

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 26 (2021)

Heft: 1

Artikel: "Bauen im Hochgebirge" : Untersuchungsmethoden und Erfahrungen aus Sicht der Ingenieurgeologie am Beispiel von 3 Bauprojekten. Rekapitulation des Vortrages anlässlich der SFIG-Tagung 2020 in Olten

Autor: Graf, Kaspar / Dalban, Pierre / Haberkorn, Anna

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-977320>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

«Bauen im Hochgebirge» - Untersuchungsmethoden und Erfahrungen aus der Sicht der Ingenieurgeologie am Beispiel von 3 Bauprojekten; Rekapitulation des Vortrages anlässlich der SFIG-Tagung 2020 in Olten

Kaspar Graf¹, Pierre Dalban¹, Anna Haberkorn¹

1 Einleitung

In den Schweizer Alpen spielt die Infrastruktur im Hochgebirge eine wichtige Rolle für den Tourismus, die Kommunikation, die Energieversorgung und den Schutz vor Naturgefahren. Um die Nachhaltigkeit und die Sicherheit solcher Infrastrukturen zu gewährleisten, ist es wichtig spezielle Bau- und Überwachungsmethoden zu nutzen. Bauprojekte im Hochgebirge stellen besondere Anforderungen an die ingenieurgeologische Begleitung. Felsbereiche, die für eine Foundation in Frage kommen sind in der Regel in ausgesetztem Gelände. Begünstigt durch Verwitterung und stark variierende Temperaturen weisen diese Felsbereiche meist eine reduzierte Stabilität auf. Bauwerke kommen zudem oft im Grenzbereich Fels zu Eis zu liegen. Felsstabilitätsverluste in diesen Bereichen werden durch den Gletscherrückgang und die Degradation des Permafrostes verstärkt.

Insbesondere touristisch genutzte Bauprojekte im Hochgebirge stellen hohe Anforderung an Stabilität und Dauerhaftigkeit. Zudem sollte die Sicherheit vor Naturgefahren jederzeit gewährleistet sein. Der Anstieg von Angebot und Nachfrage der Tourismusindustrie im Gebirge bedingt vermehrt die Realisierung von Anlagen mit hohen Förderleistungen. Hier kommen insbesondere sogenannte 3S Bahn-Systeme (2 Tragseile als

Fahrbahn und 1 umlaufendes Zugseil) zum Einsatz, mit welchen mehrere Tausend Personen pro Stunde befördert werden können. 3S-Seilbahnen, wie beispielsweise die Matterhorn Paradise Bahn von Trockener Steg zum Klein Matterhorn oder der Eiger Express von Grindelwald Grund zum Eigergletscher, stellen durch ihre hohen Seilkräfte und hohen Masten besondere Anforderungen an Fundamente und Verankerungen von Berg- und Talstationen sowie Seilbahnmasten. Auch bei Sesselliften, wie die über den Gletscher führende Furggsattelbahn, müssen hohe Gebrauchs- und Maximallasten in den Fels abgetragen werden können, da Masten schwimmend auf dem Eis gelagert sind.

Die langfristige Stabilität der Foundation ist von entscheidender Bedeutung, um die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Infrastruktur zu gewährleisten. Für die erfolgreiche Planung und Ausführung von Bauprojekten im hochalpinen Gelände, sind ein gutes Verständnis der Felsstruktur und genaue Kenntnisse der Permafrost Verbreitung Voraussetzung. Bauprojekte im Hochgebirge bedingen zudem Schutzkonzepte vor Naturgefahren, insbesondere Steinschlag und Lawinen, sowohl im Bau- wie im Betriebszustand.

Neben den Transportanlagen auf hohe Gipfel müssen ebenfalls Infrastrukturen zur touristischen Erschliessung der Destinationen geschaffen werden. Dazu gehören insbesondere Verbindungsstollen, welche einen sicheren Transfer der Menschen zu den Skipisten oder zu den Aussichtspunkten gewährleisten. Eine Besonderheit der dafür notwendigen Aus-

¹ Geotest AG, Zollikofen

bruchsarbeiten ist im Gipfel- bzw. Gratbereich oft geringe Felsüberlagerung. Der Fels zeigt in der Regel bis in mehrere Meter Tiefe eine reduzierte Festigkeit und erhöhte Klüftung durch Verwitterung und Hakenwurf.

Stollen und Kavernen, welche in Permafrostgebieten gebaut sind, bedingen besondere Massnahmen bezüglich Felsicherung und Erhalt der Felsintegrität. In diesem Hinblick müssen Veränderungen der Felsstabilität im Permafrost durch zwei ineinander greifende Effekten beachtet werden: (1) Veränderung, bzw. Verlust der Felsstabilität aufgrund des massgeblichen Wärmeeintrages infolge der Nutzung von Infrastruktur und (2) veränderte Bodeneigenschaften (z.B. Verhältnis Eis- / Wassergehalt) durch die natürliche Erwärmung des Permafrostes infolge des Klimawandels in den letzten Jahrzehnten. Hier ist es insbesondere die Durchlässigkeit bzw. Wasserführung entlang existierender Klüfte bis in grössere Felstiefen, welche zu massiven Problemen bei Betrieb und Erhalt von Untertageanlagen führen kann.

2 Baugrund

Art und Eigenschaften des Baugrundes spielen auch im Hochgebirge eine entscheidende Rolle für die Bauwerksfundation. Das Baugrundmodell sollte in der Projektierung zu einem frühen Zeitpunkt berücksichtigt werden. Wichtig ist dabei insbesondere Art und Aufbau des anstehenden Felsens, Verlauf der Felsoberflächen sowie Art, Verbreitung und Mächtigkeit des Lockergesteins.

Als Grundlage dient die Beschreibung des Gebirges mit seinem geologischen und tektonischen Aufbau: die Schichtung und Klüftung mit ihren Raumlagen in Beziehung zueinander und zur Felsoberfläche. In der Morphologie des Gebirges zeigen sich die aktiven Verwitterungs- und Erosionsprozesse. Ausbruchsnischen bilden sich entlang bevorzugter Schwächezonen bzw. Trennflächen. Zudem

wird das Felsgefüge durch Kriechprozesse (Hakenwurf) aufgelockert. Felsanisotropien bestehen häufig entlang von Gesteinsgrenzen sowie Bruch- und Scherflächen.

