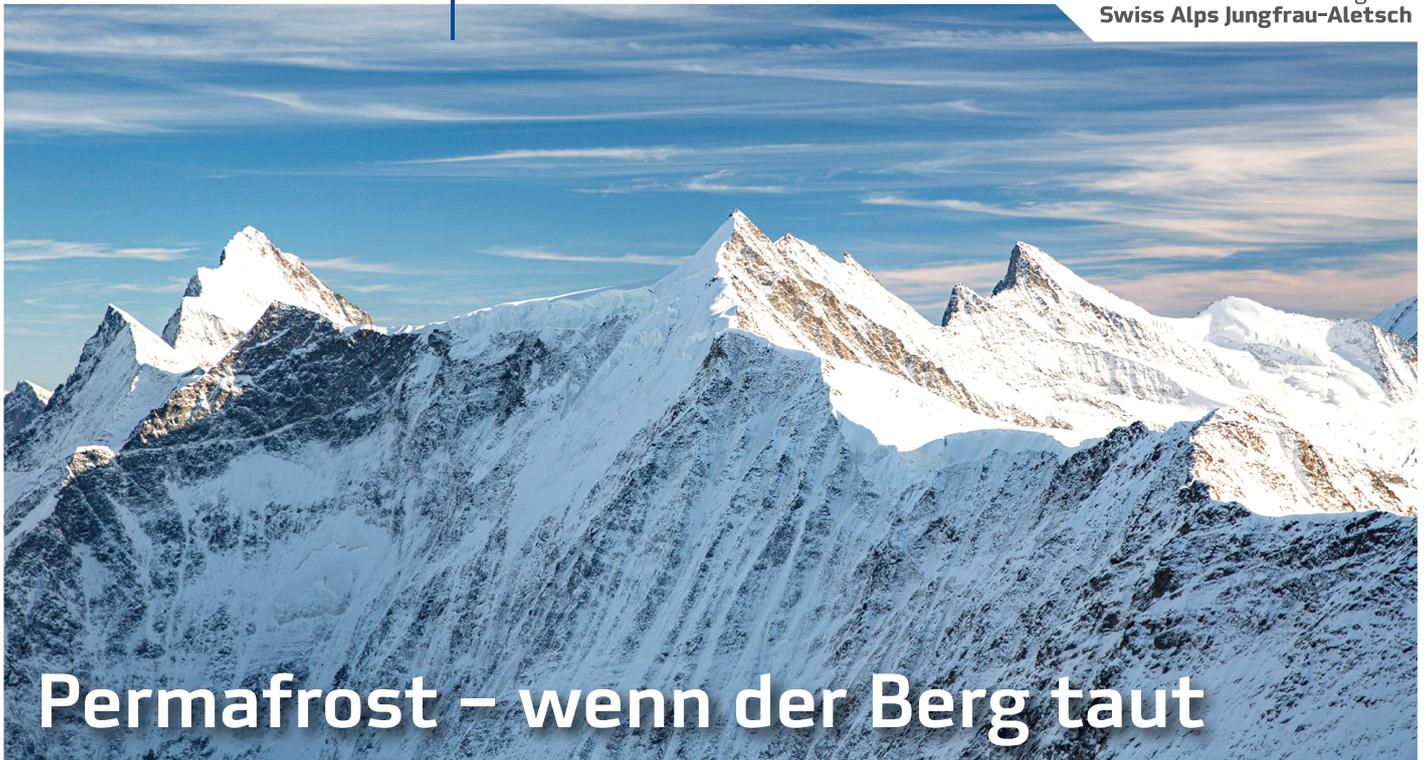


einblicke ausblicke



UNESCO World Heritage
Swiss Alps Jungfrau-Aletsch



Permafrost – wenn der Berg taut

in Kürze

- Als Permafrost bezeichnet man Untergrund, dessen Temperatur während mehrerer Jahre nicht über 0 °C steigt.
- Im Welterbe-Perimeter ist Permafrost ein wichtiges landschaftsprägendes Element: 11 % der Fläche ist von Permafrost betroffen, auf 5 % der Fläche ist Permafrost vereinzelt möglich, und 1 % ist von potenziell eisreichem Permafrost betroffen.
- Messungen der letzten zwanzig Jahre deuten auf eine Erwärmung des Permafrosts und auf eine Abnahme seiner räumlichen Verbreitung hin.
- Die Erwärmung und das Auftauen des Permafrosts wirken destabilisierend auf den Untergrund. Auf Permafrost gebaute Infrastrukturen können Schaden nehmen, und Sturzereignisse können tiefer gelegene Verkehrswege und Siedlungen bedrohen.
- Vorhersagen sind schwierig und ein integrales Risikomanagement ist angebracht. Insbesondere die systematische Überwachung zur frühzeitigen Gefahrenerkennung ist wichtig.

Permafrost ist ein weitverbreitetes Phänomen in den hochalpinen Gebieten des UNESCO-Welterbes Swiss Alps Jungfrau Aletsch. Er beeinflusst die geomorphologischen Prozesse wesentlich und hat das Landschaftsbild im Hochgebirge während Jahrtausenden massgeblich geprägt. Diese Prozesse sind auch heute gut sichtbar und tragen dazu bei, dass das UNESCO-Welterbe als aussergewöhnliches Beispiel für die Hauptstufen der Erdgeschichte gilt. Durch die Klimaerwärmung werden die Prozesse verstärkt, so dass die Menschen direkt und merkbar vom Auftauen des Permafrosts und dessen Folgen betroffen sind.

Was ist Permafrost?

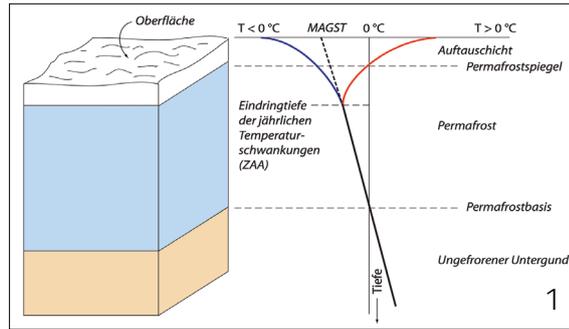
Als Permafrost bezeichnet man Untergrund (Boden, Sediment, Fels, Schutt), dessen Temperatur während mehrerer Jahre nicht über 0 °C steigt. Permafrost kann Eis enthalten, muss dies aber nicht. Gletscher sind per Definition kein Permafrost.

