

Kollegium Spiritus Sanctus Brig

Maturaarbeit 2019/20

Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz

Anhand des Permafrosts

Von:

Ammann Andreas, 5D

Eingereicht im Fachbereich Geografie

Betreut durch:

Perrig Christof

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	3
2	Einleitung	3
3	Klimawandel.....	4
3.1	Definitionen	4
3.1.1	Klima.....	4
3.1.2	Klimawandel	4
3.2	Ursachen für Temperaturveränderungen	4
3.2.1	Umverteilung der Strahlungsenergie im Klimasystem	5
3.2.2	Natürliche Einflüsse.....	6
3.2.3	Anthropogene Einflüsse.....	9
3.3	Temperaturentwicklung.....	10
3.3.1	Globale Entwicklung	10
3.3.2	Entwicklung in der Schweiz	11
3.4	Zukunftsentwicklung.....	11
3.4.1	Klimaszenarien CH2018.....	11
3.4.2	Klimaszenario für die Alpen.....	12
3.5	Fazit	13
4	Permafrost.....	14
4.1	Definition	14
4.2	Aufbau.....	15
4.3	Gliederung.....	16
4.4	Verbreitung.....	17
4.4.1	Weltweite Verbreitung.....	17
4.4.2	Verbreitung in der Schweiz.....	17
4.5	Indikatoren	18
4.6	Einflussfaktoren:.....	19
4.7	Messmethoden.....	20
4.8	PERMOS – Swiss Permafrost Monitoring Network	21
4.9	Fazit	21
5	Permafrostschwund in den Schweizer Alpen	22
5.1	Definition	22
5.2	Ursache.....	22
5.3	Entwicklung in der Schweiz.....	23
5.4	Fazit	24
6	Naturgefahren	25
6.1	Definitionen	25

6.1.1	Naturgefahren.....	25
6.1.2	Gravitative Naturgefahren.....	25
6.2	Umgang mit Naturgefahren.....	25
6.2.1	Integrales Risikomanagement.....	26
6.2.2	Gefahrenkarte.....	26
6.3	Sturzprozesse.....	27
6.3.1	Definition.....	27
6.3.2	Entstehung durch Permafrostschwund.....	27
6.3.3	Ablauf.....	28
6.4	Murgänge.....	29
6.4.1	Definition.....	29
6.4.2	Entstehung durch Permafrostschwund.....	29
6.4.3	Ablauf.....	30
6.5	Fazit.....	30
7	Schlusswort.....	31
7.1	Zusammenfassung.....	31
7.2	Ausblick.....	31
7.3	Persönliches Fazit.....	32
7.4	Danksagung.....	32
8	Literaturverzeichnis.....	33
8.1	Internetquellen.....	33
8.1.1	Mit Autor.....	33
8.1.2	Ohne Autor.....	33
8.2	Andere Quellen.....	35
9	Abbildungsverzeichnis.....	36
10	Authentizitätserklärung.....	38

1 Vorwort

Am 24. Juli 2019 stürzen zwei Bergsteiger am Matterhorn zu Tode. Der tragische Vorfall war allerdings nicht etwa auf menschliches oder materielles Versagen abzuschreiben, sondern ereignete sich, als ein Gesteinsblock, in welchem die Fixseile verankert waren, sich aus dem Felsen löste und die Bergsteiger in den Tod riss. Der ehemalige Hüttenwart der Hörnlihütte sprach nach dem Unglück vom grossen Pech der beiden Bergsteiger. Doch mit dieser Aussage hatte er definitiv nicht Recht. Denn auch wenn das Matterhorn schon immer ein bröckelnder Berg war, ist es verdächtig, wie hier und im restlichen Alpenraum die Stein- und Blockschläge zunehmen. Der wahre Grund für dieses Unglück ist der schwindende Permafrost, welcher durch seinen Rückzug aus den Felswänden, sogar in Höhen von 4000 m.ü.M, zu einer zunehmenden Instabilität führt. Permafrost taut auf, wenn die Temperatur über längere Zeit ansteigt, was wir zurzeit am Klimawandel beobachten können. Das traurige Schicksal dieser beiden Bergsteiger war also nicht Pech, sondern ist auf den Klimawandel zurückzuführen, welcher im schweizerischen Alpenraum auch noch viele weitere Probleme zum Beispiel im Bereich der gravitativen Naturgefahren hervorbringen wird. ¹

2 Einleitung

Diese Arbeit ist in vier Kapitel aufgeteilt und zeigt auf, wie Naturgefahren durch den Permafrostschwund hervorgerufen werden. Da dieser nur durch eine höhere Durchschnittstemperatur entstehen kann, welche sich zurzeit weltweit entwickelt, wird im ersten Kapitel der Klimawandel seit der Industrialisierung dem Leser erklärt. Neben der Frage, ob der Klimawandel menschengemacht (anthropogen) ist oder nur durch natürliche Phänomene entsteht, werden auch die Themen der Klimageschichte und der weiteren Entwicklung erläutert.

Anschliessend widmet sich das zweite Kapitel dem Permafrost. Neben der Definition, dem Aufbau und der Gliederung wird aufgezeigt, wo Permafrost weltweit vorkommt. In einem nächsten Teil bezieht sich das Kapitel Permafrost auf den alpinen Permafrost, welcher auch in der Schweiz gefunden werden kann. Da alpiner Permafrost nicht direkt an der Oberfläche sichtbar ist, werden Indikatoren, Einflussfaktoren und Messmethoden aufgelistet. Zum Schluss wird das Schweizerische Permafrost Netzwerk kurz PERMOS vorgestellt.

Da der Leser nun die notwendigen Voraussetzungen zum Verständnis von Permafrostschwund hat, wird dieser im dritten Kapitel beschrieben. Die Ursachen für diesen Prozess werden der Temperaturanstieg und der temperaturdefinierte Permafrost sein. Da die Messreihen zu wenig lange und somit auch nicht sehr aussagekräftig sind, wird dieses Kapitel eher kurzgehalten.

Zum Schluss dreht sich im letzten Kapitel alles um Naturgefahren. Besonders wird auf die Gruppe der gravitativen Naturgefahren eingegangen, da Permafrost solche hervorrufen kann. Nach den Definitionen wird beschrieben, wie die Schweiz mit Naturgefahren umgeht. Schliesslich werden dann mit den Sturzprozessen und dem Murgang zwei gravitative Naturgefahren vorgestellt, welche direkt durch Permafrostschwund ausgelöst werden können. Die Entstehung durch Permafrost und der Ablauf eines Ereignisses werden jeweils aufgezeigt und mit Bildern an lokalen Beispielen verdeutlicht.

¹ Seifert Marlies, Heft: Schweizer Illustrierte, S.28-33

3 Klimawandel

In einem ersten Hauptteil fokussiert sich diese Arbeit auf den Klimawandel, welcher kurz nach der Industrialisierung begonnen hat. Nach der Definition von Klima und Klimawandel wird erklärt, durch was die globale Mitteltemperatur verändert werden kann. Die Faktoren werden in natürliche und vom Menschen gemachte Einflüsse aufgetrennt. Anschliessend wird aufgezeigt, wie sich die weltweite Durchschnittstemperatur in den letzten 150 Jahren verändert hat und auch die Klimageschichte der Schweiz wird behandelt. Zum Schluss des Kapitels Klimawandel wird mit den Klimaszenarien CH2018 erklärt, wie sich das schweizerische Alpenklima in Zukunft weiterentwickeln wird.

3.1 Definitionen

3.1.1 Klima

Klima ist der „für ein bestimmtes geografisches Gebiet typische jährliche Ablauf der Witterung“. (Duden, 16.10.2019) Klima ist daher nicht dasselbe wie Wetter, sondern beschreibt den Verlauf des Wetters über eine längere Periode in einer bestimmten Region.²

3.1.2 Klimawandel

Wie es das Wort schon sagt, ist der Klimawandel ein Wandel oder eine Änderung des Klimas. Wenn sich zum Beispiel die Lufttemperatur oder die Niederschlagsmenge in einer Region langfristig verändert, wird von Klimawandel gesprochen.

Für meine Arbeit, die sich mit dem aktuellen Problem des Permafrost-Schwunds in den Schweizer Alpen auseinandersetzt, ist der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur seit 1850 von zentraler Bedeutung.³

3.2 Ursachen für Temperaturveränderungen

Verschiedene natürliche und anthropogene (vom Menschen gemachte) Einflüsse können zu einer Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur führen. Die wichtigsten Faktoren werden im folgenden Teil erläutert und es wird aufgezeigt, warum der anthropogene Einfluss zweifelslos für den aktuellen Klimawandel verantwortlich ist. Darüber hinaus gibt es aber auch einen natürlichen Faktor, welcher zu Beginn des aktuellen Temperaturanstiegs mitverantwortlich war.^{4 5}

Die Einflüsse von internen Systemschwankungen im Atmosphäre-Ozean-Meereis-System, die Ausdünnung der Ozonschicht in der Stratosphäre mit einhergehender Zunahme des Grenzschichtozons und die anthropogene Erdoberflächenveränderung (Urbanisierung, Abholzung etc.) werden in dieser Arbeit nicht diskutiert, da ihre Auswirkung auf den Klimawandel ungenügend erforscht oder variabel sind.⁶

² ohne Autor, Internetquelle: Definition Klima, DUDEN, 16.10.2019

³ ohne Autor, Internetquelle: Klimawandel, Wikipedia, 31.10.2019

⁴ Wanner Heinz & ff, Klimawandel im Schweizer Alpenraum, S.15-17

⁵ Schmitt D, Schüssler M, Solanki S.K, Forschungsinfo: der Einfluss der Sonne auf das Erdklima, S.1

⁶ Wanner Heinz & ff, Buch: Klimawandel im Schweizer Alpenraum, Kapitel 2

Zum Verständnis der aufgezeigten anthropogenen Einflüsse und des explosiven Vulkanismus (Ascheförderung) wird zuerst die Umverteilung der Strahlungsenergie im Klimasystem erläutert.

3.2.1 Umverteilung der Strahlungsenergie im Klimasystem

Materie sendet elektromagnetische Strahlung aus, wobei die Menge von der Temperatur abhängt: Warme Körper emittieren mehr Strahlung als kalte. Die Erde empfängt elektromagnetische Strahlung von der Sonne und gibt thermische Strahlung aus dem Erdinneren ab. Die verschiedenen Strahlungen ergeben zwei Kreisläufe, welche durch die Umwandlung von elektromagnetischer in thermische Strahlung durch Absorption gekoppelt sind. Für eine konstante Mitteltemperatur muss die eingehende Energie (Sonnenstrahlung) im Betrag gleich gross sein wie die austretende Energie, welche sich aus Sonnenstrahlung und thermischer Energie zusammensetzt. Die Abbildung 1 erläutert die Prozesse schematisch.⁷

Der erste (gelbe) Kreislauf beschreibt die Prozesse, welche von der elektromagnetischen Strahlung verursacht werden.

- Reflexion in der Atmosphäre:
Ein Teil der Strahlung wird von Wolken und Aerosolen (siehe anthropogene Einflüsse) direkt ins Weltall zurück reflektiert. Bei diesem Prozess werden 23% der solaren Strahlung umgesetzt.
- Absorption in der Atmosphäre:
Durch Gase, Wolken und einzelne Aerosole in der Atmosphäre wird 22% der Sonnenstrahlung absorbiert. Die entstehende thermische Strahlung wird ins Weltall abgegeben oder bleibt durch den Treibhauseffekt (siehe anthropogene Einflüsse) in der Atmosphäre.
- Reflexion an der Oberfläche:
Weisse beziehungsweise helle Oberflächen können dank ihrer grossen Albedo (Mass für das Rückstrahlvermögen von Oberflächen) auftreffendes Licht zum Teil zurückstrahlen. Neuschnee hat beispielsweise mit 0,95 eine sehr grosse Albedo und reflektiert 95% des einfallenden Lichts. Durch die Reflexion an der Oberfläche werden jedoch gerade mal 7% der elektromagnetischen Strahlung der Sonne reflektiert.⁸
- Absorption an der Oberfläche:
Der letzte und grösste Teil der auftretenden Sonnenstrahlung wird an der Oberfläche absorbiert und wird dadurch in thermische Energie umgewandelt. Diese 161W/m^2 ergeben fast die Hälfte (47%) der umgesetzten Sonnenenergie und kompensieren somit einen Teil der Energie, welche durch die thermische Strahlung der Erde verloren geht.

⁷ Behr H.D, Heft: Numerische Klimamodelle, Kapitel 2

⁸ Pfeffer Gerd, Internetquelle: Strahlung, Homepage-Gerd Pfeffer, 02.11.2019

Der zweite (rote) Kreislauf beinhaltet den Zyklus der thermischen Strahlung. Die folgenden Prozesse entstehen durch die thermische Wärme, welche von der Erde abgegeben wird, und durch Absorption von Sonnenstrahlung am Boden und in der Atmosphäre.

