

PERMAFROST IM KLIMAWANDEL

Klima macht Schule: Davos und Parc Ela

Grundlagen



Blockgletscher am Schaffläger über Davos.

Impressum

Autorin und Autor:

Gian Paul Calonder, Gemeinde Davos
Veronika Stöckli, Bergwelten 21 AG, Davos

Bildquellen:

Wo nicht anders vermerkt, stammen die Bilder von der Autorin oder dem Autor.

Das Projekt "Klima macht Schule: Davos und Parc Ela" wurde von der Gemeinde Davos für die Volksschulen in Davos initiiert und später in Zusammenarbeit mit dem Parc Ela auf die Schulen der Naturparkregion erweitert. Das Projekt wurde mit Unterstützung der Volksschule Davos, der Gemeinde Davos, der Meuli-Stiftung, dem Amt für Natur und Umwelt Graubünden, dem Verein Parc Ela und dem Bundesamt für Umwelt BAFU finanziell unterstützt.

Die Inhalte der Module orientieren sich am Davoser Klimafilm. Sie ergänzen das Themendossier zum Klimawandel für den Zyklus 3, welches GLOBE Schweiz für education21 entwickeln liess.

"Klima macht Schule: Davos und Parc Ela" behandelt die folgenden Themen als Module:

- Klima – gestern, heute, morgen
- Natürliche Ursachen von Klimaschwankungen
- Natur im Klimawandel
- Schnee im Klimawandel
- Gletscher im Klimawandel
- Permafrost im Klimawandel
- Wirtschaft und Gesellschaft im Klimawandel
- CO₂-Bilanz und Klimaschutz in der Gemeinde Davos

Jedes dieser Themen umfasst Grundlagen, Unterrichtsmaterialien für Schülerinnen und Schüler sowie methodisch didaktische Erläuterungen. Das vorliegende Dokument erläutert Grundlagen zum Thema **Permafrost im Klimawandel**.

Davos und Parc Ela, den 1. Dezember 2020

Permafrost

Wenn der Untergrund über mehrere Jahre Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufweist, so spricht man von Permafrost oder Dauerfrost. Permafrost ist ein Phänomen der nördlichen Breiten und des Hochgebirges und ist an mittleren Temperaturen unter 0°C gebunden. Auch in der Region Davos und im Parc Ela ist Permafrost in hohen Lagen nicht selten.

Erwärmt sich das Klima, so fällt die Temperatur seltener unter den Gefrierpunkt. Der Schneefall weicht dem Regen und die winterliche Schneedecke verweilt weniger lang in der Landschaft. Was bedeutet dies für den Permafrost, der auch als eisiger Klebstoff der Berge bezeichnet wird. Sind zukünftig Wege und Bauten noch sicher?

Das vorliegende Modul erläutert, wo der Permafrost bei uns vorkommt, wie der Klimawandel den Auftauprozess beeinflusst, welche Folgen das haben kann für das Leben im Gebirge und wie die Region Davos und der Parc Ela davon betroffen sind.

Das Modul soll Schülerinnen und Schüler dabei unterstützen, das Phänomen Permafrost besser zu verstehen und abzuschätzen was mit dem Permafrost in Zeiten des Klimawandels passieren wird.



Im Davoser Klimafilm handelt das Modul „Tauwetter im Untergrund“ vom Permafrost im Klimawandel.

ZUSAMMENFASSUNG

Permafrost ist ein weit verbreitetes Phänomen in kalten Gebieten weltweit. Permafrost ist das ganze Jahr hindurch kälter als 0 °C, ob im Fels, in Schutthalden, Moränen oder im gewachsenen Boden. Der ständig gefrorene Bereich kann über hundert Meter mächtig sein. Nur eine dünne Schicht an der Erdoberfläche taut zwischenzeitlich auf. Blockgletscher sind eine besondere Ausprägung des ständig gefrorenen Untergrunds. Das Eis/Schuttgemisch kriecht allmählich talwärts, ähnlich einem Gletscher.

Kälte, geringe Sonneneinstrahlung und eine Schneedecke, die bis in den Frühsommer hinein den Untergrund gegen die warme Atmosphäre isoliert; das sind die Bedingungen, wie sie in Gebieten mit Permafrost typisch sind. In den Alpen kann ab einer Höhe von 2400 m ü. M. Permafrost vorkommen. Schweizweit liegen schätzungsweise 5 % der Landesfläche im Permafrost.

Mit dem Klimawandel ändert sich die Umwelt im Gebirge markant. Die Nullgradgrenze steigt, die Luft wird wärmer, es regnet mehr und schneit weniger und die Schneedecke schwindet im Frühjahr rascher. Auf diese Veränderungen reagiert auch der Permafrost. Der gefrorene Untergrund wird wärmer, Blockgletscher kriechen rascher talwärts und das Schutt- oder Fels-Eis-Gemisch verliert an Halt, wenn das Eis schmilzt. Insbesondere bei grosser Hitze oder nach starken Regenfällen werden Sturzereignisse aus Permafrostgebieten festgestellt, dies auch in der Region Davos und im Parc Ela. Grundsätzlich reagiert der Permafrost nur sehr langsam auf den Klimawandel.

Auftauender Permafrost bildet ein Risiko, sobald Menschen und Infrastruktur betroffen sind. Nicht selten queren Wanderwege oder Passtrassen Permafrostvorkommen; Lawinenverbauungen, Bergrestaurants oder Seilbahnstützen sind gar über dem gefrorenen Boden errichtet worden. Vorbeugende Massnahmen helfen, das Risiko durch einsackende Böden oder Steinschlag gering zu halten. Bauten im Permafrost sollten grundsätzlich vermieden werden. Wird dennoch gebaut, so gilt es in Zeiten des Klimawandels den Permafrost und seine Dynamik bestmöglich zu berücksichtigen. Trotz Klimawandel wird der Permafrost zumindest in den höchsten Lagen unserer Region noch lange ein interessantes Phänomen bleiben.