Einen Permafrostboden kann man vereinfacht in drei Zonen unterteilen: die Auftauschicht, den eigentlichen Permafrost und den ungefrorenen Untergrund (s. Abbildung 1). Die Auftauschicht taut im Sommer auf und gefriert im Winter wieder. Der darunterliegende Permafrost hat das ganze Jahr über eine Temperatur unter 0 °C. Unter dem Permafrost liegt der ungefrorene Untergrund. Typischerweise hat Permafrost in den Schweizer Alpen eine Mächtigkeit von

einigen Dekametern (z. B. in Schutthalde) bis zu mehreren hundert Metern (z. B. unter dem Fels hoher Gipfel)⁶.

Permafrost ist ein wichtiges landschaftsprägendes Element. Die geothermischen Eigenschaften eines Permafrostbodens sind temperaturabhängig, wobei eine Erwärmung insbesondere steile Hänge und Felsflanken weniger stabil macht. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen und mechanischen Eigenschaften wird oft zwischen eisfreiem und eisreichem Permafrost unterschieden. Je grösser der Eisgehalt, desto mehr unterscheidet sich Permafrostboden von Nicht-Permafrostboden. Permafrostkriechen und Blockgletscher entstehen dort, wo es im Boden mehr Eisvolumen als Schutt oder Fels gibt.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit Permafrost sowie eines typischen Temperaturprofils. Der Permafrost bleibt das ganze Jahr über gefroren und befindet sich zwischen dem Permafrostspiegel und der Permafrostbasis. Oberhalb des Permafrostspiegels taut der Untergrund im Sommer auf, unterhalb der Permafrostbasis bleibt der Untergrund ungefroren. Die schwarze Temperaturlinie entspricht der mittleren Oberflächentemperatur (MAGST). Der durchgezogene Teil der Line entspricht der im Jahresverlauf unveränderten Temperatur, im gestrichelten Teil gibt es im Jahresverlauf Temperaturschwankungen. Die rote und blaue Kurve entspricht den wärmsten Temperaturen im Sommer respektive den kältesten im Winter. (Graphik: Nötzli und Gruber²)



