

Siegener Symposium

“Geomesstechnik” 2023

Geomesstechnik für alpine
Infrastruktur im Zusammenhang
mit Permafrost

Daniel Naterop

SISGEO - Italy and Huggenberger AG - Switzerland



Sieger Symposium "Geomesstechnik" 2023

Geomesstechnik für alpine Infrastruktur im Zusammenhang mit Permafrost

Daniel Naterop (SISGEO, Italy and Huggenberger AG, Switzerland)

1. Einleitung:

Infrastrukturbauten im alpinen Raum, wie Stationen und Stützen von Seilbahnen, Lawinerverbauungen, Eisenbahnanlagen, militärische Schutzbauten, sind durch den tauenden Permafrost in ihrer Stabilität gefährdet. Verkehrsanlagen wie Strassen, Eisenbahnlinien aber auch Talsperren und Stauseen können durch gravitative Felsstürze und Bodenbewegungen, welche auch von auftauendem Permafrost ausgelöst sind in Ihrer Sicherheit möglicherweise stark beeinträchtigt. Eine erfolgreiche Realisierung und Erhaltung eines Bauwerkes in Gebieten mit Permafrost stellt für die beteiligten Bauherren und Planer eine technische und finanzielle Herausforderung dar.

Beim Planen eines Tragwerkes müssen spezielle Lastfälle und Gefährdungsbilder berücksichtigt werden, welche potentielle Veränderungen des Permafrost-Baugrunds berücksichtigen. Durch die Erfassung der relevanten Grössen im Baugrund, können durch Permafrostveränderungen beeinflusste Risiken erkannt und überwacht werden um im Rahmen eine Frühwarnsystems, die Sicherheit zu verbessern.

2. Einige spezifische Begriffe und Phänomene im Zusammenhang mit Bauwerken Stabilität

Auffrieren Hebung bis zu Auswerfung von Objekten (z.B. Fundamente) im Baugrund durch Frostwirkung.

Auftaubedingte Lockerung Die Verminderung der Lagerungsdichte und damit der Druck- und Scherfestigkeit beim Auftauen eines Permafrostbodens.

Auftaubedingte Verfestigung/Konsolidation Eine durch Schmelzen und Abfluss des überschüssigen Porenwassers provozierte, zeitabhängige Verdichtung des Baugrunds (Vergrösserung der Lagerungsdichte).

Auftaubedingtes Rutschen Hanginstabilität, wird durch Auftauen von Bodeneis provoziert.

Frosthebung Durch Eisbildung verursachte Aufwärts- oder Seitwärtsbewegung des Baugrunds oder von Objekten, die sich im/auf dem Baugrund befinden.

Frostspaltung/-sprengung Durch Druck erzeugte mechanische Zerstörung von Gestein, welche beim Gefrieren von Wasser in Felsdiskontinuitäten vorkommt.

Hebungsdruck Aufwärtsdruck der durch das Gefrieren des Baugrunds erzeugt wird. Der Hebungsdruck ist verantwortlich für die Hebung von Infrastrukturen.

Permafrost-Degradation Eine Abnahme der Mächtigkeit oder der Verbreitung des Permafrosts.

Permafrost erhaltende Bauverfahren Baumethoden, die den Erhalt von Permafrost ermöglichen.

Als Permafrost wird gefrorenes Bodenmaterial bezeichnet, das während des ganzen Jahres negative Temperaturen aufweist. Die Bodenschicht zwischen der Bodenoberfläche und dem Permafrostspiegel ist die Auftauschicht (Abb. 1), die im Sommer auftaut und im Winter gefriert. Der Permafrostspiegel ist die obere Grenze des Permafrostkörpers.