- **Wärmeemission ins Weltall:**
Durch das atmosphärische Fenster und durch die Energieabgabe aus der Atmosphäre gelangt 48% Prozent der thermischen Energie ins Weltall. Der Energieverlust, der durch die Wärmeemission entsteht (70%), gleicht mit der reflektierten Sonnenstrahlung (30%) die solare Einstrahlung aus.
- **Treibhauseffekt:**
Durch die Treibhausgase wird die thermische Strahlung am Austritt aus der Atmosphäre gehindert (siehe Abschnitt 2.2.3.2).⁹

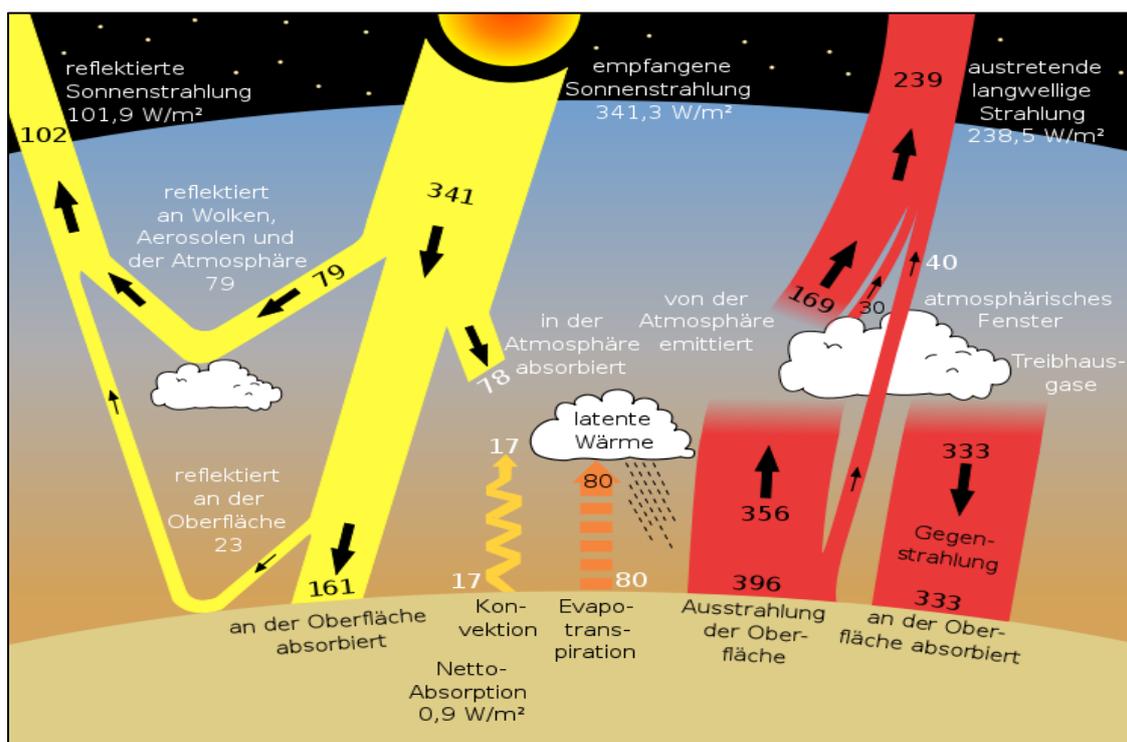


Abbildung 1: Umverteilung von Strahlungsenergie im Klimasystem

3.2.2 Natürliche Einflüsse

3.2.2.1 Schwankung der Erdbahnelemente

Die Erdbahnelemente, auch Erdbahnparameter genannt, beschreiben die Umlaufbahn der Erde um die Sonne. Durch die Gravitationskraft von anderen Planeten oder auch die durch unseres Mondes kann die Erdumlaufbahn um die Sonne über längere Zeitperioden variieren und somit ändert sich auch die Sonneneinstrahlung auf die Erde, was schlussendlich zu einem Klimawandel aufgrund der veränderten Energiebilanz führen kann. Die bekannten Erdbahnparameter sind die Exzentrizität, die Obliquität und die Präzession (siehe Abbildung 2).^{10 11}

⁹ Behr H.D, Heft: Numerische Klimamodelle, Kapitel 2

¹⁰ Heinz Wanner & ff, Buch: Klimawandel im Schweizer Alpenraum, S.15-17

¹¹ Dieter Kasang, Internetquelle: Erdbahnparameter, Wiki Bildungsserver, 31.10.2019

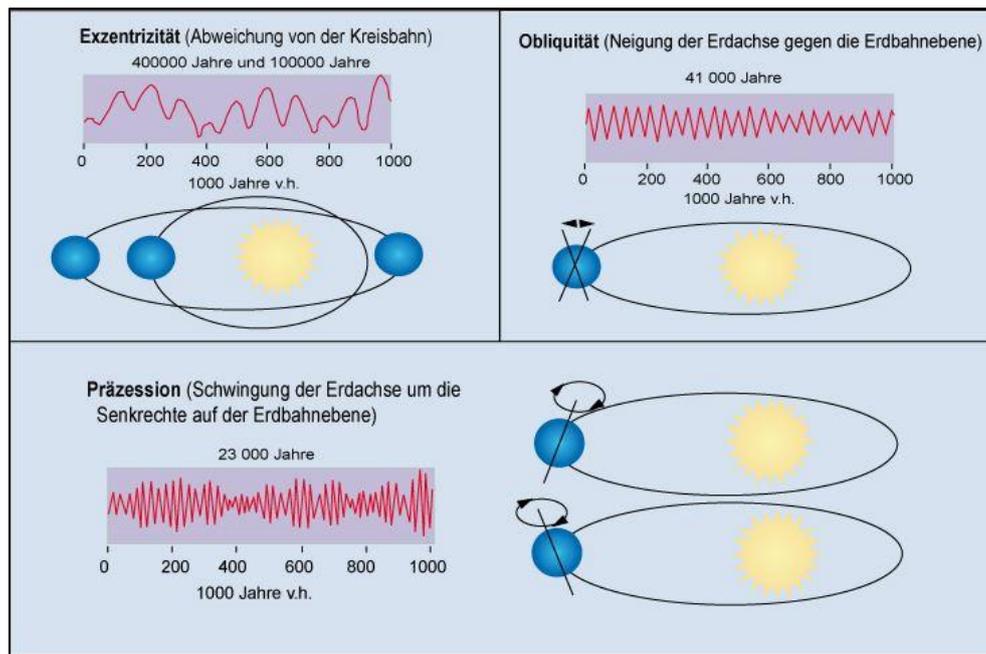


Abbildung 2: Schematische Erklärung von Exzentrizität, Obliquität und Präzession

- **Exzentrizität:**
Bei der Exzentrizität streckt oder kontrahiert sich die elliptische Umlaufbahn der Erde um ihre längere Hauptachse. Bei diesem Phänomen ist der Abstand zwischen der Sonne und der Erde während der Sommer- und Wintermonate grösser als gewöhnlich und im Herbst und Frühling etwas kleiner. Die Abstandszu- oder Abnahme ist jedoch in der Grafik übertrieben dargestellt und ist in Wahrheit nur sehr klein. Daher verändert sich die Sonneneinstrahlung und die einhergehende Energiebilanz nur sehr gering.
- **Obliquität:**
Die Obliquität beschreibt die Neigung der Erdachse gegenüber der Ebene der Umlaufbahn. Die Energiebilanz wird je nach Neigung der Achse nur sehr gering verändert, da sich der Effekt auf den beiden Halbkugeln in Waage hält.
- **Präzession:**
Die Neigung der Erdachse ist nicht immer gleich, da die Erdachse um die Normale (90°) der Erdumlaufbahn (um die Sonne) rotiert. Diese Abweichung hat von den Erdbahnparametern den grössten Einfluss auf die Energiebilanz der Erde.

Auch wenn die Erdbahnelemente einen Klimawandel bewirken können, sind sie nicht der Grund für den Temperaturanstieg in den letzten 150 Jahren, da die Phänomene der Erdbahnelemente im Bereich von 10^4 bis 10^5 Jahren ablaufen.^{12 13}

¹² Wanner Heinz & ff, Buch: Klimawandel im Schweizer Alpenraum, S.15-17

¹³ Kasang Dieter, Internetquelle: Erdbahnparameter, Wiki Bildungsserver, 31.10.2019

3.2.2.2 Explosive Vulkaneruptionen

Bei explosiven Vulkaneruptionen wird, im Gegensatz zu effusiven Vulkanausbrüchen, Asche gefördert und es können Aschewolken entstehen. Durch Windströmungen werden die kleinen Ascheteilchen dann rund um den Erdball in der Atmosphäre verteilt. Diese Teilchen wirken anschliessend als kleine Reflektoren und es wird folglich weniger Sonnenlicht absorbiert. Dadurch sinkt die globale Mitteltemperatur. Dieses Phänomen wurde 1816 durch einen gigantischen Vulkanausbruch in Indonesien ausgelöst und führte zu einem Jahr ohne Sommer.

Grosse explosive Vulkanausbrüche können aber nur zu einer Klimaänderung von maximal drei Jahren führen und erklären durch ihre abkühlende Wirkung definitiv nicht den Klimawandel.^{14 15}

3.2.2.3 Schwankung der Sonnenaktivität

Die Energiebilanz hängt nebst der Position der Erde zur Sonne (Erdbahnelemente) auch von der Aktivität der Sonne ab. Die Aktivität der Sonne wiederum hat einen Zusammenhang mit der Anzahl dunkler Flecken auf der Sonne. Ein dunkler Sonnenfleck entsteht, wenn ein starkes lokales Magnetfeld den Energietransport aus der Sonne hemmt. Die dunklen Sonnenflecken entstehen und verschwinden in einem unregelmässigen Zyklus. Wenn man nun die Anzahl Sonnenflecken mit dem zeitgleichen Klima auf der Erde vergleicht, so entdeckt man erstaunlicherweise, dass die globale Mitteltemperatur bei wenigen Sonnenflecken tiefer ist und dass bei vielen Sonnenflecken die Durchschnittstemperatur steigt (Abbildung 3). Die kleine Eiszeit zum Beispiel stimmt mit einem Sonnenfleckenminimum (Maunder-Minimum) im 17. Jahrhundert überein. Dieses auf den ersten Blick paradoxe Phänomen entsteht aus zwei Gründen:¹⁶

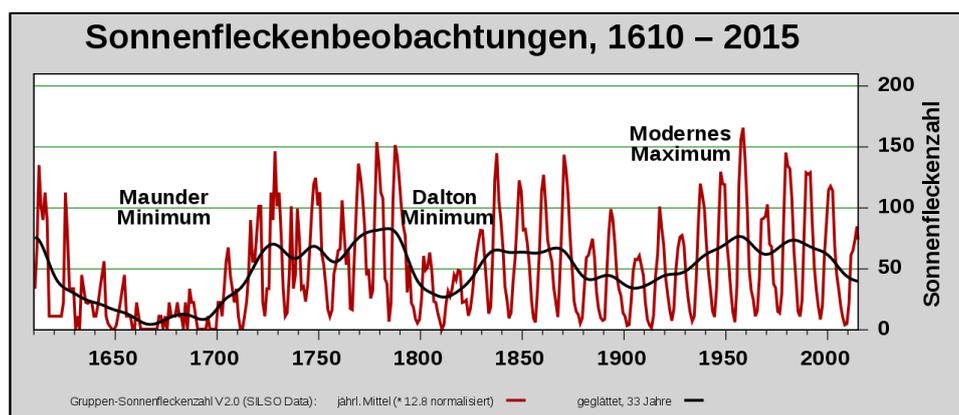


Abbildung 3: Zusammenhang von der Mitteltemperatur und der Anzahl Sonnenflecken

¹⁴ Wanner Heinz & ff, Buch: Klimawandel im Schweizer Alpenraum, S.15-17

¹⁵ Schaffner Sebastian, Internetquelle: Vulkanausbruch, HNA, 31.10.2019

¹⁶ Schmitt D, Schüssler M, Solanki S.K, Forschungsinfo: Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima, S.1-4

- Fackelgebiete:
Die Strahlungsleistung nimmt bei der Entstehung von einem dunklen Sonnenfleck um ca. 0,2% ab. Allerdings steigt die Strahlungsleistung von Fleckenminimum zu Fleckenmaximum insgesamt um etwa 0,1% an. Wenn die Sonnenaktivität gross ist, umgeben schwache Magnetfelder die dunklen Flecken. Diese Felder geben durch ihren schwachen Magnetismus enorm viel Energie ab und werden daher Fackelgebiete genannt. Sie bewirken trotz den energiearmen dunklen Flecken eine mittlere Leistungssteigerung der Sonne.¹⁷
- UV-Strahlung:
Im Aktivitätenmaximum, wo auch die Fleckenzahl maximal ist, gibt die Sonne mehr ultraviolette Strahlung ab. Die oberen Lagen der Erdatmosphäre, welche durch die erhöhte UV-Strahlung erwärmt werden, dehnen sich daher aus.¹⁸

Wie man aus Abbildung 3 und 4 unschwer erkennen kann, stimmt das letzte Sonnenfleckmaximum mit den ersten 50 Jahren Klimawandel überein und muss daher als natürlicher Einfluss auf den Klimawandel anerkannt werden. Die Schwankung der Sonnenaktivität kann aber nicht der Grund für den weiteren Temperaturanstieg ab 1950 sein. Es muss somit noch einen zweiten anthropogenen Faktor für den Klimawandel geben.