Die Beobachtung und Beschreibung der dreidimensionalen (3D) Fels-Strukturen erlauben Rückschlüsse auf die natürliche Stabilität an der Oberfläche und im Untergrund. Es lohnt sich, die Beziehung der Bauwerke zum Baugrund mittels präziser digitaler 3D Modelle zu einem frühen Zeitpunkt zu erfassen. Als moderne Hilfsmittel zur Erstellung dieser Modelle stehen heute hochauflösende georeferenzierte Photogrammetrie (mit Helikopter oder Drohne) und Laserscans zu Verfügung. Die grossen Datenmengen können mit herkömmlicher Hard- und Software problemlos verarbeitet werden. Zusammen mit den konventionellen geologischen Feldaufnahmen kann so effizient ein dreidimensionales geologisches Modell erstellt werden, welches als Grundlage für die Fundationsprojektierung dient.

Im Hochgebirge kommt der Planung der Feldaufnahmen eine besondere Bedeutung zu. Feldaufnahmen sollten nur bei ausreichender Ausaperung stattfinden. Bereits eine geringe Schneebedeckung der Ausbisslinien der Trennflächen kann das Gesamtbild verfälschen. Ausserdem sind Felswände, welche bei tiefen Temperaturen (im Winter; am Morgen) problemlos am Seil begangen werden können, bei warmer Witterung und/oder bei Sonneneinstrahlung wegen Eis- und Steinschlag meist völlig unzugänglich. Diesen Aspekten muss bei der Planung der Bauphasen Rechnung getragen werden.

Neben der generellen Stabilität des Baugrundes für die Bauwerksfundation spielt die Stabilität der Umgebung eine Rolle für den Baustellenbetrieb bezüglich der Sicherheit vor Massenbewegungen. Hier sind besonders Stein- und Blockschlag relevant, welche Menschen und Installationen auf der Baustelle gefährden.

3 Einfluss des Permafrostes

In Höhenlagen über 2'400 m ü.M. muss bei der Baugrunduntersuchung die Frage nach dem Vorhandensein von Permafrost geklärt werden. Da Fels und Lockergestein sich je nach Gelände, Exposition und Hangneigung sowie Gebirgsaufbau und Schneeverteilung ab einer bestimmten Tiefe in ständig gefrorenem Zustand befinden können, sind die daraus resultierenden besonderen Eigenschaften für Bauen im Permafrost zu berücksichtigen (z.B. [1]).

In den Schweizer Alpen sind in den letzten zwei Jahrzehnten begünstigt durch den Klimawandel die Permafrost-Temperaturen gestiegen ([2],[3]). Neben steigenden Bodentemperaturen, variiert zunehmend auch das Verhältnis von Eis zu Wasser im Boden, mit einer deutlichen Zunahme des volumetrischen Wassergehaltes ([4]). Es ist daher besonders wichtig die komplexe Permafrostverteilung im Hochgebirge zu kennen. Permafrost-Geländetypen können unterschiedlich viel Bodeneisgehalt aufweisen. Man unterscheidet zwischen (1) eisreichem Permafrost mit einem Eisgehalt, der das Porenvolumen des Bodens übersteigt ([5]) und (2) eisarmen Permafrost mit Eis nur in Poren und Klüften ([6],[7]). Eine Einteilung nach Bodeneisgehalt ist besonders wichtig, da der Permafrost unterschiedlich schnell und stark auf äussere Einflüsse reagiert, wie zum Beispiel auf klimabedingte Veränderungen der Bodentemperaturen oder der Schneeverteilung im Gebirge. Die Verteilung von eisarmen (hauptsächlich im Fels) und eisreichen (in Lockermaterial unter 30° Hangneigung) Permafrost ist detailliert in einer neuen Permafrost- und Bodeneiskarte der Schweiz dargestellt ([8]; <https://www.slf.ch/pgim>).

Die andauernde Permafrost Degradation birgt Herausforderungen für die Praxis. Steigende Bodentemperaturen führen zu einer Verdickung der saisonalen Auftauschicht, insbesondere im eisarmen Fels-Permafrost.

Wissen über die Veränderungen der Eigenschaften der Auftauschicht sind im Hinblick auf die Hang- und Infrastrukturstabilität wichtig. Durch die saisonalen Schwankungen des Eis- und Wassergehalts in der Auftauschicht können zum Beispiel Hangdeformationen verstärkt werden ([9]). Zudem kann Wasser aus Schneeschmelze oder Niederschlag in die Sedimente der Auftauschicht infiltriert werden und durch die Verdickung der Auftauschicht in neue Tiefen vorstossen. Geotechnische Probleme aufgrund der Verringerung der effektiven Spannung und der Erhöhung des Porenwasserdrucks sind die Folge ([10]) und problematisch für die Fundamente und Verankerungen von Infrastruktur. In eisreichen Permafrostgebieten können zudem auch noch Setzungen aufgrund von Bodeneisverlusten eine Herausforderung für den Bau und die Instandhaltung von Infrastruktur im Gebirge darstellen. Bestehende Bauwerksfundamente im gefrorenen Lockergestein haben trotz massiver Bauweise und Rückverankerungen in das rückwärtige Gebirge zunehmende Stabilitätsprobleme. Speziell angepasstes Baumaterial (z.B. Ankermörtel der vor dem Einfrieren abbindet), ausreichend dimensionierte Ankerlängen und flexible Strukturen (z.B. Pylone auf Schienen in eisreichem Gelände) sind erforderlich ([11]), um in Hochgebirgsregionen Schäden an der Infrastruktur und damit verbundene hohe Kosten und komplexe Reparaturen ([12]) zu vermeiden. Mit schwimmenden Fundamenten kann Verschiebungen durch hangabwärts gerichtete Deformationen und Setzungen an Bauten (z.B. Masten, Lawinverbauungen) entgegengewirkt werden, um eine gute Effizienz und lange Lebensdauer zu gewährleisten ([13],[14]).

Deutlich stärkere und schnellere Auswirkungen auf Permafrostsubstrate als der Klimawandel haben aktive mechanische Störungen wie Bautätigkeit und ein Wärmeeintrag durch die aktive Nutzung von Gebirgsinfrastruktur

(z.B. durch Menschen, Gebäude, Maschinen, Abwasser, etc.; [11],[12]). Bei neuen Bauprojekten im Hochgebirge ist deshalb die zukünftige Entwicklung des Permafrostes durch die Klimaerwärmung sowie durch die Erwärmung von Bauwerken zu berücksichtigen. Einerseits sollten neue Bauten die Gebirgstemperaturen möglichst wenig beeinflussen, d.h. nur einen geringen Wärmeeintrag bewirken. Andererseits sind die Bauwerke so zu dimensionieren, dass sie den Veränderungen des Untergrundes durch Verlust des Permafrostes ohne Weiteres standhalten können. Im dicht besiedelten Schweizer Alpenraum ist es ausserdem wichtig, Gemeinden und Infrastrukturen gegen Massenbewegungen aus höher gelegenen dynamischen Permafrostgebieten zu schützen.