ORIENTIERUNG

Permafrost ist ein Untergrund, der das ganze Jahr hindurch gefroren bleibt, also auch während der warmen Jahreszeit. Grosse Kälte, geringe Sonneneinstrahlung und Schnee bis weit in den Sommer hinein sind dem Permafrost förderlich.

Permafrost gibt es weltweit, vor allem in nördlichen Breiten und im Gebirge. In der Schweiz liegen ungefähr 5 % der Landesfläche im Permafrost. Permafrost betrifft somit ein Gebiet das zurzeit mehr als doppelt so gross ist, als die Gesamtfläche der Schweizer Gletscher. Auch in den Bergen rund um Davos und im Parc Ela kommt Permafrost vor.

Mit dem Klimawandel dürfte Permafrost früher oder später und zumindest stellenweise verloren gehen. Nicht zuletzt weil sein Zerfall auch Risiken birgt, wird seine Entwicklung eingehend untersucht. Allerdings noch nicht sehr lange. Daten und Erkenntnisse rund um den Permafrost in den Alpen sind noch jung. Erst in den späten 1940er Jahre wurden hier Permafrost-Vorkommen entdeckt. Seit den späten 1960er Jahren wird das Phänomen eingehend untersucht und seine Dynamik erforscht, auch in unserer Region.

Das vorliegende Modul fasst wichtige Erkenntnisse zu diesem Phänomen zusammen und zeigt, was mit dem Permafrost passiert, wenn es wärmer wird. Wir gehen den folgenden Fragen nach:

- Was ist Permafrost und wo kommt er bei uns vor?
- Welche Umweltbedingungen fördern Permafrost?
- Wie wirkt der Klimawandel auf den Permafrost und was können wir tun?

WAS IST PERMAFROST UND WO KOMMT ER BEI UNS VOR?

STRUKTUR

Permafrost wird schematisch in eine Auftauschicht und den eigentlichen Permafrostkörper unterteilt (vgl. Abbildung 1). Die Auftauschicht bleibt nicht ständig gefroren. Im Sommer erwärmt sich diese Deckschicht über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Auftauschicht ist je nach Standort wenige Zentimeter bis mehrere Meter dick. Unter der Auftauschicht liegt der eigentliche Permafrostkörper. Hier herrschen typischerweise Temperaturen von -3 bis $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Permafrostkörper kann einige Meter bis über hundert Meter in die Tiefe reichen. Unterhalb des Permafrostkörpers, an der Permafrostbasis, ist es über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ warm, so wie in einem „normalen“ Untergrund. Ab hier nehmen die Temperaturen wieder zu, und zwar um rund $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro 100 m , entsprechend dem geothermischen Gradienten.

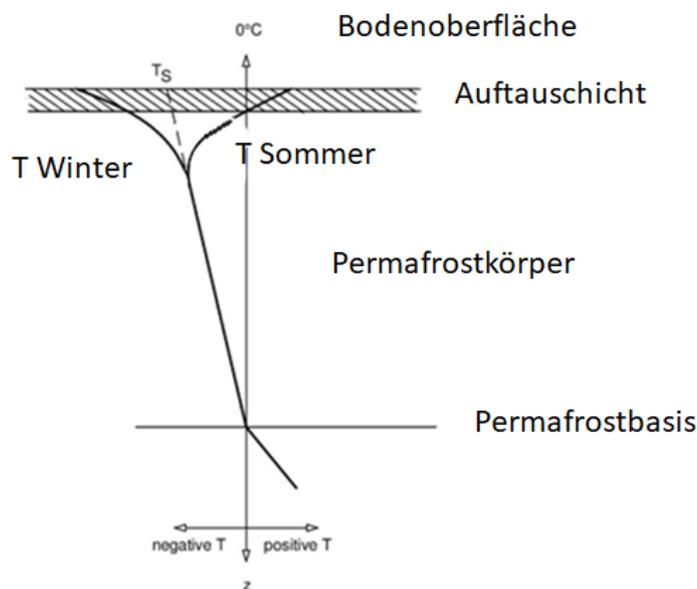


Abbildung 1. Schichtung und Temperaturverhältnisse im Permafrost. Nach Noetzli et al. 2005.

Die Temperatur im Permafrost liegt sehr nahe an der Phasengrenze des Wassers von fest zu flüssig. Je nach Temperatur weist das Gemenge aus Gestein, Eis, Wasserdampf und Luft unterschiedliche Materialeigenschaften auf. Ist der Permafrost kälter als ungefähr $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ist das Gemenge stabil, denn das Eis wirkt wie ein Klebstoff. Das Eis wirkt auch als Barriere und bewirkt, dass kaum Wasser in den Untergrund versickern kann.

VERBREITUNG

Permafrost ist in unseren Breiten ein Phänomen des Gebirges. Oberhalb von 2400 m ü. M. ist in der Regel mit Permafrost im Untergrund oder im Fels zu rechnen. Optimale Bedingungen für den Permafrost herrschen in Regionen, deren Klima eher kontinental geprägt ist. Also dort, wo die Winter besonders kalt sind.

Permafrost ist in der Region Davos und auch in der Region des Parc Ela weit verbreitet. Dies zeigen Ausschnitte aus der Permafrost- und Bodeneiskarte (vgl. Abbildung 2 und 3).