3.2.3 Anthropogene Einflüsse

3.2.3.1 Aerosoleinfluss

Aerosole sind winzige Teilchen, welche zwischen 10^{-9} m und 10^{-4} m gross und fest oder flüssig sind. Sie schweben, wie es der Name bereits sagt, in der Luft und können sowohl natürlich als auch vom Menschen produziert werden. Die natürlichen Aerosole entstehen durch biologische Prozesse (Sporen, Pilze und Bakterien), verdunstetes Meersalz, vom Wind aufgewirbelter Mineralstaub oder auch durch Waldbrände (Russ) und Vulkanausbrüche (Aschepartikel). Die anthropogenen Aerosole entstehen zum grössten Teil bei unvollständigen Verbrennungen und in der Industrie und sind Russpartikel, Schwefeldioxid und Kohlenstoffketten. Aerosole wirken kühlend, da sie Sonnenstrahlung reflektieren und Wolkenbildung begünstigen und sind somit das Gegenteil von Treibhausgasen.^{19 20}

3.2.3.2 Treibhauseffekt

Das Prinzip von einem Treibhaus ist trivial: Sonnenstrahlung gelangt durch das Glas ins Haus und wird vom Boden absorbiert oder reflektiert. Der Teil, welcher absorbiert wird, wird in thermische Energie umgewandelt und kann anschliessend nicht mehr aus dem Glashaus austreten. So entsteht ein ideales Klima für das Pflanzenwachstum. Der sogenannte Treibhauseffekt (greenhouse effect) findet in ähnlicher Weise auch in unserer Atmosphäre statt: Solare Einstrahlung wird durch die Atmosphäre oder die Oberfläche absorbiert, in thermische Energie umgewandelt und in die Atmosphäre

¹⁷ Schmitt D, Schüssler M, Solanki S.K, Forschungsinfo: Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima, S.1-4

¹⁸ Schmitt D, Schüssler M, Solanki S.K, Forschungsinfo: Der Einfluss der Sonne auf das Erdklima, S.2

¹⁹ ohne Autor, Internetquelle: Aerosole, Paul Scherrer-Institut, 01.11.2019

²⁰ Kasang Dieter, Internetquelle: Aerosole, Wiki Bildungsserver, 01.11.2019

abgestrahlt. Durch die Treibhausgase (Glasscheiben) wird thermischen Energie in der Atmosphäre (Treibhaus) zurückreflektiert. Die restliche thermische Strahlung geht im Weltraum „verloren“. Dem natürlichen Treibhauseffekt ist es zu verdanken, dass die Mitteltemperatur lebensspendende 15°Celsius anstatt -20°Celsius beträgt. Die natürlichen Treibhausgase sind Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Ozon, Distickstoffoxid und Methan.²¹

Durch anthropogene Einflüsse (Verbrennung von fossilen Energien, Düngemittel und Massentierhaltung) werden seit der Industrialisierung grosse Mengen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Lachgas (Distickstoffoxid N₂O) und Methan (CH₄) in die Atmosphäre abgegeben. Die Treibhausgaskonzentration nimmt zu und es wird folglich weniger thermische Energie ins Weltall abgegeben. Die logische Konsequenz ist, dass sich die Atmosphäre erwärmt und somit die globale Durchschnittstemperatur ansteigt. Auch wenn der anthropogene Anteil der Treibhausgase klein ist, ist der Effekt gross, da sie sehr wirksam Wärmestrahlung reflektieren.^{22 23}

Der verstärkte Treibhauseffekt, welcher vom Menschen herbeigeführt wird, ist definitiv der Hauptgrund, warum die globale Mitteltemperatur seit 1900 ansteigt. Der menschliche Einfluss (Industrialisierung) startete nur kurz, bevor die ersten Erwärmungen messbar wurden und auch der Trend, dass der Temperaturanstieg immer schneller wird, stimmt mit dem wachsenden CO₂-Ausstoss überein.

3.3 Temperaturentwicklung

3.3.1 Globale Entwicklung

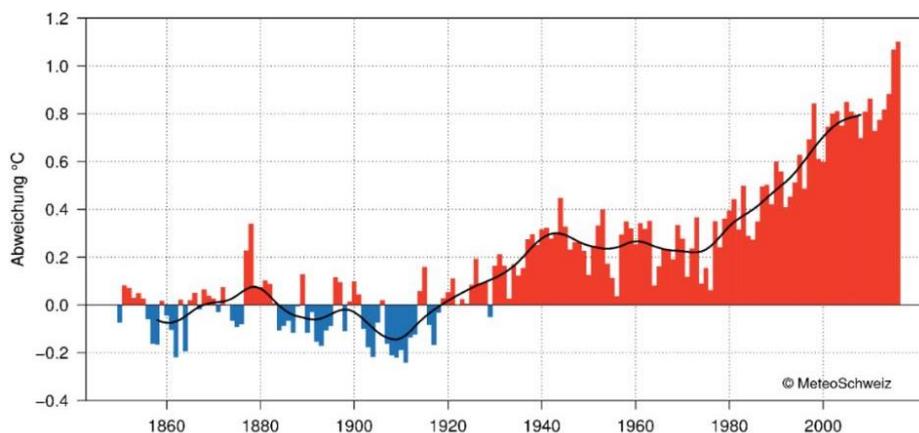


Abbildung 4: Globale Temperaturentwicklung seit 1850

Aus Abbildung 4 kann man erkennen, dass die globale Mitteltemperatur seit dem Messbeginn 1850 deutlich angestiegen ist. Der Trend beginnt in den ersten Jahren vom zwanzigsten Jahrhundert und hat sich in den letzten 35 Jahren noch verschärft. So gilt die dreissigjährige Zeitspanne von 1983 bis 2012 als die wärmste der letzten 1400 Jahre. Die globale Durchschnittstemperatur ist in den letzten 100 Jahren um 1°Celsius gestiegen und auch verschiedene andere Parameter bestätigen den Klimawandel: Der Meeresspiegel steigt kontinuierlich an, die arktische Meereis-Fläche

²¹ Behr H.D, Heft: Numerische Klimamodelle, Kapitel 2

²² Behr H.D, Heft: Numerische Klimamodelle, Kapitel 2

²³ ohne Autor, Internetquelle: Treibhausgase, Klimaretter-Lexikon, 02.11.2019

halbierte sich in den letzten 70 Jahren und die mittlere Oberflächentemperatur der Meere ist seit 1910 um 0.6°Celsius gestiegen.²⁴

3.3.2 Entwicklung in der Schweiz

Der globale Erwärmungstrend kann in der Schweiz ebenfalls festgestellt werden. Die mittlere Jahrestemperatur steigt in der Schweiz (Basel) mit 2°Celsius in den letzten hundert Jahren sogar noch stärker als im weltweiten Vergleich. Zahlreiche Indikatoren weisen auch auf eine Klimaveränderung hin: Die Anzahl Hitzetage (Temperatur > 30°Celsius) nahm seit 1960 im Schnitt um 12 Tage pro Jahr zu (Luzern). Ebenso gehen die Frosttage (Temperatur < 0°Celsius) um 20% zurück (Davos). Die Gletscherfläche der Schweiz ist seit 1850 um 1/3 kleiner geworden und der Aletschgletscher verkürzte sich seit 1978 um 1,3km.^{25 26 27}

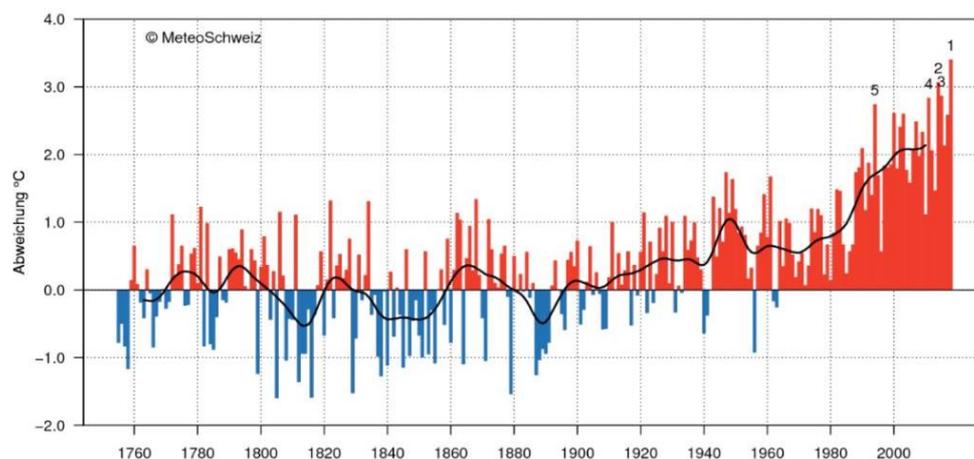


Abbildung 5: Schweizerische Temperaturentwicklung (Basel) seit 1760

3.4 Zukunftsentwicklung

3.4.1 Klimaszenarien CH2018

Die Klimaszenarien CH2018 von MeteoSchweiz und ihren Partnern versuchen in Zusammenarbeit mit EURO-CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) mit Hilfe von geeigneten Klimamodellen und Computerprogrammen Aussagen über den weiteren Verlauf der Klimaerwärmung und ihre Folgen in Bezug auf die Schweiz zu machen. Die alles entscheidende Frage dabei ist, ob sich der Mensch wandeln wird und die Treibhausgasemission auf ein Minimum reduziert oder nicht. Aus diesem Grund erstellt CH2018 verschiedene Prognosen (konsequenter, begrenzter und kein Klimaschutz) und unterscheidet im Modell zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Entwicklungen. Die Modelle geben schlussendlich Auskunft über den wahrscheinlichsten Temperaturverlauf in 5 Regionen (Jura, Mittelland, Voralpen,

²⁴ ohne Autor, Internetquelle: globaler Klimawandel, MeteoSchweiz, 29.10.2019

²⁵ Gregory Remez, Internetquelle: der Riese schrumpft, Aargauer Zeitung, 05.11.2019

²⁶ ohne Autor, Internetquelle: Hitzetage, MeteoSchweiz, 05.11.2019

²⁷ ohne Autor, Internetquelle: Klimawandel Schweiz, MeteoSchweiz, 05.11.2019

Alpen und Alpensüdseite), die Niederschlagsentwicklung und weitere Indikatoren wie Hitzetage usw.^{28 29}

3.4.2 Klimaszenario für die Alpen

Für den folgenden Teil dieser Arbeit ist die Temperaturentwicklung der Alpen von zentraler Bedeutung, da Permafrost in der Schweiz ausschliesslich in dieser Region vorkommt (siehe Verbreitung in der Schweiz). Deshalb beschränkt sich der Ausblick auf die Region der Schweizer Alpen. Da der schlimmste und der beste Fall die Grenzen für den wirklich eintreffenden Fall beschreiben, werden diese miteinander verglichen:

- **Kein Klimaschutz (RCP8.5):**
Angenommen es wird unter dem Strich weltweit immer mehr CO₂ ausgestossen, so wird auch der Treibhauseffekt immer stärker werden. Als Folge steigt die sommerliche Mitteltemperatur in den Alpen bis ans Ende des 21. Jahrhunderts noch um weitere 4-12°Celsius. Die winterliche Durchschnittstemperatur steigt auch immer weiter an allerdings ist bei ihr „nur“ ein Anstieg von 2-7°Celsius zu erwarten.
- **Konsequenter Klimaschutz (RCP2.6):**
Bei einem sofortigen strikten Klimaschutz würde die Durchschnittstemperatur in den Schweizer Alpen bis ca. 2040 genau gleich ansteigen, wie es ohne Klimaschutz passieren würde. In der mittel- und langfristigen Entwicklung würde sich aber dank dem konsequenten Klimaschutz die sommerliche Durchschnittstemperatur bei ca. 2,6°Celsius Erwärmung vom Standpunkt 2018 einpendeln. Der winterliche Temperaturanstieg wäre ab 2040 bei konstanten 1,5°Celsius.³⁰

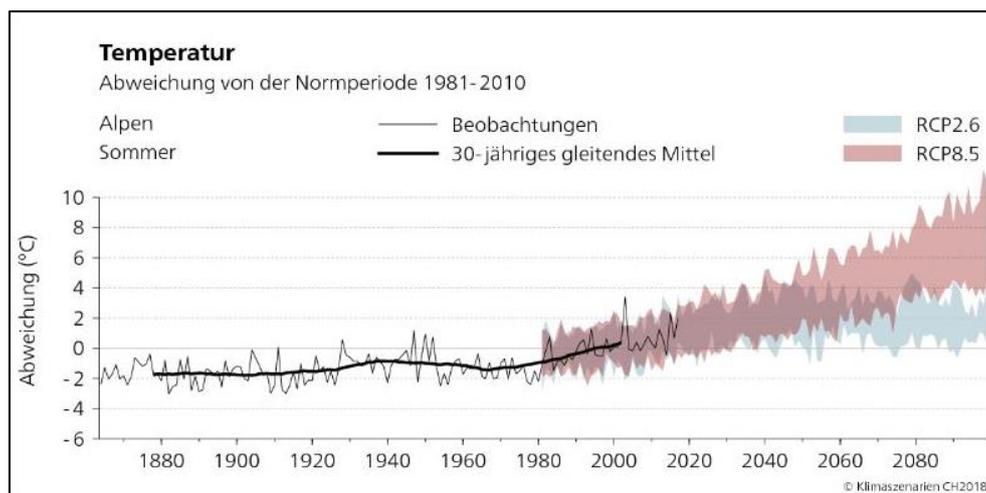


Abbildung 6: Modellierter Temperaturverlauf in den Schweizer Alpen

²⁸ ohne Autor, Internetquelle: CH2018-Klimaszenarien verstehen, MeteoSchweiz, 05.11.2019

²⁹ ohne Autor, Internetquelle: CH2018-Zahlen und Fakten, MeteoSchweiz, 05.11.2019

³⁰ ohne Autor, Internetquelle: CH2018-Webatlas, MeteoSchweiz, 05.11.2019

3.5 Fazit

Der Klimawandel, den wir seit der Industrialisierung durch viele Indikatoren und Faktoren messen und erleben, wird vor allem durch den Menschen hervorgerufen. Auch wenn in den ersten Jahren die Erwärmung auf die Aktivität der Sonne (dunkle Sonnenflecken) abgeschoben werden kann, gibt es keinen anderen natürlichen Einfluss, der die anhaltende Klimaerwärmung nach 1950 erklären kann. Der vom Menschen verstärkte Treibhauseffekt lässt durch die erhöhte Konzentration von Kohlenstoffdioxid, Distickstoffoxid (Lachgas) und Methan in der Atmosphäre nicht genügend thermische Energie ins All entweichen. Als Folge stieg die globale Mitteltemperatur in den letzten 120 Jahren um 1°Celsius, jene der Schweiz sogar um 2°Celsius. Den anthropogenen Klimawandel kann man nicht nur am Temperaturverlauf erkennen, sondern wird durch ansteigende Meeresspiegel, Eis- und Schneeschwund und viele weitere Indikatoren bestätigt.³¹

Wenn man in die Zukunft der Schweizer Alpen schaut, muss man sich Sorgen machen. Die Klimaerwärmung ist hier stärker als im weltweiten Mittel. Die Schweiz ist daher auf ein globales Umdenken hin zum konsequenten Klimaschutz angewiesen. Falls sich nichts ändert müssen die Alpengebiete der Schweiz mit einer Erwärmung zwischen 4-12°Celsius bis Ende Jahrhundert rechnen.³²

³¹ Behr H.D, Heft: Numerische Klimamodelle, Kapitel 2

³² ohne Autor, Internetquelle: CH2018-Webatlas, MeteoSchweiz, 05.11.2019

4 Permafrost

Im Kapitel Permafrost wird zuerst in einem allgemeinen Teil aufgezeigt, was Permafrost ist (Definition und Aufbau) und wie er gegliedert werden kann. Nach dem die weltweite Verbreitung behandelt wurde, beschränkt sich dieses Kapitel dann immer mehr auf den alpinen Permafrost, welcher in der Schweiz vorkommt. Wo kann Permafrost in der Schweiz gefunden werden, welche Faktoren begünstigen Dauerfrostboden und welche Typen finden wir in den Alpenregionen?