4 Einfluss von Schnee und Eis

Neben Permafrost spielen bei Projektierung und Ausführung von Hochgebirgsbauten auch der Einfluss von Gletschereis und Schnee eine wichtige Rolle. Aufgrund oft begrenzter Platzverhältnisse liegen Bauplätze häufig in Randlagen zu Gletschern oder Firnfeldern. In Gipfel- oder Gratbereichen ist eine räumliche Beeinflussung von Gletscher und Bauwerk oft nicht zu vermeiden. Dabei ist es wichtig, die Grenzflächen Eis zu Fels mittels Sondierungen abzuklären. Beispielsweise kann ein Steilabbruch der Felsoberfläche unter dem Gletscher durch dessen Rückgang langfristig zu einer labilen Fundation eines Bauwerkes führen. Hier ist zu erwähnen, dass neu exponierte Felsflächen im Rückzugsbereich des Gletschers durch das Wegfallen von Temperaturisolation und Erosionsschutz in kurzer Zeit massiv an Stabilität verlieren und verwittern.

Logistik, Sicherheit und Baufortschritt auf Gebirgsbaustellen sind massgeblich von der Witterung abhängig. Gerade der Aufwand für die Schneeräumung wird oft unterschätzt; die in der Hauptbauzeit im Tagesverlauf

stark variierenden Temperaturen sind bezüglich der Verarbeitung von Beton und Ankermörtel zu berücksichtigen. Die Erwärmung der Felsoberflächen führt in den exponierten Felswänden im Tagesverlauf jeweils zu stark erhöhter Steinschlaggefahr.

5 Auswirkung der Baustellen auf die Felsstabilität

Der Felsabtrag für Baugruben im Hochgebirge kann die Stabilität in zweierlei Hinsicht negativ beeinflussen. Zum einen wird das Gebirge in der Regel quer zu den Hauptstrukturen (Schichtung, Klüftung) abgetragen, so dass Trennfächen ungünstig angeschnitten werden. Ohne zusätzliche Felsicherung resultieren deshalb kurz- oder langfristig instabile Baugrubenanschnitte. Zum anderen kann ein Felsaushub bisher ungestörte Permafrostbereiche erschliessen und den bis dato gefrorenen Felsen, Einflüssen der Atmosphäre aussetzen. Im Sommer und Herbst bildet sich dadurch in kurzer Zeit eine neue und tiefer reichende Auftauschicht, was je nach anstehendem Gesteinstyp und tektonischer Beanspruchung zu einer massiven Auflockerung des vorher kompakten Felsens führt.

6 Drei Fallbeispiele hochalpiner Bauwerke

6.1 Bergstation der 6er Sesselbahn Trockener Steg – Furggsattel, Zermatt

Die 2003 in Betrieb genommene Furggsattel-Anlage (Fig. 1) war die erste Sesselbahn der Schweiz, deren 17 Stützen mehrheitlich schwimmend auf dem Gletscher gelagert sind. Die Bahn hat eine Länge von 2'550 m. Die Bergstation auf 3'369 m ü.M. dient als Spannstation und musste auf einem (damals) nur wenige Meter breiten Felsband zwischen Furgg- und Theodulhorn fundiert werden. Nach Süden bricht das Gelände senkrecht nach Italien ab,



Fig. 1: Situation und Übersicht Bergstation Furggsattel lift im Betriebszustand.

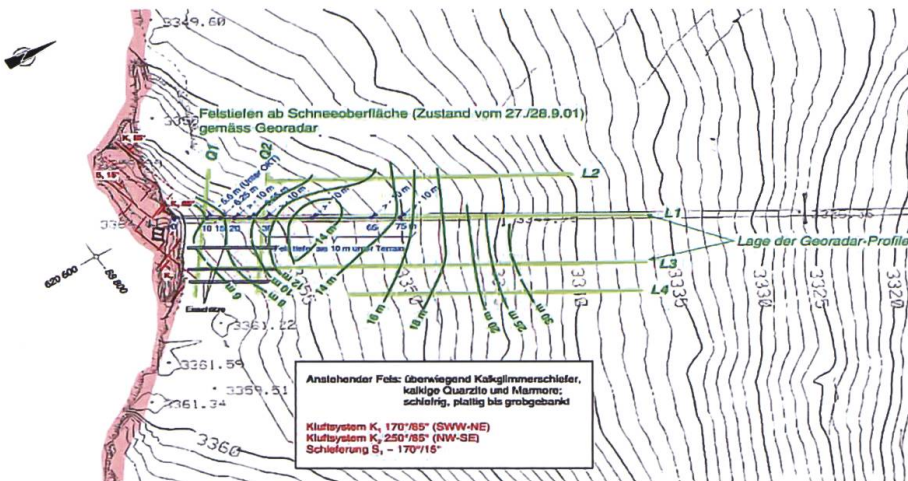


Fig. 2: Resultate der Felsaufnahmen und der Felstiefen unter dem Gletscher.

nach Norden taucht die Felsoberfläche aus geschichteten Quarziten steil unter den Oberen Theodulgletscher ab (Fig. 6).

Der Felsaufbau wurde auf der Südseite am Seil erkundet. Auf der Nordseite wurden lokal Baggerschlitze im Eis erstellt und zusätzlich der Felsverlauf unter den Gletscher mit Georadar vermessen (Fig. 2). Dadurch konnte der Baugrund gut charakterisiert werden. Das Fundationskonzept erforderte die Abtragung von Zugkräften bis 6'000 kN in den Permafrost-Fels. Durch den labilen Felsabbruch Richtung Süden und die Gletscherrandlage im Norden mussten Fundation und Verankerung in die schmale Felszone in Gratlage erfolgen. Für eine genaue und sorgfältige Dimensionierung dieses Bauprojekts musste beachtet werden, dass besonders in steilen Gratlagen der eisarme Fels-Permafrost besonders schnell auf (atmosphärische) Veränderungen reagiert. Es wurde eine massive mit 6 Permanentankern abgespannte Betonkonstruktion gewählt.

Die Fundation erfolgte auf grobgebankten Quarziten welche rund 10 m unter der Felskante in graue Glimmergneise und -schiefer übergehen. Das Gebirge wird von zwei konjugierten subvertikalen Kluftfamilien durchschlagen (Fig. 3). An der Oberfläche waren die Kluftöffnungen eisfrei, während sie im im Fundament- und Ankerbereich mit Eis gefüllt waren. Die Kluftöffnungen nahmen mit zunehmender Tiefe generell ab. Um die



Fig. 3: Ansicht der Station von Süden mit den zerklüfteten und aufgelockerten Felszonen.