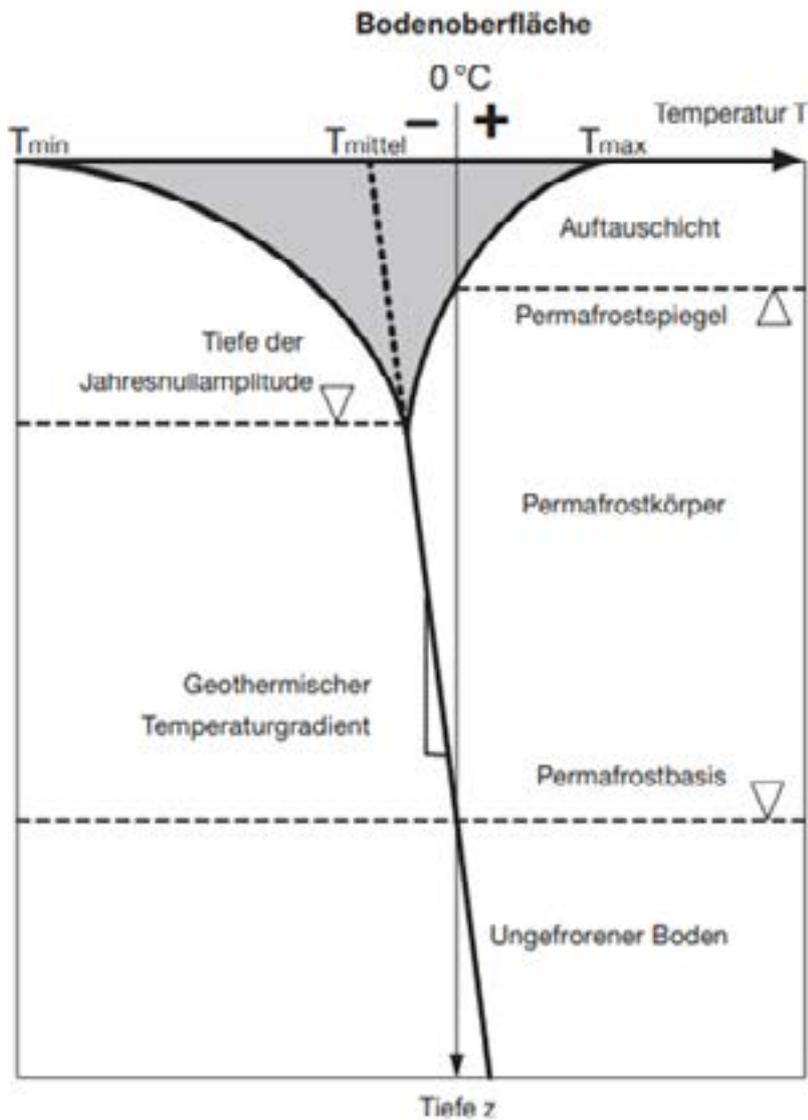
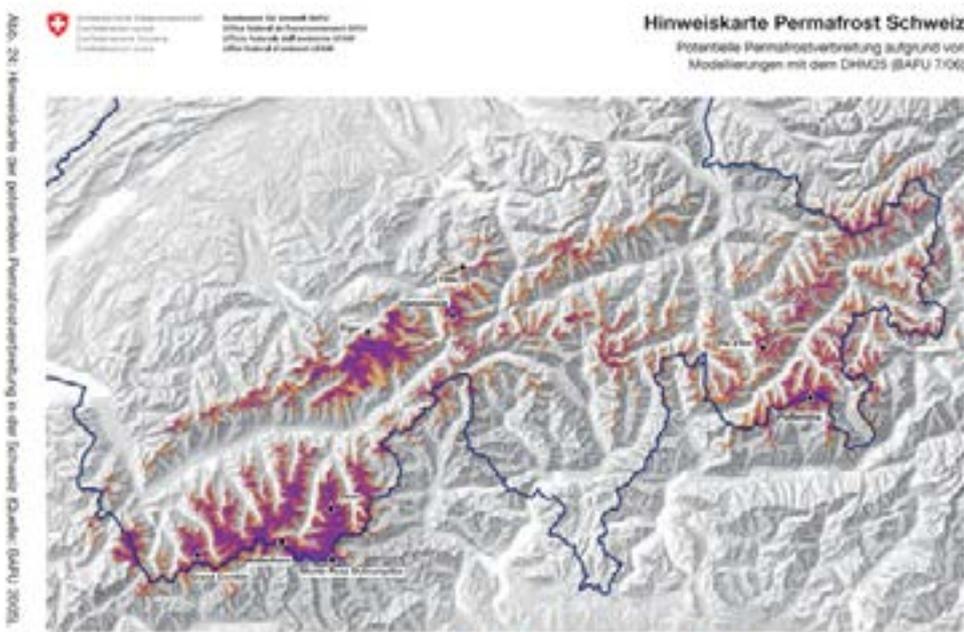
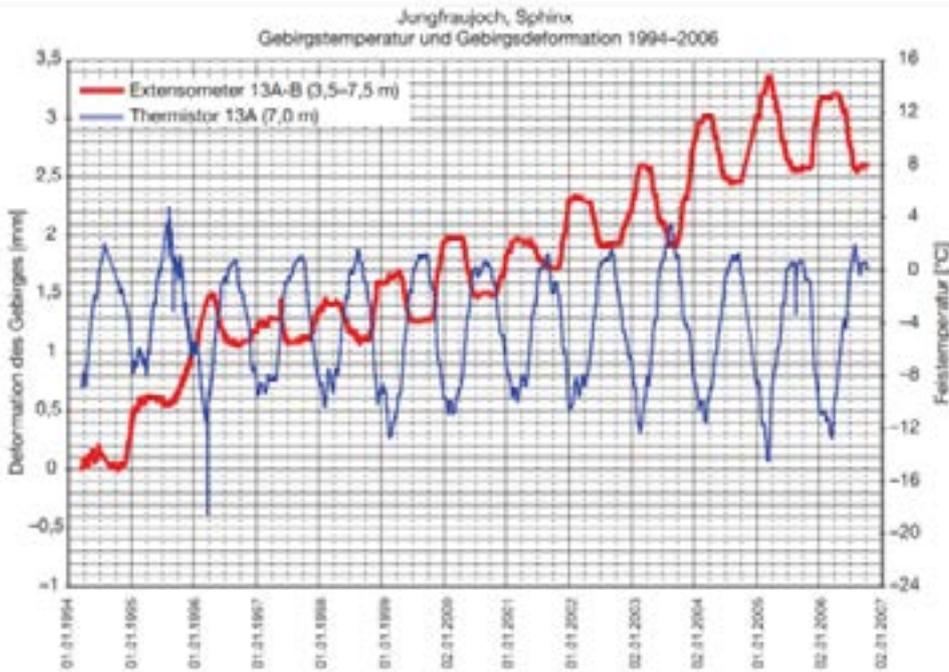


