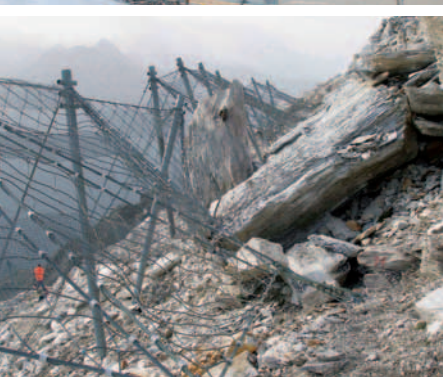




Bauen im Permafrost

Ein Leitfaden für die Praxis

Christian Bommer, Marcia Phillips, Hans-Rudolf Keusen
und Philipp Teyssere



WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee
und Landschaft WSL

Bauen im Permafrost

Ein Leitfaden für die Praxis

Christian Bommer, Marcia Phillips, Hans-Rudolf Keusen und Philipp Teyssere

Herausgeber

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 2009

Verantwortlich für die Herausgabe

Prof. Dr. James Kirchner, Direktor WSL

Autoren

Christian Bommer, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos
Dr. Marcia Phillips, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos
Dr. Hans-Rudolf Keusen, Geotest AG, Zollikofen
Dr. Philipp Teyssie, Teyssie & Candolfi AG, Visp

Auftraggeber

armasuisse Immobilien; Bundesamt für Verkehr BAV

Steuerungsausschuss

Ulrich Appenzeller, armasuisse Immobilien, Bern; Toni Eder, Bundesamt für Verkehr BAV, Bern;
Dr. Michael Lehning, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos

Fachliche Begleitgruppe

Christian Tellenbach, armasuisse Immobilien, Bern; Rolf Keiser, armasuisse Immobilien, Bern; Urs Dietrich, Bundesamt für Verkehr BAV, Bern; Charly Wuilloud, Dienststelle für Wald und Landschaft Kanton VS, Sion

Projektpartner

Geotest AG; Schweizer Alpen-Club SAC; Kanton Wallis

Lektorat

Dr. Veronika Stöckli, SLF, Davos; Frank Krumm, SLF, Davos

Review

Dr. Lukas Arenson, BGC Engineering, Vancouver BC; Ruedi Degelo, Gasser Felstechnik AG, Lungern;
Dr. Felix Keller, Academia Engiadina, Samedan; Stefan Margreth SLF, Davos; Prof. Dr. Hansruedi Schneider, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil

Zitiervorschlag

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

Gestaltung

Jacqueline Annen, WSL

Umschlag

Abbildungen von oben nach unten:

Aushub mit dem Bagger in einem eisreichen Lockergestein (Foto SLF)

Bau einer Hütte im Hochgebirge (Foto SLF)

Durch Steinschlag beschädigte Schneenetze in einem kriechenden Permafrosthang (Foto SLF)

Streifenfundament einer Berghütte auf felsigem Baugrund (Foto Ruch Architekten, Meiringen)

Querverschiebbare Seilbahnstütze (Foto SLF)

Instrumentiertes Bohrloch im Permafrost (Foto SLF)

Bezug

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

WSL Shop

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

Preis: Fr. 26.–, e-shop@wsl.ch, www.wsl.ch/eshop

PDF Download: www.wsl.ch/publikationen/pdf/9819.pdf

ISBN 978-3-905621-46-4

© Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 2009

Vorwort

Stationen und Stützen von Seilbahnanlagen wie auch Bahnhöfe und Bauten von Eisenbahnanlagen sind stabil und sicher gebaut. Auch im Hochgebirge in Schnee und Eis sind sie auf stabilem Fels fundiert. Touristen und Reisende erwarten diese Sicherheit. In den letzten Jahren wurde diese Gewissheit jedoch durch etliche Meldungen der Presse erschüttert: «Der Berg schmilzt weg», «der Permafrost taut auf, die Fundamente werden instabil». Das Problem des tauenden Permafrosts ist neu; nicht aber das Bauen im Permafrost. In den Alpen wurden bisher verschiedene Bautechniken eingesetzt, gewisse bewährten sich, andere weniger. Tatsache ist: Es waren in den letzten Jahren immer häufiger Schäden an bestehenden Bauten zu beklagen. Die Klimaerwärmung mit dem teilweisen Auftauen der Permafrostzonen beschleunigte diesen Prozess noch. In diesem Zusammenhang stellte sich das Bundesamt für Verkehr (BAV) als zuständige Aufsichtsbehörde von Seil- und Eisenbahnen gewisse Fragen: Ist die Sicherheit der bestehenden Anlagen noch gewährleistet? Haben die Betreiber die Gefahren und Risiken erkannt? Welches sind wirtschaftliche resp. kostengünstige Sanierungskonzepte? Wie stellen wir sicher, dass neue Anlagen zweckmässig gebaut werden?

Seit Jahrzehnten baut und unterhält das Eidgenössische Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) zahlreiche Bauten im Gebirge. Dazu gehören Seilbahnen, Strassen, Übermittlungs-, Kampf- und Führungsbauten. Das einwandfreie Funktionieren dieser Infrastruktur ist zentral für die Auftragserfüllung der Armee. Wie bei den zivilen Anlagen stellt der Permafrost und bzw. dessen Verschwinden immer höhere Anforderungen an die Konstruktion dieser Bauwerke. Als Immobilienorgan des VBS stellte sich armasuisse Immobilien die Frage, wie der Problematik am besten begegnet werden kann.

Es gibt viele gute Beispiele von realisierten Bauten. Die Forschung läuft und viel Grundlagenwissen ist vorhanden. Daraus entstand die Idee, den aktuellen Wissensstand zu erheben und in einer Dokumentation zugänglich zu machen. Das Bundesamt für Verkehr (BAV) zusammen mit armasuisse Immobilien erteilt einen entsprechenden Auftrag an das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. Ziel war es, Erfahrungen aus Projekten zusammenzutragen, Wissenslücken festzustellen und durch gezielte Forschung zu schliessen sowie wirksame Überwachungsmethoden für verschiedene Anwendungsfälle aufzuzeigen und damit die Sicherheit und Robustheit der Bauwerke zu erhöhen.

Der daraus entstandene Leitfaden liegt nun vor. Er ist als Nachschlagewerk gedacht und richtet sich an alle Geologen, projektierende Planungs- und Ingenieurbüros, Eigner oder Bauherren, Behörden von Bund, Kantonen, Gemeinden sowie Unternehmungen, die an entsprechenden Bauten und Anlagen im Permafrostgebiet beteiligt sind.

Unter der Leitung des SLF und in Zusammenarbeit mit bestens qualifizierten Experten konnte der Auftrag von BAV und armasuisse Immobilien erfüllt werden. Vor uns liegt ein Werk, das als Grundlage für viele Bauten und Sanierungen dienen soll. Es trägt dazu bei, dass die eingangs erwähnte Erwartung von Betreibern, Reisenden und Touristen in Bezug auf die Sicherheit und Stabilität von Bauten und Anlagen erfüllt wird. Herzlichen Dank an alle, die mit Rat und Tat zum guten Gelingen dieses umfassenden Leitfadens beigetragen haben.

Bundesamt für Verkehr
Toni Eder, Vizedirektor
Abteilung Infrastruktur

armasuisse Immobilien
Ulrich Appenzeller, Vizedirektor
Der Leiter

Dank

Aeberli Hans Ulrich (Jäckli AG)
Alpiger Klaus (Schneller Ritz und Partner AG)
Ammann Walter (IDRC)
Andenmatten Rinaldo (alp Andenmatten Lauber & Partner AG)
Bebi Paul (ehem. Baumeister-Polier)
Bertle Rufus (Geognos Bertle Technische Geologie GmbH)
Bonetti Hanspeter (Gasser Felstechnik AG)
Büchel Peter (SAC)
Danioth Carlo (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)
Degelo Ruedi (Gasser Felstechnik AG)
Delang Ulrich (SAC)
Eberle Toni (Eberle AG)
Elmiger Urs (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)
Feuz Peter (Schilthornbahn AG)
Heinzer Peter (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)
Horntrich Robert (Liftgesellschaft Sölden GmbH)
Huber Andreas (ehem. Führungsunterstützungsbasis der Schweizer Armee)
Hurm Martin (Bayrische Zugspitzbahn Bergbahn AG)
Imhasly Heinz (Fiesch-Eggishorn Luftseilbahnen AG)
Jaun Markus (armasuisse)
Jenatsch Reto (SAC)
Krummenacher Bernhard (Geotest AG)
Küchler Jörg (Küchler Ankertechnik AG)
Kuhn Markus (Sakret AG)
Kuprian Helmut (Liftgesellschaft Sölden GmbH)
Lardelli Thomaso (Büro für Technische Geologie AG)
Lauber Christian (alp Andenmatten Lauber & Partner AG)
Loser Stefan (Sika Schweiz AG)
Maesano Antonino (Matterhorn Engineering AG)
Marte Roman (Garber, Dalmatiner & Partner)
Münger Ruedi (Baugeologie AG)
Nötzli Jeanette (Universität Zürich)
Raetzo Hugo (BAFU)
Schindler Heinz (Jungfraubahnen AG)
Schmid Odilo (Odilo Schmid & Partner AG)
Sommer Urs (Emch & Berger AG)
Steiner Walter (B+S AG)
Stoffel Lukas (SLF)
Thomet Richard (Thomet Bauleitung)
Venzin Andreas (Luftseilbahn Corvatsch AG)
Walser Markus (Silvrettaseilbahnen AG)
Wellauer Peter (Holcim AG)
Wohllaib Werner (BIAD)

Abstract

Construction on permafrost: a practical guideline

The successful realization of construction projects in mountain permafrost areas is a technical and logistic challenge for all parties involved. The site selection and the structure design are of central importance. The former must be based on a detailed preliminary study which investigates whether the site is located in permafrost terrain and determines the substrate characteristics. If the site is located in ice-rich terrain, a change of location or complete renouncement should be considered. Timely observations and appropriate monitoring instrumentation at a potential construction site deliver useful information on ground temperature, ice content and deformation characteristics.

Loading conditions taking into account potential changes to the permafrost substrate must be considered for the structure design. The influences of climate change, construction activity and the use of the infrastructure can lead to permafrost degradation and for example induce differential settlement and creep. The potential evolution of the permafrost during the service life of the structure must be forecasted and the substrate characteristics chosen accordingly. Infrastructure in exposed locations can additionally be affected by natural hazards originating in permafrost areas. These must be accounted for in the hazard analyses and the residual risk determined according to the serviceability of the infrastructure. The residual risks, consisting for example of excessive loads, natural hazards and other potential risks should be communicated to the constructors. A robust, reliable bearing structure with an appropriate foundation or anchor concept and planned redundancies is essential to avoid restrictions of use during the service life of the infrastructure. Monitoring systems can be used to detect and avoid problems or hazards, thus increasing safety during all project phases. The systematic recording and analysis of measurement data can also be used as an early warning system.

This practical guideline is subdivided into three main parts. In the first part, permafrost is defined, its characteristics described and practically applicable permafrost detection techniques are presented. The central part describes a recommended project schedule. The importance of a detailed preliminary study and of an integral monitoring system during all project phases is emphasized here. In a third part, various technical solutions for foundations, anchors, excavations, flexible systems, substrate improvement, tunnels and insulation techniques are enumerated. In addition, the specific handling of building materials for infrastructure in permafrost is discussed.

Every construction project in mountain permafrost is unique and requires specially adapted solutions in order to account for the many exceptional situations which can be encountered. Due to their complexity, it is not appropriate to develop general, all-encompassing 'recipes' for sustainable construction in permafrost. These guidelines nevertheless describe various challenges and solutions, which are based on the current practical and scientific state-of-the-art regarding permafrost infrastructure, but do not claim to be exhaustive.

Keywords: mountain permafrost, infrastructure on permafrost, substrate investigation, site selection, structure design, technical solutions, monitoring

Zusammenfassung

Die erfolgreiche Realisation eines Bauprojekts im Hochgebirgspermafrost ist für alle Beteiligten eine technische und logistische Herausforderung. Für die Erstellung von nachhaltigen Bauobjekten sind die Standortwahl und das Tragwerkskonzept von zentraler Bedeutung. Die Standortwahl muss auf eine detaillierte Vorstudie abgestützt werden, welche abklärt, ob der geplante Standort sich im Permafrost befindet, und die Baugrundbedingungen untersucht. Liegt der Standort im eishaltigen Permafrost, sollte eine Standortverschiebung oder ein Bauverzicht in Erwägung gezogen werden. Durch eine frühzeitige Beobachtung und Instrumentierung können Aussagen zur Temperatur, zum Eisgehalt und zum Deformationsverhalten des Baugrunds an einem potenziellen Standort gesammelt werden.

In der Tragwerksanalyse müssen zusätzliche Lastfälle berücksichtigt werden, welche mögliche Veränderungen des Permafrost-Baugrunds einbeziehen. Die Einflüsse der Klimaerwärmung, der Bauaktivität und der Nutzung können zur Permafrost-Degradation im Baugrund beitragen und Auswirkungen wie z. B. differenzielle Setzungen und Kriechdeformationen auslösen. Die Permafrostentwicklung während der geplanten Nutzungsdauer eines Bauwerks muss prognostiziert und dementsprechend die langfristigen, charakteristischen Baugrundwerte gewählt werden. Infrastrukturen an exponierter Lage können zusätzlich durch Naturgefahren aus Permafrostgebieten gefährdet werden. Dies ist in die Gefährdungsbilder einzubeziehen und das Restrisiko ist bezüglich der Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks abzuschätzen. Die nicht abgedeckten Restrisiken, die aus Überlastfällen, Naturgefahren und andern Sonderrisiken zusammengesetzt sein können, sind der Bauherrschaft zu kommunizieren. Zur Gewährleistung der Nutzung während der Lebensdauer eines Bauwerks ist ein robustes, angepasstes Tragwerk, mit einem geeigneten Fundations- und Verankerungskonzept sowie mit eingeplanten Redundanzen wichtig. Mit systematischen Überwachungsmessungen können allfällige Probleme oder Gefahren während allen Projektierungsphasen besser erkannt und die Sicherheit erhöht werden. Eine systematische Aufzeichnung und Auswertung der Messungen kann als Frühwarnsystem dienen.