Verankerungen mit 6 Permanentankern im möglichst kompakten Fels zu erstellen, wurden die Bohrungen in zwei Reihen steil mit Winkeln von 50° und 60° zur Horizontalen in den Fels gebohrt (Fig. 4 und 5). Die Anker haben freie Ankerlängen von 11 m und sind 7 m im Fels vermörtelt. Im Fundament wurden 3 zusätzliche Ankertrumpeten für mögliche Ersatzanker erstellt. Zur Überwachung allfälliger Felsbewegungen wurden zusätzlich zu den Messvorrichtungen der Ankerköpfe, zwei 3-fach Extensometer mit Längen von 18, bzw. 19 m (Fig. 5) versetzt. Damit verfügt die Bergstation über 2 redundante Systeme zur langfristigen Überwachung von Felsbewegung und Ankerkraftentwicklung. Die Thermistoren erlauben es zudem, die Entwicklung der Gebirgstemperaturen von der Oberfläche bis in den Bereich der Verankerungen zu verfolgen.

Die Messungen zeigen, dass der Fels heute noch negative Temperaturen zwischen -5°C und -1.5°C aufweist. Die Temperaturmaxima und -minima haben sich dabei zwischen 2011 und 2020 um rund 3°C erhöht. Somit kommen die Permafrost-Felstemperaturen nun in Bereiche, in denen Laborversuche gezeigt haben, dass die Festigkeit von Eis stark ver-



Fig. 4: Ansicht der Fundamente im Bauzustand; Blick von Norden auf den vorderen Steher.



Fig. 5: Blick während der Spannarbeiten in den Ankerkeller mit den im Fundamentblock eingebauten Ankern und Extensometern.

mindert ist ([15]). Hierbei wurde in Scherversuchen gezeigt, dass die Festigkeit einer eisgefüllten Kluft eine Funktion von Normal-

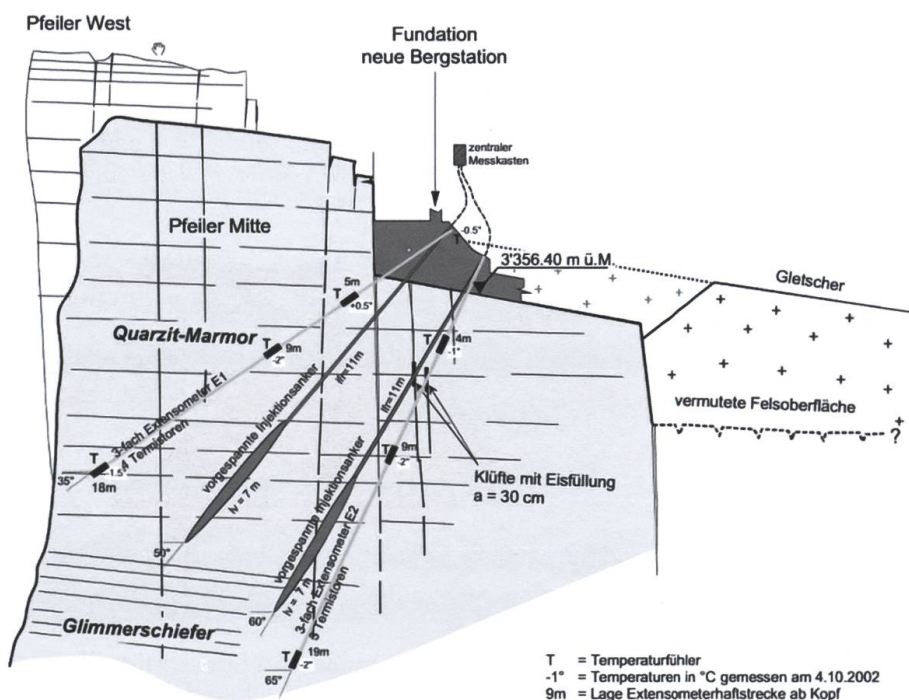


Fig. 6: Schematischer Profilschnitt durch die Fundation der Bergstation. Nach links (S) bricht das Plateau steil ab, nach rechts (N) taucht der Fels treppenartig unter den Gletscher ab.

spannung und Temperatur ist. Bei niedrigen Temperaturen ist die Festigkeit deutlich höher als die einer ungefrorenen Verbindung. Allerdings nimmt die Festigkeit einer eisgefüllten Kluft stark ab, wenn die Eistemperaturen auf zwischen -2°C und 0°C ansteigen. Daraus folgt, dass ein Felsabschnitt stabil ist, wenn sich entweder kein Eis in den Klüften befindet oder wenn das Klufteis niedrige Temperaturen aufweist, jedoch instabil wird, wenn sich das Eis erwärmt ([15]).

Parallel zur erwartenden Klimaentwicklung wird damit gerechnet, dass der Permafrost im Bereich der Bergstation auch wegen topographischer 3D-Effekten (starke Erwärmung der Südwand; [16]) verschwindet. Die Geometrie der Verankerungen wurde deshalb so gewählt, dass auch bei einer Destabilisierung der oberflächlichen Felskompartimente in der Südwand die Langzeitstabilität der Bergstation und die Gebrauchstauglichkeit der Anlagen nicht gefährdet ist. Eine abnehmende Scherfestigkeit der Klüfte wurde mit der Geometrie und Dimensionierung der Verankerung berücksichtigt.

Bei der Ausführung der Verankerungen wurden die erstellten Bohrungen mit Wasser gefüllt und während 10 Tagen mit Heizschlangen vorgewärmt, um ein zuverlässiges Abbinden des Ankermörtels zu gewährleisten.

Es wurde bei den Mörtellieferanten speziell frostsicherer Ankermörtel bestellt. Dieser band schon im Mischer ab und konnte deshalb nicht gepumpt werden. Die Anker mussten wieder ausgebaut und ausgeflogen werden. Nach einer erneuten Heizphase und unter Verwendung eines anderen Mörtelproduktes konnten die Anker später ohne Probleme eingebracht und injiziert werden.

Die Entwicklung der Ankerkräfte, der Felsbewegungen und der Felstemperaturen wird seit nunmehr 18 Jahren überwacht. Die heute automatisierte Messanlage überträgt die gemessenen Daten auf ein Datenportal. Wäh-

rend die Ankerkräfte mit leichten saisonalen Schwankungen sehr konstant bleiben, zeigen die Extensometer teilweise einen saisonalen Verlauf der Felsbewegungen mit einer nicht reversiblen Komponente, bzw. einem treppenförmigen Anstieg, was auf eine Öffnung von Klüften hinweist.