Ohne Permafrost würde die Gebirgslandschaft des Welterbes – mit ihren spektakulären Berggipfeln, Felswänden, Blockgletschern und gefrorenen Moränen – nicht so aussehen, wie sie dies heute tut.

Verbreitung des Permafrosts

Das Vorkommen und die Eigenschaften von Permafrost werden in erster Linie durch das Klima, die Topografie und die Eigenschaften des Untergrunds bestimmt. In der Schweiz findet man Permafrost typischerweise in kalten und hochgelegenen Schutthalden, Moränen und Felswänden oberhalb von etwa 2500 m ü. M. Die Verteilung von Permafrost kann jedoch auf sehr kleinem Raum stark variieren³.

Modellstudien gehen davon aus, dass 3 bis 6 % der Schweizer Landesfläche Permafrost aufweisen^{2,3}. In den Welterbe-Gemeinden ist der Anteil an Permafrost insgesamt höher: 6 % der Fläche ist von Permafrost betroffen, auf 3 % der Fläche ist Permafrost vereinzelt möglich, und 1 % ist von potenziell eisreichem Permafrost betroffen (s. Abbildung 2).

frost betroffen (s. Abbildung 2). Diese Anteile sind mit 11 %, 5 % respektive 1 % noch höher, wenn man nur das Gebiet innerhalb des Welterbe-Perimeters berücksichtigt.

Permafrost ist an der Bodenoberfläche nicht direkt sichtbar. Es gibt jedoch Anhaltspunkte, welche auf Permafrost hindeuten. Wichtige solche

Permafrostzeiger sind aktive Blockgletscher (s. Abbildung 3), Hängegletscher, Eiswände oder ganzjährige Schneeflecken. Das Fehlen dieser Indikatoren bedeutet jedoch nicht, dass kein Permafrost vorhanden ist. Für die direkte und eindeutige Bestimmung von Permafrost sind meist Temperaturmessungen im Untergrund nötig.

Auftauen des Permafrosts und seine Auswirkungen

Über die letzten zwanzig Jahre deuten schweizweit drei wichtige Messgrößen – Bodentemperatur, Eisgehalt und Kriechgeschwindigkeit – auf eine Erwärmung des Permafrosts und auf eine Abnahme seiner räumlichen Verbreitung hin. Die Bodentemperaturen sind gestiegen, der Eisgehalt im Boden hat abgenommen und Blockgletscher haben sich schneller fortbewegt. Dieser Trend hat sich in den letzten zehn Jahren verstärkt und wurde lediglich im schneearmen Jahr 2017 unterbrochen⁹.