Der praxisorientierte Leitfaden ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil «Grundlagen» wird das Phänomen Permafrost definiert, dessen Eigenschaften beschrieben und in der Praxis anwendbare Permafrost-Erkundungs- und Nachweismethoden aufgelistet. Im mittleren Teil des Leitfadens wird ein empfohlener Projektablauf aufgezeigt, und die Wichtigkeit einer ausführlichen Vorstudie mit entsprechender Vorlaufzeit sowie eines integralen Überwachungskonzepts während allen Projektphasen betont. Im dritten Teil werden technische Lösungen für Fragestellungen während der Ausführung und Sanierung von Fundationen, Verankerungen, Aushubarbeiten, flexiblen Systemen, Baugrund-Tragfähigkeitsverbesserung, Stollen und Tunnel sowie Massnahmen zur Verminderung von Wärmeeintrag in den Untergrund und der Umgang mit Baumaterialien von Bauten im Permafrost aufgezeigt.

Im Hochgebirgspermafrost ist jedes Bauprojekt einzigartig und verlangt nach speziellen, angepassten Lösungen, um die vielen aussergewöhnlichen Situationen zu meistern. Generelle, allumfassende «Rezepte» für nachhaltiges Bauen im Permafrost zu verfassen, ist aufgrund der hohen Komplexität nicht zweckmässig. Im vorliegenden Leitfaden werden dennoch diverse Herausforderungen und mögliche Lösungen dazu beschrieben. Diese basieren auf einem aktuellen, fachlichen und technischen Wissensstand, erheben jedoch keinen Anspruch allumfassend zu sein.

Schlüsselwörter: Gebirgspermafrost, Infrastruktur im Permafrost, Baugrunduntersuchung, Standortwahl, Tragwerkskonzept, technische Lösungen, Überwachung

Résumé

Le succès de la réalisation d'un projet de construction sur du pergélisol de haute montagne est pour tous un enjeu technique et logistique. Pour la réalisation d'une construction viable, le choix d'un site d'implantation et d'une structure adaptée sont des questions centrales. Le site d'implantation doit faire l'objet d'une étude préalable détaillée afin de déterminer s'il se trouve sur du pergélisol et d'analyser les conditions de construction. Si le site se trouve sur du pergélisol riche en glace, un déplacement ou abandon du site devrait être envisagé. L'analyse de la température, composition en glace et déformation du sol peut être effectuée par une observation attentive et une instrumentation préalable du site d'implantation envisagé.

Dans l'analyse de la structure porteuse, des problèmes supplémentaires doivent être pris en considération, de manière à intégrer les possibles modifications du pergélisol. Le réchauffement climatique, la construction et de l'exploitation du sol peuvent contribuer à la dégradation du pergélisol et avoir des effets tels que des tassements différentiels et le fluage. L'évolution du pergélisol durant la durée d'utilisation d'un ouvrage doit être prévue et, par conséquent, les caractéristiques à long terme du terrain doivent être déterminées. Les infrastructures situées dans des terrains exposés peuvent être sujets à des risques naturels supplémentaires provenant des régions de pergélisol. Ceci est à inclure dans l'analyse du danger et le risque relatif à l'utilisation d'une infrastructure doit être estimé. Les risques résiduels non considérés, comme les risques naturels et d'autres risques spécifiques, doivent être communiqués au maître d'ouvrage. Afin de garantir la fiabilité d'une construction pour toute sa durée d'utilisation, il est important que l'ouvrage soit pourvu d'une structure robuste et adaptée ainsi que de fondations appropriées. Les éventuels problèmes ou dangers peuvent être détectés par le biais de mesures systématiques durant toute la phase du projet, permettant de ce fait d'augmenter la sécurité de l'ouvrage. Un système de surveillance et d'évaluation systématique des mesures peut tenir lieu de système d'alerte rapide.

Ce guide pratique est divisé en trois parties. Dans la première partie, les «bases» du phénomène de pergélisol sont définies. En particulier, les propriétés du pergélisol sont décrites et les méthodes pratiques de prospection et de détection du pergélisol sont répertoriées. Dans la partie centrale du guide, les recommandations pour la conduite d'un projet sont détaillées. L'importance d'une analyse préliminaire ainsi que d'une surveillance intégrée durant toute la phase du projet sont soulignées. Dans la troisième partie, des solutions techniques sont données pour l'exécution et la réparation des fondations, des ancrages, des travaux d'excavation, des systèmes flexibles, l'amélioration de la résistance du terrain, des galeries et des tunnels. Des mesures de réduction de la chaleur dans le sous-sol sont également décrites et l'utilisation de matériaux de construction de bâtiments dans le pergélisol est abordée.

Dans le pergélisol alpin, chaque projet de construction est unique et requiert des solutions spécifiques et adaptées afin de faire face aux nombreuses situations exceptionnelles. La rédaction de « recettes » globales et générales pour la construction durable dans le pergélisol est impossible du fait de sa complexité. Dans le présent guide, divers enjeux et solutions possibles sont cependant décrites. Celles-ci sont basées sur un état des lieux des connaissances techniques et scientifiques actuelles, mais l'enquête ne peut prétendre être exhaustive.

Mots clés: pergélisol alpin, infrastructures sur pergélisol, étude du sol, choix de site, analyse de structure porteuse, solutions techniques, surveillance

Inhalt

Vorwort	3
Dank	4
Abstract	5
Zusammenfassung	6
Résumé	7
Grundlagen	13
Geltungsbereich und Abgrenzung	14
1 Verständigung	15
1.1 Permafrost Glossar	15
1.2 Permafrost: Definitionen und Erläuterungen	17
1.3 Permafrostverteilung	20
1.4 Eigenschaften des Permafrosts	20
1.4.1 Thermische Eigenschaften von Permafrostböden	20
1.4.2 Geotechnische Eigenschaften	23
1.5 Geländeformen und Geomorphologie im Gebirgspermafrost	35
1.6 Permafrost und Klimaänderung	40
1.7 Naturgefahren	40
1.8 Abklärung von Permafrostvorkommen	43
1.8.1 Verdacht auf Permafrostvorkommen	44
1.8.2 Nachweis Permafrost	55
Projektablauf	61
2 Vorstudie	64
2.1 Notwendige Vorabklärungen für Neubauten im Permafrost	64
2.1.1 Voruntersuchung	64
2.1.2 Felduntersuchungen	64
2.1.3 Laboruntersuchungen	65
2.2 Notwendige Vorabklärungen für bestehende Bauten im Permafrost	65
2.2.1 Voruntersuchung	65
2.3 Tragwerksanalyse	66
2.3.1 Standortwahl	66
2.3.2 Tragwerkskonzept	67
3 Vorprojekt	69
3.1 Nutzungsvereinbarung	69
3.2 Projektbasis	70
3.3 Umweltverträglichkeit	70
3.4 Einwirkungen	70
3.4.1 Einwirkungen auf das Tragwerk	70
3.4.2 Mögliche Veränderungen der Einwirkungen auf das Tragwerk wegen des Permafrosts	70
3.5 Auswirkungen	72
3.5.1 Auswirkungen auf das Tragwerk	72
3.5.2 Mögliche Veränderungen der Auswirkungen auf das Tragwerk wegen des Permafrosts	72
3.5.3 Auswirkungen auf den Baugrund	73

3.6	Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse	73
3.6.1	Analysen- und Untersuchungsumfang	74
3.7	Anwendungsbeispiel 1	76
3.7.1	Ausgangslage Beispiel 1	76
3.7.2	Einwirkungen auf das Tragwerk	77
3.7.3	Auswirkungen auf das Tragwerk	77
3.7.4	Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse	77
3.7.5	Analysen- und Untersuchungsumfang	78
3.8	Anwendungsbeispiel 2	78
3.8.1	Ausgangslage Beispiel 2	78
3.8.2	Einwirkungen auf das Tragwerk	79
3.8.3	Auswirkungen auf das Tragwerk	79
3.8.4	Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse	79
3.8.5	Analysen- und Untersuchungsumfang	79
4	Bauprojekt	81
4.1	Bemessung	81
4.2	Nachweise	81
5	Realisierung	83
5.1	Ausführungsprojekt	83
5.1.1	Ausschreibung	83
5.1.2	Neubauten im Permafrost	84
5.1.3	Sanierung bestehender Bauten im Permafrost	84
5.2	Überwachung und Bauausführungskontrollen	84
5.2.1	Vorbereitung des Überwachungssystems	84
5.2.2	Überwachungssysteme während der Ausführung	85
5.2.3	Kontrollplan	86
5.2.4	Ausführungskontrollen	86
6	Nutzung und Erhaltung	87
6.1	Überwachung	87
6.1.1	Anpassung des Überwachungssystems	87
6.1.2	Überwachungs- und Unterhaltsplan	87
6.1.3	Überwachungssysteme während der Nutzung und Erhaltung	87
6.2	Erhaltungs- und Massnahmenplanung	87
6.2.1	Erhaltungs- und Massnahmenplan	87
6.2.2	Mögliche Massnahmen	89
7	Rückbau	91
7.1	Umweltgerechtes Bauen	91
7.2	Planung und Ausführung	91
7.3	Verbleibende Bauten und Bauteile	91
7.4	Finanzierung	92
	Technische Lösungen	93
8	Technische Lösungen	94
8.1	Foundationen	94
8.1.1	Foundationskonzept	94
8.1.2	Flachfoundationen	94

8.1.3 Tiefenfundation	95
8.1.4 Pfahlbelastungsversuche	96
8.1.5 Überwachungs- und Unterhaltsplan Fundationen	96
8.2 Verankerungen	97
8.2.1 Verankerungskonzept	97
8.2.2 Felsanker und Vernagelung	98
8.2.3 Bohrtechnik	98
8.2.4 Ankerzugversuche	99
8.2.5 Überwachungs- und Unterhaltsplan Verankerungen	99
8.3 Aushub	99
8.3.1 Aushubarbeiten	99
8.3.2 Böschungen	99
8.4 Baumaterialien	100
8.4.1 Zementgebundene Mörtel	100
8.4.2 Beton	101
8.4.3 Zusatz- und Injektionsmittel Mörtel / Beton	103
8.4.4 Frostsichere Materialien	104
8.4.5 Geeignete Baumaterialien	104
8.5 Flexible Systeme	104
8.5.1 Querverschiebbare Seilbahnstützen	105
8.5.2 Drei Punkte Lagerung	106
8.5.3 Lawinenverbauungen	107
8.5.4 Wasserleitungen	108
8.6 Massnahmen zur Verminderung von Wärmeeintrag in den Untergrund	109
8.6.1 Wärmedämmung	109
8.6.2 Kälte­dämmung	109
8.6.3 Bauliche Massnahmen	110
8.6.4 Aktive und passive Kühlsysteme	110
8.6.5 Sammeln von Schneeschmelz- und Regenwasser	112
8.6.6 Modifikation der Baugrundoberfläche	112
8.7 Baugrund-Tragfähigkeitsverbesserung	113
8.7.1 Materialaustausch	113
8.7.2 Injektion und Vernagelung	113
8.7.3 Drainage	114
8.7.4 Permafrost auftauende Bauverfahren	114
8.7.5 Permafrost erhaltende Bauverfahren	115
8.8 Stollen und Tunnel	116
8.8.1 Eisarmer, standfester Fels	116
8.8.2 Eisreicher, nicht standfester Fels und Lockergestein	116
Anhänge	119
Anhang A: Hinweiskarte Permafrost Schweiz	120
Anhang B: Beispiel eines Kontrollplans oder eines Überwachungs- / Unterhaltsplans (Auszug)	121
Anhang C: Grafische Definition der Frost- und Auftauindices	122
Anhang D: Literaturverzeichnis Bauen im Permafrost	123
Anhang E: Quellenverzeichnis Bauen im Permafrost	125

Grundlagen

Die erfolgreiche Ausführung von Bauten im Gebirgspermafrost stellt eine Herausforderung für alle Beteiligten dar. Generelle, allumfassende «Rezepte» für nachhaltiges Bauen im Permafrost zu verfassen, ist aufgrund der hohen Komplexität nicht zweckmässig. Im vorliegenden Leitfaden werden dennoch diverse Herausforderungen und mögliche Lösungen dazu beschrieben.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen geschaffen, die zur Verständigung des Phänomens Permafrost und für den Gebrauch des Leitfadens für Bauten im Permafrost benötigt werden. Nach einem ersten Abschnitt, in welchem der Geltungsbereich und die Abgrenzung des Leitfadens beschrieben werden, wird in einem kurzen Glossar die bauspezifische Permafrostterminologie aufgelistet. Danach werden die wichtigsten Permafrostbegriffe erläutert, sowie die Permafrostverteilung in den Schweizer Alpen dargestellt. Die thermischen und geotechnischen Eigenschaften des Gebirgspermafrosts werden umfangreich beschrieben, und die wichtigsten Geländeformen aufgezeigt. Zusätzlich werden die Wirkungen der Klimaänderung auf den Permafrost und mögliche Naturgefahren, die in Permafrostgebieten vorkommen können, beleuchtet. Am Ende des Kapitels wird ein systematischer, praxisorientierter Ablauf zur Abklärung von Permafrostvorkommen vorgestellt.

Geltungsbereich und Abgrenzung

Mit dem vorliegenden Produkt **Bauen im Permafrost: ein Leitfaden für die Praxis** haben die Autoren eine Praxishilfe für die Projektierung, Realisierung, Nutzung und Erhaltung, sowie für den Rückbau von Bauten im Gebirgspermafrost erstellt. Im ersten Abschnitt werden die **Grundlagen** vermittelt. Hier werden die wichtigsten Eigenschaften, die Verteilung und das Vorkommen von Permafrost in den Alpen beschrieben, sowie mögliche Naturgefahren in Permafrostgebieten aufgezeigt. Zudem werden anerkannte und in der Praxis anwendbare Methoden zur Abklärung von Permafrostvorkommen beschrieben.