6.2 Stollen und Aletschausgang auf dem Jungfraujoch; Verlust der Felsstabilität durch auftauenden Permafrost

Der sogenannte Aletschausgang auf 3'463 m ü.M. auf der Ostseite der Sphinx ist der wichtigste Ausgang vom Jungfraujoch auf den Gletscher (Fig. 7 und 8). Er bildet Ausgangs- und Endpunkt bedeutender hochalpiner Touren und ist einer der Hauptattraktionen für Touristen. Der Ausgang liegt am Fuss der



Fig. 7: Ausschnitt aus der digitalen Landeskarte (map.geo.admin.ch; ©swisstopo) mit der Lage des Aletschausganges (roter Kreis).



Fig. 8: Ansicht der Sphinx von SE. Roter Kreis = Stollenausgang (Drohnenaufnahme GEOTEST).

über 100 m hohen Südwand der Sphinx (auf deren Gipfel das gleichnamige Observatorium und die Touristenplattform liegen; Fig. 8).

Der Stollenausgang liegt in massigen Gneisen des Lauterbrunnen-Kristallins. Das Gebirge ist oberflächlich aufgelockert und wird von einzelnen flach südwärts einfallenden Scherzonen durchschlagen. Im oberen Wandbereich stehen die flach nach Süden einfallenden grauen Kalkmylonite des Jungfraukeiles an. Diese sind anfällig für Karst und werden von steilen Ost-West streichenden Klüften durchschlagen.

Der Sphinxgrat und -gipfel wird von Granitgneisen des Jungfrau-Kristallins aufgebaut. Diese werden durch offene, teilweise eisgefüllte Klüfte tiefgründig aufgelockert.



Fig. 9: Blick nach Norden in die markante durchschlagende Scherzone welche den Aletschgang unterquert.



Fig. 10: Wasserführende Entlastungsbohrung im Spritzbetongewölbe des Aletschanges.

Der rasche Rückgang des Gletschereises bedingt laufende Unterhaltsarbeiten, um einen ebenen Ausgang vom Tunnel auf den Gletscher zu gewährleisten. Die starke Ausperung der Felsflanken im Bereich des Ausgangs hat dazu geführt, dass in den letzten Jahren umfangreiche Felssicherungs- und Steinschlagschutzmassnahmen zur Vermeidung von Steinschlag und Felsablosungen umgesetzt werden mussten.

Aufgrund der Höhenlage bestehen auf dem Jungfrauoch im ungestörten Gebirge generell negative Felstemperaturen, wobei die saisonale Auftauschicht je nach Exposition ganz unterschiedliche Mächtigkeiten aufweist. Der Gletscherrückgang im Bereich des Aletschausganges war in den letzten Jahren besonders ausgeprägt mit weitreichenden Konsequenzen für die Felsstabilität. Die süd-exponierten Felsflächen werden nach ihrer Freilegung von Eis stark erwärmt und zeigen dadurch eine intensive Auflockerung entlang vorbestehender Risse und Klüfte (Fig. 9). Der Wärmeeintrag der Stollenanlagen in den umgebenden Fels (siehe auch Kapitel 3) bewirkt eine «interne» Felsauflockerung und erhöht die Durchlässigkeit des Gebirges für zirkulierendes Schmelzwasser.

Der bestehende Aletschgang wurde 1996 ausgebrochen, nachdem der alte Ausgang westlich davon durch einen sich ankündigenden Felssturz verschüttet wurde. 2006 wurden nach einem erneuten kleinen Felssturz in der Spritzbetonschale des Stollens einige Meter vom Ausgang entfernt, Risse und Wasseraustritte bemerkt. Zur Überwachung wurden Entlastungsbohrungen oberhalb des Stollenportales gebohrt (Fig. 10). Die Messungen zeigten das Auftreten von Felsbewegungen entlang von steilen, oberflächenparallelen Klüften.

Aufgrund der Zunahme der Bewegungen der Felszonen über dem Tunnelportal, den auftretenden Rissen und Abplatzungen im Gewölbe hinter dem Ausgang und dem nordseitig unter zunehmendem Druck in den Tunnel austretenden Wasser (Fig. 10), wurde eine

umfassende Felsicherungsmaßnahme mittels 15 m langen Litzenankern zur aktiven Stabilisierung der gesamten betroffenen Felszone über dem Aletschausgang projektiert und im Winter 2007/2008 ausgeführt (Fig. 11).



Fig. 11: Winterbaustelle oberhalb Aletschausgang zur Erstellung der permanenten Verankerungen.

Die Beobachtungen zeigen, dass die Wassereintritte in den letzten 10 Jahren stetig zunehmen und die feuchte Zone sich im Stollen nach innen und gleichzeitig über den gesamten Stollenquerschnitt ausbreitet. Das austretende Wasser stammt sehr wahrscheinlich vom rund 50 m höher gelegenen Hängegletscher auf der Nordseite der Sphinx das Wasser zirkuliert über steilstehende Klüfte.

Die Extensometer zeigen leichte Deformationen im Bereich von 1 bis 2 mm (Fig. 12). Die Ankerkräfte bleiben bisher konstant. Der Zustand der Ankerköpfe wird periodisch überprüft (Fig. 13); dabei werden auch der Zu-

stand der Felsbereiche und deren generelle Stabilität kontrolliert.

6.3 Sanierung der Foundation eines instabilen Seilbahnmastes - Beispiel der Rothorn Seilbahn in Zermatt

Die 1996 gebaute Rothornbahn verbindet die Stationen von Blauherd und Unterrothorn (Fig. 16). Sie verfügt über zwei Masten, die in den Höhen von 3'030 m ü.M (Mast 1) und 3'085 m ü.M (Mast 2) stehen (Fig. 14). Aufgrund zunehmender Bodeninstabilität haben sich in den letzten 10 Jahren die Sockel des Mast 1 in Richtung NW um mehrere cm bewegt (Fig. 15), was zur Gefährdung der Tragfähigkeit der Struktur und in der Folge im Frühjahr 2018 zur zeitweisen Einstellung des Bahnbetriebs führte. Es musste rasch eine machbare Lösung zur Sicherung der Fundamente gefunden werden.

Die steile Westflanke des Unterrothorns besteht aus Bündnerschiefern, welche im Gipfelgebiet lokal von hellen, plattigen Quarziten überlagert sind. In der Zone des Masts ist das Gelände von grobblockigem Schutt bedeckt; der anstehende Fels ist nur lokal erkennbar. Dieser weist eine massgebliche Schieferung auf, welche steil nach NW, also etwas quer zum Hang einfällt. Steilstehende und durchschlagende offene Klüfte sind in der Südflanke erkennbar. Auf der Basis von 15 Tastbohrungen (bis 30 m tief) konnte ein geo-



Fig. 12: Ausschnitt der Aufzeichnung der Messresultate der Extensometer.