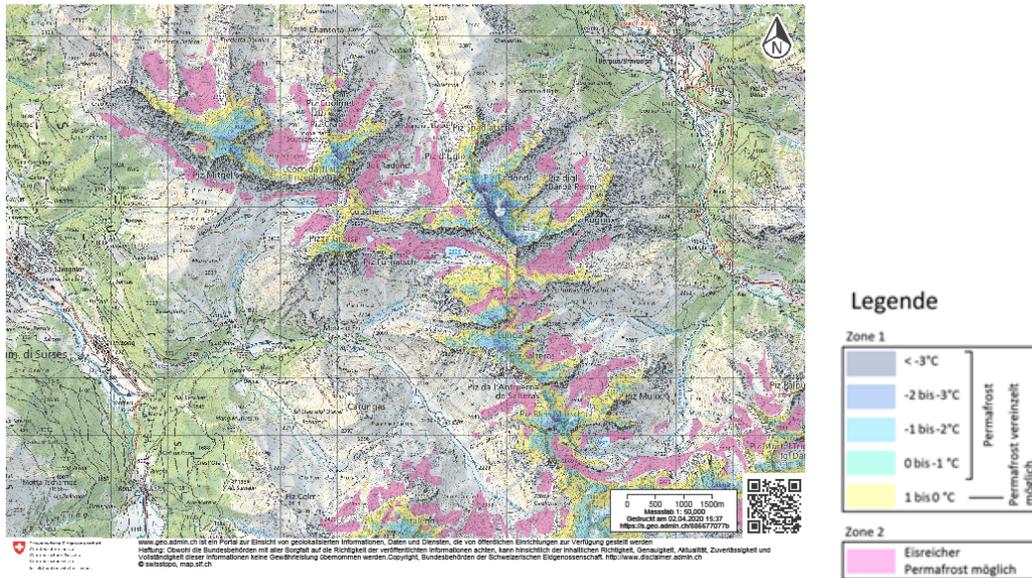


Abbildung 2. Mögliche Permafrost-Vorkommen bei den Bergüner-Stöcken im Parc Ela. Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

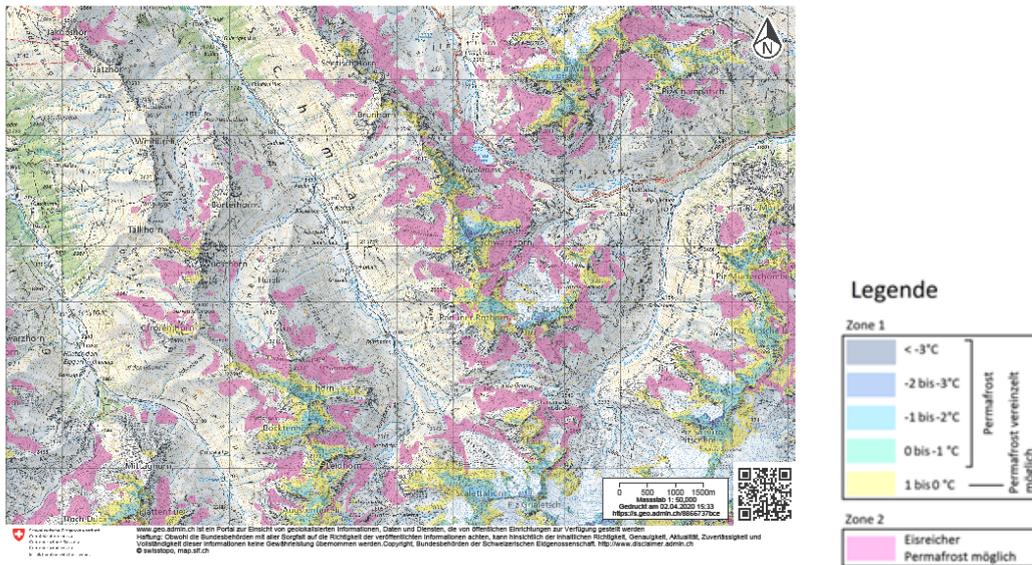


Abbildung 3. Mögliche Permafrost-Vorkommen rund um das Schwarzhorn bei Davos. Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

AUSPRÄGUNGEN

Permafrost kann in verschiedenartigem Untergrund vorkommen, so im gewachsenen Boden, im Sediment, in Moränen, Schuttfächern oder im Fels. Permafrost an sich ist nicht sichtbar. Er liegt

entweder unter seiner Auftauschicht, unter Schutt oder ist im Fels verborgen. Gut zu sehen ist er dann, wenn bei Bauarbeiten oder Felsabbrüchen das Eis im Untergrund zum Vorschein kommt.

Bestimmte Zeichen in der Landschaft weisen auf Permafrost im Untergrund hin. Beispiele sind Schneeflecken, die bis in den Sommer liegen bleiben (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4. Schneefelder im Sommer sind ein Indiz für Permafrost im Untergrund, wie hier am Gorihorn bei Davos.

Ein anderes Beispiel sind Blockgletscher (vgl. Abbildungen 5 und 6). Ein Blockgletscher ist ein Gemenge aus Schutt und Eis, das unter der Wirkung der Schwerkraft talwärts kriecht, ähnlich einem Gletscher. Blockgletscher kriechen sehr langsam, und zwar um 0,1 bis 3 m pro Jahr. Die Bewegungen spiegeln sich in den typischen teigartigen Wülsten wider.



Abbildung 5. Blockgletscher bei der Wiss Rüfi (links) und am Gfrohrenhorn im Sertig (rechts).