4.1 Definition

Permafrost, auch Dauerfrostboden oder permanenter Bodenfrost genannt, ist gefrorener Boden. Wenn der Untergrund während mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren eine Temperatur von maximal 0°Celsius aufweist, wird er als Permafrost bezeichnet. Nur die durchgehend negative Untergrund-Temperatur definiert den Permafrost. Er kommt in nördlichen Ländern und in Gebirgen wie den Alpen vor. Da Permafrost nur im Untergrund verbreitet ist, gehören Gletscher nicht zu dieser Kategorie.

Die Mächtigkeit, das heisst die Distanz zwischen Permafrostbasis (untere Grenze) und Permafrostspiegel (obere Grenze), kann von knapp einem Meter bis zu tausend Meter reichen und hängt von der Temperatur der bodennahen Luft und dem Wärmefluss aus der Erde ab.^{33 34 35 36}



Abbildung 7: Permafrost-Messung am Matterhorn

³³ Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.25

³⁴ Biskaborn Boris, Internetquelle: Alfred-Wegener-Institut, 27.08.2019

³⁵ Götz Andreas, Raetzo Hugo, Artikel: Permafrost – mit dem Risiko umgehen, S.8

³⁶ Nötzli Jeanette, Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.111-112

4.2 Aufbau

Untergrund, welcher Dauerfrostboden aufweist ist dreischichtig aufgebaut:

Die obere, aktive Schicht (active layer) wird Mollisol genannt. Im Sommer taut diese je nach Jahresmitteltemperatur zwischen 0.5m bis 3m auf. Die Schicht unter dem active layer ist der eigentliche Permafrost. Die Grenze von Mollisol zu Permafrost wird als Permafrostspiegel definiert. Ab dem Permafrostspiegel ist der Boden während dem ganzen Jahr, auch in der wärmsten Phase des Jahres, gefroren. Die Temperaturschwankungen durch saisonale Faktoren (Sommer und Winter) im eigentlichen Permafrostkörper nehmen in der Tiefe exponentiell ab. Der Effekt verpufft nach 20m fast komplett. Dieser Punkt wird zero annual amplitude (ZAA), auf Deutsch jährliche Nullamplitude genannt.

In zunehmender Tiefe erwärmt sich der Permafrost durch das Erdinnere allmählich wieder. Die Temperatur in tieferen Bereichen steigt kontinuierlich wieder an. Bei der Permafrostbasis durchquert das Thermometer wieder die 0°Celsius-Grenze. Der darunterliegende Boden gehört nicht mehr zum permanenten Dauerfrost. Permafrost besteht aus Sediment, Gestein oder Erde und kann Eis enthalten. Oftmals sind im Dauerfrostboden pflanzliche und tierische Resten eingespeichert. Sie wurden durch Erosion und Ablagerung in den Boden, welcher erst später gefroren ist, eingelagert. Die dauerhaft negativen Temperaturen ermöglichen eine gute Konservierung. Da der permanent gefrorene Boden erst unterhalb der aktiven Schicht beginnt, kann man ihn nicht sehen.^{37 38 39}

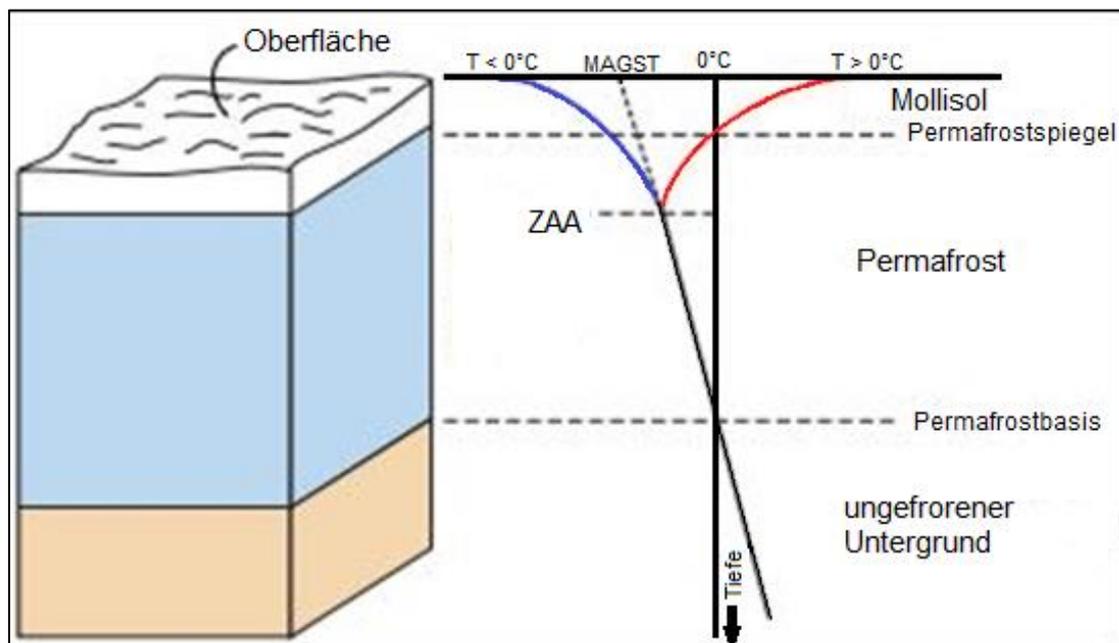


Abbildung 8: Schichtung und Temperaturverlauf des Permafrosts

³⁷ Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.25

³⁸ ohne Autor, Internetquelle: Aufbau des Permafrosts, Freie Universität Berlin, 03.09.2019

³⁹ Nötzli Jeanette, Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.112

4.3 Gliederung

Permafrost kann gegliedert werden anhand der horizontalen und der vertikalen Achse. Welcher Typ in einer Region vorkommt, hängt von der Jahresmitteltemperatur ab. Man unterscheidet die folgenden drei Hauptkategorien:

- Der kontinuierliche, zusammenhängende Permafrost:
Seine Mächtigkeit beträgt bis zu 1000m und mindestens 90 Prozent vom Boden sind gefroren. Die sommerliche Auftauschicht (active layer oder Mollisol) ist nur wenige Dezimeter tief. Die Jahresmitteltemperatur in den entsprechenden Regionen ist unter -6°Celsius .
- Der diskontinuierliche, unzusammenhängende Dauerfrostboden:
Die gefrorene Schicht ist maximal 100m tief und mehr als die Hälfte des Bodens ist gefroren. Im Sommer taut die aktive Schicht 1m bis 1.5m auf. Die Jahresmitteltemperatur ist etwas höher als die des kontinuierlichen Permafrostes.
- Der sporadische Permafrostboden:
Der Boden ist nur noch lückenhaft gefroren. Seine Mächtigkeit beträgt maximal 15 Meter und ist somit verschwindend klein. Der Boden taut in diesen Bereichen im Sommer bis in 3m Tiefe auf. Auch wenn der sporadische Permafrost flächenmässig nur sehr klein ist, dürfen die Jahresmitteltemperaturen an der Oberfläche nicht den Taupunkt überschreiten.

40 41

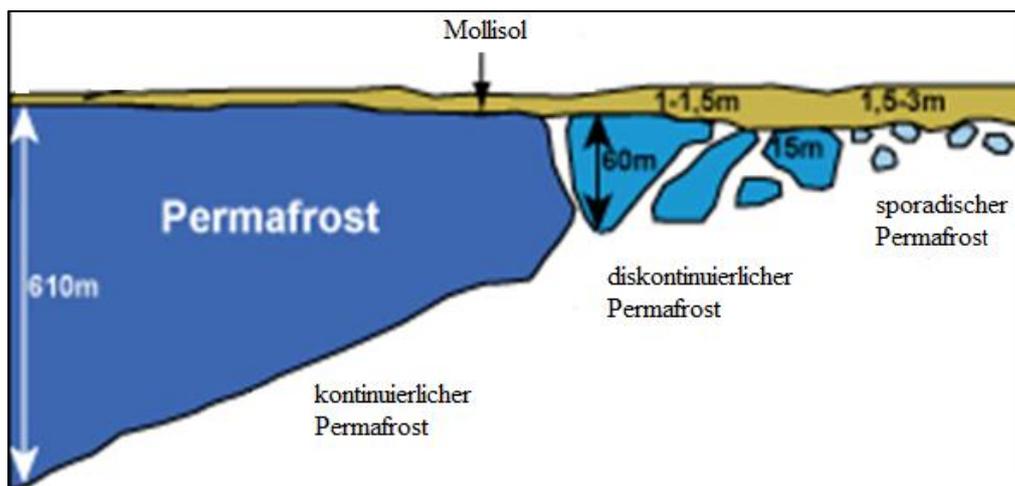


Abbildung 9: Permafrost-Gliederung

⁴⁰ ohne Autor, Internetquelle: Aufbau des Permafrosts, Freie Universität Berlin, 03.09.2019

⁴¹ Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.25-26

4.4 Verbreitung

4.4.1 Weltweite Verbreitung

Permafrost findet man in den Polargebieten und in Gebirgen. Er kommt zwischen dem sechzigsten und achtzigsten Breitengrad vor. Dieser wird daher zirkumpolarer Permafrost genannt. 20% der Erdoberfläche weisen Permafrost auf. Da es auf der südlichen Hemisphäre in den entsprechenden Breitengraden weniger Landmasse hat und diese meistens vergletschert ist, liegen die grössten Dauerfrostboden-Gebiete auf der nördlichen Halbkugel. Nördlich des Äquators nimmt er eine Fläche von 23 Millionen km² ein. Das sind 24% der Landmasse auf der nördlichen Halbkugel. Permafrost wird nur gebildet, wenn die Oberfläche eisfrei ist. Gletscher bilden eine isolierende Schicht und vereiteln das Gefrieren des Bodens. Da Skandinavien im Gegensatz zu Sibirien in der Weichsel-Kaltzeit vergletschert war, konnte in Skandinavien der Permafrost nicht an Mächtigkeit zunehmen. Somit gehören die Skandinavischen Länder nicht zu den grossen Permafrost-Reservoirs wie Russland und Alaska.^{42 43 44}

4.4.2 Verbreitung in der Schweiz

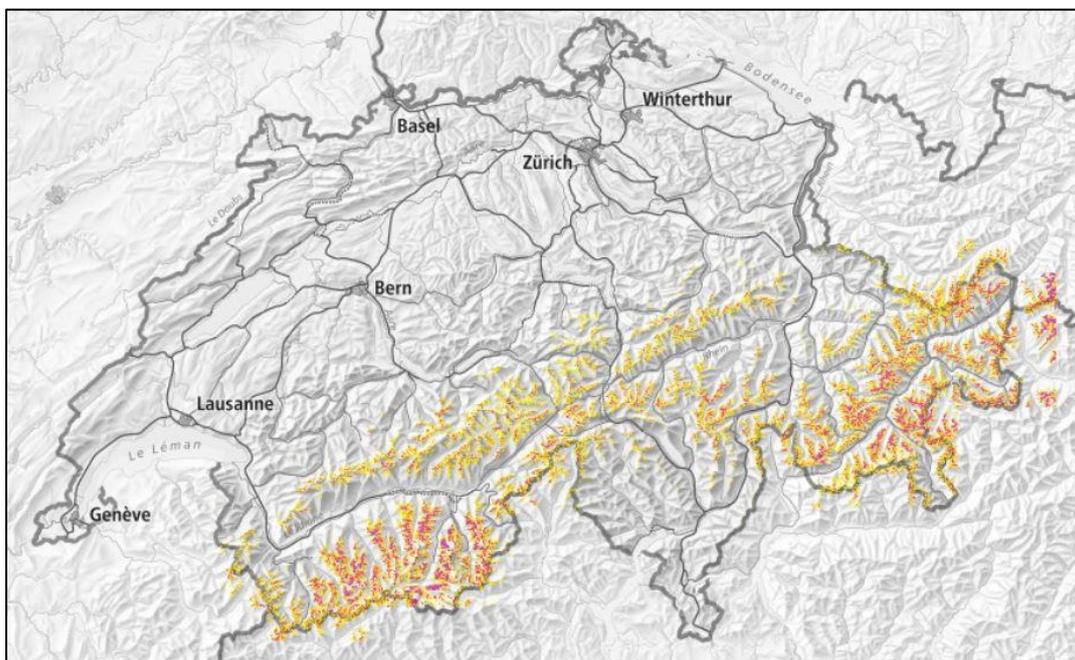


Abbildung 10: Potenzielle Permafrost-Verbreitung in der Schweiz

Permanenter Bodenfrost kommt in der Schweiz in den Walliser, Berner und Bündner Alpen in Form von alpinem Permafrost vor und nimmt 5 Prozent der Landesfläche ein (siehe Abbildung 10). Die Gletscherfläche der Schweiz ist im Vergleich nur halb so gross.⁴⁵