Fig. 13: Überprüfung der Ankerköpfe durch den Geologen.

logisches Modell erstellt werden (Fig. 16). Dabei zeigte sich, dass der Fels von einer 2.5 m bis 9 m mächtigen Geröllschicht überdeckt wird. Dieses Material weist zahlreiche grosse Hohlräume auf. Darunter wurde generell kompakter Fels durchsetzt mit stärker zerklüfteten Zonen erbohrt. Die Bohrlöcher wurden mit der Kamera befahren; dabei zeigten sich die grossen und sehr unregelmässigen

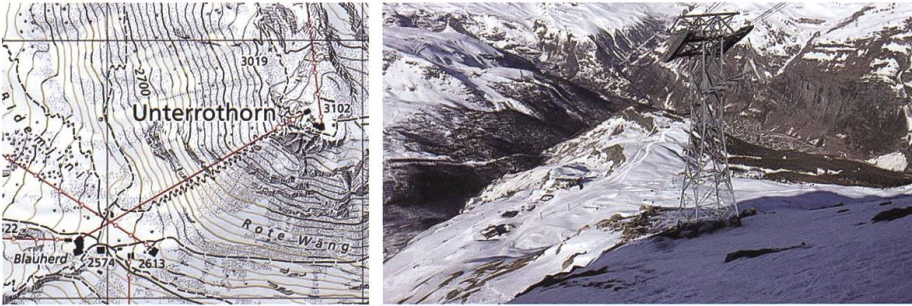


Fig. 14: Situation und Ansicht Mast 1 der Rothornbahn.

DEFORMATIONSMESSUNG BLAUHERD-UNTER ROTHORN Mast 1

VEKTOREN LAGEMESSUNG 1:200

Vektormassstab 1:1

Nullmessung vom 28.09.2012

- ▶ Vektoren 2013
- ▶ Vektoren 2014
- ▶ Vektoren 2015
- ▶ Vektoren 2016
- ▶ Vektoren 2017
- ▶ Vektoren 18.02.2018

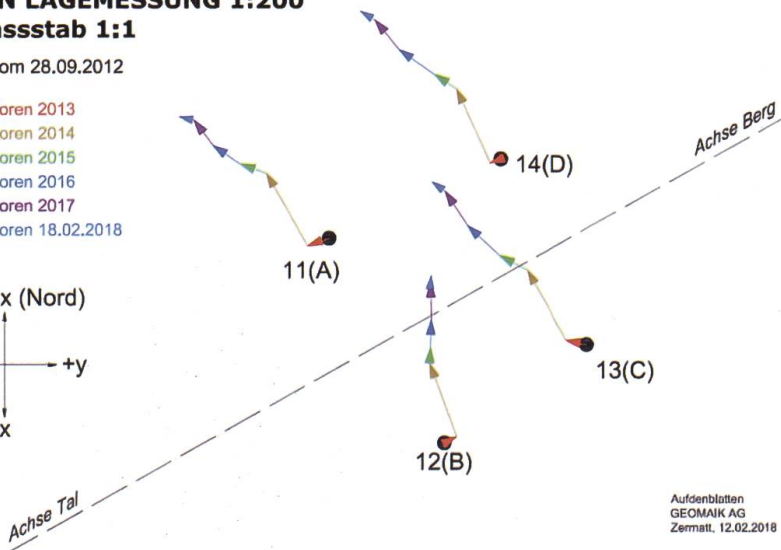
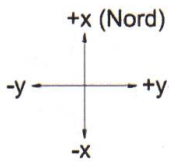


Fig. 15: Resultate der nicht kongruenten Deformationsmessungen der Fundamente von Mast 1, quer zur Bahnaxe.

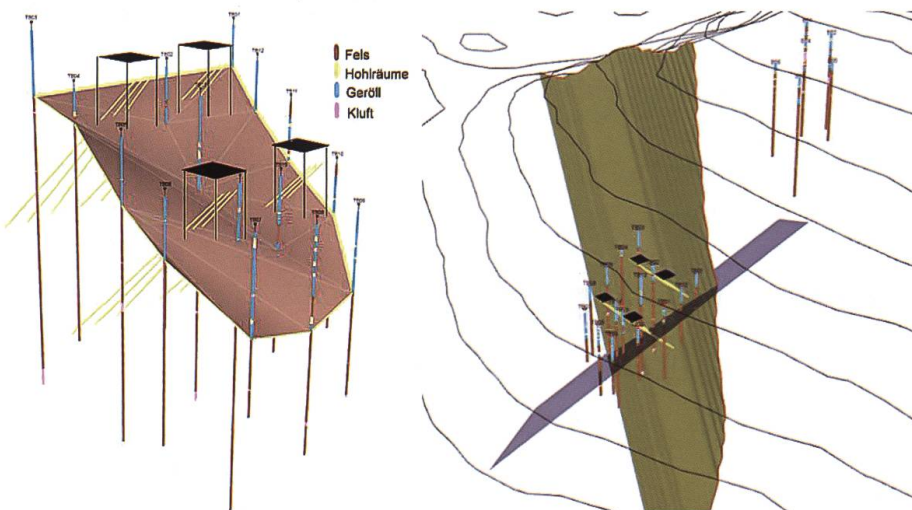


Fig. 16: Links: Vereinfachtes geologisches Modell des Fundamentbereiches von Mast 1. Rechts: Ansicht im Gesamtkontext mit kongjugierten Kluftsystemen.

gen Hohlräume. Eislin sen, welche beim Bau der Fundamente angetroffen wurden, wurden nicht mehr beobachtet.

Der Mast wurde im rund 35° steilen Gelände auf vier nicht miteinander verbundenen und mit vorgespannten Ankern verankerten Betonfundamenten abgestützt. Gemäss Ausführungsbericht wurden die Fundamente auf dem anstehenden Fels fundiert.

Ursachen der Geländebewegungen

Gemäss geologischem Modell sind zwei hauptsächliche Ursachen für die Deformationen des Untergrundes der Fundamente verantwortlich. Einerseits besteht eine tiefgründige grossräumige Sackungsbewegung des Gebirges entlang der quer zum Hang streichenden Hauptschieferung und der steil einfallenden Klüftung. Andererseits treten in den Lockergesteinen flach- bis mittelgründige Setzungs- und Rutschbewegungen auf, welche mit dem auftauenden Permafrost zusammenhängen. Es ist davon auszugehen, dass mit der Schneeschmelze und bei Regen Wasser in den zuvor gefrorenen Hohlräumen und Klüften zirkulieren kann. Dies führt zur Destabilisierung der steilen Böschungen und fortgesetzten Setzungsbewegungen im Untergrund.