Abbildung 6. Blockgletscher bei Muottas Muragl (links) und am Piz Corvatsch (rechts), beide im Engadin. Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

PERMAFROST AM FLÜELAPASS

Mit der Erkenntnis, dass Permafrost auch in alpinen Lagen vorkommt, wuchs das Interesse am Thema. Die Forschenden wollten besser verstehen, wie kalt Permafrost ist, wie tief er in den Untergrund reicht und wie er sich im Verlauf eines Jahres oder Jahrzehnts verändert. Um diesen Fragen nachzugehen, wurden an verschiedenen Standorten Bohrlöcher mit Messgeräten ausgerüstet, um Temperatur, Bewegungen oder freies Wasser zu erfassen.

Die Forschung rund um den Permafrost ist im Messverbund PERMOS verbunden. Im Kanton Graubünden wird der Permafrost im Gebiet des Muottas Muragl bei Pontresina, am Corvatsch-Murtèl oder am Flüelapass untersucht. Am Corvatsch werden seit 1987 Daten erhoben, was für das noch junge Forschungsgebiet eine lange Zeit ist.

Der Standort am Flüelapass liegt über dem Schottensee. An diesem Standort wurde der Permafrost bereits in den 1970er Jahren detailliert untersucht. Seit 2003 wird er hier systematisch beobachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Permafrostkörper in der Schutthalde ungefähr 10 m in die Tiefe reicht und dass die Auftauschicht ungefähr 3 m misst. Die Dauer, während der die Auftauschicht positive Temperaturen verzeichnet, reicht von 106 bis 159 Tage pro Jahr.

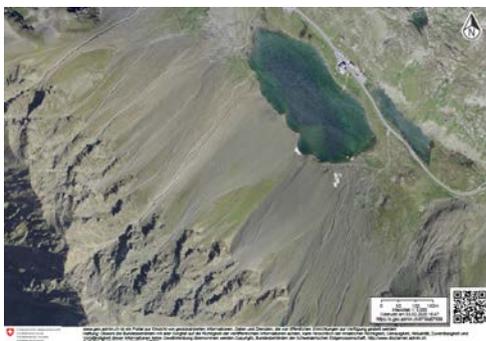


Abbildung 7. Fels und Schutfächer südwestlich des Schottensees sind stellenweise mit Permafrost durchsetzt. Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

WELCHE UMWELTBEDINGUNGEN FÖRDERN PERMAFROST?

Permafrost ist grundsätzlich an ein kaltes Klima gebunden. Ob Permafrost an einem bestimmten Standort überhaupt vorkommt, hängt auch vom Gelände (Höhenlage und Exposition) und den geologischen Bedingungen ab. Die folgenden Abschnitte erläutern dies.

EXPOSITION

An Hängen oder Felswänden, die nach Süden fallen, ist Permafrost ab einer Höhe von 3000 m ü. M. wahrscheinlich. Fällt das Gelände hingegen nach Norden oder Nordwesten kann Permafrost bereits auf 2400 m ü. M. vorkommen (vgl. Abbildung 8). Anhand dieser vertikalen Verteilung zeigt sich: Je mehr direkte Sonneneinstrahlung auf den Untergrund oder den Fels trifft, desto seltener ist er mit Permafrost durchsetzt.

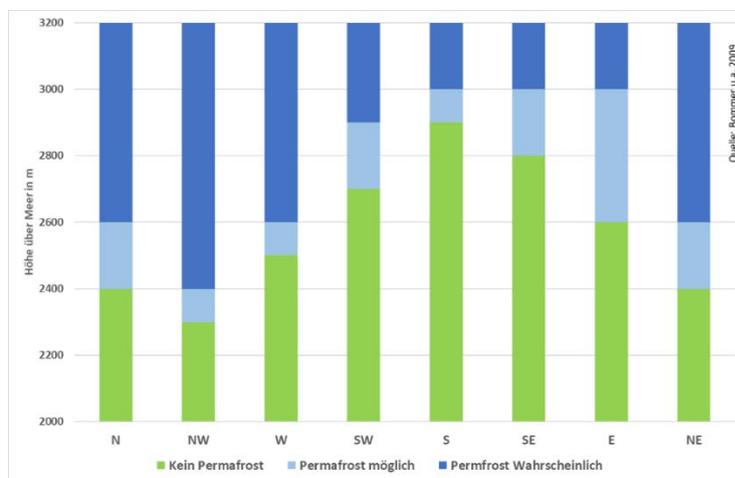


Abbildung 8. Nördliche Expositionen sind bereits in tieferen Lagen mit Permafrost als südliche.

Quelle: Bommer et al., 2009.

KLIMA

Während Exposition, Höhenlage oder Geologie über die Zeit mehr oder weniger stabil bleiben, ist das Klima veränderlich. Die klimatischen Bedingungen wirken in einem komplexen Zusammenspiel von Sonneneinstrahlung, Temperatur, Schneebedeckung und Regen auf den Permafrost. Entscheidend ist letztlich, ob und wie viel Wärme in den Untergrund eindringen kann. Die Wärme gelangt zum Beispiel über die Sonneneinstrahlung oder über warme Luft in die Auftauschicht. Von hier dringt die Wärme in tiefere Bodenschichten oder in den Fels, und zwar umso effektiver, je kompakter die Umgebung ist, resp. je weniger Luft sie enthält. Im Fels ist der Wärmefluss deutlich ausgeprägter als im Lockergestein. Wärme kann auch mit dem Regenwasser in den Untergrund gelangen.