Der zweite Teil des Leitfadens, **Projektablauf**, richtet sich nach dem Aufbau der Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins SIA. Dementsprechend sind folgende Projektphasen definiert:

- Vorstudie
- Vorprojekt
- Bauprojekt
- Realisierung
- Nutzung und Erhaltung
- Rückbau

Im dritten Teil, **technische Lösungen**, wird auf die häufigsten Fragestellungen und mögliche Verfahren bei Foundationen und Verankerungen sowie auf technische Lösungen bezüglich Aushubmethoden, Baumaterialien, flexible Systeme, Wärmedämmung, Baugrund-Tragfähigkeitsverbesserung und Tunnelbau im Permafrost eingegangen.

Am Ende jedes Kapitels befindet sich ein Fazit, in dem die wichtigsten Punkte zusammengefasst werden.

Der vorliegende Leitfaden für Bauten im Permafrost bezieht sich auf die Normen SIA 261, 261/1 und 267, 267/1. Wo nichts anderes vermerkt ist, gelten die einschlägigen Tragwerksnormen des SIA. Diese Normen sind anerkannte Regeln der Baukunde und bilden das Schweizer Normenwerk im Bauwesen (Webseite: www.sia.ch).

Die im Leitfaden verwendete Sprache richtet sich nach der üblichen Terminologie des Fachbereichs Bauingenieurwesen und wurde mit dem deutschen Glossar der internationalen Permafrost Organisation (IPA), soweit nötig, ergänzt.

Für die Projektierung von Lawinenverbauungen im Permafrost wird auf die technische Richtlinie Lawinenverbau im Anbruchgebiet (MARGRETH 2007) verwiesen. Darin werden die Tragwerksanalyse, die Bemessung, die konstruktive Durchbildung, sowie die Ausführungskontrollen und Überwachung von Lawinenverbauungen behandelt. Im vorliegenden Leitfaden wird in Kapitel 8.5 nur kurz auf Lawinenverbauungen mit Pendelstützen im Permafrost eingegangen.

Der vorliegende Leitfaden erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das Ziel des vorliegenden Leitfadens ist den aktuellen Stand des Wissens und der Technik im Zusammenhang mit dem Erstellen und dem Unterhalt von Bauten im Permafrost für die Praxis zusammenzufassen.

1 Verständigung

1.1 Permafrost Glossar

Das vorliegende Permafrost Glossar entspricht mehrheitlich dem Glossar der Internationalen Permafrost Association (IPA), (IPA, German terms (2005), Webseite: <http://nsidc.org/fgdc/glossary>). Hier werden vor allem bauspezifische Begriffe erläutert, die in diesem Leitfaden oder in der Fachliteratur gebräuchlich sind.

Anfrieren

Prozess, der zwei Objekte durch Eis verbindet.

Anfrierungsfestigkeit

Bruch- oder Scherfestigkeit, die überwunden werden muss, um zwei durch Eis verbundene Objekte zu trennen.

Auffrieren

Hebung von Objekten (z.B. Fundamente) im Baugrund durch Frostwirkung. Dieser Prozess kann zu einem Auswerfen des Objekts führen.

Auftaubedingte Lockerung

Die Verminderung der Scherfestigkeit beim Auftauen eines eishaltigen Baugrunds (Verminderung der Lagerungsdichte).

Auftaubedingte Verfestigung / Konsolidation

Eine durch Schmelzen und Abfluss des überschüssigen Porenwassers provozierte, zeitabhängige Verdichtung des Baugrunds (Vergrößerung der Lagerungsdichte).

Auftaubedingtes Rutschen

Hanginstabilität, die durch Auftauen von Bodeneis provoziert wird.

Auftauindex

Differenz zwischen einem relativen Minimum und Maximum der Summenkurve der mittleren täglichen Lufttemperaturen (ergibt einen Index in der Einheit «Gradtage») während einer Periode von positiven Lufttemperaturen (Sommer) (SN 670 140b) (Anhang C).

Bodeneis

Allgemeine Bezeichnung für Eisformen in gefrorenen Böden.

Dilatanz

Volumenvergrößerung oder Reibungskoeffizienterhöhung eines körnigen Lockergesteins, die durch Einwirkung von Scherkräften entsteht.

Druckschmelzung

Reduktion des Eisschmelzpunkts durch Aufbringen von Druck.

Frostempfindlicher Baugrund

Baugrund, in dem durch Segregation Eislinsen entstehen können, die Schäden durch Hebung während des Gefrierens oder Verminderung der Tragfähigkeit während des Auftauens erzeugen können (SN 670 140b).

Frosthebung

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

Frostindex der Luft

Differenz zwischen einem relativen Maximum und Minimum der Summenkurve der mittleren täglichen Lufttemperaturen (ergibt einen Index in der Einheit «Gradtage») während einer Periode von negativen Lufttemperaturen (Winter) (SN 670 140b) (Anhang C).

Frostspaltung / -sprengung

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

Froststabiler / -unempfindlicher Baugrund

Baugrund, in dem das gefrierende Porenwasser keine schadenverursachende Hebungen und das Auftauen keine nennenswerte Verminderung der Tragfähigkeit bewirkt (SN 670 140b).

Frostwirkung

Durch abwechselndes Auftauen und Gefrieren von Porenwasser resultierende Auswirkungen auf Objekte im Baugrund.

Gefrierverfahren

Künstliches Erzeugen oder Erhalten von gefrorenem Baugrund.

Gehalt an ungefrorenem Wasser

Die Menge an ungefrorenem (flüssigem) Wasser im Permafrost.

Gekühlter Pfahl

Ein mit Kühlsystemen ausgerüsteter Pfahl.

Gradtage

Differenz zwischen der mittleren täglichen Lufttemperatur und der Referenztemperatur (0°C), summiert über alle Kalendertage mit $T < 0^{\circ}\text{C}$ (für Frostindex) oder $T > 0^{\circ}\text{C}$ (für Auftauindex).

Hebungsdruck

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

Kriechen

Langsame Deformation (zeitabhängige Scherdeformation), die von einer langfristigen Belastung verursacht wird, die zu gering ist, um einen Bruch zu erzeugen.

Maximale Frosteindringtiefe

Normal zur Bodenoberfläche gemessene Tiefe, die der Frost maximal in den Baugrund eindringt (für weitere Informationen SN 670 140b, Frost).

Permafrost Aggradation

Eine Zunahme der Mächtigkeit oder der Verbreitung des Permafrosts.

Permafrost auftauende Bauverfahren

Baumethoden, die eingesetzt werden, wenn Permafrost-Degradation nicht verhindert werden kann:

- Der Baugrund wird aufgetaut / verdichtet / ersetzt
- Auftaubedingte Setzungen werden bei der Tragwerksanalyse und Bemessung der Infrastruktur berücksichtigt.

Permafrost-Degradation

Eine Abnahme der Mächtigkeit oder der Verbreitung des Permafrosts.

Permafrost erhaltende Bauverfahren

Baumethoden, die den Erhalt von Permafrost ermöglichen.

Saugspannung oder Kryosuktion

Entwicklung einer Saugspannung, die im gefrierenden oder teilweise gefrorenen Baugrund auftritt, resultierend aus einem Temperaturgradienten im ungefrorenen Wasseranteil.

Segregationseis

Bodeneis, das durch die Migration von Porenwasser oder Wasserdampf entlang eines negativen Temperaturgradienten gebildet wird.

Taubeständiger Permafrost

Baugrund, der beim Auftauen keine bedeutende Setzung oder Festigkeitsabnahme erfährt.

Tauempfindlicher Permafrost

Baugrund, der beim Auftauen eine bedeutende Setzung oder Festigkeitsabnahme erfährt.

Temperaturgradient

Temperaturdifferenz über eine Distanz, ausgedrückt in $^{\circ}\text{C m}^{-1}$.

Thermosyphon

Ein passives Wärmeaustauschgerät (Ein- oder Zweiphasen Flüssigkeits- / Gassystem), das Wärme aus dem Untergrund durch einen Zirkulations- und Konvektionsprozess entfernt.

1.2 Permafrost: Definitionen und Erläuterungen

Als **Permafrost** wird gefrorenes Bodenmaterial bezeichnet, das während des ganzen Jahres negative Temperaturen aufweist. Permafrost ist somit ein rein thermisches Phänomen: Allein die Temperatur des Untergrunds ist massgebend – und nicht der Eisgehalt. In den Alpen wird Permafrost auch als «alpiner Permafrost» oder «Gebirgspermafrost» bezeichnet.

Die Bodenschicht zwischen der Bodenoberfläche und dem Permafrostspiegel ist die **Auftauschicht** (Abb. 1), die im Sommer auftaut und im Winter gefriert. Diese kann einige Zentimeter bis mehrere Meter dick sein und ihre Mächtigkeit kann von Jahr zu Jahr variieren. Weil saisonal bedingte Phasenänderungen (Bildung oder Schmelzen von Eis) in der Auftauschicht stattfinden, kann sie aus geotechnischer Sicht problematisch sein.

Der **Permafrostspiegel** ist die obere Grenze des **Permafrostkörpers** (Abb. 1). Darunter weist der Boden ganzjährig negative Temperaturen auf. Der Permafrostkörper kann einige Meter bis mehrere Dutzende Meter mächtig sein.

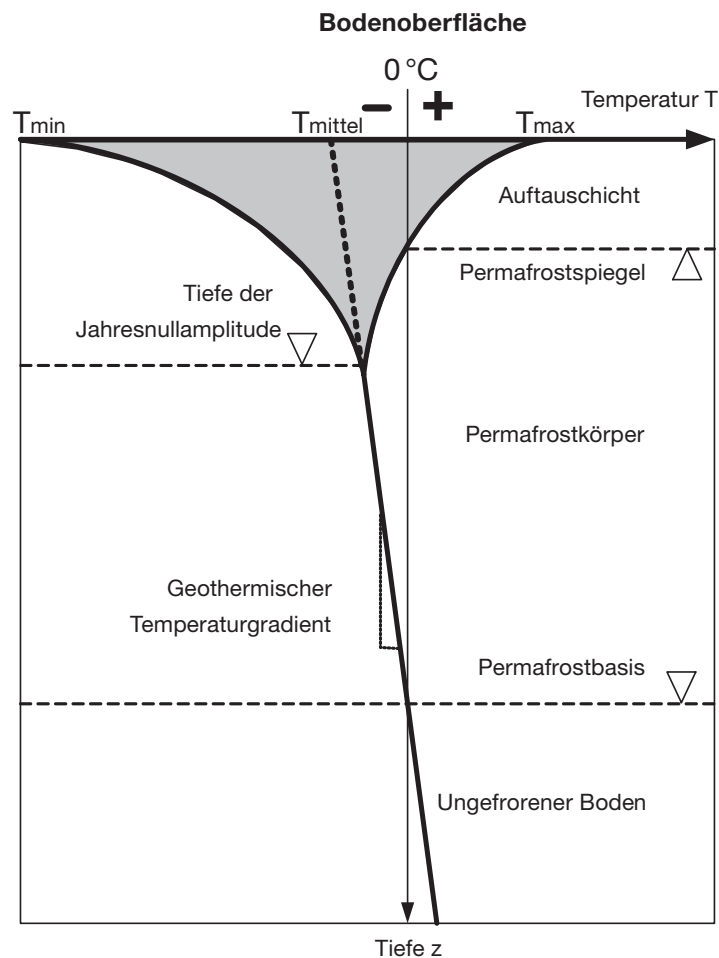


Abb. 1: Wichtige Begriffe und typische Temperaturverteilung (schwarze Kurven) in einem Permafrostboden. Der graue Bereich zeigt die Spannbreite der saisonalen Temperaturschwankungen im Untergrund.

Die **Permafrostbasis** ist die untere Grenze des Permafrostkörpers (Abb. 1). Darunter bleibt der Boden durch den **geothermischen Wärmefluss** vom Erdinneren ganzjährig ungefroren. Wegen der Komplexität der alpinen Topographie kann der konstante Wärmefluss je nach Standort eine unterschiedliche Intensität aufweisen.

Ab einer gewissen Tiefe im Untergrund, der **Tiefe der Jahresnullamplitude** (Abb. 1), werden keine jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Boden festgestellt.

Permafrostböden können **Bodeneis** enthalten (Abschnitt 1.4.2). Dieses Eis entsteht durch das Gefrieren von Regen- und Schneeschmelzwasser, durch Schnee- und Lawinenablagerungen oder aus altem Gletschereis. Im Fels ist Bodeneis hauptsächlich in Klüften und in Rissen zu finden. Im Lockermaterial (z.B. Moränen, Schutthalden) kann Eis in Poren und Hohlräumen vorkommen. Bodeneis kann dispers verteilt oder als massives Eis (Eislinsen) auftreten. Beim Gefrieren von Porenwasser bildet sich so genanntes **Poreneis**, ohne zusätzliche Wasserzufuhr. Zu beachten ist, dass beim Gefrieren von Wasser das Volumen um etwa 9 % zunimmt (Hebungen) und umgekehrt beim Schmelzen des Eises abnimmt (Setzungen).

Temperaturgradienten können dazu führen, dass Wasserdampf von wärmeren zu kälteren Stellen im Boden transportiert wird und dort gefriert, was zur Neubildung von Eis führt, so genanntem **Segregationseis**. Diese Art der Eisbildung ist auch im Fels möglich und führt zu Spaltenwachstum und Gebirgsaufweitung.

Der **Eisgehalt** wird durch die Eigenschaften des Bodens (Korngrösse, Porenvolumen, Hohlräume) bestimmt und hat einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und auf die Tragfähigkeit des Baugrunds. Der gravimetrische Eisgehalt wird durch den Gewichtsanteil von Eis im Vergleich zu trockenem Bodenmaterial bestimmt und wird prozentual ausgedrückt. Bei einem Eisgehalt zwischen 50 und 150 % spricht man von hohem Eisgehalt. Der volumetrische Eisgehalt wird durch das Verhältnis zwischen dem Eisvolumen und dem gesamten Bodenvolumen bestimmt. Der maximale volumetrische Eisgehalt beträgt daher 100 vol. %. Verschiedene Eisgehalte werden in Abschnitt 1.4.2 beschrieben.

In feinkörnigen Böden kann auch bei Temperaturen unter 0°C **ungefrorenes Wasser** vorhanden sein, da die Mineralogie (Kristallstruktur und chemischen Eigenschaften) und die Korngrösse des Bodens den Gefrierpunkt senken können.