⁴² Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.25-27

⁴³ ohne Autor, Internetquelle: Permafrostboden, Wikipedia, 04.09.2019

⁴⁴ Kasang Dieter, Internetquelle: Permafrost, Hamburger Bildungsserver, 04.09.2019

⁴⁵ Nötzli Jeanette, Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.112

Alpiner Permafrost kann in Felsen (Felswände) oder in Lockermaterial (Hänge und Ebenen) aufgefunden werden und wird durch bestimmte Indikatoren (siehe Kapitel 4.5) gekennzeichnet. Die Faustregel ist, dass ab 2500m, ab der Waldgrenze, Permafrost vorhanden ist. Das schweizerische Permafrost Monitoring Netzwerk Permos (Kapitel 4.8) beobachtet den Permafrost und versucht mit Hilfe von Modellierung die Verbreitung zu beziffern. Durch die komplexe Beschaffenheit der Alpen ändern sich die Einflussfaktoren (siehe Kapitel 4.6) jedoch auf kleinem Raum bereits erheblich, was zu einer uneinheitlichen Verteilung führt.⁴⁶

4.5 Indikatoren

Durch die oberste Schicht (active layer) bleibt der eigentliche Permafrostkörper bei Betrachtung einer alpinen Landschaft unsichtbar (siehe Kapitel 4.2). Allerdings gibt es Anzeichen (Indikatoren), welche eindeutig auf Permafrost hinweisen. Das Gegenteil gilt jedoch nicht: Wenn keine Anzeichen zu erkennen sind, heisst das noch lange nicht, dass es keinen Permafrost in diesem Gebiet hat. Folgende Indikatoren deuten auf Permafrost hin:

- **Eiswände und Hängegletscher:**
Obwohl Eiswände und Hängegletscher per Definition (siehe Kapitel 4.1) keine Permafrosttypen sind, kann man an ihnen die Existenz von Permafrost in Felswänden beweisen. Eiswände und Hängegletscher können nur dann am Felsen „kleben“, wenn der Fels auch gefroren ist. Ansonsten würde das Eis, welches in direktem Kontakt mit dem Gestein ist, verflüssigt werden. Es wäre keine Haftung möglich.
- **Perennierende Schneeflecken:**
Ganzjährige (perennierende) Schneeflecken entstehen in Lawinenkegeln oder an sehr schattigen Stellen. Da die Temperatur unter der Schneedecke nie wärmer als 0°Celsius wird, sind solche Schneeflecken auch ein Indikator für Dauerfrostböden.
- **Blockgletscher:**
Werden die Klüfte in einer Schutthalde mit Eis ausgefüllt, nimmt die Reibung im Erdinneren stark ab. Wenn dieses Gebilde nun in einem Hang ist, bewegt sich die Masse, bestehend aus Lockermaterial und Eis, unter dem Einfluss der Gravitationskraft hangabwärts. Diese Kriterien (Hanglage, hoher Eisgehalt und Lockermaterial) definieren einen Blockgletscher. Blockgletscher fließen wenige Zentimeter pro Jahr talabwärts und sind mehrere 100m lang. Durch seine lavastromähnliche Form, hervorgerufen von der schnelleren Fließgeschwindigkeit in der Mitte, und dem hohen Schuttanteil, ist er als Permafrost-Indikator leicht zu erkennen.⁴⁷

⁴⁶ Nötzli Jeanette, Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.114

⁴⁷ Nötzli Jeanette, Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.114

4.6 Einflussfaktoren:

Die Temperatur ist das Hauptkriterium, damit permanenter Bodenfrost existieren kann. Es gibt allerdings auch Einflussfaktoren, welche die Bodentemperatur durch ihre physikalischen Eigenschaften beeinflussen. Folgende Faktoren begünstigen oder verhindern Permafrost:

- **Höhenlage:**
Bei zunehmender Höhe sinkt die Mitteltemperatur. Daher gilt: Je höher in den Alpen desto eher gibt es Dauerfrostböden
- **Nord-/Südhang:**
In Nordhängen definieren lange Schattenperioden das Klima. Daher kann die mittlere Jahrestemperatur auch unterhalb der Waldesgrenze unter -2°Celsius liegen und somit Permafrostbildung oder zumindest eine Konservierung der Vorkommen bewirken. Durch die intensive Sonneneinstrahlung in Südhängen kann es dort sogar in 4000 m. ü. M. noch Permafrost freie Zonen geben.
- **Schneemengen/Schneebedeckung:**
Wenn es viel Schnee über den Winter gibt, wird der Untergrund im Frühjahr und Sommer länger durch die Schneedecke isoliert. Somit wird die Jahresmitteltemperatur direkt am Boden nach unten gedrückt und es entstehen ideale Bedingungen für Permafrost. Grosse Schneeablagerungen, die durch Lawinen und Schneeverwindungen entstehen, wirken auch isolierend. Der Effekt kann zusätzlich verstärkt werden, wenn es im Dezember lange schneefrei bleibt. Denn durch die fehlende Schneedecke (Isolationsschicht) kann die Umgebungsluft den Boden weiter abkühlen. Somit ist es für den Erhalt des Permafrosts wichtig, dass es anfangs Winter möglichst lange nicht schneit. Im Frühling sollte der Schnee dann sehr lange liegen bleiben. ^{48 49 50}
- **Bodenbeschaffenheit:**
Wenn der Boden durch grosse Gesteinsblöcke geprägt ist, kühlt er im Winter durch den Luftaustausch besser aus und wird im Sommer weniger stark erhitzt. Permanent gefrorener Boden wird daher in dieser Bodenart gefördert. ⁵¹

⁴⁸ Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.27-28

⁴⁹ ohne Autor, Internetquelle: Hinweiskarte der Permafrostverbreitung, BAFU, 12.09.2019

⁵⁰ Götz Andreas, Raetzo Hugo, Artikel: Permafrost-mit dem Risiko umgehen, 13.09.2019

⁵¹ Nötzli Jeanette, Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.114

4.7 Messmethoden

Die Permafrost-Verbreitungskarte (Abbildung 10) zeigt an, in welchen Regionen Permafrost zu erwarten ist. Allerdings können die Informationen nicht einfach auf lokale Zonen angewendet werden, da die Karte mit Hilfe von Modellen erstellt wird.⁵² Zur Lokalisierung von Permafrost in spezifischen Regionen werden genaue Messmethoden benötigt. Dabei gibt es drei Standardtechniken:

- Die Bohrung:
Bei ihr wird ein Loch in den Untergrund gebohrt und dann mit Messsonden versehen. Dadurch kann man feststellen, ob es im Untergrund Permafrost hat und wie er sich bei klimatischen Veränderungen verhält. Vorteile an der Methode sind, dass sie sehr ungezinkt ist und viele Informationen für die Forschung preisgibt. Der Nachteil an dieser Methode ist, dass sie nur im kleinen Stil verfolgt werden kann, da sie sehr teuer und aufwendig ist. Des Weiteren können die Resultate nicht oder nur zum Teil auf andere Regionen angewendet werden.
- Die BTS-Methode:
Für eine lokale Beurteilung wird daher meistens die BTS-Methode angewendet. BTS steht für „Bottom Temperature of the Winter Snowcover“ (Bodentemperatur der winterlichen Schneedecke). Bei dieser indirekten Methode wird zwischen Februar und März die Temperatur vom Boden unter einer Schneedecke gemessen. Die Schneedecke muss mindestens 80cm dick sein, da ab diesem Ausmass die Umgebungstemperatur keinen Einfluss auf die Bodentemperatur unter dem isolierend wirkenden Schnee hat. Die Bodentemperatur wird nur noch vom Untergrund selbst bestimmt. Wenn die BTS unter -3°C liegt, weist der Boden Permafrost auf. Ab einer BTS von 0°C gibt es definitiv keinen Permafrost. Das Hauptproblem der BTS-Methode ist, dass sie von -3°C bis 0°C nicht aussagekräftig ist. Für eine Aussage bräuchte es in diesen Fällen eine Bohrung.^{53 54}
- Geophysikalische Methoden:
Bei geophysikalischen Messungen nutzt man die physikalischen Eigenschaften vom Untergrundmaterial, um Permafrost zu lokalisieren. Durch verschiedene Verfahren (Seismik, Georadar und Geoelektrik) kann man Dichteunterschiede oder die elektrische Leitfähigkeit im Boden messen und somit Rückschlüsse auf den Eisgehalt machen. Diese Methode hat verschiedene Vorteile: Eine Messung dauert 1 bis 3 Stunden und nach einem Tag sind die Daten ausgewertet (ideal für hochalpinen Bau). Weiter kann das Volumen und der Eisgehalt eines Permafrostkörpers gemessen werden und die geophysikalischen Methoden sind nicht-invasiv. Das heisst, dass der Permafrost nicht beschädigt oder verändert wird.^{55 56}

⁵² ohne Autor, Internetquelle: Permafrostverbreitung in der Schweiz, BAFU, 20.09.2019

⁵³ Delaloye Reynald, Vonder Mühll Daniel, Heft: die Alpen, S.31

⁵⁴ Nötzli Jeanette, Stefan Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.116

⁵⁵ Nötzli Jeanette, Stefan Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.115-116

⁵⁶ Hilbich Christin, Powerpoint: Geophysikalische Methoden, Folie 2 und 19

4.8 PERMOS – Swiss Permafrost Monitoring Network

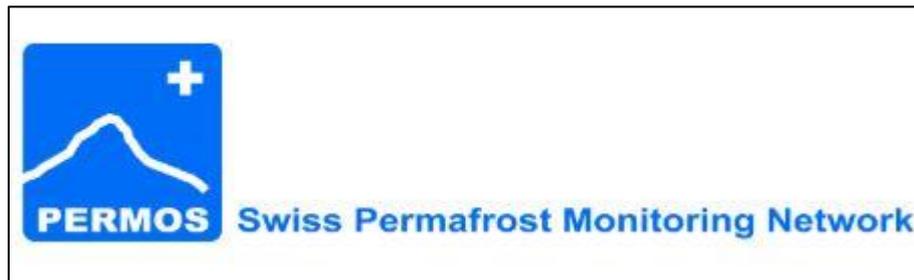


Abbildung 11: Logo von PERMOS

PERMOS steht für schweizerisches Permafrost Überwachungsnetzwerk. Das Netzwerk koordiniert sämtliche Messungen von Permafrost in der Schweiz, verwaltet die Daten und erforscht die Entwicklung der Dauerfrostböden. Von 2000 bis 2006 befand sich das Projekt in der Testphase und wird seit 2007 langfristig vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), der schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften und dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) finanziert. PERMOS arbeitet mit 6 Partnern zusammen (ETH Zürich, Universität Freiburg, Universität Lausanne, Fachhochschule Südschweiz, Universität Zürich und Institut für Schnee- und Lawinenforschung Schweiz). Die Partner übernehmen die Feldforschung und unterhalten die Webseite. Das Ziel des Netzwerks ist es, die Lage und die Entwicklung des Permafrosts im Klimawandel zu dokumentieren und seinen Einfluss auf Naturgefahren besser zu verstehen.^{57 58}

4.9 Fazit

Permafrost ist ein weltweit verbreitetes Phänomen und wird nur durch die durchgehend negative Bodentemperatur definiert. Oberhalb des eigentlichen Permafrostkörpers befindet sich eine aktive Schicht (Mollisol), welche in den warmen Monaten auftaut. In den Schweizer Alpen ist alpiner Dauerfrostboden sehr inhomogen verteilt und kann in Felswänden und Lockermaterial (z.B. Blockgletscher) auftreten. Dank Indikatoren, Messungen und computergestützten Modellen kann er lokalisiert und quantifiziert werden. Diese Arbeit wird vom schweizerischen Permafrost Überwachungsnetzwerk PERMOS und seinen Partnern durchgeführt. Des Weiteren untersucht PERMOS den Einfluss des Klimawandels auf den Permafrost.