Die Schneedecke spielt beim Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Untergrund eine entscheidende Rolle. Der Schnee reflektiert einerseits die Sonnenstrahlung (Albedo) dadurch wird die Umgebung weniger stark aufgewärmt und andererseits kann der Schnee wegen seiner isolierenden

Eigenschaften den Wärmefluss in den Untergrund blockieren. Liegt ausreichend Schnee, so kann weder Wärme eindringen, noch der Untergrund auskühlen. Je nachdem wie warm Luft und Schnee sind, erwärmt und reduziert sich der Permafrost oder er kühlt ab und baut sich auf. Die Tabelle 1 listet Klimafaktoren, welche für das Vorkommen von Permafrost entscheidend sind.

Tabelle 1. Klimafaktoren, die den Permafrost fördern oder reduzieren.

Klimaparameter	Wirkung auf Permafrost	Begründung
Sonneneinstrahlung	-	Sonne wärmt.
Lufttemperatur	-/+	Warme Luft wärmt, kalte kühlt.
Schnee	-/+	Isoliert mehr oder weniger gegen Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur.
Regen	-	Leitet Wärme in den Untergrund.

- negative Wirkung baut den Permafrost ab

+ positive Wirkung baut den Permafrost auf

WIE WIRKT DER KLIMAWANDEL AUF DEN PERMAFROST?

Mit dem Klimawandel ändern sich auch die Umweltbedingungen für den Permafrost. Die zunehmend warmen Temperaturen bringen den Schnee im Frühjahr rascher zum Schmelzen, sodass die Sonne und die warme Luft länger auf den Permafrost einwirken können. Die Schneefallgrenze steigt an, sodass der Niederschlag auch in grossen Höhen zunehmend als Regen fällt. Gleichzeitig nimmt der Niederschlag im Winter eher zu, sodass der Schnee als mächtige Isolationsschicht den Untergrund im Winter vor Kälte und im Frühjahr vor Wärme schützt.

Die Schneedecke spielt also eine entscheidende Rolle, sie ist aber von Jahr zu Jahr sehr wechselhaft. Tendenziell weisen die entscheidenden Klimafaktoren auf eine Erwärmung des Permafrosts hin (vgl. Tabelle 1).

Wie sich der Permafrost vor dem Hintergrund des Klimawandels tatsächlich verändert, zeigt ein Blick auf die Messwerte. Hier zeigt sich folgender Trend: Das Eis wird wärmer, die Auftauschicht wird mächtiger, die Blockgletscher kriechen rascher und ihr Eis schwindet. Besonders ausgeprägt reagiert der Permafrost auf langandauernde Phasen mit warmen Temperaturen. So waren in den heissen Sommern 2015 und 2018 die Auftauschichten so gross wie nie zuvor seit Messbeginn.

Die Messreihen im alpinen Permafrost sind noch kurz, sie bestätigen aber, dass der Permafrost allmählich wärmer wird und stellenweise schrumpft. Die Daten bestätigen zudem, dass die Schneebedeckung entscheidend ist. Auch in der wärmsten hydrologischen Vierjahresperiode seit 1864, in den Jahren 2015 bis 2018, hat sich der Permafrost zeitweise abgekühlt. Es war dies in den Jahren 2017 und 2018 der Fall, als ausserordentlich viel Schnee lag. Demgegenüber lag in den vorhergehenden Wintern 2015 und 2016 nur wenig Schnee, weshalb in dieser Zeit der Permafrost wärmer wurde.

Die Abbildung 9 zeigt diesen Befund beispielhaft. Sie beschreibt den Permafrost vor dem Hintergrund der mittleren monatlichen Temperatur und des Niederschlags von Segl im Engadin. An den nicht weit entfernten Permafrost-Messstationen am Piz Corvatsch und im Gebiet Muottas Muragl werden sowohl die Temperatur des Permafrosts als auch die Fliessgeschwindigkeit von zwei Blockgletschern erfasst (vgl. Tabelle 2).