Ungefrorene Bereiche innerhalb des Permafrostkörpers werden als **Taliks** bezeichnet – oberhalb des Permafrostspiegels werden sie Suprapermafrost-Taliks genannt (Abb. 2). In Taliks können Wasserflüsse (und somit auch Wärmeflüsse) stattfinden. Bei oberflächennahen Baugrunduntersuchungen können Suprapermafrost-Taliks fälschlicherweise den Eindruck erwecken, dass kein Permafrost vorhanden ist. Taliks können zum Beispiel durch fließendes Bodenwasser oder durch Bauaktivität verursacht werden.

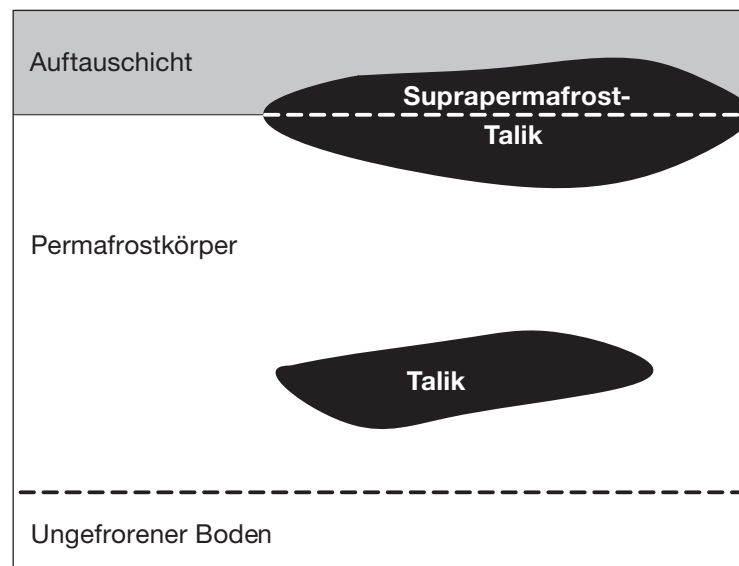


Abb. 2: Taliks sind ständig ungefrorene Bereiche ($T > 0^\circ\text{C}$) innerhalb des Permafrostkörpers und im Bereich des Permafrostspiegels.

1.3 Permafrostverteilung

In den Alpen kann Permafrost oberhalb einer Höhe von etwa 2200 m ü.M. vorkommen, je nach Exposition und Hanglage (Abschnitt 1.8). Rund 6 % der Oberfläche der Schweizer Alpen liegen im Permafrost.

In einzelnen, speziellen Fällen, kann **azonaler Permafrost** in tieferen Höhenlagen vorkommen (um 1000 m ü.M.) – meistens unter schattigen Schutthalden am Fuss von steilen Felswänden. Solche Standorte sind oft durch auffällig kleinwüchsige Bäume charakterisiert. Azonaler Permafrost kann auch künstlich erzeugt werden, zum Beispiel unter Kunsteishallen, die nicht über eine Kälte­dämmschicht zwischen der Eisfläche und dem Baugrund verfügen.

Im Gebirge wird das Vorkommen von Permafrost massgeblich von der Topographie, der Schneedecke (LUETSCHG *et al.* 2008), der Lufttemperatur und der Strahlung, sowie von der Beschaffenheit der Bodenoberfläche, der Geologie und der Hydrologie beeinflusst (Tab. 1).

1.4 Eigenschaften des Permafrosts

1.4.1 Thermische Eigenschaften von Permafrostböden

In den Alpen liegen die Permafrosttemperaturen generell im Bereich zwischen -3°C und 0°C . In hochgelegenen, exponierten Felswänden können tiefere Temperaturen herrschen.

Die Bodentemperaturen werden einerseits durch den geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinneren beeinflusst, welcher zeitlich konstant bleibt und im Gebirge leicht kleiner ist. Andererseits werden sie massgebend durch saisonale Bedingungen und Prozesse an der Bodenoberfläche beeinflusst (Tab. 1).

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Bodentemperatur verändert, wird zudem durch die physikalischen Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Diese wiederum werden bestimmt über den anteilmässigen Gehalt an Festsubstanz, Luft, Eis und Wasser, und deren thermische Eigenschaften. Wegen der isolierenden Wirkung der Luft leitet eine Schutthalde mit hohem Luftgehalt die Temperatur langsamer als Fels.

Nahe der Bodenoberfläche werden stündliche und tägliche Temperaturschwankungen registriert, während sich in grösseren Tiefen nur noch saisonale Schwankungen bemerkbar machen. Mit zunehmender Tiefe werden die Temperatursignale ausgefiltert und verzögert: In einer Tiefe von 10 m ändert sich die Temperatur zum Beispiel etwa 6 Monate später als an der Bodenoberfläche (Abb. 3). Die Wärme des Sommers erreicht also erst im Laufe des Winters diese Tiefe – eine wichtige Erkenntnis zum Beispiel für das Erstellen von Verankerungen im Permafrost.

Wärmetransport im Boden

In Permafrostböden findet Wärmeaustausch entweder durch **Wärmeleitung** (Wärmefluss in festen Materialien entlang eines Temperaturgradienten) oder durch **Konvektion** (z.B. wenn eine Luft- / Wasserzirkulation durch Klüfte oder Porenräume existiert, Abb. 4) statt. Die Wärmeleitung hängt von der Wärmeleitfähigkeit K ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) des Bodens ab. Bei den

Tab. 1: Parameter, welche die Bodentemperatur und somit die Permafrostverteilung im Hochgebirge beeinflussen.

Parameter	Erläuterung
Topographie	In Hangfusslagen (Lawinenablagerungen), an Graten (Schneeverfrachtung, niedriger geothermischer Wärmefluss), steilen Felswänden (wenig bis kein Schnee), Schattenhängen (wenig Strahlung) und generell in hohen Lagen (niedrigere Lufttemperaturen) sind die Bodentemperaturen im Allgemeinen tiefer. Durch eine komplexe Topographie (z.B. Grate) gibt es hohe Bodentemperaturkontraste zwischen sonnigen und schattigen Hanglagen – diese können sich gegenseitig im Untergrund beeinflussen.
Räumliche und zeitliche Schneedeckenverteilung	Die isolierende Wirkung der Schneedecke entscheidet wesentlich darüber, ob und wie die Temperatur zwischen Luft und Boden ausgetauscht wird. Der Boden kühlt stärker aus an Stellen wo der Schnee weggeblasen wird, heterogen verteilt ist (z.B. in grobblockigem Gelände) oder wegrutscht (geringere Isolation). Die Bodentemperatur ist ebenfalls tiefer an Stellen wo der Schnee im Sommer länger liegen bleibt (Hangfusslagen, Mulden, Kunstschneepisten) (Schutz vor Strahlung und hohen Lufttemperaturen). Permafrostfördernde zeitliche Schneedeckenverteilung: wenig Schnee im Herbst / Frühwinter, viel Schnee im Frühling / Sommer. Die Schneedecke hat einen wesentlichen Einfluss auf die Permafrostverteilung, da im Hochgebirge der Boden oft 8–10 Monate schneebedeckt ist.
Lufttemperatur	In Permafrostgebieten liegt die mittlere jährliche Lufttemperatur unter 0 °C (Ausnahme: in tief liegenden, azonalen Permafrostgebieten kann die mittlere jährliche Lufttemperatur über 0 °C liegen). Im Gebirge herrscht ein Lufttemperaturgefälle von ca. 0,6 °C / 100 m.
Strahlung	Die direkte kurzwellige Strahlung fördert die Schneeschmelzrate und erhöht die Bodentemperatur in der schneefreien Jahreszeit. Schattenhänge und schattige Standorte weisen deshalb niedrigere Bodentemperaturen auf.
Oberflächenbeschaffenheit	Rauhe, grobblockige Böden sind generell kälter (Luftzirkulation, gut drainiert, heterogene Schneedecke) als feinkörnige Böden.
Bodeneigenschaften	Die thermischen und geotechnischen Eigenschaften des Baugrunds werden durch die physikalischen Eigenschaften des Gesteins (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Albedo) und weitere Aspekte wie die Schichtung und Zusammensetzung des Baugrunds stark beeinflusst.
Hydrologie	Die Bodentemperatur wird durch fließendes Wasser stark beeinflusst. Ein Teil des Wassers (z.B. während der Schneeschmelze) kann einfrieren und Bodeneis bilden. Innerhalb des Permafrostkörpers können sich Taliks bilden, durch welche Wasser fließt. Seen haben einen wärmenden Einfluss (hohe Wärmekapazität). Tiefe Quellwassertemperaturen (< 3 °C) können auf Eis im Boden hindeuten.
Gletscher	Da die Bodentemperatur unter alpinen Gletschern 0 °C beträgt, gibt es dort im Allgemeinen keinen Permafrost, mit der Ausnahme des Bereichs oberhalb des Bergschrundes, unter Hängegletschern oder unter Firnflecken.

konvektiven Prozessen spielen zusätzliche Faktoren für den Wärmetransport eine Rolle (wie z.B. die Strömungs- oder Fließgeschwindigkeit der Luft bzw. des Wassers). Beim Gefrieren und Auftauen (Frostwirkung) sowie bei der Kondensation von Wasser oder der Sublimation von Eis (Phasenänderungen) wird zudem **latente Wärme** ($0,334 \text{ MJ kg}^{-1}$ bei Frostwirkung von Eis, $2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ bei der Kondensation) abgegeben resp. aufgenommen.

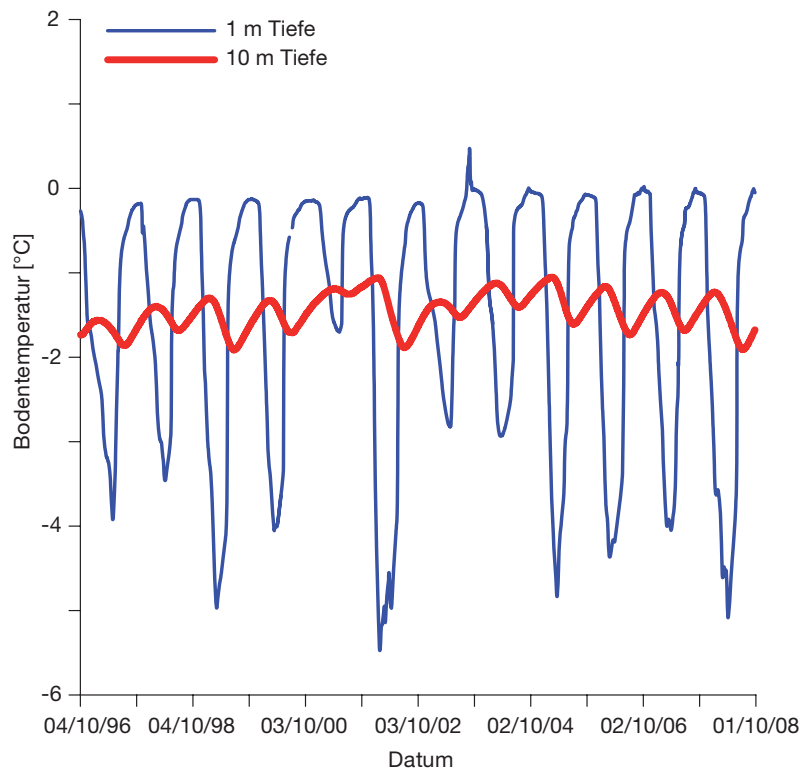


Abb. 3: Bohrlochtemperaturen in 1 m und 10 m Tiefe in einem Permafrostboden (Schafberg Pontresina, GR) auf 2900 m ü.M. zwischen 1996 und 2008. In 10 m Tiefe wird das Temperatursignal vom vorherigen Sommer respektive Winter mit etwa 6 Monaten Verzögerung aufgezeichnet (Daten SLF, Davos).

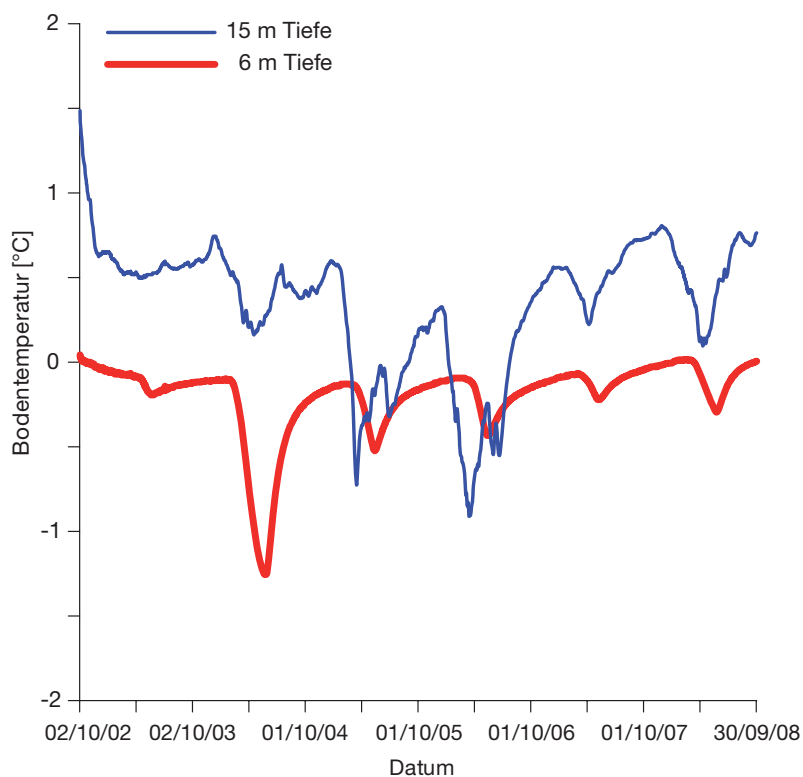


Abb. 4: Bohrlochtemperaturen in 6 m und in 15 m Tiefe in einem Blockschutt auf 2400 m ü.M. (Flüelapass, GR), zwischen 2002 und 2008. In 15 m Tiefe herrscht ein konvektiver Wärmetransport, der durch Luftzirkulation in Hohlräumen verursacht wird und abrupte Temperaturschwankungen verursacht. In 6 m Tiefe dagegen dominiert Wärmeleitung im Bodeneis. So gibt die Art der Temperaturschwankungen Hinweise auf die Beschaffenheit des Untergrunds (Daten SLF, Davos).