⁵⁷ ohne Autor, Internetquelle: PERMOS – Informationen zum Netzwerk, PERMOS, 16.10.2019

⁵⁸ Nötzli Jeanette, Stefan Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.119

5 Permafrostschwund in den Schweizer Alpen

5.1 Definition

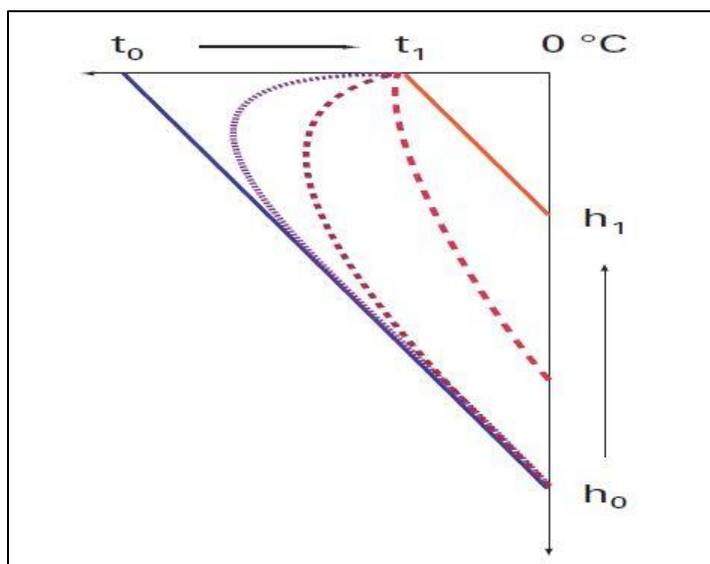
Permafrost ist bekanntlich Boden, welcher dauerhaft gefroren ist (Kapitel 4.1). Als Schwund wird ein Prozess des sich allmählichen Verringerens oder des Schwindens definiert.⁵⁹

Folglich ist der Permafrostschwund ein Prozess, welcher das allmähliche Schwinden des Permafrosts, also eine Masseabnahme, bezeichnet. Im folgenden Kapitel wird die Hauptursache für dieses Phänomen aufgezeigt und es wird auf die Messreihen, exemplarisch auf die der Temperaturveränderungen in Bohrlöchern, von PERMOS eingegangen.

5.2 Ursache

Gemäss der Definition von Permafrost (Kapitel 4.1) hängt seine Existenz und seine Mächtigkeit in erster Linie von der Temperatur ab. Wenn sich die Lufttemperatur durch den Klimawandel erwärmt, steigt auch die bodennahe Mitteltemperatur im Alpenraum. Im Kapitel Klimawandel wird aufgezeigt, dass der Erwärmungstrend in den Alpen überdurchschnittlich gross ist (siehe Abschnitt 3.3.2).

Durch die erhöhte Boden- und Lufttemperatur nimmt die Mächtigkeit der aktiven Schicht (Mollisol) zu. Der Permafrostspiegel verschiebt sich nach unten (siehe Abbildung 8). Da der Permafrost von oben aufgewärmt wurde, setzt sich dieser Trend zeitverzögert im Untergrund fort, bis die Permafrostbasis erreicht wird. Wenn sich der Permafrostkörper wieder im Gleichgewicht befindet, was 10 bis mehrere 100 Jahre dauern kann, ist die Permafrostuntergrenze (Basis) erhöht und der ganze Körper ist im Schnitt wärmer. In der Bilanz ist eine Masse- und Mächtigkeitsabnahme zu beobachten.⁶⁰



1. An der Oberfläche steigt die Oberflächentemperatur t_0 (Temperatur zum Zeitpunkt 0) auf t_1 an.
2. Der Erwärmungstrend setzt sich nach unten fort, bis die Basis bei h_0 (Tiefe zum Zeitpunkt 0) erreicht wird.
3. Die Mächtigkeit nimmt bis zur neuen Permafrostbasis h_1 ab.
4. Im wiedererlangten Gleichgewicht erkennt man eine Erwärmung des Permafrosts (rot eingefärbt).

Abbildung 12: Schematische Entwicklung des Permafrostschwunds

⁵⁹ ohne Autor, Internetquelle: Schwund, DUDEN, 12.11.2019

⁶⁰ Nötzli Jeanette, Stefan Gruber Stefan, Buch: Permafrost – ein Überblick, S.112-113

Die schematische Erklärung würde den Schwindungsprozess nur dann wahrheitsgetreu erklären, wenn die Temperatur der einzige Faktor wäre, welcher eine Abnahme des Permafrosts hervorrufen könnte. Im Abschnitt 4.6 (Einflussfaktoren) wurden allerdings noch weitere Gründe für ein Wachstum oder einen Schwund erläutert, welche man unbedingt mitberücksichtigen muss. Vor allem für Permafrost ausserhalb von Felswänden ist die Auskühlung im November und Dezember sowie die Schneebedeckung im Frühling entscheidend.

5.3 Entwicklung in der Schweiz

Anders als zum Beispiel bei der globalen Mitteltemperatur, welche zum Teil bereits seit über 150 Jahren dokumentiert und erforscht wird, begann man sich erst in den späten Siebzigern für das Phänomen Permafrost zu interessieren. Obwohl die Forschung dank hochmoderner Technik wie der Computermodellierung und geophysikalischen Messmethoden (Abschnitt 4.7) grosse Fortschritte macht, ist es schwierig, Aussagen über den langfristigen Einfluss des Klimawandels auf den permanenten Dauerfrost zu machen. Der Grund dafür ist, dass die Datenreihen aufgrund ihres kurzen Zeitraums zu wenig aussagekräftig sind. Trotzdem kann man in den Messungen von PERMOS, welche die Geschwindigkeit von Blockgletschern, die Temperatur in Bohrlöchern und den elektrischen Widerstand von Permafrostarealen dokumentieren, bereits Anzeichen für einen Permafrostschwund beobachten. Dies wird in der untenstehenden Abbildung durch den Temperaturanstieg im Permafrost mit saisonalen Schwankungen verdeutlicht. Die junge Forschungsgeschichte fällt ebenfalls direkt ins Auge.^{61 62}

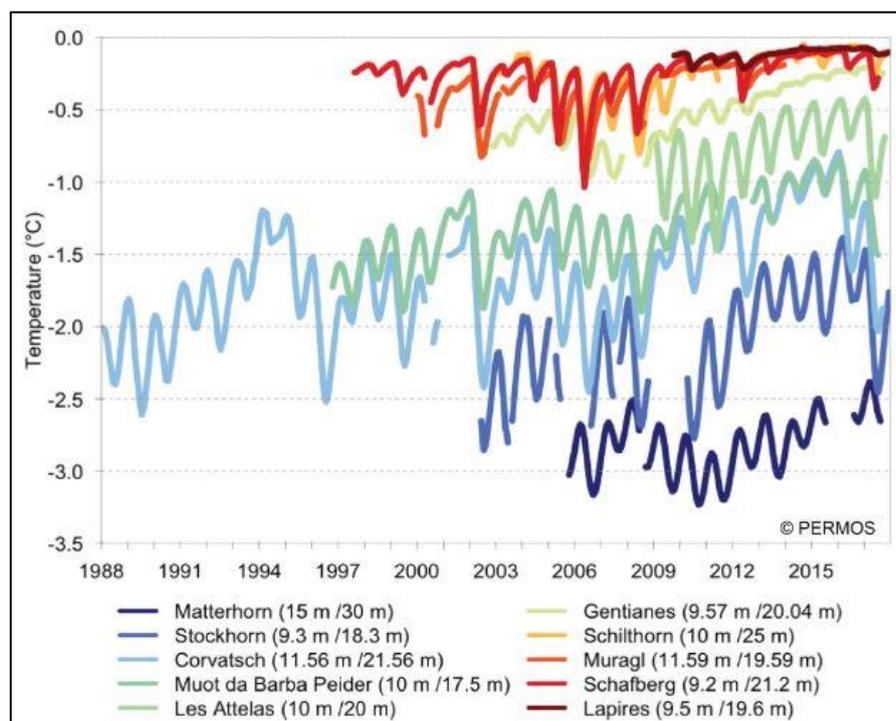


Abbildung 13: Temperaturentwicklung in Bohrlöchern

⁶¹ Krautblatter Michael & ff, Zeitungsartikel: Permafrost in den Alpen, S.22-23

⁶² ohne Autor, Internetquelle: PERMOS – Informationen zum Netzwerk, PERMOS, 16.10.2019

5.4 Fazit

Auch wenn der Temperaturanstieg durch den Klimawandel definitiv zu einem Schwund von permanentem Dauerfrost führt, sind die Messdatenreihen zu wenig signifikant, um Zukunftsszenarien zu prognostizieren, da Änderungen im Permafrost sich über mehrere hundert Jahre erstrecken können.

Die sommerliche Auftauschicht zumindest wird durch die höheren Temperaturen im Sommer, welche sich gemäss Klimaszenarien noch verschärfen werden, massiver ausfallen. Ohne eine Prognose zu wagen, wie die Mächtigkeit der Permafrostreserven sich verändern werden, reicht die Diczunahme der aktiven Schicht (Mollisol) bereits aus, um ein erhöhtes Risiko für Naturgefahren zu generieren.⁶³



Abbildung 14: Perennierende Schneefelder unter dem Bortelhorn

⁶³ ohne Autor, Internetquelle: PERMOS – Informationen zum Netzwerk, PERMOS, 16.10.2019

6 Naturgefahren

Im letzten Kapitel dieser Arbeit kann sich der/die Leser/in einen Überblick über die Naturgefahren, besonders über den Bereich der gravitativen Naturgefahren, verschaffen. Mit dem Murgang und den Sturzprozessen werden zwei Phänomene, welche unter anderem durch den Permafrostschwund entstehen können, genauer vorgestellt und es wird erklärt, wie sie in diesem konkreten Fall entstehen. Zu Beginn des Kapitels wird ausserdem anhand der Gefahrenkarte auf einen Teil der Prävention, welche ansonsten aber nicht weiter behandelt wird, eingegangen.

6.1 Definitionen

6.1.1 Naturgefahren

Als Naturgefahren werden „alle Vorgänge und Einwirkungen der Natur [...], die für den Menschen und für Sachwerte schädlich sein können“ (vgl. Fabian Piller und Matthias Probst, S.186) definiert. Durch den Menschen werden Naturereignisse erst zu Gefahren, wenn er selbst und seine Güter gefährdet sind. In der Schweiz sind gravitative Naturgefahren, wie zum Beispiel Rutschungen und Sturzprozesse, klimatisch-meteorologische Naturgefahren, wie Trockenheit und Starkregen, und tektonische Naturgefahren, also Erdbeben, in unterschiedlichen Häufigkeiten verbreitet.

6.1.2 Gravitative Naturgefahren

Gravitative Naturgefahren entstehen, wie es der Name bereits sagt, durch die Gravitationskraft. Sie unterscheiden sich von den anderen Kategorien durch ihre räumliche Verbreitung, welche durch die Topografie gegeben ist. Anders als bei den klimatisch-meteorologischen und den tektonischen Gefährdungen, welche überregional auftreten, sind sie ortsgebunden. Hochwasser, Murgang, Rutschungen, Sturzprozesse und Lawinen sind die Ereignisse, welche zu den gravitativen Naturgefahren gehören.^{64 65}

6.2 Umgang mit Naturgefahren

Gravitative Naturgefahren können zwar durch bautechnische Massnahmen, wie zum Beispiel einen Geschiebesammler oder Lawinenverbauungen, zum Teil verhindert werden, allerdings bleibt immer ein gewisses Risiko, was so viel wie „das Produkt aus dem Ausmass und der Wahrscheinlichkeit eines möglichen Schadens“ (vgl. Fabian Piller und Matthias Probst, S.187) bedeutet, übrig. Das Prinzip der Gefahrenabwehr stösst daher und auch wegen den enormen Kosten bald einmal an seine Grenzen. Anstatt enorm viele Ressourcen für dieses illusorische Ziel aufzuwenden, setzt die Schweiz auf eine Risikokultur, welche zum Ziel hat, das Gefahrenpotenzial auf ein vernünftiges Niveau zu senken. Diese Strategie wird im integralen Risikomanagement umgesetzt.⁶⁶

⁶⁴ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.186

⁶⁵ ohne Autor, Wegleitung: Objektschutz, Kantonale Gebäudeversicherungen, S. 9-11

⁶⁶ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.187

6.2.1 Integrales Risikomanagement

Das Ziel des integralen Risikomanagements, kurz IRM, ist es, im Einklang mit Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft sinnvolle Lösungen im Umgang mit Naturgefahren zu erschaffen. Dabei geht es nicht nur darum Gefahrenzonen zu meiden und Risiken zu minimieren, sondern auch abzuwägen, ob das Risiko in gewissen Fällen tragbar ist. In einem drei Schritte Konzept wird beurteilt, welche Gefahren vorhanden sind und welche Risiken tragbar sind. Zum Schluss wird ein Massnahmen- und Prioritätenkatalog erstellt.⁶⁷

6.2.2 Gefahrenkarte

Für den ersten Schritt des integralen Risikomanagements, der Gefahrenbeurteilung, stellen Gefahrenkarten die wichtigste Grundlage dar. Sie sind ein Mittel zur Prävention von Schäden durch Naturgefahr, wenn sie strikt in der Raumplanung angewandt werden. Die Gefahrenkarten, deren Erarbeitung in der Verantwortung der Kantone liegt, werden wissenschaftlich durch Beobachten und Messen erstellt und zeigen das Gefahren- und Schadenspotenzial von gravitativen Naturgefahren für einen bestimmten Raum auf. Zu jeder Gefahrenkarte wird ein technischer Bericht publiziert, welcher über die Gründe für Naturgefahren zum Beispiel Permafrostschwund, die Intensität und vieles mehr ortsspezifisch informiert. Die Gefahreneinschätzung wird folgendermassen durch die Intensität und die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses vorgenommen:

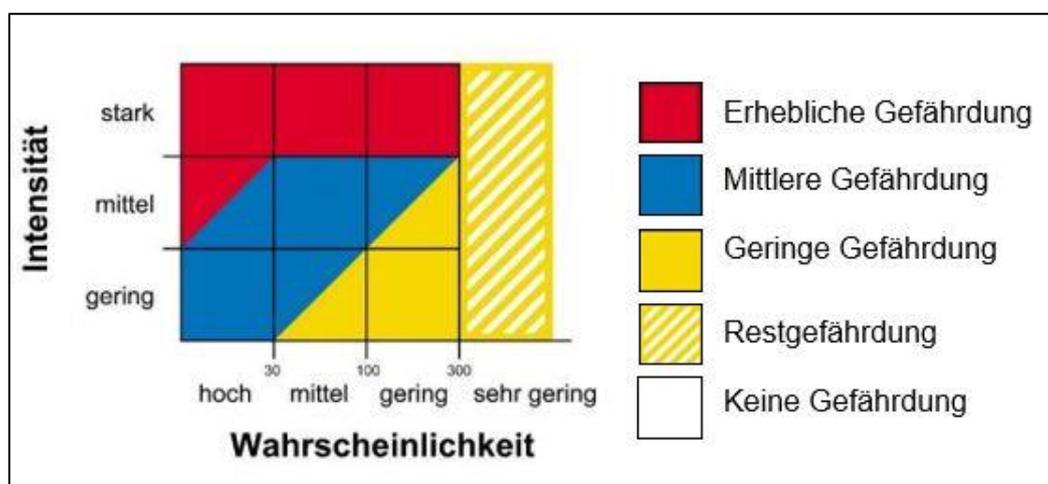


Abbildung 15: Gefahrenstufen mit Legende

Für die Raumplanung bedeutet die erhebliche Gefährdung ein Verbot für Neu- und Anbauten sowie eine Rückzonung des Baulandes. Bei Neubauten im blauen Bereich sollte man zuerst nach Alternativen suchen und eine Interessenabwägung machen, da im Ernstfall auch mit Bauvorschriften erhebliche Schäden entstehen könnten. Ab der blauen Zone sind Personen in Gebäuden sicher. Es muss allerdings mit Schäden an Gebäuden gerechnet werden. Die Gefährdung ist ab der gelben Zone nur noch sehr klein. Es sind keine Verbote oder Gebote vonnöten.^{68 69}

⁶⁷ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.187-188

⁶⁸ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.190

⁶⁹ ohne Autor, Dossier: Gefahrenkarten, BAFU, S. 1-2

6.3 Sturzprozesse

6.3.1 Definition

Als Sturzprozesse werden eine Gruppe von gravitativen Naturgefahren verstanden, welche in steilen Hängen durch zu Tal rollendes, springendes oder fallendes Locker- oder Festmaterial charakterisiert wird. Das Gefälle muss dabei mindestens 57% steil sein. Die verschiedenen Sturzprozesse, welche Steinschlag, Blockschlag, Felssturz oder Bergsturz genannt werden, unterscheiden sich durch die Sturzeschwindigkeit, den Durchmesser der grössten Steine und das Volumen (siehe Abbildung 16). Sturzprozesse werden meistens durch Verwitterung (Frostverwitterung) und veränderte Druckverhältnisse im Felsen durch Wassereinfluss ausgelöst.⁷⁰

Sturzprozesstyp	Geschwindigkeit	Durchmesser	Volumen
Steinschlag	5-30 m/s	<0.5m	<10 ⁶ m ³
Blockschlag	5-30 m/s	>0.5m	<10 ⁶ m ³
Felssturz	10-40 m/s	>1.0m	<10 ⁶ m ³
Bergsturz	>40 m/s	>1.0m	>10 ⁶ m ³

Abbildung 16: Klassifikation der Sturzprozesse

6.3.2 Entstehung durch Permafrostschwund

Damit Sturzprozesse im Permafrost entstehen, sind als wichtigstes Kriterium Kluftsysteme im Felsen, welche mit Eis gefüllt sind, vonnöten. Diese Eisfüllungen werden Eislinsen genannt. Durch die Volumenzunahme von gefrorenem Wasser lassen Eislinsen die Klüfte immer grösser werden. Solange der Permafrost jedoch gefroren ist, trocknet er den Felsen aus, was die Reibungskräfte zwischen den instabilen Felsmassen erhöht und somit ein Kollaps verhindert. Des Weiteren kann das Permafrost-Eis den Felsen stützen und zusammenhalten. Durch Permafrostschwund können nun Sturzprozesse auf zwei verschiedene Arten ausgelöst werden:

- **Bindende Kräfte:**
Das Eis hat den Permafrost zusammengehalten. Wenn sich der Permafrost in Folge erhöhter Lufttemperatur erwärmt, verliert das Eis diese Bindekraft. Dieser Prozess beginnt bereits bei einer Eistemperatur von -2°Celsius, da dann der Wassergehalt zunimmt. Instabile Felspartien können sich nun ablösen.
- **Veränderte Druckverhältnisse:**
Wenn das Eis in den Klüften durch die Erwärmung schmilzt und Wasser von der Oberfläche, welches bis anhin wegen der Eisschicht nicht in den Felsen gelangte, eindringt, sammelt sich dieses in den geöffneten Klüften. Das Wasser reduziert die Reibungskräfte. Das ohnehin schon instabile Gestein wird zudem durch den Wasserdruck weiter destabilisiert und es können Sturzprozesse entstehen.⁷¹

⁷⁰ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.194-195

⁷¹ Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.33-34

6.3.3 Ablauf

Die Bewegungsform und ähnliche Faktoren sind den technischen Berichten der jeweiligen Gefahrenkarten zu entnehmen und sind entscheidend für den Massnahmenkatalog im Bereich des Gebäudeschutzes. Bei Sturzprozessen wird das losgelöste Material durch die Gravitationskraft in Richtung Tal transportiert und beschleunigt. Dabei können sich die Komponenten auf drei verschiedene Arten fortbewegen.

- Rollen oder Gleiten:
Das Sturzmaterial wird entlang des Bodens nach transportiert. Je nach Form und Geschwindigkeit der Steine entsteht neben der Translationsbewegung (schieben/gleiten) auch noch eine Rotationsbewegung (rollen). Schäden an Gebäuden sind nur im Bereich der unteren Wände zu erwarten.
- Springen:
Wenn das Lockermaterial springend (Flugphasen und Aufprallstellen) den Berg hinunterkommt, wirken Translations- und Rotationskräfte auf die einzelnen Steine. Schäden können auf der ganzen Wandhöhe entstehen, da die Sturzkomponenten auch in der Flugphase, in einer gewissen Höhe über dem Boden) auf ein Objekt aufprallen können. Wenn die Flughöhe grösser ist als die Gebäudehöhe sind auch Schäden an Dächern möglich.
- Fallen:
Wenn sich ein Gebäude unterhalb einer Felswand oder ähnlichem befindet, können Sturzkomponenten bei einem Ereignis auch das Dach beschädigen. Anders als bei der springenden Fortbewegung entstehen beim fallenden Phänomen keine Rotationskräfte.⁷²



Abbildung 17: Steinschlag im Saastal

⁷² ohne Autor, Wegleitung: Objektschutz, Kantonale Gebäudeversicherungen, S. 90-94

6.4 Murgänge

6.4.1 Definition

Murgänge, welche auch Muren oder Rufen genannt werden, sind durch den grossen Anteil an Feststoffen (30%-60%) bestehend aus Steinen, Holz, Kies und Sand charakterisiert. Sie treten ausschliesslich bei Hangexposition von mindestens 24% auf und benötigen eine aussergewöhnlich grosse Menge von Wasser. Daher entstehen Murgänge bei Starkniederschlagsereignissen oder durch grosse Mengen Schmelzwasser im Bachbett eines Wildbachs.⁷³



Abbildung 18: Wildbachbett

6.4.2 Entstehung durch Permafrostschwund

Permafrost im Lockermaterial (zum Beispiel Blockgletscher) hält Steine, Kies etc. zusammen, wie es bereits im Fels-Permafrost der Fall war. Als weitaus wichtigere Aufgabe schützen die Eismassen das Lockermaterial vor Erosion. Die Masse bleibt auch bei starken Regenfällen kompakt und verwitterungsresistent. In Folge des Klimawandels taut der Permafrostboden auf und verschiebt sich in höhere Lagen. Der Eisgehalt nimmt im Lockermaterial ab und kann daher die Komponenten, bestehend aus Blöcken, Steinen, Kies und Sand, nicht mehr genügend gut zusammenbinden oder verkleben. Schliesslich nimmt die ganze Hangstabilität ab. Bei grossen Schmelzwasser-Mengen oder Starkniederschlägen erodiert das Wasser nun aufgrund des fehlenden Eises den Boden. Im Extremfall wird das Schuttgemenge in einem Hang verflüssigt und durch die verringerte Reibung (Wasserfilm) mithilfe der Gravitationskraft in Bewegung versetzt. Ein Murgang ist durch das Fehlen von Permafrost entstanden.^{74 75}

⁷³ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.192-193

⁷⁴ Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, S.33

⁷⁵ Käab Andreas, Mitteilungen: photogrammetrische Analyse, S. 149-150

6.4.3 Ablauf

Ein Murgang wird während eines Starkniederschlagsereignisses oder grosser Schmelzwassermengen spontan ausgelöst. Wie auf Abbildung 19 in der Mitte zu erkennen ist, können Blöcke, welche so gross wie ein Kleinwagen sind, im vorderen Teil des Geschiebes transportiert werden. Je nach Volumen des Geschiebes, welches zwischen 100m^3 bis $100'000\text{m}^3$ gross ist, und dem Gefälle können Murgänge bis zu 20m/s (72km/h) schnell werden. Wenn das Tal oder das Wildbachbecken breiter wird oder das Gelände weniger steil ist, verlangsamt sich ein Murgang auf 2m/s bis 7m/s . Zum Stillstand gelangt er erst bei einem Gefälle unter 17% . Die Fliesshöhe ist im Bachbett oder kleinen Seitentälern bis zu 3m hoch, was in Kombination mit mitgerissenen Bäumen zu Verstopfungen beispielsweise bei Brücken führen kann. Neben der Geschwindigkeit verringert sich auch die Geschiebehöhe, wenn mehr Platz zur Verfügung steht (Talöffnung). Die Erosion bei diesem Prozess ist sehr gross.^{76 77 78}



Abbildung 19: Murgang im Illgraben

6.5 Fazit

Einen hundert prozentigen Schutz vor Naturgefahren gibt es nicht. Auch im Bereich der gravitativen Naturgefahren muss man mit Schäden und Risiken rechnen. Mit dem integralen Risikomanagement versucht man in der Schweiz sinnvolle Lösungen im Umgang mit Naturgefahren zu schaffen. Ein wichtiger Punkt sind dabei beispielsweise bauplanerische Massnahmen, welche mithilfe der kantonalen Gefahrenkarten abgeschätzt werden. Im zweiten Teil dieses Kapitel wurde schliesslich aufgezeigt, wie Sturzprozesse und Murgänge durch den Permafrostschwund entstehen oder ausgelöst werden. Die Stabilität des Hanges und Felsen sowie die binden Kräfte des Eises spielen dabei eine zentrale Rolle.

⁷⁶ Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.192-193

⁷⁷ ohne Autor, Wegleitung: Objektschutz, Kantonale Gebäudeversicherungen, S. 78-81

⁷⁸ ohne Autor, Faktenblatt: Hochwasser und Murgang, BAFU, S. 1-2

7 Schlusswort

7.1 Zusammenfassung

Der Klimawandel ist definitiv vom Menschen herbeigerufen. Als wichtigstes Merkmal des Problems kann man den globalen Temperaturanstieg seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts beobachten. Aber auch andere Indikatoren, beispielsweise der Rückgang des Polareises, weisen auf den Wandel hin. Die Entwicklung in der Schweiz, auf welche sich die Arbeit beschränkte, ist sogar noch stärker als das globale Mittel. Die Durchschnittstemperatur wird gemäss Klimaszenarien CH2018 in Zukunft ohne konsequenten Klimaschutz weiter stark steigen. Das Horrorszenario approximiert einen sommerlichen Temperaturanstieg in den Alpen von 10° Celsius. Die Erwärmung wird aber ziemlich sicher weniger stark ausfallen. Bei einem konsequenten Klimaschutz wären es sogar «nur» 2° Celsius.

Um den Prozess des Permafrostschwunds und den daraus resultierenden Naturgefahren zu verstehen, wurde im nächsten Kapitel der Permafrost näher erklärt. Permafrost ist dauernd gefrorener Boden und kommt auf einer doppelt so grossen Fläche wie die Gletscher in den Schweizer Alpen vor. Sein Aufbau bestehend aus Mollisol (aktive Schicht) und Permafrostkörper und die negative Untergrundtemperatur charakterisieren ihn. Das Vorkommen ist sehr schwer abzuschätzen, da permanenter Bodenfrost in den Alpen sehr inhomogen verteilt ist und er nicht von Auge erkannt werden kann. Somit sind diverse Indikatoren, beispielsweise perennierende Schneeflecken, Messmethoden und Computermodellierungen vonnöten.

Der Permafrostschwund ist die logische Konsequenz aus dem Klimawandel und dem temperaturbedingten Permafrost. Erste Veränderungen sind bereits zu erkennen, allerdings sind die Messdatenreihen zu wenig signifikant, damit man zuverlässige und abgestützte Aussagen über die genauen Entwicklungen machen kann.

Fest steht, dass gravitative Naturgefahren im Bereich der Sturzprozesse und Murgänge durch den Permafrostschwund begünstigt werden. Daher wurde im letzten Kapitel aufgezeigt, wie sie durch das Schwinden des Dauerfrostbodens entstehen und wie die Schweiz mithilfe der Risikokultur (integrales Risikomanagement) ein Mittel zum Schutz und Umgang mit Naturgefahren anwendet.