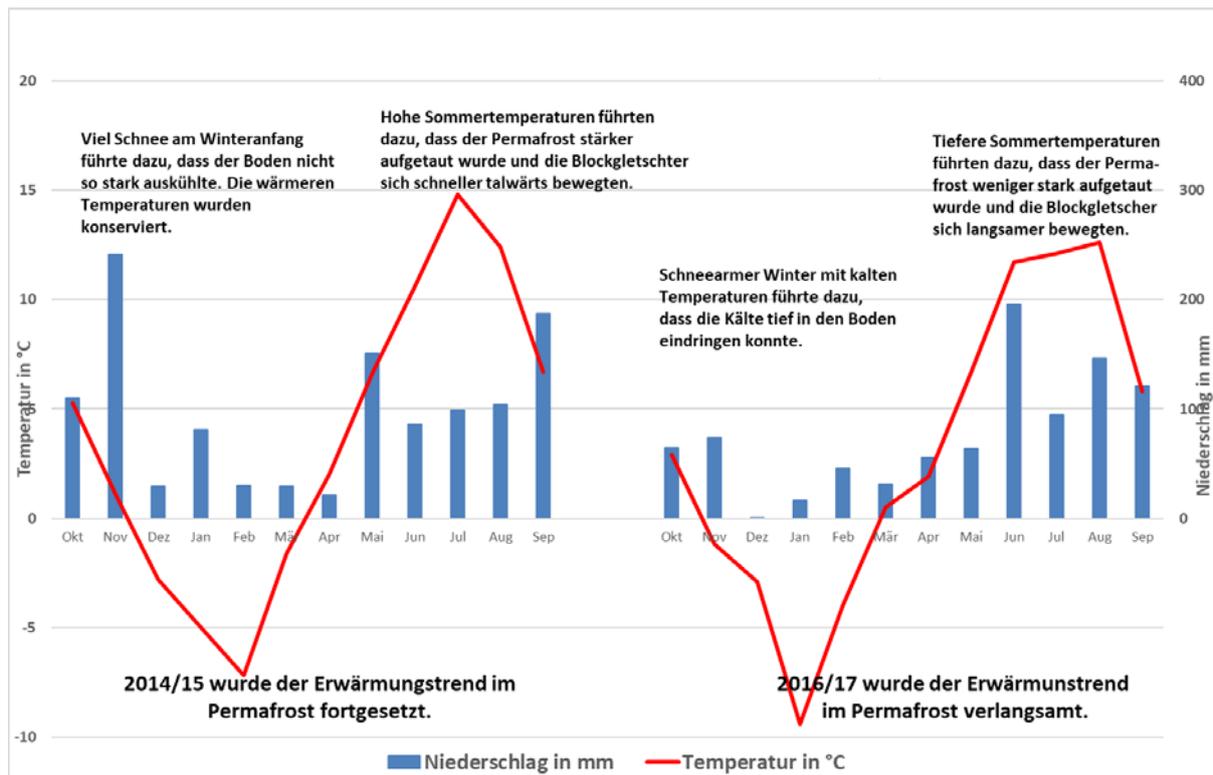


Abbildung 9. Temperatur und Niederschlag in den hydrologischen Jahren 2014/2015 und 2016/2017 an der Messstation in Segl im Engadin (1804 m ü. M.) und die Dynamik im Permafrost auf Muottas Muragl. Daten: MeteoSchweiz und PERMOS, 2019.

Das Wechselspiel von Temperatur oder Sonneneinstrahlung und Schnee kann das Verhalten des Permafrostes weitgehend erklären.

Die Messwerte aus dem Engadin bestätigen, dass sich der Permafrost erwärmt. In Schutthalden oder Blockgletschern geschieht dies sehr langsam, wie im vorliegenden Fall. Denn einerseits ist sehr viel Energie nötig, um Eis zu schmelzen und andererseits liegt der Permafrostkörper unter einer isolierenden Schuttschicht.

Tabelle 2. Mittlere Fliessgeschwindigkeit der Blockgletscher am Piz Corvatsch und bei Muottas Muragl im Engadin (2014/15 und 2016/17). Daten: PERMOS, 2019.

Standort Blockgletscher	Höhenlage [m ü. M.]	Fliessgeschwindigkeit 2014/15 [m/Jahr]	Fliessgeschwindigkeit 2016/17 [m/Jahr]
Piz Corvatsch	2630-2800	0.11	0.08
Muottas Muragl	2490-2750	1.02	0.9

Der Permafrost im Fels ist den klimatischen Veränderungen viel direkter ausgesetzt, als jener in Schutthalden und Blockgletschern. Das kompakte Gestein leitet die Wärme effektiver als luftdurchsetzte Schutthalden, sodass der Permafrost sich rascher erwärmt. Dies kann schliesslich dazu führen, dass die Felswände ihren Zusammenhalt verlieren und abbrechen.

Der Permafrost reagiert nicht nur in den Alpen auf den Klimawandel, sondern auch im hohen Norden. Die auftauenden Permafrostböden sind dort nicht nur ein Risiko für die Infrastruktur, sie sind auch wegen der austretenden Treibhausgase problematisch. Warme Temperaturen beschleunigen in den Torfböden den Abbau von organischem Material. Dabei entstehen Treibhausgase, vor allem Methan. Forschende haben festgestellt, dass mehr Treibhausgase entweichen, als die Vegetation über den Sommer in der Form von Kohlenstoff wieder binden kann.

INSTABILER BAUGRUND

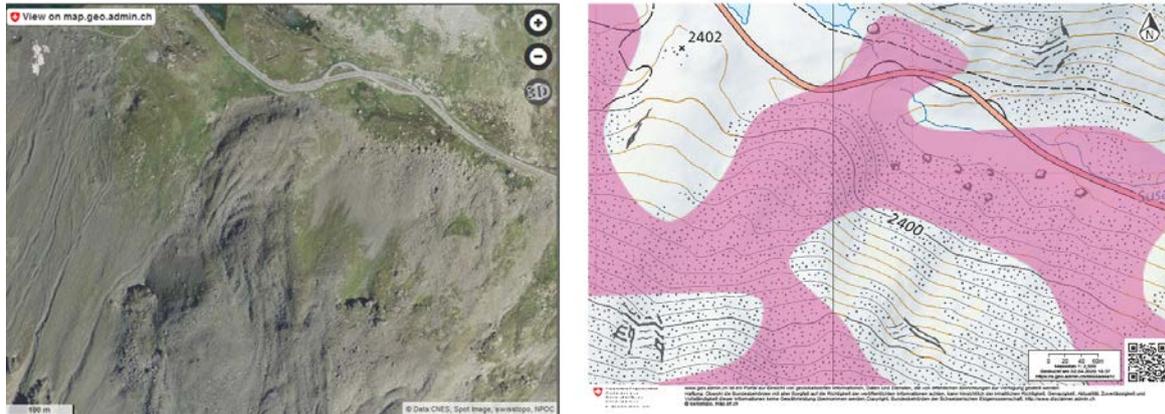
In den vergangenen Jahren ist viel gebaut worden, auch hoch oben im Gebirge. Einige Strassen, Seilbahnmasten, Bergrestaurants oder Lawinerverbauungen stehen auf Permafrost und damit auf potenziell instabilem Untergrund. Denn wenn das Eis taut, so hinterlässt es Hohlräume im Untergrund. In der Folge sackt der Boden ab und die darüber errichteten Bauten werden beschädigt (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 10. Verschobene Lawinerverbauungen und Steinschlagnetze weisen auf Bewegungen des Permafrosts im Untergrund hin (Fotos: S. Margreth SLF).