1.4.2 Geotechnische Eigenschaften

Die geotechnischen Eigenschaften eines eishaltigen Baugrunds im Permafrost sind temperaturabhängig. Ein Temperaturanstieg im Baugrund führt zum Beispiel zu einer Reduktion der Scherfestigkeit und kann Deformationen und Tragwerksversagen auslösen. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die geotechnischen Eigenschaften von Lockergesteinen und Fels im Permafrost eingegangen. Der Einfluss der einzelnen Komponenten (Eis, Festsubstanz, Wasser und Luft), die einen Permafrost-Baugrund zusammensetzen, wird beschrieben. Die Gehalte dieser Komponenten beeinflussen das Festigkeits- und das Deformationsverhalten.

Strukturelle Eigenschaften

Gefrorenes Erd- oder Felsmaterial ist ein komplexes, multiphasiges System bestehend aus den vier Komponenten:

- mineralische Festsubstanz (Lockergestein, Fels)
- Eis
- ungefrorenes Wasser
- Luft

Analog zum ungefrorenen Baugrund können auch im Permafrost das Porenvolumen und der Sättigungsgrad bestimmt werden. Letzterer gibt an, in welchem Ausmass die vorhandenen Poren mit Eis und ungefrorenem Wasser gefüllt sind.

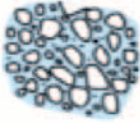
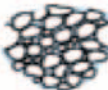
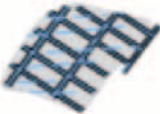
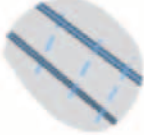
Das Eis ist die problematischste Komponente des gefrorenen Untergrunds. Dieses bestimmt die massgeblichen physikalischen und boden- resp. felsmechanischen Eigenschaften. Je grösser der Eisgehalt, desto mehr tendieren die Eigenschaften des Permafrosts gegen diejenigen von reinem Eis. Eis weist ein visko-plastisches Deformationsverhalten auf und hat spezifische physikalische und mechanische Eigenschaften. Von geotechnischer Bedeutung ist dabei in erster Linie das plastische Verhalten (Kriechen) von Eis unter Last (HAEFELI 1954).

Neben dem Eis ist ungefrorenes Wasser eine weitere wichtige Komponente im Permafrost. Der Gehalt an ungefrorenem Wasser beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Permafrosts. Ungefrorenes Wasser kommt einerseits als Wasserfilm auf der Oberfläche der mineralischen Phase und im Eis selbst vor, und kann durch die Mineralogie und die Korngrösse, die chemische Zusammensetzung des Wassers, zum Beispiel Salzgehalt, sowie durch Druckkräfte einen Gefrierpunkt unter 0°C aufweisen. Untersuchungen im hohen Norden haben gezeigt, dass selbst im Permafrost mit Temperaturen unter -5°C noch Wassergehalte von 5% und mehr auftreten können. Die Gehalte an ungefrorenem Wasser können im Permafrost mit zunehmender Temperatur je nach Bodentyp auf 10 bis 40% ansteigen (WILLIAMS 1967; TSYTOVICH 1975). Gemäss ARENSON *et al.* 2009, kann in den Alpen davon ausgegangen werden, dass bei Temperaturen unter -2°C das meiste Wasser im Boden gefroren ist, da im allgemeinen der Salzgehalt darin gering ist.

Strukturell können verschiedene Arten von Permafrost unterschieden werden (Tab. 2). Neben Böden mit relativ kleinen Gehalten an Poreneis kommen häufig auch grössere Eislinsen vor, wie zum Beispiel in eisreichen Moränen (RIEDER *et al.* 1980).

Für geotechnische Zwecke wird in der kanadischen Literatur (JOHNSTON 1981) im Permafrost zwischen «hard frozen» (Baugrund mit geringen Gehalten an ungefrorenem Wasser), «plastic frozen» (Baugrund mit hohen Eisgehalten und hohen Gehalten an ungefrorenem Wasser) und «dry frozen» (Baugrund praktisch ohne Eis) unterschieden. Plastisch gefrore-

Tab. 2: Beispiele von Bodeneis-Erscheinungen in Lockergesteinen (Poreneis) und im Fels (Klufteis). Die angegebenen Werte können örtlich variieren und sollten je nach Problemstellung mit Feld- oder Labortests verifiziert werden.

Gesteinsgefüge	Schematische Darstellung	Volmetrischer Eisgehalt (Sättigungsgrad mit Eis)	Mechanisches Verhalten im gefrorenen Zustand
Quasiisotrop (<i>ähnliche Eigenschaften in allen Richtungen</i>) Lockergestein mit viel Eis		Eisreich 55–85 % (übersättigt)	Ausgeprägtes Kriechen unter Belastung (Schwerkraft, Auflast)
Lockergestein mit wenig Eis		Eisarm 0–20 % (ungesättigt–gesättigt)	Kriechen unter Belastung
Anisotrop (<i>Richtungsabhängige Eigenschaften</i>) Geklüfteter Fels mit viel Eis		Eisreich 10–30 % (gesättigt)	Kriechen auf Klüften
Geklüfteter Fels mit wenig Eis		Eisarm 0–10 % (ungesättigt)	Wenig Probleme evtl. Kriechen auf ungünstig liegenden Klüften

ner Permafrost tendiert wie reines Eis zu Deformation und Kriechen, während trockener Permafrost ähnliche mechanische Eigenschaften aufweist wie der ungefrorene Baugrund. Die Deformierbarkeit von hart gefrorenem Permafrost hängt weitgehend von dessen Eisgehalt ab. Neben den statischen, strukturellen Eigenschaften des Permafrosts spielen kryogene Prozesse im Permafrost eine wichtige Rolle.

Dazu gehören im Wesentlichen:

- Veränderung der Struktur und Textur wegen:
 - Gefrieren von Wasseranteilen
 - Eislinsenwachstum
 - Auftauen von Eis / Schnee
- Transport von Feuchtigkeit von warm zu kalt (Eissegregation)

Während der Schneeschmelze oder während eines Starkniederschlags wird zum Beispiel Wärme durch Wasser in den Untergrund transportiert (Konvektion). Dabei wird, je nach Temperatur im Untergrund, entweder Bodeneis geschmolzen oder gebildet. Neben den Folgen wie eine reduzierte Stabilität, Setzungen oder Hebungen, werden durch die Zu- und Abnahmen des Eisgehalts auch die geotechnischen Eigenschaften des Baugrunds ständig verändert.

Durch Temperaturunterschiede zwischen ungefrorenem und gefrorenem Boden entsteht ein so genannter negativer Temperaturgradient. In Kombination mit der Saugspannung, die durch Eisbildung entsteht, bewirkt dieser, dass das Porenwasser oder der Wasserdampf vom ungefrorenen Boden in den gefrorenen Boden transportiert wird (Abb. 7). Abhängig vom Wassernachschub können sich durch diesen so genannten Segregationsprozess Eislinsen ausbilden (Abschnitt Segregationseis). Auf diese kryogenen Vorgänge und Prozesse im Permafrost wird in Kapitel 1.7 weiter eingegangen.

Lockergestein im Permafrost

Die geotechnischen Eigenschaften von Lockergesteinen im Permafrost werden hauptsächlich durch den Eisgehalt, die Kornzusammensetzung und die Temperatur bestimmt. In diesem Abschnitt werden die geotechnischen Eigenschaften dieses Materials beschrieben sowie auf deren Festigkeits- und Deformationsverhalten eingegangen.

Kornform und Korngrößenverteilung

Die Kornform und die Korngrößenverteilung der Lockergesteine sowie das Verhältnis zwischen Festsubstanz und Eisgehalt beeinflussen das Festigkeits- und Deformationsverhalten eines gefrorenen Baugrunds. Die Kornverteilungskurven zeigen meist eine gut abgestufte Zusammensetzung, jedoch mit wenig oder keinen Feinkomponenten der Tongröße. Zusammensetzung und Textur der Lockergesteine im Permafrost können mit denen eines ungefrorenen Bodens verglichen werden, so dass generell im Permafrost alle Lockergesteins-Klassen nach USCS (Unified Soil Classification System) möglich sind. Die Klassifikation der Lockergesteine wird in der Schweizer Norm SN 670 005a (Feld) und SN 670 008a (Labor) geregelt.

Der Einfluss der Kornzusammensetzung auf die Frostempfindlichkeit wird im Kapitel 8.4.4 beschrieben. Die Feinanteile beeinflussen die Eisbildung und somit die Frostempfindlichkeit eines Baugrunds. Die feinkörnigen Komponenten eines Baugrunds können mehr Wasser an sich binden, was beim Gefrieren zu Problemen wie Frosthebung und beim Tauen zu Scherfestigkeitsverlusten und Setzungen führen kann.

Lagerungsdichte und Porosität

Da die Lagerungsdichte über die Porosität definiert wird, sind diese beiden geotechnischen Eigenschaften nur schwer voneinander zu trennen, so dass sie hier zusammen beschrieben werden. Die Lagerungsdichte bestimmt die mechanischen Eigenschaften eines Baugrunds mit nur wenig Feinanteilen (Sande, Kiese) zu einem grossen Teil. Eine dichte Lagerung vergrössert die Scherfestigkeit durch die Dilatanz und führt zu einer Verminderung der Setzungsempfindlichkeit eines Permafrost-Baugrunds. Eine kleine Porosität hat zudem meistens einen niedrigen Eis- und Luftgehalt zur Folge. Eine lockere Lagerung weist die gegenteiligen Eigenschaften auf. Die Porosität liegt zum Beispiel höher, was die Möglichkeit eines grossen Eis- und Luftgehalts mit sich bringen kann. Im Allgemeinen ist in der Auftauschicht eine Zunahme der Lagerungsdichte gegen unten durch den Überlagerungsdruck erkennbar.

Die Porosität beeinflusst den Eis- und Wassergehalt eines Baugrunds im Lockergestein. Dabei spielt die Grösse der Poren eine wichtige Rolle. In grossen Poren fliesst Wasser hauptsächlich in Richtung Schwerkraft. In kleinen Poren hingegen kann Wasser durch die Kapillarität und Saugspannung sowie als Wasserdampf durch einen Temperaturgradienten im Baugrund in jede Richtung transportiert werden. Die Poren stellen somit den Nachschub an Wasser und Wasserdampf für die Bildung von Segregationseis sicher.

Luftporengehalt

Der Luftporengehalt eines gefrorenen Baugrunds im Lockergestein ist unterschiedlich gross. Ein hoher Luftporengehalt kann durch eine zusätzliche Belastung oder durch eine Scherbewegung zu Festigkeitsverlusten, erhöhten Deformationsraten oder Setzungen führen. Letztere sind auf eine Volumenabnahme durch eine Verdichtung zurückzuführen. Durch Schmelzen des Bodeneises kann sich der Luftporengehalt in einem Baugrund erhöhen.

Hydraulische Durchlässigkeit

Die Hydrologie in einem gefrorenen Baugrund ist kompliziert, da sie Gefrier- und Tauprozessen unterworfen ist. Sie kann sich verändern zum Beispiel durch Wasser das in einen porösen, ungesättigten Permafrost-Baugrund eindringt und eine durchgehende Eisschicht aufbaut, durch Wasserzirkulationen im Permafrostkörper (Taliks), oder durch wärmeres Wasser welches zu Schmelzprozessen führen kann. Dadurch verändert sich die hydraulische Durchlässigkeit ständig.

Generell wird die hydraulische Durchlässigkeit durch den Gehalt an Feinanteilen, den Eisgehalt und die Porosität (Lagerungsdichte) bestimmt. In der Auftauschicht sind gegen unten zunehmend Feinanteile (inverse Segregation) und hohe Lagerungsdichten (Überlagerungsdruck) erkennbar. Die Durchlässigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Sie ist in der Auftauschicht um mehrere Zehnerpotenzen höher als die in einem eisreichen Permafrostkörper, so dass ein eisgesättigter Permafrost meist als undurchlässig bezeichnet werden kann.

Eisgehalt

Das meiste Bodenwasser im Permafrost tritt als Eis auf. Der Eisgehalt eines gefrorenen Baugrunds im Lockergestein ist unterschiedlich. Dieser kann dispers sein aber durch den Prozess der Eissegregation erhöht werden. In Abbildung 5 sind verschiedene volumetrische Eisgehalte eines grobkörnigen Lockergesteins schematisch dargestellt. Der Eisgehalt hat neben der Bodentemperatur den stärksten Einfluss auf das Festigkeits- und Deformationsverhalten eines Permafrost-Baugrunds.