7.2 Ausblick

Mit der Vorgabe von 20 Seiten Text muss man ein Arbeitsthema auf bestimmte Aspekte und Hauptkenntnisse beschränken. In dieser Arbeit geschah dies vor allem im Bereich der Naturgefahren. Hier wurde praktisch das ganze Thema der Gefahrenprävention und des Schutzes vor Naturgefahren nicht bearbeitet. Somit wären diese zwei Themen eine spannende Ergänzung zum Verfassten. Wie werden Gefahrenkarten konkret erstellt und welche Schutzmassnahmen kann man gegen Sturzprozesse und Murgänge baulich, biologisch, technisch und planerisch realisieren, wären beispielsweise zwei weitere äusserst spannende Themen. Des Weiteren wurde vieles im Kapitel Klimawandel nicht oder nur oberflächlich behandelt. So wäre es interessant, sich über systeminterne Schwankungen im Klimasystem der Atmosphäre, hervorgerufen durch den El Nino beispielsweise, Gedanken zu machen. Im Bereich der genauen Zusammensetzung der Atmosphäre und ihrer zahlreichen physikalischen und chemischen Interaktionen könnte man noch viele Seiten schreiben.

7.3 Persönliches Fazit

Als ich im Frühjahr 2019 meine erste Themenpriorität "Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz" als Maturaarbeitsthema zugeteilt bekommen hatte, wusste ich noch nicht allzu viel über die Kunst des Schreibens einer Arbeit. Ich war aber von Anfang an Feuer und Flamme für dieses Thema und bald war klar, dass ich das Thema auf die Problematik des Permafrostschwunds, hervorgerufen durch den Klimawandel, eingrenzen werde. Durch meine grosse Verbundenheit zur Natur beschäftigten mich die Erkenntnisse, welche ich in stundenlanger Lektüre herausfand, sehr: Über uns, auf knapp 2500 m.ü.M und höher, schlummert im Untergrund ein faszinierendes Phänomen, welches durch den Klimawandel immer mehr zur Gefahr wird. Der Permafrost schmilzt davon und damit auch die zusammenhaltende und schützende Eisschicht. Da ich in einem Alpenkanton lebe, sind ich und mein Umfeld direkt von den Folgen betroffen. Plötzlich sah ich das Thema Klimawandel ganz anders: Wir müssen handeln! Wir müssen Verantwortung übernehmen und uns für eine Gesellschaft und Politik mit Netto-Null CO₂-Emission einsetzen. Wir müssen die globale Erderwärmung stoppen, um eine Schadensbegrenzung zu erreichen. Nur so haben wir die Möglichkeit unseren Nachkommen eine ähnlich intakte und schöne Natur, welche nicht zur Gefahrenhölle wird, zu überlassen, wie wir sie tagtäglich erleben durften. Jeder kann seinen Teil dazu beitragen mit einem bewussten und eingeschränkten Fleischkonsum, mit der Benutzung von erneuerbaren Energien beim Heizen und vielem mehr.

7.4 Danksagung

Ein grosses Dankeschön möchte ich meinem Betreuer, Herr Perrig Christof, aussprechen, welcher mich durch meine erste grosse Arbeit begleitet hat. Er ist mir stets mit einem guten Rat bei Seite gestanden und hat mir immer das Gefühl gegeben, dass ich es schaffen kann. Ein weiteres Merci geht an Herr Pfammatter Claudio für die Korrektur und die zahlreichen Tipps im Bereich der Sprache, der einheitlichen Formatierung und vielem mehr.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Internetquellen

8.1.1 Mit Autor

Biskaborn Boris, Permafrost, Alfred-Wegener-Institut, 29.08.2019
<https://www.awi.de/im-fokus/permafrost.html>

Burkhard Pascal und Pascal Zehr, Schweizer Klima, SRF, 29.10.2019
<https://www.srf.ch/news/schweiz/klima-in-der-schweiz-seit-60-jahren-nur-noch-hitzerekorde>

Horst Rademacher, Permafrost schmilzt, FAZ, 01.11.2019
<https://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/alpen-wenn-der-permafrost-schmilzt-rutschen-die-haenge-11008737.html>

Kasang Dieter, Aerosole, Wiki Bildungsserver, 01.11.2019
<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Aerosole>

Kasang Dieter, Erdbahnparameter, Wiki Bildungsserver, 31.10.2019
<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Erdbahnparameter>

Kasang Dieter, Permafrost, Hamburger Bildungsserver, 29.08.2019
<https://bildungsserver.hamburg.de/eis-und-schnee-nav/2121522/permafrost/>

Pfeffer Gerd, Strahlung, Homepage-Gerd Pfeffer, 02.11.2019
http://www.gerd-pfeffer.de/atm_strahlg.html

Remez Gregory, der Riese schrumpft, Aargauer Zeitung, 05.11.2019
<https://www.aargauerzeitung.ch/schweiz/der-riese-schrumpft-warum-der-aletschgletscher-den-anwohnern-sorgen-bereitet-132932708>

Sebastian Schaffner, Vulkanausbruch, HNA, 31.10.2019
<https://www.hna.de/welt/vulkan-welt-verdunkelte-6204716.html>

8.1.2 Ohne Autor

Aerosole, Paul-Scherrer-Institut, 01.11.2019
http://aerosolforschung.web.psi.ch/Was_Page/Was_Page.htm

Aufbau des Permafrosts, Freie Universität Berlin, 03.09.2019
https://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/geomorphologie/periglazialmorphologie/Permafrost/Aufbau_eines_Permafrostbodens/index.html

CH2018-Klimaszenarien verstehen, MeteoSchweiz, 05.11.2019
<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/klimaszenarien-verstehen.html#1237028146>

CH2018-Zahlen und Fakten, MeteoSchweiz, 05.11.2019
<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten.html>
CH2018-Webatlas, MeteoSchweiz, 05.11.2019

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html>

Globaler Klimawandel, MeteoSchweiz, 29.10.2019

<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-weltweit/globaler-klimawandel.html>

Hinweiskarte, BAFU, 12.09.2019

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/verkehr/grundlagen/hinweiskarte-der-permafrostverbreitung-in-der-schweiz.html>

Hitzetage, MeteoSchweiz, 05.11.2019

<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/hitzetage-frosttage-und-andere-indikatoren.html>

Klimawandel, DUDEN, 16.10.2019

<https://www.duden.de/rechtschreibung/Klima>

Klimawandel, Wikipedia, 31.10.2019

<https://de.wikipedia.org/wiki/Klimawandel>

Klimawandel Schweiz, MeteoSchweiz, 05.11.2019

<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz.html>

Permafrost, Freie Universität Berlin, 03.09.2019

<https://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/geomorphologie/periglazialmorphologie/Permafrost/index.html>

Permafrost, SLF, 01.11.2019

<https://www.slf.ch/de/permafrost/permafrost-und-naturgefahren.html>

Permafrostboden, Wikipedia, 29.08.2019

<https://de.wikipedia.org/wiki/Permafrostboden>

PERMOS, 16.10.2019

<http://www.permos.ch/index.html>

Schwund, DUDEN, 12.11.2019

<https://www.duden.de/rechtschreibung/Schwund>

Treibhausgase, Klimaretter-Lexikon, 02.11.2019

<http://www.klimaretter.info/tipps-klima-lexikon/1897-treibhausgase-anthropogene>

Was ist Permafrost, Eventfive Bremen, 03.09.2019

<https://www.youtube.com/watch?v=MsnfdoVpTmw>

8.2 Andere Quellen

Behr H.D., Heft: Numerische Klimamodelle, Heft 3/4, 28. Jahrgang, 2002

Delaloye Reynald, Vonder Mühl Daniel, Heft: die Alpen, Ausschnitt: mit PERMOS Permafrost erforschen, S.29-32, 2002

http://archiv.alpen.sac-cas.ch/index/?user_fjx145_pi1%5BbookId%5D=1165

Götz Andreas, Raetzo Hugo, Artikel: Permafrost-mit dem Risiko umgehen, Band 128, 2002

<https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=sbz-004:2002:128::474#2505>

Hilbich Christin, Powerpoint: Geophysikalische Methoden zur Beobachtung von Tauprozessen und Quantifizierung des Eisgehalts im Permafrost

[http://www.temps-](http://www.temps-symposium.ch/files/talks/Hilbich_Geophysikalische_Methoden_Tauprozesse_Eisgehaltsquantifizierung_Permafrost.pdf)

[symposium.ch/files/talks/Hilbich_Geophysikalische_Methoden_Tauprozesse_Eisgehaltsquantifizierung_Permafrost.pdf](http://www.temps-symposium.ch/files/talks/Hilbich_Geophysikalische_Methoden_Tauprozesse_Eisgehaltsquantifizierung_Permafrost.pdf)

Käab Andreas, Mitteilungen: Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung von Naturgefahren im Hochgebirge, S.149-150, 1996

Keller Felix, Zehnder Ursula, Egli-Broz Helena, Lehrmittel: Permafrost und Klimawandel, Auflage 1, 2008

Krautblatter Michael, Kellerer-Pirklbauer Andreas, Gärtner-Roer Isabelle, Zeitungsartikel: Permafrost in den Alpen, Geographische Rundschau, S.22-29, Ausgabe 11, 2018

Nötzli Jeanette, Stephan Gruber, Buch: Verein zum Schutz der Bergwelt, Ausschnitt: alpiner Permafrost – ein Überblick, S.111-121, 2005

Piller Fabian, Probst Matthias, Dossier: Naturgefahren, S.185-200,

Schmitt D, Schüssler Manfred, Solanki Sami, Forschungsinfo: der Einfluss der Sonne auf das Erdklima, Max-Planck-Institut für Sonnenforschung, Info 2, 2009

<https://www.mps.mpg.de/442697/19Der-Einfluss-der-Sonne-auf-das-Erdklima.pdf>

Seifert Marlies, Heft: Patient Matterhorn, Schweizer Illustrierte, Nr.37, S.28-33, 2019,

Wanner Heinz, Gyalistras Dimitros, Luterbacher Jürg, Rickli Ralph, Salvisberg Esther, Schmutz Christoph, Buch: Klimawandel im Schweizer Alpenraum, 2000

Dossier: Gefahrenkarte, BAFU, S.1-2, 2005

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahregrundlagen/ Gefahrenkarten--intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html>

Faktenblatt: Hochwasser und Murgang, BAFU, 2015, S.1-2

Wegleitung: Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren, Kantonale Gebäudeversicherungen, S.1-105, 2005

9 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Umverteilung der Strahlungsenergie im Klimasystem
[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sun_climate_system_alternative_\(German\)_2008.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sun_climate_system_alternative_(German)_2008.svg)
02.11.2019
- Abbildung 2: Schematische Erklärung von Exzentrizität, Obliquität und Präzession
<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Erdbahnparameter>
31.10.2019
- Abbildung 3: Zusammenhang von der Mitteltemperatur und der Anzahl Sonnenflecken
Max-Planck-Institut für Sonnenforschung
01.11.2019
- Abbildung 4: Globale Temperaturentwicklung seit 1850
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-weltweit/globaler-klimawandel.html>
05.11.2019
- Abbildung 5: Schweizerische Temperaturentwicklung (Basel) seit 1760
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz.html>
15.11.2019
- Abbildung 6: Modellierter Temperaturverlauf in der Schwizer Alpen
<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html>
06.11.2019
- Abbildung 7: Permafrost-Messung am Matterhorn
<https://www.aotag.ch/de/portfolio-item/permafrost-messen-in-den-alpen/>
17.09.2019
- Abbildung 8: Schichtung und Temperaturverlauf des Permafrosts
Eigene Nachbearbeitung
<http://www.permos.ch/info.html>
04.09.2019
- Abbildung 9: Permafrost-Gliederung
Eigene Nachbearbeitung
<https://bildungsserver.hamburg.de/eis-und-schnee-nav/2121522/permafrost/>
04.09.2019

- Abbildung 10: Potenzielle Permafrost-Verbreitung in der Schweiz
https://map.geo.admin.ch/?zoom=1.2750000103314707&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.bafu.permafrost&layers_opacity=0.7&lang=de&topic=bafu&E=2665031.48&N=1181035.85
12.09.2019
- Abbildung 11: Logo von PERMOS
<http://www.permos.ch/index.html>
16.10.2019
- Abbildung 12: Schematische Entwicklung des Permafrostschwunds
Alpiner Permafrost – Ein Überblick
12.11.2019
- Abbildung 13: Temperaturentwicklung in Bohrlöchern
http://www.permos.ch/fig/PERMOS_BHT_eng-01.jpg
14.11.2019
- Abbildung 14: Perennierende Schneefelder unter dem Bortelhorn
Aufnahme von Cornelia Ammann
- Abbildung 15: Gefahrenstufen mit Legende
Eigene Nachbearbeitung
www.bafu.admin.ch/gefahrenkarten
15.11.2019
- Abbildung 16: Klassifikation der Sturzprozesse
Eigene Tabelle
- Abbildung 17: Steinschlag im Saastal
<https://www.vs.ch/de/web/sfcep/types-de-dangers>
20.11.2019
- Abbildung 18: Wildbachbett
Dossier Naturgefahren
20.11.2019
- Abbildung 19: Murgang im Illgraben
<https://www.wsl.ch/de/naturgefahren/murgang-und-geschiebe/murgang.html>
19.11.2019

10 Authentizitätserklärung

Ich bezeuge mit meiner Unterschrift, dass meine Angaben, über die bei der Abfassung meiner Maturaarbeit benützten Hilfsmittel und über mir allenfalls zuteil gewordene Hilfe in jeder Hinsicht der Wahrheit entsprechen und vollzählig sind.

Ort und Datum: _____

Unterschrift des Schülers: _____