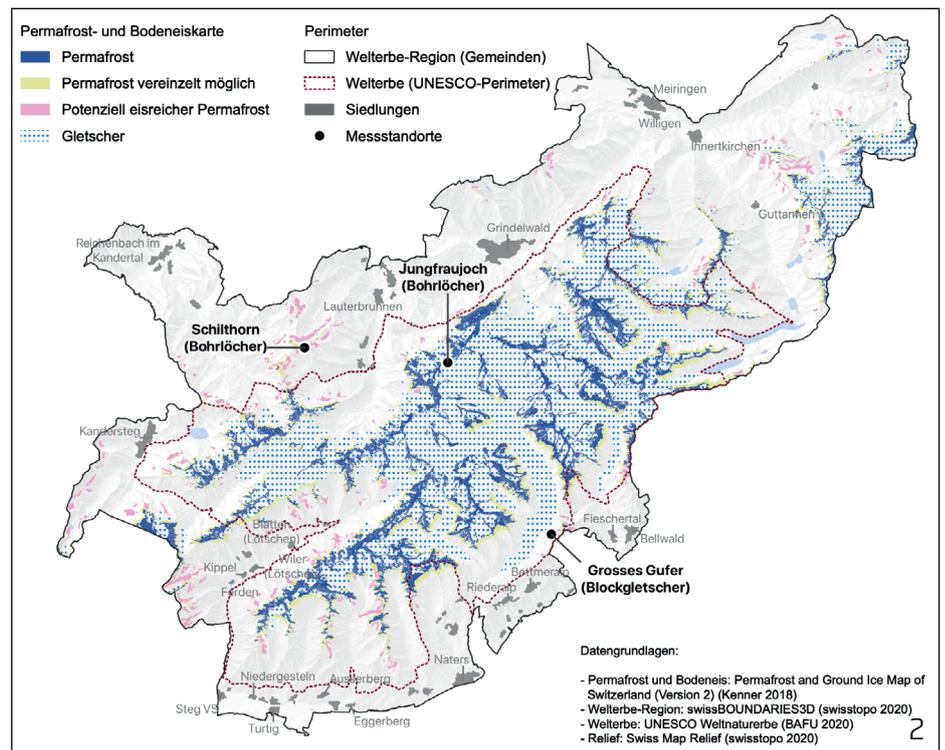
Dieselben Beobachtungen treffen mehrheitlich auch auf das UNESCO-Welterbe

Abbildung 2: Permafrost in der Region und im Perimeter des UNESCO-Welterbes Swiss Alps Jungfrau-Aletsch. Permafrost wird in der Karte als eisarm klassifiziert (z. B. Permafrost in Felswänden oder in trockenen Lockergesteinen). Eisreicher Permafrost hingegen umfasst permanent gefrorenes Lockergestein, dessen Eisgehalt den Porenraum im Boden übersteigt (z. B. Blockgletscher oder eisreiche Schutthalden). (Daten: Kenner⁴)

Box 1: PERMOS

Das Schweizer Permafrost Monitoring Netzwerk (PERMOS) dokumentiert systematisch den Zustand und die Veränderungen des Gebirgspermafrosts in den Schweizer Alpen. PERMOS wurde in den 1990er Jahren initiiert und ist seit 2000 in Betrieb. Wesentliche finanzielle Unterstützung erhält das Netzwerk vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, vom Bundesamt für Umwelt BAFU und von der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT). PERMOS wird von sechs Partnerinstitutionen getragen: den Universitäten Freiburg, Lausanne und Zürich, der ETH Zürich, der Fachhochschule Südschweiz SUPSI und dem WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. (Quelle: <http://permos.ch/>)

In der Welterbe-Region befinden sich drei Messstandorte des Monitoring-Netzwerk PERMOS: auf dem Schilthorn werden die Temperaturen in Bohrlöchern und an der Bodenoberfläche sowie Veränderungen des unterirdischen Eis- und Tauwasserhaltes gemessen, auf dem Jungfraujoch werden die Temperaturen in Bohrlöchern und an der Bodenoberfläche erfasst, und beim Blockgletscher «Grosses Gufer» am Rande des Grossen Aletschgletschers werden Temperaturen an der Bodenoberfläche sowie die Geschwindigkeiten des Permafrostkriechens überwacht.