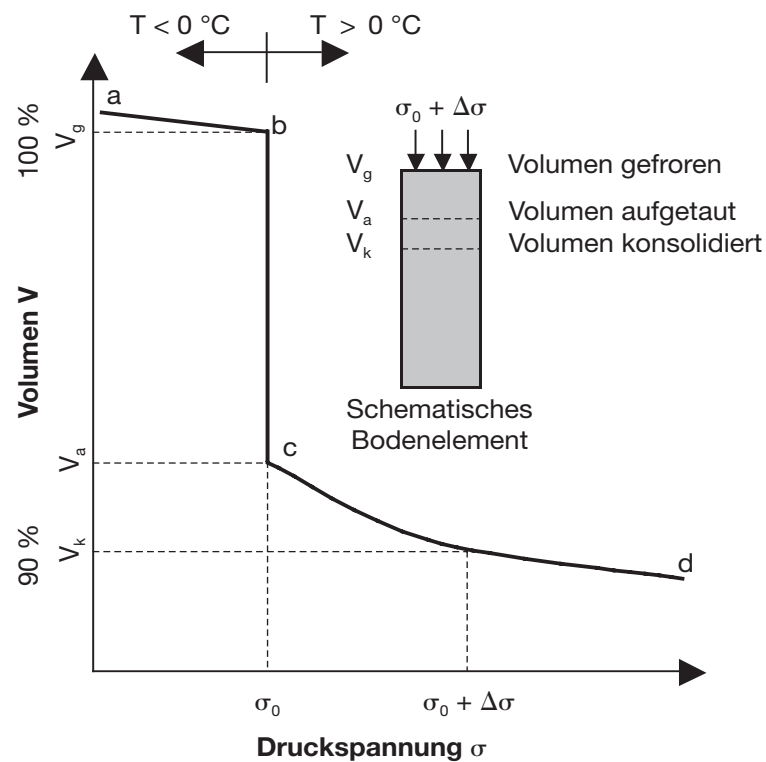
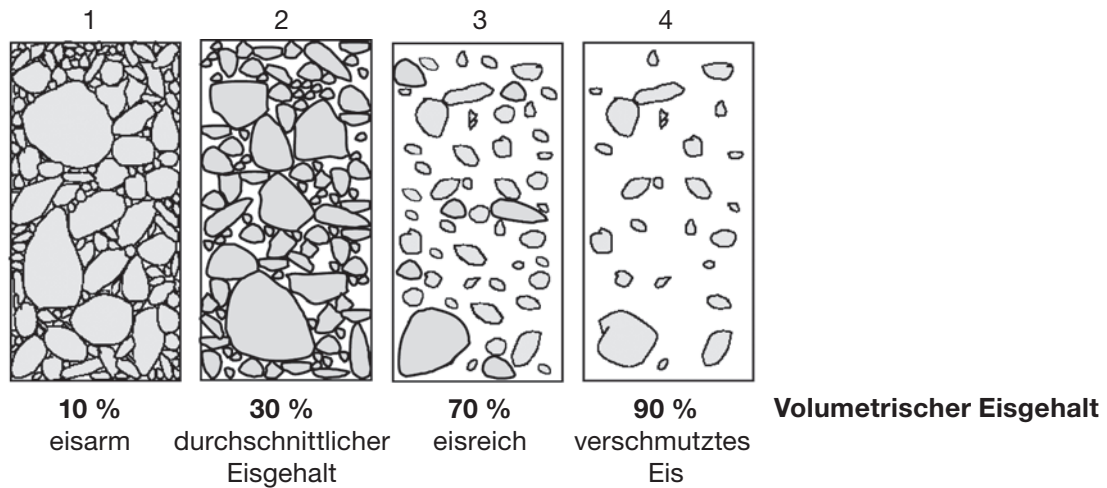
Das Schmelzen von Bodeneis kann zu einer Volumenabnahme und damit zu Setzungen führen (Abb. 6). Die Volumenabnahme durch den Phasenwechsel einerseits und das Drainieren von Schmelzwasser aus dem Lockergestein andererseits sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Linie bc repräsentiert dabei das Tauen von Bodeneis bei 0 °C. In feinkörnigem Lockergestein ist zudem eine kontinuierliche auftaubedingte Konsolidierung zu beobachten. Diese dauert so lange bis das Gleichgewicht im Baugrund für den Überlagerungsdruck σ_0 und einer zusätzlicher Last $\Delta\sigma$ wieder hergestellt ist. Die Volumenabnahme wegen auftaubedingter Setzung und zunehmender Druckspannung ist in Abbildung 6 mit der Line cd dargestellt.

Segregationseis

Durch die Migration von Porenwasser oder Wasserdampf entlang eines negativen Temperaturgradienten (von warm zu kalt) zur Gefrierfront kann es zur Bildung von eisreichen Zonen (Eislinsen oder Schichten unterschiedlicher Dicke) im Permafrost kommen. Diese können zu Hebungen (Aufwärts- oder Auswärtsbewegung durch Expansion) des Baugrunds führen, und beeinflussen die Scherfestigkeit und Tragfähigkeit des Untergrunds in Abhängigkeit der Eistemperatur. In Abbildung 7 ist der Segregationsprozess (Bildung von Segregationseis) schematisch dargestellt.

Temperatur

Abnehmende Permafrosttemperaturen können die Festigkeit eines eishaltigen Baugrunds erhöhen sowie die Kriechverformungen minimieren (Abb. 8). Kaltes Eis (≤ -2 °C) zeigt ein weniger duktils Deformationsverhalten, während warmes Eis (≥ -2 °C) ein duktils Deformationsverhalten aufweist. Ansteigende Temperaturen in einem eishaltigen Permafrost-Baugrund bewirken eine Reduktion der Festigkeit sowie beschleunigte Kriechbewegungen. Gemäss ARENSEN *et al.* (2009) ist das meiste Wasser ab etwa -2 °C im Lockergestein gefroren, so dass die Festigkeit des Permafrosts zunimmt.



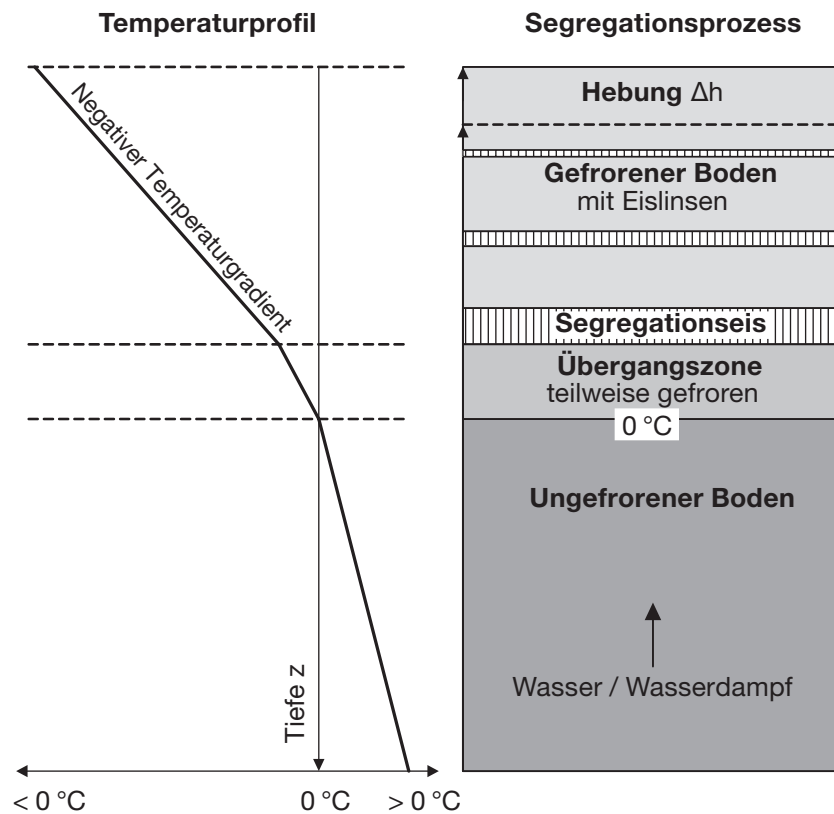


Abb. 7: Schematische Darstellung des Segregationsprozesses, Bildung von Segregationseis.

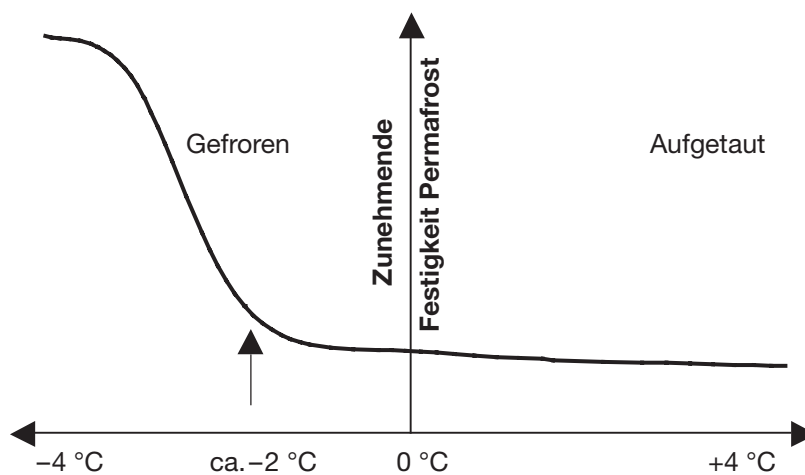


Abb. 8: Schematisch Darstellung der Permafrostfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur, (angepasst nach ANDERSLAND und LADANYI 2004).

Festigkeitsverhalten

Das Festigkeitsverhalten eines Permafrost-Baugrunds im Lockergestein ist hauptsächlich von der Kornverteilung, der Lagerungsdichte, dem Eisgehalt und der Bodentemperatur abhängig. Die Scherfestigkeit eines grobkörnigen, dicht gelagerten Baugrunds im Lockergestein wird durch den Reibungswinkel und die Dilatanz bestimmt. In einem gefrorenen Baugrund kann es zu einer Erhöhung der Scherfestigkeit durch den Verbund der einzelnen Körner mit Eis kommen. Dieser Verbund kann mit einer Zementierung der einzelnen Körner verglichen werden.

Eine Scherfestigkeitszunahme der Lockergesteins-Eismatrix ist bis zur Eissättigung feststellbar, da die Kräfte vorwiegend durch das Kornskelett der festen Komponenten übertragen werden. Liegt der Eisgehalt über der Eissättigung (Eisübersättigung) wird die Scherfestigkeit durch Kriechen reduziert. Das Eis bestimmt nun die Scherfestigkeit des Baugrunds da der Korn zu Korn Kontakt verloren geht, der die innere Reibung erzeugt (Abb. 5). Dies führt zu einer Abnahme der Scherfestigkeit.

Liegen die Bodentemperaturen im Permafrost knapp unter 0 °C, ist nur eine geringe Scherfestigkeitszunahme gegenüber dem ungefrorenen Zustand zu erwarten. Beim vollständigen Auftauen, sowie bei grossen Deformationen, geht der zementierende Effekt des Eises verloren, so dass die Scherfestigkeit wieder abnimmt und mit derjenigen im ungefrorenen Zustand verglichen werden kann.

Ein feinkörniger Baugrund erreicht in gefrorenem Zustand gegenüber dem ungefrorenen eine Scherfestigkeitserhöhung falls keine Eisübersättigung vorliegt. Beim Auftauen kann es zu erhöhten Porenwasserdrücken kommen. Dies hat eine Reduktion der effektiven Spannungen und somit der Scherfestigkeit zur Folge und kann zu Instabilitäten führen.

Die Belastungs- und Deformationsgeschwindigkeit beeinflusst das Festigkeitsverhalten eines Permafrost-Baugrunds. Dieses Verhalten ist in Abbildung 10 in Abhängigkeit des volumetrischen Eisgehalts dargestellt sowie im Abschnitt Deformationsverhalten beschrieben.

Deformationsverhalten

Ein gefrorener, eisreicher Baugrund im Lockergestein zeigt ein stark zeitabhängiges Deformationsverhalten bei gleich bleibender Belastung. Die Kriechbewegung wird dabei durch den Eisgehalt und die Eistemperatur beeinflusst. Liegt der Eisgehalt im Lockergestein über der Eissättigung (Eisübersättigung) geht der Korn zu Korn Kontakt verloren, der die innere Reibung erzeugt. Dies führt zu einer Zunahme der Kriechdeformationen.

In Abbildung 9 sind Kriechkurven eines eishaltigen Lockergesteins unter Auflast mit unterschiedlichem Eisgehalt und den drei dominanten Kriechphasen dargestellt. Die Standardkriechkurve besteht aus drei charakteristischen Kriechphasen in Abhängigkeit der Zeit, die primäre (sofort, abnehmend), die sekundäre (konstant bleibend) und die tertiäre Phase (zunehmend bis zum Bruch, selten erreicht).

Die Geschwindigkeit, mit der eine Last aufgebracht wird, sowie der volumetrische Eisgehalt beeinflussen das Deformationsverhalten eines gefrorenen, eishaltigen Baugrunds. Eine schnelle Belastung kann in einem spröden Bruch resultieren, während dessen eine langsame Belastung je nach Eisgehalt eine dilatante oder eine duktile, von Kriechen geprägte, Verformung zur Folge hat (Abb. 10).

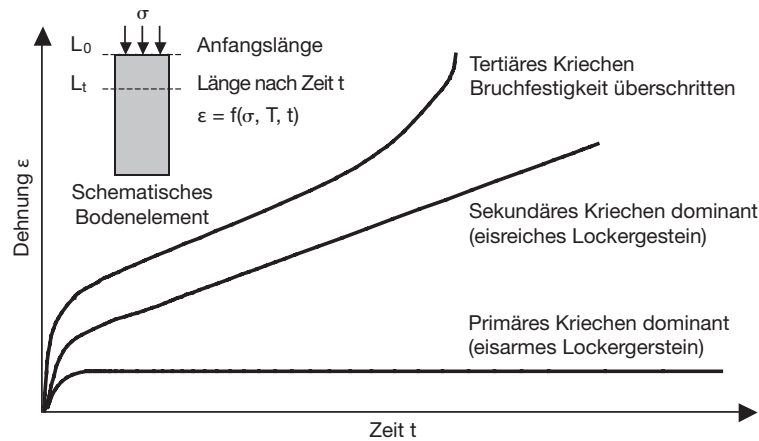


Abb. 9: Kriechkurven für unterschiedliche Eisgehalte im Lockergestein (angepasst nach ANDERSLAND und LADANYI 2004). L_0 = Anfangslänge, L_t = Länge nach Zeit t , ε = Dehnung, σ = Auflast, T = Temperatur.

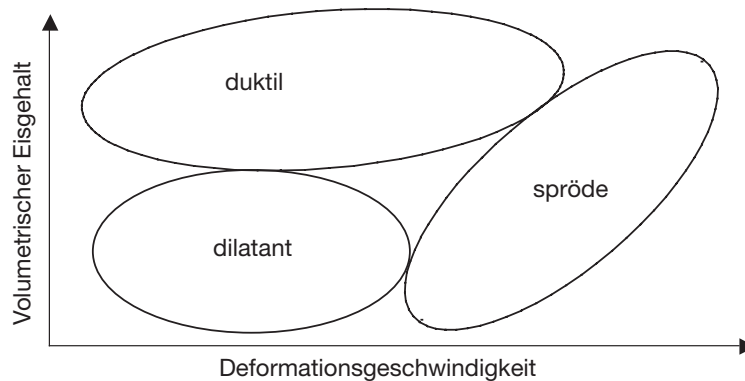


Abb. 10: Deformations- und Festigkeitsverhalten eines Lockergesteins im Permafrost in Abhängigkeit des volumetrischen Eisgehalts (angepasst nach ARENSON *et al.* 2002).