Abb. 1: Wichtige Begriffe und typische Temperaturverteilung (schwarze Kurven) in einem Permafrostboden. Der graue Bereich zeigt die Spannbreite der saisonalen Temperaturschwankungen im Untergrund. Im Alpen Raum kann Permafrost ab einer Höhe von ca. 2000m_{ÜM} auftreten. Je nach Exposition und Hanglage kann diese Höhe stark variieren. In der Schweiz liegt eine Fläche von ca. 6% im Permafrost.

Die Schneedecke, die Lufttemperatur, die Strahlung und die Topographie aber auch die Bodenbeschaffenheit (thermische Eigenschaften) und die lokale Hydrogeologie beeinflussen die Entwicklung des Permafrost stark. Die geotechnischen Eigenschaften, primär das Festigkeits- und Deformationsverhalten, eines Baugrundes sind vom Permafrost stark beeinflusst. Die mechanischen Eigenschaften von Festgestein z.B. einer Felswand, Felsböschung) im Permafrost sind vorrangig durch von Frost verursachter Verwitterung (Frostspaltung) und die durch Frost unterstützte Stabilität des Gebirgsgefüges beeinflusst.



- Legende:
- Permafrost lokal Möglich
 - Permafrost flächenhaft Wahrscheinlicher



3. Mess- und Überwachungskonzept bei geotechnischen Strukturen im Permafrost

Anhand einer Risikobetrachtung mit Felduntersuchungen allenfalls unterstützt durch Labortests für geplante aber auch bestehende Bauten und der Erhebung resp. Planung des Standortes und des Tragwerkes ergeben sich Parameter welche für ein Überwachungskonzept eingesetzt werden. Ein Kontrollplan bei Neubauten und bei Bauten m Bestand dokumentiert die auszuführenden Überwachungen und Messungen und definieren die daraus abzuleitenden Massnahmen.

Zur Vorerkundung des Permafrostvorkommens stehen folgende Methoden im Vordergrund:

- Bodenoberflächentemperatur resp. Basis-Temperatur der Schneedecke ist eine einfache und effiziente Methode Informationen über die räumliche Verteilung des Permafrostes zu erhalten
- Mit einem Sonnenkompass wird die potentielle Sonneneinstrahlungsdauer für jeden Monat an einem beliebigen Punkt im Gelände festgestellt.
- Anhand von terrestrischen Vermessungen können allfällige Kriechbewegungen und deren Geschwindigkeiten, sowie Senkungen, Hebungen und Volumenänderungen an Fels- und Bodenoberflächen sowie an bestehenden Bauten festgestellt werden.
- Geophysikalische Messmethoden wie Geoelektrik, Georadar oder Seismik erlauben die Temperatur, der Wasser- und der Eisgehalt des Bodens, sowie die Stratigraphie zu bestimmen.

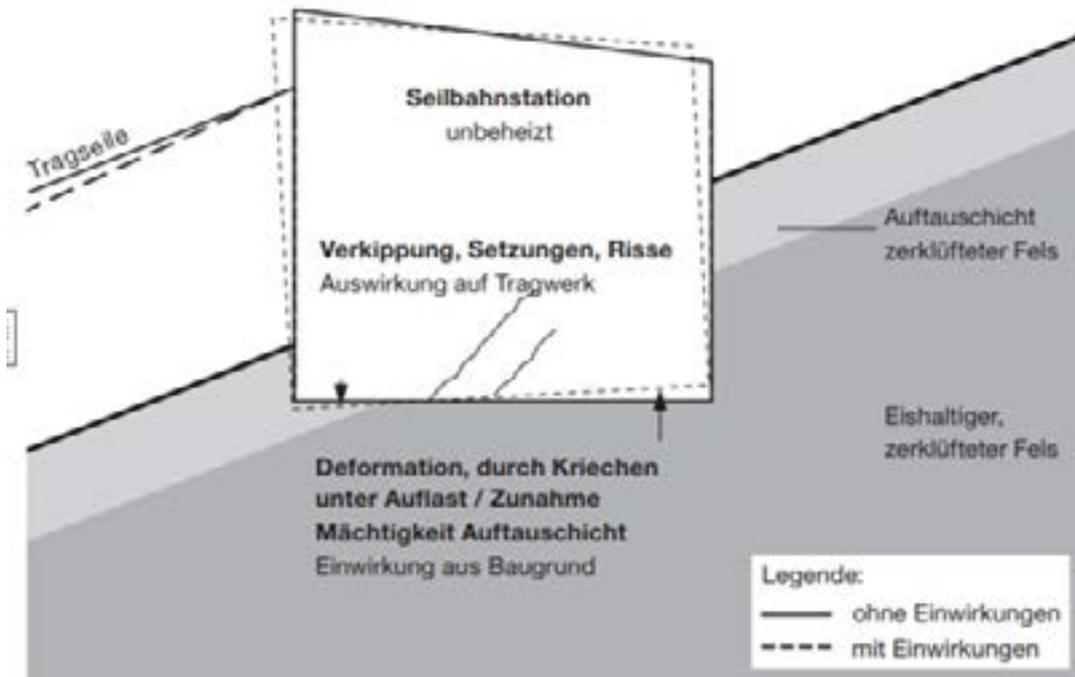
Permafrost kann mit folgenden Methoden nachgewiesen werden:

- Sondierschlitze bieten die Möglichkeit, direkte Informationen über die Eigenschaften des Baugrunds in den obersten Metern zu erhalten und es besteht die Möglichkeit, Messinstrumente wie Thermometer im Boden einzubauen.
- Bohrungen liefern direkte Angaben über die Baugrundeigenschaften bis in eine grosse Tief. Die Auftauschicht sollte auf jeden Fall durchbohrt und wenn möglich die Basis des Permafrostkörpers erreicht werden. In allen Fällen sollte vermieden werden, mit Wasser zu bohren, um den Permafrost möglichst wenig zu stören. Anstelle von Wasser sollte Luft zur Spülung des Bohrlochs eingesetzt werden. Um nachträglich Messungen zu ermöglichen werden die Bohrlöcher mit einem wasserdichten Rohr bestückt. Das Rohr sollte eingemörtelt und mit einem Schacht (mit Deckel) an der Oberfläche geschützt werden. Für Deformationsmessungen (Inklinometer- und oder Extensometermessungen) werden die Bohrlöcher mit Inklinometer- und Sondenextensometer-Rohren z.B. T-Rex oder Gleitdeformeter ausgerüstet und der Ringraum Messrohr-Boden ausgemörtelt.

In Bohrlöchern können verschiedene Messwert um den Zustand des Baugrunds und allfällige Veränderungen im Permafrost festzuhalten, ausgeführt werden.

- Mittels Temperaturmessketten die mit einem Datenlogger betrieben sind, wird das Ausmass und die Lage über die Zeit des Permafrostkörpers erfasst und dessen Temperaturen präzise gemessen.

Schematic drawing of a cable way summit station partially in permafrost foundation.



Vorbereitung des Überwachungssystems

Die Überwachung mit Messsystemen erfolgt optimalerweise vor dem Baubeginn. Eine systematische Planung der Messungen und Überwachungen basiert auf einer Risikobetrachtung welche folgende Elemente aufweist:

- Risikoermittlung
- Risikobewertung
- Risikobeeinflussung (-Minderung) durch Überwachungsmessungen

Eine optimale Überwachung von Baugrund und Bauwerk beginnt mit der einer systematischen Planung der Messsysteme und deren Betrieb:

- a) Problemstellung, Fragen die es zu beantworten resp. zu bearbeiten gilt
- b) Welche physikalischen Parameter sollen erfasst werden Meter, °C, Newton, Pascal, Zeit in welcher Grösse und Genauigkeit
- c) Messprinzip (punktweise, linienweise, räumlich)
- d) Welche Messsysteme sollen eingesetzt werden (technische Eignung, Kosten, Verfügbarkeit, Robustheit, Austauschbarkeit Messsystem bei langen Messzeiträumen, Redundanz)
- e) Messprogramm (Periode, Messhäufigkeit, Grenzwert-Behandlung, Darstellung der Daten und Schnittstelle zu Anwendern)
- f) Datenauswertung und Informationsverarbeitung (Verantwortlichkeit,
- g) Massnahmen im Normalbetrieb und Ereignisfall (z.B. bei Grenzwertüberschreitung, Informationsfluss, etc.)

Messungen wie z.B. Temperatur- und Deformationsmessungen, die frühzeitig, d.h. genügend lange vor Baubeginn starten, wenn möglich ein Jahr vorher, beginnen, zeigen durch die Bauarbeiten verursachte Veränderungen möglicherweise auf.

Können Schäden am Bauwerk schon bei kleinen Deformationen entstehen, sind, um aussagekräftige Schlüsse zu ziehen, genaue und empfindliche Messsysteme einzusetzen.

Überwachungssysteme während der Ausführung

Die folgende Zusammenstellung listet verschiedene Überwachungssysteme und Methoden auf:

a) Visuelle Überwachung Einsehbarkeit Täglich, Wöchentlich

– Risse, Hohlräume

– Eis

– Änderungen allgemein

b) Automatische Boden- / Luft-Temperaturmessungen Zugänglichkeit Stündlich Täglich

– Entwicklung der Temperatur auf Oberflächen, in Bohrlöchern und an Tragwerken

c) Geodätische Vermessung

– Verschiebungen auf der Geländeoberfläche und an Bauwerken kontinuierlich Wöchentlich / Monatlich

d) 3D Laserscanning – Verschiebungen des Geländes

– Grosse Volumenänderungen im

Gelände (z.B. durch Felsbewegungen, Eisschwund, Eisbildung, usw.)