Datengrundlagen:
 - Permafrost und Bodeneis: Permafrost and Ground Ice Map of Switzerland (Version 2) (Kenner 2018)
 - Welterbe-Region: swissBOUNDARIES3D (swisstopo 2020)
 - Welterbe: UNESCO Weltkulturerbe (BAFU 2020)
 - Relief: Swiss Map Relief (swisstopo 2020)



Abbildung 3: **Blockgletscher «Grosses Gufer».** Blockgletscher sind die auffälligsten geomorphologischen Formen in Permafrostgebieten. Bei Blockgletschern handelt es sich um eisreichen Permafrost in Schutthalden. Wenn das Eisvolumen das Volumen der Porenräume in der Schutthalde übertrifft, wird die innere Reibung stark reduziert und die Schutthalde verformt sich im steilen Gelände unter dem Einfluss der Schwerkraft. Blockgletscher bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von wenigen Dezimetern pro Jahr und ähneln in der Form einem Lavastrom. (Foto: Raphael Schmid)

Swiss Alps Jungfrau-Aletsch zu. So zeigen die Messungen in den Bohrlöchern auf dem Schilthorn (s. Abbildung 4) und auf dem Jungfraujoch steigende Temperaturen in allen Messtiefen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Mächtigkeit sowie die geographische Ausdehnung des Permafrosts in der ganzen Welterbe-Region mehrheitlich abgenommen haben. Aufgrund des Klimawandels wird der Permafrost auch mittelfristig weiter abnehmen.

Das Auftauen des Permafrosts kann den Untergrund destabilisieren und entsprechende Folgewirkungen haben. So stehen zum Beispiel viele Infrastrukturbauten (Bergbahnstationen, Masten, Berghütten, Lawinenverbauungen etc.) auf Permafrostboden. Mächtigere Auftauschichten und Eisverluste können zum Beispiel zu Setzungen und Sackungen führen sowie die Stabilität von Felswänden beeinflussen. Dadurch können die Infrastrukturen Schaden nehmen (s. Box 3).

Die abnehmende Stabilität des Untergrunds kann aber auch für Gebiete ausserhalb der eigentlichen Permafrostzone Folgen haben. Massenbewegungen wie Hangrutschungen, Murgänge, Felsstürze und Steinschläge betreffen auch tiefer liegende Regionen. Besonders Verkehrswege (z. B. Strassen, Wanderwege) und Siedlungen stehen hier im Fokus. Sowohl im Sommer 2003 als auch im Sommer 2015 führten die Auftauprozesse im Permafrost zu einer Häufung von Sturzereignissen².

Ausblick

Es ist bestätigt, dass sich der Permafrost in den Schweizer Alpen in den letzten zwei Jahrzehnten erwärmt hat, und sehr wahrscheinlich, dass diese Erwärmung an einigen Orten zu Eisverlusten, verstärkten Hangbewegungen und Instabilität von Bauten im Hochgebirge führen wird. Vorhersagen sind jedoch schwierig. Insbesondere die Fragen, wo und wie schnell der Permafrost abnehmen und wie sich das auf Infrastrukturen, Gesellschaft und Wirtschaft auswirken wird, sind schwierig zu beantworten.

Box 2: Permafrost global

Weltweit ist etwa ein Fünftel der Landfläche von Permafrost betroffen⁷. Grosse Permafrostgebiete gibt es im Norden Nordamerikas und Eurasiens. In diesen Regionen kann Permafrost eine Mächtigkeit von Kilometern erreichen und sich kontinuierlich über sehr grosse Gebiete erstrecken. In geringerer Ausdehnung ist Permafrost auch in eisfreien Gebieten der Antarktis, in Hochgebirgen, auf einigen antarktischen Inseln sowie am Boden der Schelfgebiete des Arktischen Ozeans vorzufinden.

Die Klimaerwärmung führt weltweit zu einer Verringerung der räumlichen Ausdehnung und der Mächtigkeit des Permafrosts. Es gibt Modellrechnungen, welche von einer Verringerung der Ausdehnung der zusammenhängenden Permafrostzone von bis zu 90 % bis ins Jahr 2100 ausgehen⁷. Solche Modellvorhersagen sind aber mit grossen Unsicherheiten behaftet, und es gibt grosse Differenzen zwischen unterschiedlichen Modellen.