Zusammenfassung

Die geotechnischen Eigenschaften von Lockergesteinen im Permafrost werden neben der Bodentemperatur durch den Eis- und Festsubstanzgehalt bestimmt. Die Festigkeit ist hauptsächlich von der Kornverteilung, der Lagerungsdichte, dem Eisgehalt und der Bodentemperatur abhängig. Die Scherfestigkeit eines gefrorenen Baugrunds kann je nach Eisgehalt durch den Verbund der einzelnen Körner mit Eis erhöht werden.

Das Deformationsverhalten ist stark zeitabhängig und wird dabei durch den Eisgehalt und die Eistemperatur beeinflusst. Liegt der Eisgehalt im Lockergestein über der Eissättigung, geht der Korn zu Korn Kontakt verloren, was zu einer Zunahme der Kriechdeformationen führt.

In Tabelle 3 ist qualitativ zusammengestellt, wie die verschiedenen geotechnischen Eigenschaften die Scherfestigkeit und das Deformationsverhalten eines Permafrost-Baugrunds im Lockergestein beeinflussen. Die angegebenen Werte können örtlich variieren, und sollten je nach Problemstellung mit Feld- oder Labortests verifiziert werden.

In Tabelle 4 sind charakteristische Baugrundwerte sowie die Scherfestigkeits- und Deformationsmechanismen von gefrorenen Lockergesteinen zusammengestellt. Die angegebenen Werte können örtlich variieren, und sollten je nach Problemstellung mit Feld- oder Labortests verifiziert werden.

Tab. 3: Geotechnische Eigenschaften von gefrorenen Lockergesteinen, welche Scherfestigkeit und Deformationsverhalten beeinflussen. * AS: Auftauschicht; PF: Permafrost

Lockergestein	Scherfestigkeit		Deformationsverhalten	
	+ (Zunahme)	– (Abnahme)	+ (Zunahme)	– (Abnahme)
Korngrößenverteilung	Gute Abstufung, grobkörnig	Gleichförmig, feinkörnig	Feinkörnig	Gute Abstufung, grobkörnig
Lagerung	Dicht	Locker	Locker	Dicht
Durchlässigkeit: AS / PF*	Hoch	Niedrig	Hoch, > Kriechen	Niedrig, < Kriechen
Luftporengehalt	Klein, < Kriechen	Gross, > Kriechen	Gross, > Kriechen	Klein, < Kriechen
Eisgehalt	Bis gesättigt	Übersättigt, trocken	Übersättigt	Trocken bis gesättigt
Temperatur	$\leq -2\text{ °C}$	$\geq -2\text{ °C}$	$\geq -2\text{ °C}$, > Kriechen	$\leq -2\text{ °C}$, < Kriechen

Tab. 4: Charakteristische Baugrundwerte und Mechanismen von gefrorenem Lockergestein.

Beschreibung / Baugrundwerte	Gefrorenes, eisarmes Lockergestein	Gefrorenes Lockergestein	Eisreiches Lockergestein	Verschmutztes Eis
Raumgewicht [kg m ⁻³]	2000–2300	1550–2000	1100–1550	900–1100
Lagerung	Dicht	Locker	–	–
Eisgehalt [%]	20–0	55–20	85–55	100–85
Reibung	Reibung, Dilatanz	Reibungsarm	Sehr reibungsarm	Sehr reibungsarm
Scherfestigkeits-Zusammensetzung, Mechanismen	Eisfestigkeit, Lockergesteinsfestigkeit, strukturelle Behinderungen, Dilatanz	Eisfestigkeit, Lockergesteinsfestigkeit, strukturelle Behinderungen	Eisfestigkeitssteigerung durch Gesteinspartikel	Eisfestigkeit
Kriech- und Deformationsmechanismen	Gedämpftes Kriechen, Deformation behindert durch Kornform	Kriechen, Deformation behindert durch Kornform	Kriechen, Verschiebungen evtl. behindert durch Gesteinspartikel	Kriechen unbehindert, Verschmutzung unterstützt Rekristallisation

Fels im Permafrost

Die geotechnischen Eigenschaften von Fels im Permafrost werden hauptsächlich durch den Eisgehalt, die Zerklüftung des Felses und die Felstemperatur bestimmt. Auf der Felsoberfläche und in der Auftauschicht beeinflusst die Frostverwitterung (Frostsprengung) die geotechnischen Eigenschaften. In diesem Abschnitt werden die geotechnischen Eigenschaften von Fels beschrieben sowie auf deren Festigkeits- und Deformationsverhalten eingegangen.

Gebirgseigenschaften

Die bautechnische Felsqualität wird im Permafrost massgebend durch die Kluftdichte und Kluftweite sowie den Eisgehalt bestimmt. Eine Möglichkeit die Felsqualität (Klufthäufigkeit) zu bestimmen ist im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, Angaben zum Eisgehalt sind in den Abschnitten Eisgehalt und Segregationseis zu finden.

Für komplexe und deformationsanfällige Bauten empfiehlt es sich die Felsbeschaffenheit des Baugrunds sorgfältig zu erheben. Dabei müssen neben der Kluftdichte (Häufigkeit) und der Kluftweite auch deren Richtung sowie der Durchtrennungsgrad bestimmt werden. Aus der Aufnahme der Zwischenschichten (Kluftfüllung) kann die Gleitreibung der Trennflächen abgeleitet und mit Temperaturmessungen Aussagen bezüglich dem Fels- und Eisverbund gemacht werden.

Eine weitere Möglichkeit die Gebirgseigenschaften zu erkunden, ist eine Kernbohrung abzuteufen, und die «ungestörten» Proben anschliessend im Labor auf ihre Druckfestigkeit und Gleitreibung zu prüfen. Wichtig ist auch die Kluftorientierung der Kerne aufzunehmen. Die Diskontinuitäten können unter anderem mit einer Bohrlochkamera genauer bestimmt werden. Weitere mögliche Untersuchungen sind im Kapitel 2.1.2 respektive 2.1.3 zu finden.

Rock Quality Designation Index (RQD-Index)

Der RQD-Index (ASTM D6032) ist ein Wert, um die Qualität von Felsbohrkernen zu klassifizieren. Dabei wird pro Laufmeter die Summe der Länge der Bohrkernstücke die länger als 0,10 m sind durch die Gesamtlänge (1 m) dividiert. Der daraus resultierende Wert wird mit Erfahrungswerten aus einer Klassifikationstabelle verglichen (Tab. 5), und dient als eine erste Abschätzung der Felsqualität.

Tab. 5: Rock Quality Designation Erfahrungswerte zur Klassifizierung der Gebirgsdruckfestigkeit oder Felsqualität (angepasst nach DEERE 1963).

RQD	Felsqualität
< 25 %	Sehr gering
25–50 %	Gering
50–75 %	Mittel
75–90 %	Gut
90–100 %	Ausgezeichnet

Geological Strength Index (GSI)

Der GSI ist eine Methode, um die Felsqualität von stark zerklüftetem, frostverwittertem Fels zu klassifizieren. Der GSI basiert auf geologischen Oberflächenbeobachtungen wie der Lithologie (Bestimmung der Gesteine), Felsstruktur und der Oberflächenbeschaffenheit (Zerklüftung, Verwitterung, Kluftfüllung). Die daraus resultierenden Einschätzungen dienen einer ersten Abschätzung der Felsqualität, ohne Baugrundsondierungen vornehmen zu müssen. Detaillierte Angaben zur Bestimmung der Felsqualität nach GSI sind in MARINOS und HOEK (2005) zu finden.

Porosität

Die Porosität beeinflusst den Wassergehalt im Fels. Dabei spielt die Porengrösse eine wichtige Rolle. In grossen Poren fliesst Wasser hauptsächlich in Richtung der Schwerkraft. In kleinen Poren hingegen kann Wasser durch die Kapillarität und Saugspannung sowie Wasserdampf bei Temperaturgradienten im Fels in jede Richtung transportiert werden. Den massgeblichen Nachschub an Wasser- oder Wasserdampf für die Bildung von Segregationseis stellen jedoch nicht die Poren sondern die Klüfte sicher.

Schichtung, Klüfte

Felsuntergrund und Felswände stellen nur ein Problem dar, wenn sie geschichtet oder zerklüftet sind und Eis enthalten. Treffen diese Bedingungen zu, kann eine Erwärmung des Eises die Stabilität gefährden und zu Block- oder Felsstürzen führen.

Die Zirkulation von Wasser und warmer Luft in Klüften trägt zu einer Erwärmung des Fels und des Permafrosts bei und somit zum Schmelzen des Eises. In offene Felsklüfte ablaufendes Wasser kann sich zurück stauen. Das rückgestaute Wasser in den Spalten oder Klüften baut einen Wasserdruck auf, welcher Block- oder Felsstürze auslösen kann.

Eisgehalt

In gesundem Fels hängt der Eisgehalt hauptsächlich von dessen Kluftdichte ab. Es ist jedoch selten, dass der Fels keine Risse, Spalten und Klüfte aufweist. Diese können mit Eis gefüllt sein. Eisgefüllte Klüfte können neben der «zementierenden Wirkung» (Scheinkohäsion) eine Felswand versiegeln, so dass Wasser nicht in den Fels eindringen kann. Angaben zum volumetrischen Eisgehalt von Fels sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Segregationseis

Durch Segregation von Eis kann es zur Vergrößerung von Felsspalten oder Klüften kommen. Die Entstehung von neuen Rissen erfolgt meist in der Nähe der Permafrostoberfläche oder an der Untergrenze der Auftauschicht. Folgende Voraussetzungen ermöglichen die Segregation von Eis:

- Negativer Temperaturgradient (Abb. 7)
- Kluftsystem (Durchlässigkeit) welches Wassermigration oder den Transport von Wasserdampf ermöglicht
- Wassernachschub (ungefrorenes Wasser)

Das Segregationseis ist massgeblich für Felshebungen (Aufwärts- oder Auswärtsbewegung durch Expansion) verantwortlich (Abschnitt 1.7, Abb. 20).

Temperatur

Abnehmende Bodentemperaturen wirken sich positiv auf die Stabilität von eishaltigem Fels aus, da der Fels-Eisverbund gestärkt wird. Steigende Felstemperaturen bewirken dagegen eine Permafrost-Degradation und somit eine Destabilisierung. Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass wenn Eis eine Temperatur knapp unter dem Gefrierpunkt erreicht, der Fels-Eisverbund vermindert und instabil wird (Stabilitätsindex: $< 1,0$ Versagen des Fels- Eisverbunds; $> 1,0$ fester Fels-Eisverbund), (Abb. 11) (DAVIES *et al.* 2001).

Eine Erwärmung wirkt sich im Permafrost schneller an steilen Felsoberflächen als im Lockergestein aus. Steile Felswände weisen keine isolierende, grobblockige Schicht (Blöcke mit Luftzwischenräumen) und wenig Schneebedeckung auf und werden somit direkt von der Lufttemperatur und der Strahlung beeinflusst.

Festigkeitsverhalten

Die Druckfestigkeit eines gesunden Fels ist grundsätzlich durch die Gesteinsart bestimmt. In einem zerklüfteten Gebirge ist die Festigkeit von der Klufrichtung und der Kluftfüllung abhängig. Greift eine Kraft normal zu einer eisgefüllten Kluft an, ist die Druckfestigkeit von den Eis- und Felseigenschaften abhängig.

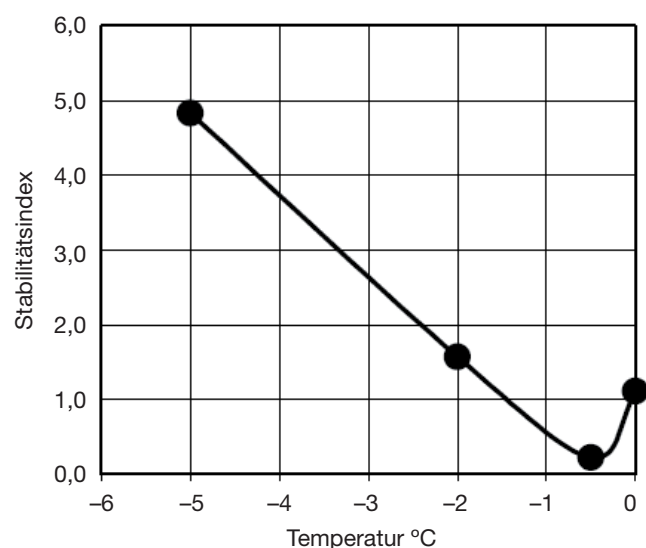


Abb. 11: Zusammenhang zwischen der Temperatur von Klufteis und des Stabilitätsindexes von Fels (angepasst nach DAVIES *et al.* 2001).

Parallel zur Kluft auftretende Kräfte werden als Scherkräfte bezeichnet. Die Scherfestigkeit einer eisgefüllten Kluft ist von der Fels- und der Eistemperatur abhängig. Eine Erwärmung des Kluftes reduziert die Stabilität. Dieses Verhalten kann durch die Entwicklung von Porenwasserüberdruck in Kombination mit blockierten Drainagewegen erklärt werden. Letztere führen zu einer reduzierten effektiven Spannung und setzt die Scherfestigkeit in den Klüften herab. Im Vergleich dazu sind eisfreie sowie eisgefüllte Klüfte ($T \leq -2\text{ °C}$) stabiler (Abb. 11).

Die Festigkeit des Eises wird neben der Temperatur durch den hydrostatischen Druck, die Bildungsbedingungen, die Kristallstruktur sowie Unreinheiten oder Einschlüsse von feinem Material beeinflusst.