– Verschiebungen von Infrastrukturen Vermessene Referenzpunkte im Gelände

e) Bohrloch-Sondenextensometer- Messungen (z.B. T-Rex, Gleitdeformeter, DEX)

– differentielle Hebungen Setzungen im Baugrund (Verschiebungsprofile entlang der Bohrung)

f) Bohrloch-Inklinometer Messungen

– Horizontale Verschiebungen im Baugrund Inklinometer-Rohr in Bohrloch

Monatlich während kritischer Bauphasen automatische Messung mit Inklinometer-Messkette

g) Extensometermessungen Zugänglichkeit Täglich – Wöchentlich, während kritischer Bauphasen automatische Messung

– Verschiebungen von Felsklüften

– Verschiebungen von Bauten

Kraftmessung an Ankerkraftmessdosen Zugänglichkeit Monatlich bis 1 Mal / Jahr während

kritischer Bauphasen automatische Messung

– Bodenpressungen unter Fundationen

– Ankerkräfte von Felsverankerungen

h) Ankerzugversuch – bei Installation der Anker

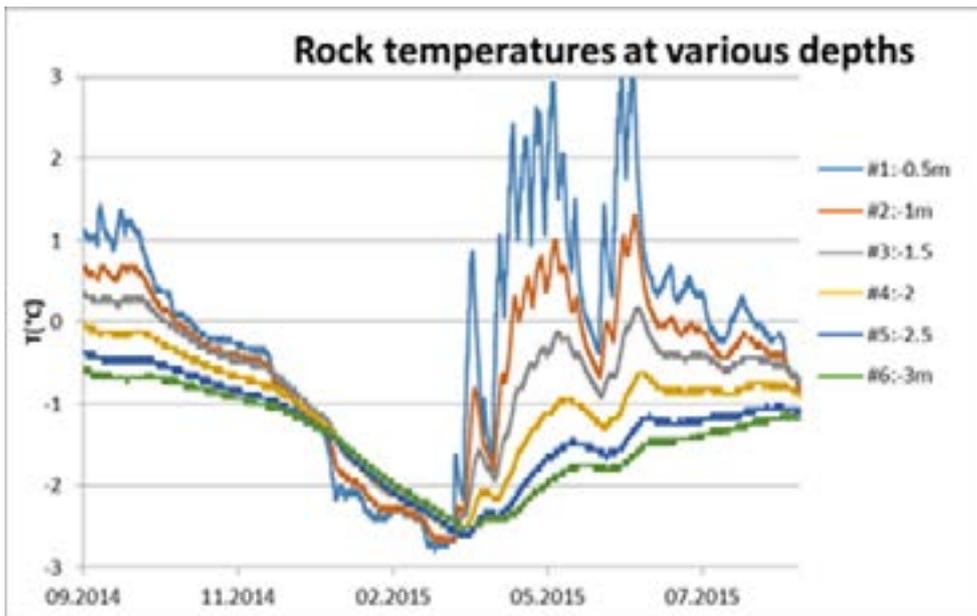
4. Monitoring zur Beurteilung und Überwachung der Stabilität von Seilbahn-Bergstationen Kleinmatterhorn und Berggipfel in der Ostschweiz,

Das Projekt Alpin X, das durch die Zermatt Bergbahnen realisiert wird, hat zum Ziel eine Touristen- Verbindung zwischen Zermatt (Schweiz) und Cervinia (Italien) über den Gipfel des Kleinmatterhorns zu realisieren. Dazu werden am Gipfel in 3820m Höhe, an den 50° bis 70° geneigten Felswänden, zwei neue Seilbahn-Bergstationen gebaut. In diesen Serpentine-Felswänden mussten umfangreiche Felsausbruchsarbeiten von ca. 10000m³ und Felsstabilisierungen auf einer Länge von 60m und einer Höhe von ca. 50m ausgeführt werden. Spezielle Herausforderungen ergaben sich durch oberflächennahe instabile Felspartien und die herrschenden Permafrost-Bedingungen. Ein felsmechanisches Monitoring, mit dem einerseits die Felsverschiebungen, Felstemperaturen und die Lasten der Felsverankerungen erfasst werden, bilden einen wichtigen Bestandteil um die Sicherheit während den Bauarbeiten und in den folgenden Betriebsjahren zu gewährleisten.