Wie auch im Alpenraum führt das Auftauen des Permafrosts weltweit zu Instabilitäten im Untergrund. Vor allem in Sibirien, Alaska und im nördlichen Kanada sind Siedlungen und Infrastrukturanlagen wie Flughäfen auf Permafrost gebaut und daher durch das Auftauen des Permafrosts bedroht. Die Schäden sind oft kostspielig oder führen sogar zur Aufgabe der Infrastrukturanlagen. Bis zu 3.3 Mio. Menschen bzw. zwei Drittel der aktuellen Bevölkerung in Permafrostgebieten der Nordhalbkugel könnten bis 2050 direkt betroffen sein¹⁰.

Das Auftauen kann aber auch Auswirkungen in weiteren Weltgegenden haben. Es wird geschätzt, dass gefrorene Böden insgesamt doppelt so viel Kohlenstoff enthalten wie die Atmosphäre¹¹. Dieser hat sich über Jahrtausende in der Eisschicht angesammelt und wird nun aufgrund des Permafrost-Tauens nach und nach in Form von CO₂ und Methan in die Atmosphäre freigesetzt. Dies kann zu einem Teufelskreis von verstärktem Treibhausgasausstoss, Klimaerwärmung und Permafrosttau führen.

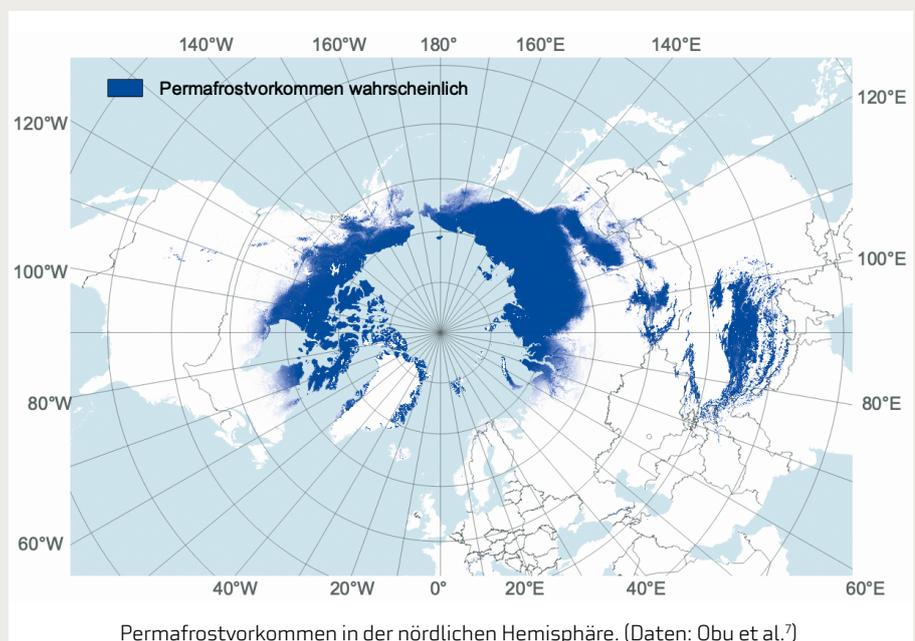
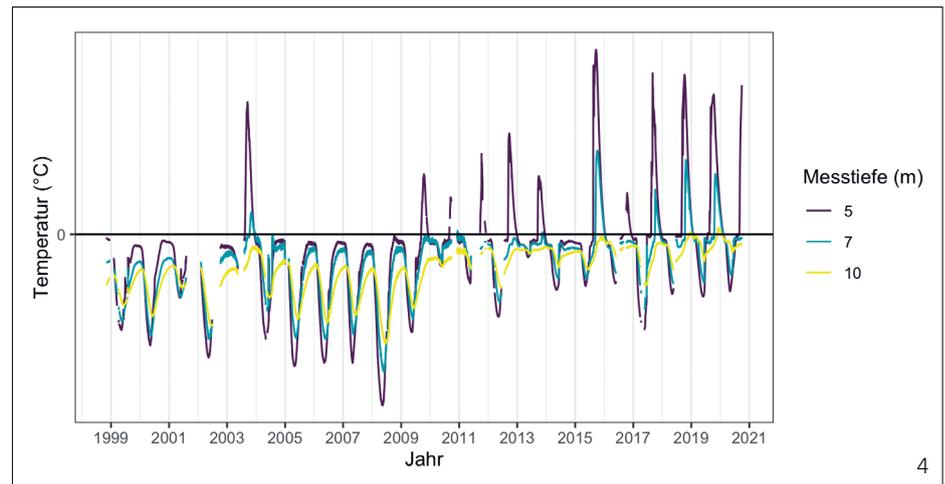