Überwachung

Der Mast und dessen Fundamente wurden zusammen mit repräsentativen Punkten in der Umgebung, geodätisch überwacht (Fig. 17). Zusätzlich wurden die einzelnen Fundamente mit autonomen GPS-Antennen bestückt. In einigen Sondierbohrungen wurden Inklinometer und Piezometer installiert, um allfällige tiefgründige Bewegungen und Wasserführung zu messen.

Zur Sicherung des Mastes wurden die nachfolgend beschriebenen Massnahmen getroffen. Um die Bodenstabilität zu verbessern und die individuellen Deformationen der einzelnen Fundamente zu unterbinden, wurde der Untergrund in der Umgebung und zwischen

den Fundamenten mit 117, bis zu 15 m tiefen Injektionsbohrungen mit einem Raster von 1 bis 2 m Abstand stabilisiert (Fig. 18 bis 21). Damit sollte im Untergrund ein monolithischer Zementkörper erzeugt werden, der die Hohlräume mit Zement stabilisieren und quasi den fehlenden Permafrostkörper (Lockergestein mit einer Eismatrix) ersetzen sollte. Insgesamt wurden 1'300 Bohrmeter abgeteuft und fast 600 Tonnen Mörtel injiziert.

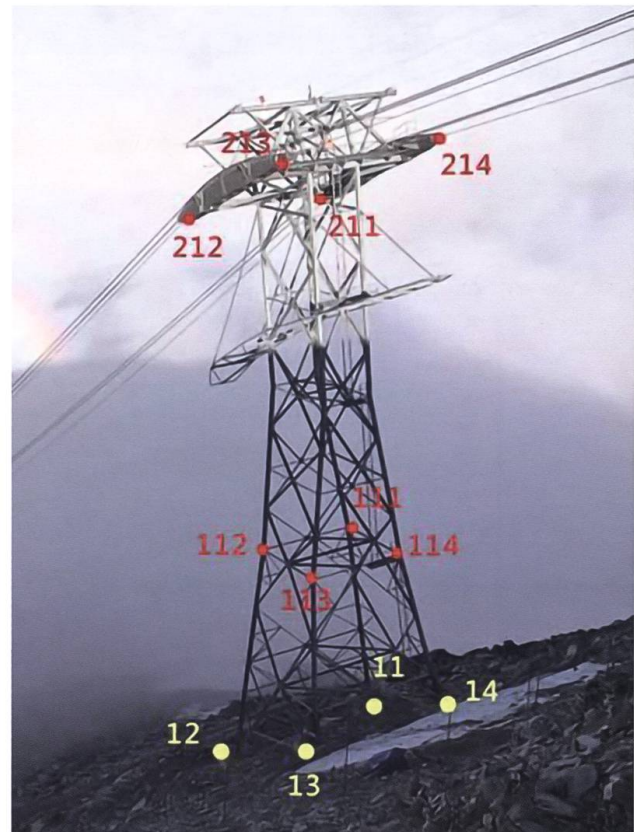


Fig. 17: Ansicht von Mast 1 mit geodätischen Messpunkten an der Konstruktion und auf den Fundamenten.



Fig. 18: Ansicht der Baustelle mit Mastfundament und Bohrungen im Vordergrund.

Die Fundamente wurden so modifiziert, dass die Stahlkonstruktion in Abhängigkeit der Deformationen justiert werden kann. Da tiefgründige Bewegungen des Untergrundes (Felsackung) mit technischen Mitteln nicht zu beherrschen sind, wurde die gesamte Konstruktion so modifiziert, dass die Fundamente zusammen mit dem Mast «mitschwimmen» können. Mit den verschiebbaren Mastfüßen ist garantiert, dass der Mast in Zukunft in seiner horizontalen und vertikalen Lage korrigiert werden kann.

Unter Berücksichtigung der injizierten Mörtelmengen sowie der Anordnung des definitiven Bohrrasters (Fig. 19) wurden die Ziele der Injektionsarbeiten erreicht und der vorher labile, setzungempfindliche Untergrund massgeblich konsolidiert. Es ist anzumerken, dass durch den grobblockigen und sehr durchlässigen Gehängeschutt die Injektionsarbeiten ohne grössere Probleme, drucklos ausgeführt werden konnten. Der Erfolg der Injektionen zeigte sich in den nachträglich für die Verstärkung und Verbindung der Fundamente ausgeführten Aushubarbeiten.

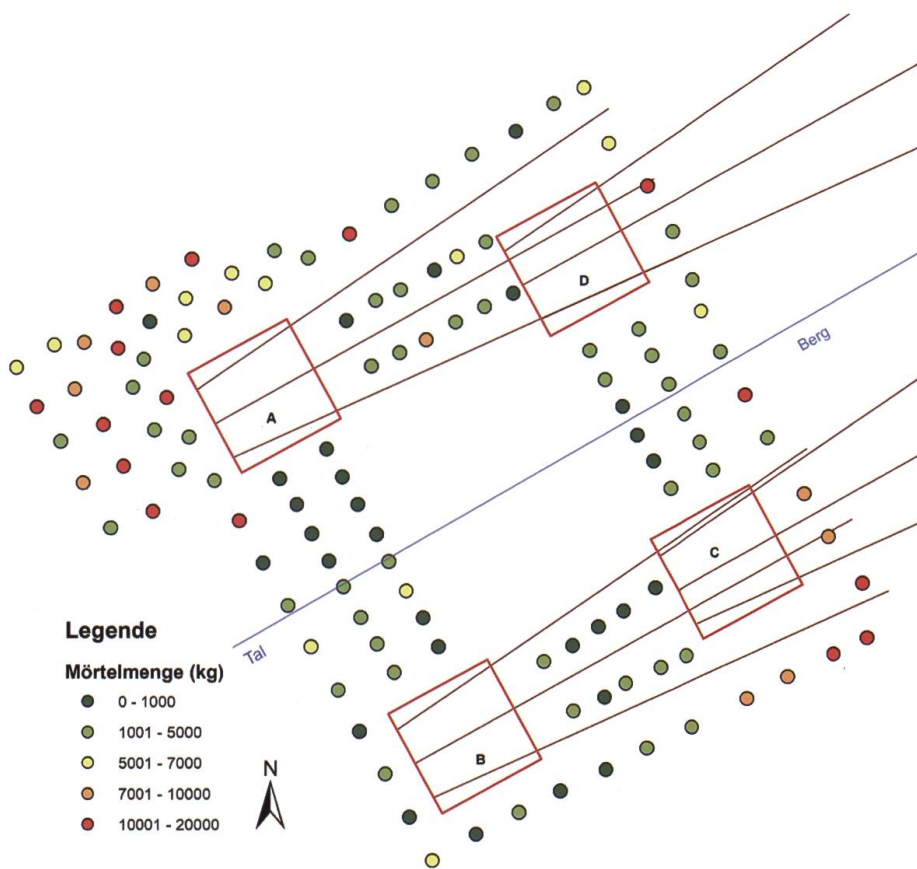


Fig. 19: Übersichtsplan der Injektionsbohrungen (Stand August 2018).