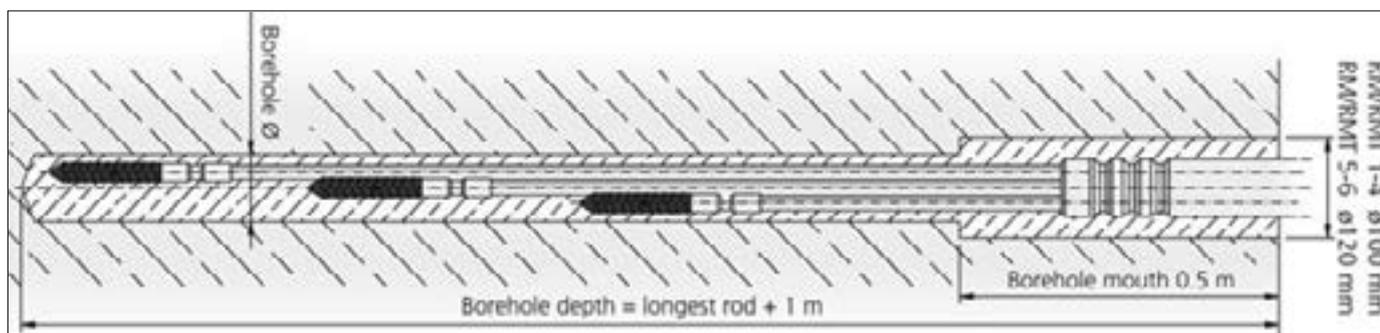
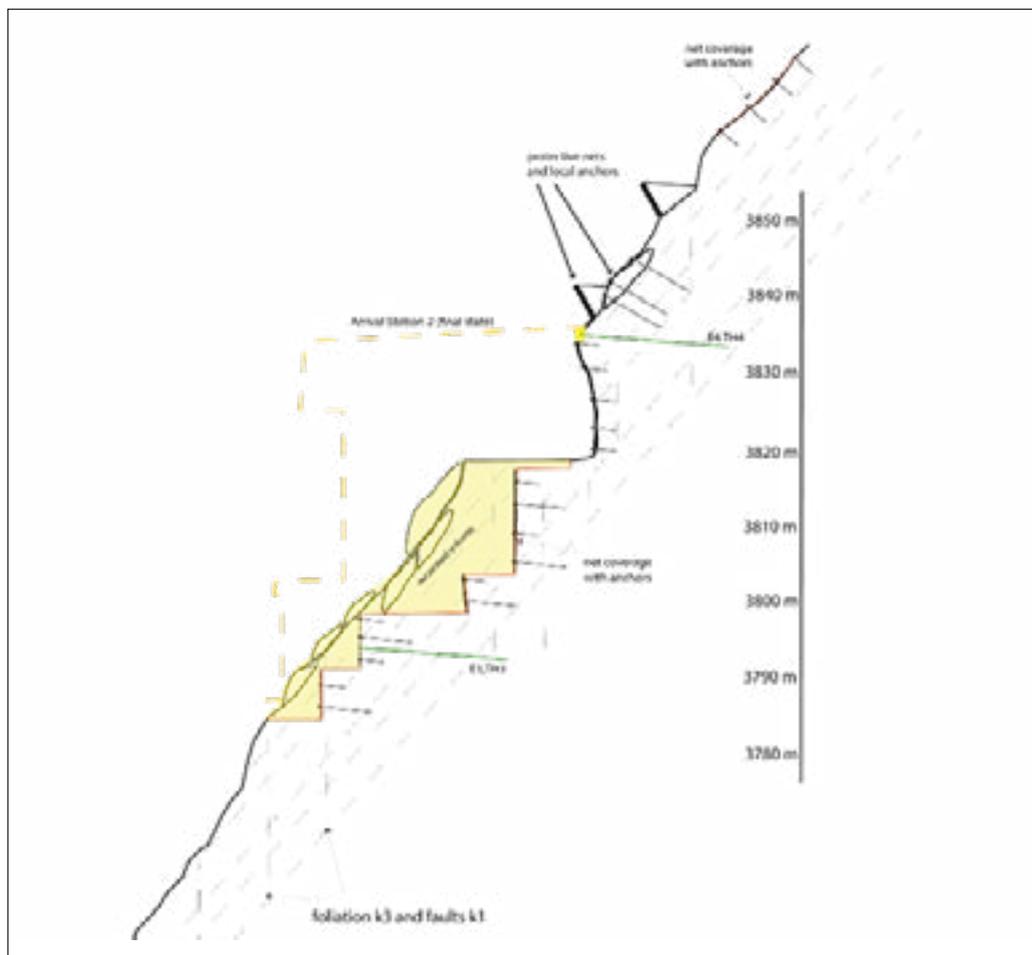
Strongly foliated serpentinite at the excavation front. (b) Typical superficial undulated rock flakes

Aufgrund der großen Höhe der Baustelle sind innerhalb des Felsmassivs vorherrschende Permafrostbedingungen zu berücksichtigen. Dies führt zu einer durchgehend negativen Gesteinstemperatur ab einer Tiefe von etwa 2 m, während die Gesteinstemperaturen in den oberflächennahen Schichten starken jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen und im Sommer positiv werden und die so genannte aktive Zone bilden. Diese Gesteinstemperaturkonfiguration führt zur Existenz von Eisfüllungen mit geringer Ausdehnung innerhalb der Schichtung oder der Risse der flachen und oberflächennahen Schichten von denen einige um Mitte Juni auftauen und abfließen. Die Ausdehnung des Permafrostkörpers innerhalb des Klein Matterhorns nimmt aufgrund der Klimaerwärmung und lokaler Aktivitäten im Zusammenhang mit bestehenden Einrichtungen und Bauwerken tendenziell ab. Dies führt zu einer fortschreitenden Vergrößerung der Auftauschicht verbunden mit einer Zunahme von Felsinstabilitäten in den oberflächennahen Schichten.