Ein derartiger Schaden könnte sich auch am Flüelapass bei Davos ereignen. Denn die Permafrost- und Bodeneiskarte geht bei einem Strassenabschnitt in unmittelbarer Nähe zur Passhöhe von eisreichem Permafrost im Untergrund aus (vgl. Abbildung 11). Sollte das Eis dort schmelzen, so würde die Strasse an dieser Stelle absacken.

Ein ähnliches Bild zeigt sich am Albulapass. Hier liegt ein längerer Strassenabschnitt unterhalb der Passhöhe auf Bergüner-Seite möglicherweise in eisreichem Permafrost. Die Passtrasse wurde auf diesem Teilstück bisher nicht geteert, was mit den instabilen Verhältnissen des Bodens zu tun haben könnte. In den kommenden Jahrzehnten wird es sich zeigen, ob die Strasse beschädigt wird oder nicht.



**Abbildung 11. Blockgletscher, der in Richtung Flüelapassstrasse kriecht. Die Permafrost- und Bodeneisekarte (rechts) geht von eisreichem Permafrost im Untergrund aus (rosa markierte Fläche).
Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo.**

STEINSCHLAG UND FELSSTURZ

Das Eis im des Permafrosts hält den Schutt oder Fels in seiner unmittelbaren Umgebung zusammen. Wird dieses Eis wärmer als ungefähr $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, so lässt dieser Zusammenhalt nach – Fachleute sprechen von nachlassender Scherfestigkeit. Steine oder gar Blöcke können sich aus dem Eis lösen.

Nicht jeder Steinschlag oder Felssturz im Gebirge ist auf tauenden Permafrost zurückzuführen. Wenn jedoch bei einem Felssturz im Anrissgebiet blankes Eis sichtbar wird, kann das ein Indiz dafür sein. In den ausserordentlich heissen Sommern 2003 und 2015 wurden im Alpenraum ungewöhnlich viele Felsstürze aus Höhenlagen verzeichnet, in denen der Permafrost weit verbreitet ist.



Abbildung 12. Felssturzmaterial auf dem Vadret da Porchabella am Piz Kesch, 2014. Foto: M. Phillips, SLF.

Einer dieser Felsstürze ereignete sich z. B. im Parc Ela. So brach im Februar 2014 am Piz Kesch ein Felsfeiler ab und grosse Brocken stürzte auf den darunterliegenden Vadret da Porchabella (vgl. Abbildung 12). Die Analyse hat ergeben, dass Felsbrücken brachen, die das Gestein ursprünglich zusammenhielten. Das Ereignis selbst hat eine längere Vorgeschichte. Zunächst hat der Druck auf den Fels nachgelassen, weil das Eis allmählich geschrumpft ist. Später sind die Spalten und Klüfte im Fels wieder mit Schnee, Wasser und Eis aufgefüllt worden, was den Fels erneut unter starkem Druck setzte. Schliesslich ist der Felsfeiler kollabiert.

Aus dem Permafrost lösen sich Steine und Felsbrocken überwiegend oberhalb von 3000 m ü. M. Talböden und Siedlungsgebiete werden nur selten erreicht. Dennoch können sie Menschen und Infrastruktur treffen.

VORSORGLICHE MASSNAHMEN

Weil der Permafrost in den Alpen besser erforscht wird, sind auch die Risiken besser bekannt, die von ihm ausgehen. Um Schäden zu vermeiden wurden verschiedentlich Massnahmen entwickelt, die vorwiegend präventiv die Gefahren aus dem Permafrost abwenden können. In Tabelle 3 werden einige Beispiele aufgeführt.

Tabelle 3. Herausforderungen, ihre Zusammenhänge und Auswirkungen sowie mögliche Massnahmen in und um den Permafrost in den Alpen. Quellen: Bommer 2009, Landwing und Phillips, 2015.

Herausforderung:	Zusammenhänge und Auswirkungen:	Mögliche Massnahmen:
Bauen im Permafrost	Temperatur wird durch das Bauwerk selber in den Permafrost oder in den anstehenden gefrorenen Fels geleitet und verstärkt den Auftauereffekt.	Mittels Bohrungen die Untergrundverhältnisse erfassen und beurteilen bevor gebaut wird. Hohlraum zwischen Bauwerk und Fels lassen. Boden unter Bauwerk abkühlen.
Bauen im Permafrost	Bewegungen des auftauenden Permafrostes müssen aus Sicherheitsgründen durch das Bauwerk (z.B. Seilbahnmast oder Seilbahnstation) ausgeglichen werden.	Position des Seilbahnmasten wird mittels Schienen, die im Fundament eingelegt worden sind, von Zeit zu Zeit angepasst. Fundament der Seilbahnstation wird mittels hydraulischer Pumpe um den Betrag der Absenkung angehoben.
Skipisten und Wanderwege im Permafrostgebiet	Auftauender Permafrost in Zusammenhang mit Wassereintrüben führt zu Lochbildungen, Setzungen und Sackungen im Gelände.	Je nach Situation werden die beschädigten Stelle umgangen oder mit Material aufgefüllt oder ausgeglichen.
Infrastruktur unterhalb eines Permafrostgebietes	Auftauender Permafrost im Fels führt zu Steinschlag.	Wenn das Risiko gross ist, dass Infrastruktur betroffen sein wird, wird diese mit Steinschlagnetzen möglichst Nahe an der Abbruchstelle geschützt.
Infrastruktur unterhalb eines Permafrostgebietes	Auftauender Permafrost destabilisiert Fels- und Lockergestein und kann so zu Felsstürzen oder in Zusammenhang mit Niederschlägen zu Murgängen führen.	Wenn das Risiko gross ist, dass Infrastruktur betroffen sein wird, wird diese mit Schutzdämmen, Geschiebesammlern etc. im Talbereich geschützt.
Quelle: Bommer, 2009 und Landwing und Phillips, 2015		

SCHLUSSBEMERKUNG

Permafrost ist ein Phänomen kalter Gebirgsregionen und deshalb ist er auch bei uns weit verbreitet. Der ständig gefrorene Untergrund war bis vor wenigen Jahrzehnten nur aus nördlichen Regionen bekannt. In den Alpen wurde er erst Ende der Sechziger Jahre entdeckt.