Abbildung 4: **Temperaturmessungen der letzten 20 Jahre in unterschiedlichen Tiefen des Permafrost-Bohrlochs «SCH_5198» auf dem Schilthorn** (Quelle: PERMOS⁹). Die Messungen zeigen einen Anstieg der Temperaturen im Permafrost. So kann die Abnahme der Permafrost-Mächtigkeit zum Beispiel an der gelben Linie abgelesen werden, welche die Temperatur in 10 m unter der Bodenoberfläche abbildet und sich allmählich an 0 °C annähert.



Box 3: Seilbahn Eggishorn

Im Oktober 2019 stellten die Aletsch Bahnen AG den Betrieb der Walliser Gondelbahn Fiescheralp-Eggishorn im Gebiet der Bergstation präventiv und temporär ein. Bei einer Analyse durch den eigenen technischen Dienst und externe Fachspezialisten wurde eine Terrainabsenkung im Gebiet der Bergstation festgestellt. Die Absenkung hatte dazu geführt, dass das Fundament der Bergstation an einzelnen Stellen nicht mehr vollflächig auf dem Untergrund auflieg.

Durch bauliche Massnahmen konnten entstandene Sackungen im Bereich des Fundaments aufgefüllt und der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden. Die Kosten für diese baulichen Massnahmen bewegten sich im unteren sechsstelligen Bereich. Es wurden zusätzliche Überwachungsmassnahmen installiert und die Seilbahn nahm ihren Betrieb im Dezember 2019 wieder auf.

Es war das erste Mal in der Geschichte, dass eine Schweizer Seilbahn von sich aus den Betrieb wegen Permafrost-Risiken einstellen musste. Das Beispiel steht exemplarisch für die möglichen Folgen, die das Tauen des Permafrosts für die Infrastruktur in den Schweizer Alpen haben kann.

Wichtig ist daher ein integrales Risikomanagement. Dieses beinhaltet unter anderem, dass die Entwicklungen des Permafrosts und Infrastrukturen systematisch überwacht und Gefahren frühzeitig erkannt werden. Allfällige Massnahmen sollten frühzeitig ergriffen werden. Diese sind oft technischer (d. h. baulicher) Natur, aber auch Nutzungsreglementierungen (z. B. Wegsperrungen, Verlegung von Gebirgswanderwegen sowie Verzicht auf bestehende Besteigungsrouten etc.) sind möglich.

Permafrost ist somit nicht nur ein landschaftsprägendes Element, welches den aussergewöhnlichen universellen Wert des UNESCO-Welterbes Swiss Alps Jungfrau-Aletsch massgeblich mit ausmacht. Permafrost – beziehungsweise dessen Rückgang – ist auch ein Naturphänomen, welches Natur, Gesellschaft und Wirtschaft in der Welterbe-Region direkt betrifft und in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird.