Um mögliche Gebirgsinstabilitäten in den tiefen Gesteinsschichten unter und hinter der Station zu erkennen, werden Verschiebungen beiderseits von vorhandenen kreuzenden Diskontinuitäten sowie eine mögliche Erwärmung der Gebirgstemperaturen mit Hilfe von 4 Stück 3-fach Bohrlochextensometern mit Stahlgestänge (E1-E4) und 4 Stück 3-fach Bohrloch-Thermistoren (TH1-TH4) überwacht. Diese Instrumente wurden in um 10° nach unten geneigten Bohrlöchern installiert, die in den untersten Ebenen der Aushubplattform sowie direkt unter den Stützbereichen der Dächer gebohrt wurden. Sie liefern Messungen in 3 verschiedenen Tiefen zwischen 5 und 30 m. Bisher wurden keine signifikanten Verschiebungen festgestellt, während die Temperaturen im Gestein immer noch unter 0°C liegen, aber eine leichte Erwärmung aufzeigen.

Green line: Borehole extensometers and temperature string installed in boreholes





Borehole extensometer head (type Huggenberger) with cables of temperature string

View from the Klein-Matterhorn towards the famous Matterhorn mountain



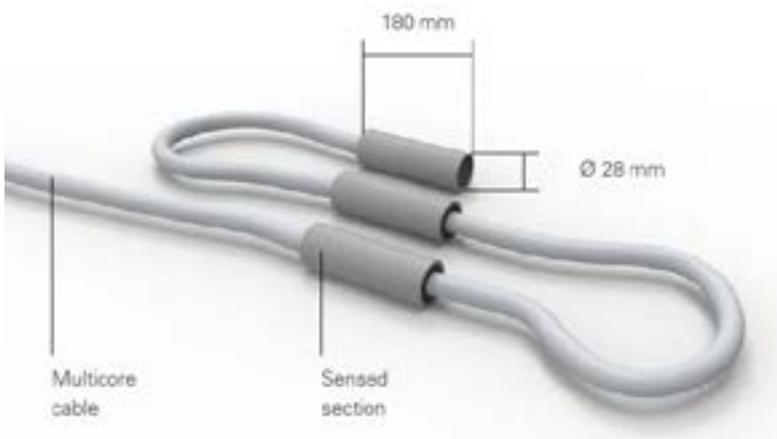
5. Seilbahn-Bergstation Ostschweiz

Ein weiteres Projekt zeigt das Felsmechanik-Monitoring auf einem Berggipfel in der Ostschweiz auf. Die auf ca. 3100 m Höhe gelegene Bergstation ist auf Fels (Serpentinit) im Permafrost verankert. Durch die sich ändernden klimatischen Verhältnisse kann sich die Frostzone verändern und somit die Stabilität des Widerlagers beeinträchtigen. In Bohrungen eingebaute Systeme zur 3-D Verschiebungsmessung und Temperaturmessung werden in den nächsten Jahren wichtige Hinweise und Informationen im Hinblick auf eventuell notwendige Stabilisierungsmassnahmen geben. Der dort vorhandene Serpinit ist stark erodiert. Diese erodierte Zone reicht bis in grössere Tiefen von ca. 5-8m. Bei der Degradation des Permafrostes nimmt die Scherfestigkeit und die Druckfestigkeit massiv ab und es treten Setzungen und Horizontalverschiebungen auf.

Rear area of the summit station

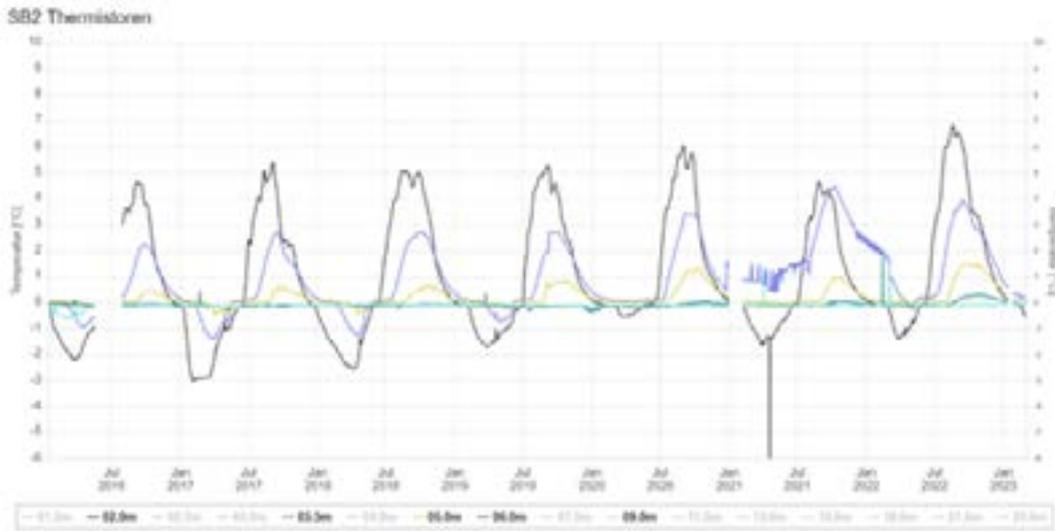


Inclinometer -Magnet-Extensometer borehole casing prepared to have the temperature strings attached: ready to install