Der Permafrost ist ein Produkt von Klima und Standort. Dabei scheint die Schneedecke und ihre isolierende Wirkung ausschlaggebend zu sein. Zwar sind die Datenreihen noch kurz, dennoch zeigt sich, dass der Permafrost tendenziell wärmer wird.

Auftauender Permafrost ist keine Naturgefahr. Erst in Kombination mit andern Faktoren wie Geologie, Geländeneigung, Klüfte oder Risse kann er Naturgefahren wie Steinschlag oder Felssturz auslösen und so zum Risiko werden. Zum Risiko wird der auftauende Permafrost, wenn Werte betroffen sind, wie zum Beispiel Bauten oder Menschenleben. Für dieses Risiko ist nicht nur der Klimawandel verantwortlich. Denn die Bauten werden in alpinen Regionen immer zahlreicher und damit wächst das Schadenspotenzial.

Permafrost ist eine interessante Naturerscheinung, dessen Dynamik in Zeiten des Klimawandels noch einige Fragen offen lässt.

LITERATURVERZEICHNIS

- BAFU (Bundesamt für Umwelt; Hrsg.). 2016. Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bern, Umwelt-Zustand Nr. 1629, 108 S.
- Bommer C, Phillips M, Keusen H, Teyssere P. 2009. Bauen im Permafrost. Ein Leitfaden für die Praxis. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 126 S.
- Davies MCR, Hamza O, Harris C. 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 137-144.
- Furrer G, Fitze P. 1970. Beitrag zum Permafrostproblem in den Alpen. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich*, Jahrgang 115, Heft 3: 353-368.
- Häberli W. 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). Nr 17 Hrsg. Zürich: Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- Häberli W. 1985. Creep of Mountain Permafrost: International structure and flow of alpine rock glaciers. Zürich: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie.
- Häberli W, M Wegmann und D Vondermühl. 1997. Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 90: 407-414.
- Häberli W, Maisch M. 2007. Klimawandel im Hochgebirge. In Wilfried Endlicher und Wilhelm Friedrich Gerstengabe (Hrsg.). *Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke, Ausblicke*. Berlin und Potsdam, 142 S.
- Kenner R, Phillips M. 2017. Fels- und Bergstürze in Permafrost-Gebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis. Schlussbericht Arge Alp Projekt ‚Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze‘. Davos.
- Landwing M, Phillips M. 2015. Permafrost in den Alpen. In *Praxis Geographie* Westermann Verlag (Hrsg). Mensch und Relief. Anthropogeomorphologie. Ausgabe Januar Heft 1 / 2015. S. 16-25.
- Natali SM, Watts JD, Zona D. 2019. Large loss of CO₂ in winter observed across the northern permafrost region. *Nature Climate Change*, Volume 9: 852-857.
- Naturwissenschaften Schweiz. 2017. Fortschreitende Erwärmung des alpinen Permafrosts [online]. Medienmitteilung vom 06.02.2017. Abgerufen am 25.8.2019.
- NCCS (Hrsg.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.
- Noetzli J, Gruber S. 2005. Alpiner Permafrost – ein Überblick. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt (München)*, 70. Jahrgang: 111 – 121.
- Noetzli J, Christiansen H, Deline H, Gugliemin P, Isaksen M, Romanovsky K, Streletskiy. 2018. Permafrost thermal state. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), S20-S22.

Noetzli J, Phillips M. 2019. Mountain permafrost hydrology. Eine Studie im Rahmen des NCCS Themenschwerpunktes "Hydrologische Grundlagen zum Klimawandel" des National Centre for Climate Services.

PERMOS (Swiss Permafrost Monitoring Network). 2019. Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Noetzli J, Pellet C and Staub B (eds.), Glaciological Report Permafrost No. 16–19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 104 pp.

Phillips M, Wolter A, Lüthi R, Amann F, Kenner R. & Bühler Y. 2017. Rock slope failure in a recently deglaciated permafrost rock wall at Piz Kesch (Eastern Swiss Alps), February 2014.

Phillips M. 2016. Informationen zum Permafrost am Flüelapass. Mündliche Auskunft.

SLF (WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF). 2020. Permafrost Monitoring [online]. www.slf.ch. Abgerufen am 3.2. und am 26.3. 2020.

Staub B. 2015. The evolution of mountain permafrost in the context of climate change – towards a comprehensive analysis of permafrost monitoring data from the Swiss Alps. THESIS Presented to the Faculty of Science of the University of Fribourg, Suisse.

Vaks A, Gutareva AS, Breitenbach SFM, Avirmed E, Mason AJ, Thomas AL, Osinzev AV, Kononov AM, Henderson GM. 2013. Speleothems Reveal 500,000-Year History of Siberian Permafrost. *Science* 12 Apr 2013 : 183-186.

Wikipedia.2020. Scherfestigkeit (online). www.wikipedia.org. abgerufen am 1.4.2020.

Zenklusen Mutter E, Blanchet J, Phillips M. 2010. Analysis of ground temperature trends in Alpine permafrost using generalized least squares. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115.