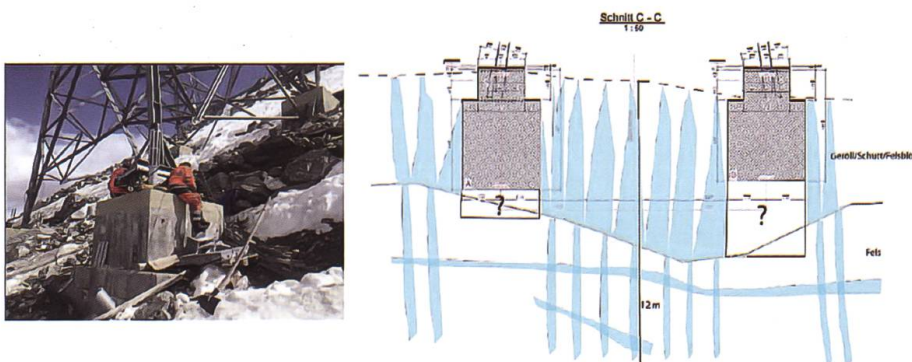


Fig. 20: Konzeptskizze der Injektionssäulen im Querschnitt.



Fig. 21: Injektionssäule (hellgrau) in den Hohlräumen des Blockschuttes am Rand der Aushubkante.

7 Schlussfolgerungen

Die Auswirkungen der Klimaveränderungen sind gerade in exponierter Lage im Hochgebirge massiv und tiefgreifend. Der Stabilitätsverlust im Fels vollzieht sich häufig innerhalb weniger Jahre und ist nicht graduell.

Planung, Realisierung und Unterhalt hochalpiner Bauten bedingen neben der Erarbeitung dreidimensionaler Baugrundmodelle im häufig ausgesetzten Gelände, ein vertieftes Verständnis der Entwicklung der Felstemperaturen. Foundationen können mithilfe technischer Massnahmen optimiert werden. Tiefgründigen Felsbewegungen muss durch eine vorausschauende Standortwahl der Bauwerke, wann immer möglich, ausgewichen werden. Unter Umständen sind flexible Bauweisen zu wählen, welche es erlauben, Deformationen des Untergrundes mitzumachen und bis zu einem gewissen Grad zu «erdulden».

Neue Mittel der Beurteilung und Überwachung erleichtern die Erarbeitung der dynamischen Baugrundmodelle. Langfristige Überwachungssysteme sollten als integraler Bestandteil der Planung, Realisierung und des Betriebes hochalpiner Bauten betrachtet werden, um die langfristige Gebrauchstauglichkeit zu garantieren.

Literatur

- [1] Bommer, C., M. Phillips, H.-R. Keusen & P. Teysseire 2009: Bauen im Permafrost: Ein Leitfaden für die Praxis. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 126 S. ISBN 978-3-905621-46-4
- [2] Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove & H. Steltzer 2019: High Mountain Areas. [in "IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate"]. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte et al. (Eds): 131-202.
- [3] PERMOS 2019: Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. J. Noetzli, C. Pellet and B. Staub (Eds), Glaciological Report (Permafrost) No. 16-19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 104 pp. DOI: 10.13093/permos-rep-2019-16-19.
- [4] Mollaret, C., C. Hilbich, C. Pellet, A. Flores-Orozco, R. Delaloye & C. Hauck 2019: Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites. *The Cryosphere* 13(10): 2557-2578. DOI: 10.5194/tc-13-2557-2019
- [5] Harris, S. A., H. M. French, J. A. Heginbottom, G. H. Johnston, B. Ladanyi, D. C. Sego and R. O. van Everdingen 1998: Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. Technical Memorandum No. 142. Ottawa, Ontario, Canada, Permafrost Subcommittee, Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada.
- [6] Krautblatter, M., C. Huggel, P. Deline & A. Hasler 2012: Research perspectives on unstable high-alpine bedrock permafrost: measurement, modelling and process understanding. *Permafrost and Periglacial Processes* 23(1): 80-88. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.740>
- [7] Murton, J. B., R. Peterson & J.-C. Ozouf 2006: Bedrock Fracture by Ice Segregation in Cold Regions. *Science* 314(5802): 1127-1129. DOI: 10.1126/science.1132127

- [8] Kenner, R., J. Noetzli, M. Hoelzle, H. Raetzo & M. Phillips (2019a): Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere* 13: 1925–1941. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-13-1925-2019>
- [9] Rist, A., M. Phillips & S. M. Springman 2012: Inclined Shear Box Simulations of Deepening Active Layers on Perennially Frozen Scree Slopes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 23(1): 26–38. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.1730>
- [10] Arenson, L. U. & M. Jakob 2015: Periglacial Geohazard Risks and Ground Temperature Increases. In *Engineering Geology for Society and Territory*, eds. G. Lollino, A. Manconi, J. Clague, W. Shan & M. Chiarle, Cham: Springer International Publishing: 233–237.
- [11] Bommer, C., M. Phillips & L. U. Arenson 2010: Practical recommendations for planning, constructing and maintaining infrastructure in mountain permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1): 97–104. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.679>
- [12] Duvillard, P.-A., L. Ravel, M. Marcer & P. Schoeneich 2019: Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. *Regional Environmental Change*, 19: 1281–1293. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z>
- [13] Phillips, M., F. Ladner, M. Muller, U. Sambeth, J. Sorg & P. Teyssie 2007: Monitoring and reconstruction of a chairlift midway station in creeping permafrost terrain, Grächen, Swiss Alps. *Cold Regions Science and Technology*, Special Issue: A Selection of papers presented at the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, Wyoming, September 2004, 47: 32–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.08.014>
- [14] Phillips, M. & S. Margreth 2010: Kriechbewegungen unterschätzt. *TEC21*, 5-6: 24–26.
- [15] Davies, M. C., O. Hamza, & C. Harris 2001: The Effect of Rise in Mean Annual Temperature on the Stability of Rock Slopes Containing Ice-Filled Discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1):137–144. DOI: 10.1002/ppp378.
- [16] Noetzli, J. & S. Gruber 2009: Transient thermal effects in Alpine permafrost. *The Cryosphere*, 3: 85–99. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-3-85-2009>