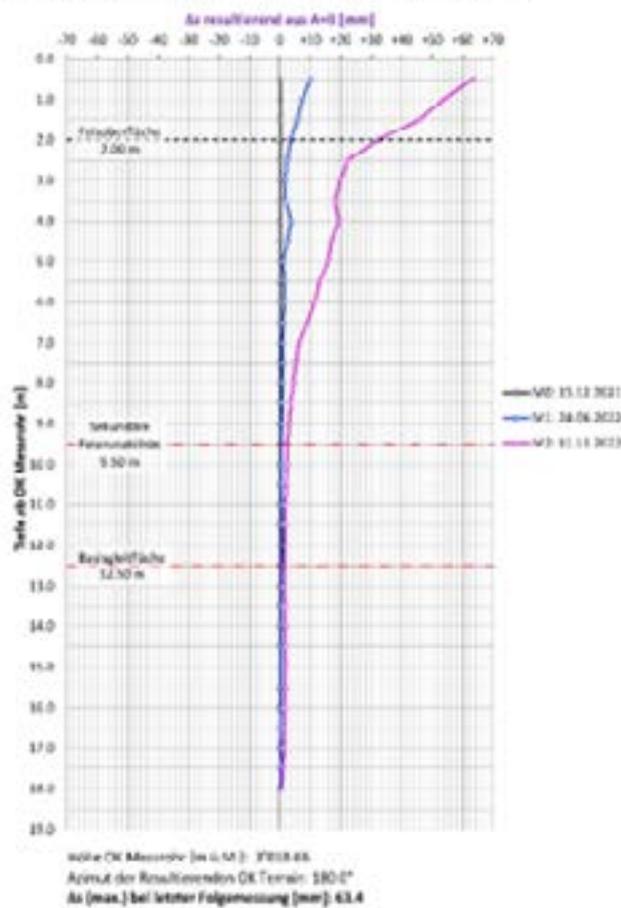
Thermistor String

Rock temperatures over past 8 years and at various depths

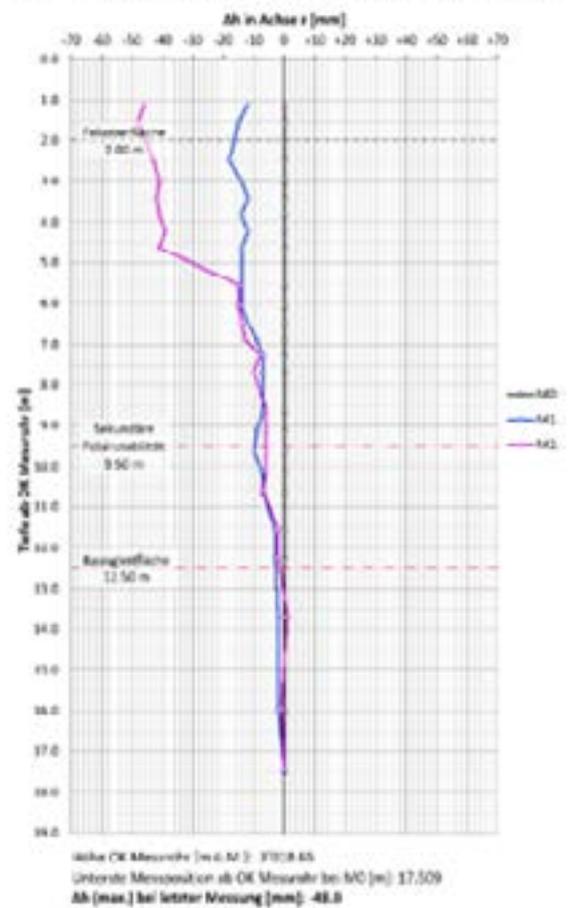


Horizontal and vertical deformation in deformation profiles

Aufgenommene Lagerverchiebung, Bezugspunkt unterste Messposition



Aufgenommene Höhenverchiebung, Bezugspunkt UK unterster Magnetring



Literatur:

Bauen im Permafrost Ein Leitfaden für die Praxis. Bommer, C.; Phillips, M.; Keusen, H.-R.; Teyseire, P., 2009: Bauen im Permafrost: Ein Leitfaden für die Praxis. Birmensdorf, Eid. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 126 S. J: 2009

Rock mechanics and engineering for the Klein Matterhorn glacier paradise (Zermatt, Switzerland), P. Dalban (Geotest AG, CH-3052 Zollikofen), R. Haas (Gasser Felstechnik AG, CH-6078 Lungern), M. Lauber (LABAG, CH-3920 Zermatt), D. Naterop (Huggenberger AG, CH-8810 Horgen resp. Sisgeo srl. IT-20060 Masate)