Literatur und weiterführende Informationen

- ¹ **BAFU.** Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung. 2005. <https://map.geo.admin.ch/?layers=ch.bafu.permafrost> (abgerufen am 18 Feb. 2021).
- ² **BAFU.** Klimabedingte Risiken und Chancen. Bern: Bundesamt für Umwelt BAUF; 2017. Umwelt-Wissen Report No.: UW-1706-D.
- ³ **Kenner R, Noetzi J, Hoelzle M, Raetz H, Phillips M.** Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere*. 2019;13(7):1925-1941. doi:10.5194/tc-13-1925-2019.
- ⁴ **Kenner R.** Permafrost and Ground Ice Map of Switzerland. <https://zenodo.org/record/1470165#YBAm55NKg8M> (abgerufen am 26 Jan. 2021). doi:10.5281/zenodo.1470165.
- ⁵ **Lawrence DM, Slater AG.** A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters*. 2005. doi:10.1029/2005GL025080.
- ⁶ **Nötzli J, Gruber S.** *Alpiner Permafrost – ein Überblick*. München: Verein zum Schutz der Bergwelt (VzSB); 2005. S. 111-121. Jahrbuch Report No.: 70.
- ⁷ **Obu J, Westermann S, Bartsch A, Berdnikov N, Christiansen HH, Dashtseren A, Delaloye R, Elberling B, Etzelmüller B, Kholodov A, et al.** Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*. 2019;193:299-316. doi:10.1016/j.earscirev.2019.04.023.9.
- ⁸ **PERMOS.** PERMOS Data Portal. <http://newshinypermoss.geo.uzh.ch/app/DataBrowser/> (abgerufen am 19. Feb. 2021).
- ⁹ **PERMOS.** Swiss Permafrost Bulletin 2018/2019. Swiss Permafrost Monitoring Network (PERMOS); 2020. doi:10.13093/permoss-bull-2020.
- ¹⁰ **Ramage J, Jungsberg L, Wang S, Westermann S, Lantuit H, Heleniak T.** Population living on permafrost in the Arctic. *Population and Environment*. 2021. doi:10.1007/s11111-020-00370-6.
- ¹¹ **Turetsky MR, Abbott BW, Jones MC, Anthony KW, Olefeldt D, Schuur EAG, Grosse G, Kuhry P, Huguenot G, Koven C, et al.** Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*. 2020;13(2):138-143. doi:10.1038/s41561-019-0526-0.

Das UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch



Die Region des UNESCO-Welterbes Swiss Alps Jungfrau-Aletsch umfasst nicht nur eine atemberaubende Hochgebirgslandschaft mit Gletschern, vielfältigen geologischen Formen und einem breiten Spektrum von Habitaten, sondern auch eine vielfältige Kulturlandschaft. Diese einzigartige Kombination ist aus Sicht der einheimischen Bevölkerung, der kantonalen und nationalen Akteure und der UNESCO würdig, für kommende Generationen geschützt und erhalten zu werden. Um die Veränderungen des Gebiets und die Gefährdung seiner Werte und Funktionen zu erfassen, werden im Rahmen einer Gebietsüberwachung unterschiedliche Aspekte aus Umwelt und Gesellschaft und deren Entwicklung regelmässig mittels Indikatoren überprüft und bewertet. Basierend darauf können Massnahmen zum Erhalt der Werte der Region erarbeitet werden. Die vorliegende Broschüre ist Teil der Serie «Einblicke – Ausblicke», welche zweimal pro Jahr über interessante Entwicklungen in der Welterbe-Region informiert.

Verantwortlich für diese Ausgabe

Dr. Roger Bär
Centre for Development and Environment (CDE)
Universität Bern

Wissenschaftliche Begleitung

Dr. Jeannette Nötzli
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF)
Projektleiterin PERMOS

Herausgeber und Kontakt

UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch
Managementzentrum
Bahnhofstr. 9a, CH - 3904 Naters
T: +41 (0)27 924 52 76
info@jungfrau-aletsch.ch
www.jungfrau-aletsch.ch
www.mySwissalps.ch

Titelbild

Die Fiescherwand mit dem kleinen und grossen Fiescherhorn, im Hintergrund das Finsteraarhorn und das grosse Grünhorn (Foto: Raphael Schmid)

Partner des Welterbes:
Die Mobiliar, Gebäudeversicherung Bern GVB,
Jungfrauabahn, BEK|BCBE, Stämpfli Druck