Deformationsverhalten

Das Deformationsverhalten eines gesunden Fels wird grundsätzlich durch den Elastizitätsmodul der Gesteinsart bestimmt. In einem zerklüfteten Fels ist die Deformation von der Klufttrichtung und der Kluftfüllung abhängig. Greift eine Kraft normal zu einer eisgefüllten Kluft an, ist das Deformationsverhalten von den Eis- und Felseigenschaften abhängig. Parallel zur Kluft auftretende Kräfte bewirken eine Scherdeformation. Diese ist in einer eisgefüllten Kluft von der Eistemperatur abhängig. Eine Erwärmung des Kluftes erhöht die Scherdeformationsrate (Kriechrate) und kann im schlimmsten Fall den Eis-Fels-Verbund zerstören.

Zusammenfassung

In der Praxis ist die wichtigste geotechnische Eigenschaft von eishaltigem Fels das Deformations- resp. Kriechverhalten unter einer Auflast. Je nach Eisgehalt ist mit einem viskoplastischen Deformationsverhalten zu rechnen. In zerklüftetem, eishaltigem Fels werden die Deformationen von der Klufttrichtung und der Kluftfüllung bestimmt. Je nach Kraftangriff ist das Deformationsverhalten, sowie die Druck- oder Scherfestigkeit von den Eis- oder Felseigenschaften abhängig. Eine Erwärmung des Kluftes erhöht die Scherdeformationsrate (Kriechrate) und kann im schlimmsten Fall den Eis-Fels-Verbund zerstören.

Tab. 6: Geotechnische Eigenschaften von gefrorenem Fels, welche Scherfestigkeit und Deformationsverhalten bestimmen.

Fels	Scherfestigkeit		Deformationsverhalten	
	+ (Zunahme)	– (Abnahme)	+ (Zunahme)	– (Abnahme)
RQD-Index	> 50 %	< 50 %	< 50 %	> 50 %
Porosität	Klein	Gross	Gross	Klein
Klüftigkeit	Gering, gegen Scherrichtung	Hoch, in Scherrichtung	Hoch, in Scherrichtung	Gering, gegen Scherrichtung
Segregationseis	Keine bis wenige Eislinsen	Viele Eislinsen	Viele Eislinsen	Keine bis wenige Eislinsen

In Tabelle 6 ist qualitativ zusammengestellt, wie die verschiedenen geotechnischen Eigenschaften die Scherfestigkeit und das Deformationsverhalten von gefrorenem Fels beeinflussen. Die angegebenen Werte können variieren, und sollten je nach Problemstellung mit Feld- oder Labortests verifiziert werden.

1.5 Geländeformen und Geomorphologie im Gebirgspermafrost

Permafrost ist ein thermisches und zumeist verborgenes Phänomen. Es gibt jedoch gewisse geomorphologische Formen und Prozesse, die auf Permafrostvorkommen deuten (Abschnitt 1.8).

Aktive Blockgletscher sind zungenförmige, schuttbedeckte Geländeformen, die aus Steinen und Eis bestehen und mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern bis Metern pro Jahr talwärts kriechen. Sie haben eine gewölbte Form, Kriechstrukturen an der Oberfläche und steile Ränder ($> 38^\circ$). Die steilen Ränder deuten darauf hin, dass sie Eis enthalten, da der natürliche Böschungswinkel von Lockermaterialien weniger als etwa 38° beträgt. Das Wasser allfälliger Quellen an der Stirn ist kälter als 3°C . Aktive Blockgletscher können einige Dutzend bis mehrere hundert Meter lang sein und ihre Mächtigkeit kann mehrere Dutzend Meter erreichen. Sie sind auf Karten, auf Luftbildern und im Gelände gut erkennbar und sehen ähnlich aus wie zähflüssige Lavaströme (Abb. 12, links).

Relikte Blockgletscher enthalten kein Eis, sind kaum gewölbt und zusammengesackt. Die Ränder sind weniger steil als 38° . Flechten und Vegetation können an deren Oberfläche vorhanden sein. Allfällige Wasserquellen sind wärmer als 3°C . Sie deuten darauf hin, dass wahrscheinlich kein Eis mehr vorhanden ist (Abb. 12, rechts).

Kleinere, zungenförmige **Kriechformen** können sich in Lockersedimenten bilden – so zum Beispiel in Schutthalden oder Moränen – und einige bis mehrere Dutzend Meter lang und einige Zentimeter bis Dezimeter mächtig sein. In Permafrostgebieten sind sie meist vegetationsfrei und haben steile Ränder, was auf Eis im Boden deutet. Sie sind auf Luftbildern und im Gelände gut erkennbar (Abb. 13).



Abb. 12: (Links) aktiver Blockgletscher mit Kriechstrukturen und steilen Rändern (Val d'Err, Juliergebiet 2600 m ü.M., GR). (Rechts) relikter Blockgletscher in sich zusammengefallen, mit Vegetation (Älpeltispitz, Klosters 2300 m ü.M., GR) (Foto Thomas Stucki, SLF).



Abb. 13: Kriechformen in einer Schutthalde (Juliergebiet 2700 m ü.M., GR).

Perennierende Schneeflecken bleiben ein bis mehrere Jahre liegen ohne im Sommer zu schmelzen und isolieren somit den Boden gegen hohe Lufttemperaturen und Strahlung. Sie befinden sich meistens in Hangfusslagen (Lawinenablagerungen) oder in Mulden (Windverfrachtung) und sind auf Luftbildern und im Gelände im Herbst sichtbar (Abb. 14).

Thermokarstsenkungen entstehen, wenn das Bodeneis schmilzt und der Boden dadurch an Volumen verliert (Hohlräume entstehen). Solche Senkungen können in wenigen Tagen bis einigen Jahren entstehen und mehrere Meter tief sein. In deren Umgebung kann der Boden weiterhin Eis enthalten (Abb. 15).



Abb. 14: Perennierende Schneeflecken (Lawinenablagerungen) am Fuss eines Steilhangs (Schafberg 2800 m ü.M., Pontresina, GR).



Abb. 15: Thermoskarstsenkung in Lockergesteinen auf einer Skipiste.



Abb. 16: Musterboden in leicht geneigtem Gelände (Juliergebiet 2700 m ü.M., GR).



Abb. 17: Klufteis in der Anrissfläche eines Felssturzes (Gemsstock 2960 m ü.M., UR. Foto: Carlo Danioth).

Musterböden entwickeln sich typischerweise in Lockergesteinen. Im flachen Gelände können sich zum Beispiel Steinkreise bilden, im geneigten Gelände Steinstreifen. Solche Muster sind Indikatoren dafür, dass der Boden Eis enthält und dass Tau- und Gefrierprozesse stattfinden. Sie können aber nicht als sichere Permafrostindikatoren betrachtet werden (Abb. 16).

In Anrissflächen von Rutschungen, Murgängen (in Lockermaterial) und Steinschlag (in Fels) kann **Bodeneis** oder **Klufteis** sichtbar sein. Dies ist ein klarer Nachweis für Permafrost. Solches Eis ist jedoch nur selten direkt im Gelände sichtbar (Abb. 17).

Unter **Hängegletschern** sind die Felswände permanent gefroren, da sonst das Eis auf der Felsoberfläche abrutschen würde. Sie sind deswegen ein klarer Nachweis für Permafrost (Abb. 18).

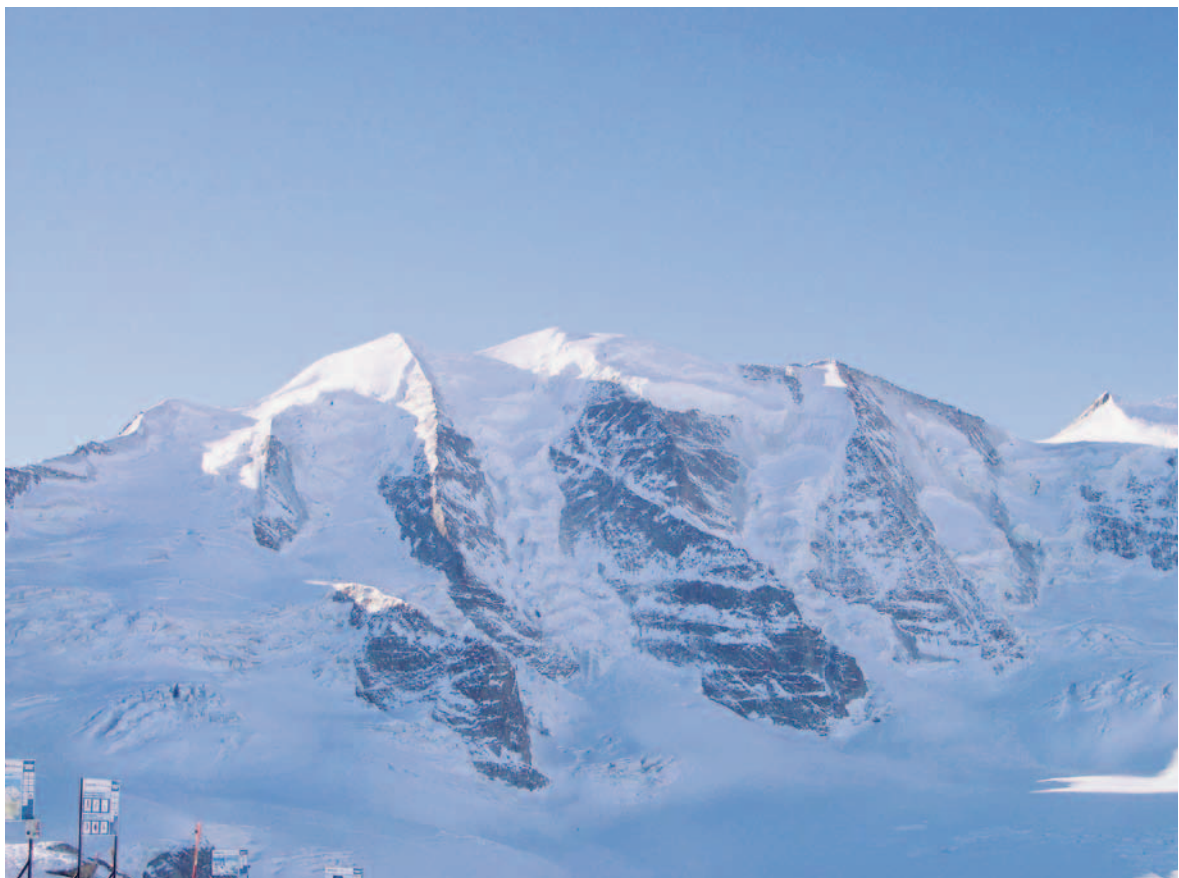


Abb. 18: Hängegletscher und Eiswände (Piz Palü, GR). Die Hängegletscher sind an steile Felswände angefroren und deuten auf Permafrost im Untergrund.

1.6 Permafrost und Klimaänderung

In den 2007 publizierten nationalen und internationalen Klimaberichten wird für die Schweiz mit einer Erwärmung von 2 bis 3 °C in den nächsten 50 Jahren gerechnet (OcCC, 2007; IPCC, 2007). Verschiedene Klimaszenarien berechnen für das Hochgebirge im Alpenraum sogar höhere Erwärmungen (bis 4 °C; GIORGI *et al.* 1997), dabei werden neben dem Temperaturanstieg 5 bis 30 % weniger Niederschläge für den Sommer und etwa 20 % mehr Niederschläge für den Winter erwartet. Es ist zudem mit einer Zunahme von Extremniederschlägen sowie mit Hitzewellen und Trockenperioden im Sommer zu rechnen. Die Folgen daraus sind schwierig abzuschätzen. Es steht jedoch fest, dass die allgemeine Erwärmung sowie die zunehmenden Extremereignisse eine abbauende Wirkung auf den Permafrost und auf das Bodeneis haben (MARTY *et al.* 2009). Falls der Permafrost sich erwärmt oder gar schmilzt, können Massenbewegungen resultieren (Abschnitt 1.7). Die aktuelle Klimaänderung bedeutet somit eine besondere technische Herausforderung bei der Erstellung und dem Unterhalt von Bauten, die im Permafrost verankert sind.

1.7 Naturgefahren

Im Permafrost treten spezifische Naturgefahren auf, bedingt durch das vorhandene Eis. Es sind dies im Wesentlichen folgende Prozesse:

- a) Kriechen von Hängen, Blockgletscher (erhöhter Geschiebeanfall)
- b) Setzungen durch das Auftauen von Poren- resp. Klufteis
- c) Felsstürze und Hangrutschungen infolge Wasserdruck bedingt durch Tauvorgänge im Permafrost
- d) Erosion von aufgetauten Permafrostkörpern durch instabile Struktur

Der Prozess a) ist ein über lange Zeit andauernder Vorgang. Er ist vergleichbar mit permanenten, kontinuierlichen Hangbewegungen, welche in alpinen Gebirgen häufig sind und auch Tausende von Jahren andauern können. Solche Kriechbewegungen im Permafrost können ähnlich wie grosse permanente Rutschungen durch rheologische Modelle erklärt werden. Je nach Tiefenlage der Gleitfläche werden Bauten als Ganzes verschoben oder durch differenzielle Bewegungen beeinflusst. Die auftretenden Kräfte erreichen ein Vielfaches des normalen Erddrucks.

Die Prozesse b) bis d) sind durch Veränderungen im Permafrost verursacht. Im intakten Permafrost ist der Gang der Lufttemperatur bis tief ins Gebirgsinnere feststellbar. Diese Tiefenwirkung hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges ab und liegt im Gneis und Kalk bei etwa 25 m. Dies wird durch Messungen am Jungfrauoch bestätigt (Abb. 19).

Der Temperaturgang im Innern des Permafrosts bewirkt ein ständiges, partielles Gefrieren und Auftauen des Wasseranteils im Permafrost. Es kommt zur Migration von Wasserdampf von warm zu kalt entlang eines negativen Temperaturgradienten. Die Folge ist ein zum Temperaturgang antizyklisches Eiswachstum (Segregation). Anhand von über 10jährigen Messungen im Gebiet der Sphinx am Jungfrauoch kann dieser Prozess veranschaulicht werden. Das Gebirge erleidet eine jährliche, zur Felstemperatur antizyklische Deformation, welche nicht vollständig reversibel ist. Durch die Abkühlung kommt es zur Ausscheidung von Eis, was zu einer fortschreitenden Aufweitung des Gebirges führt. Im Sphinxfels erreicht diese Deformation innerhalb von 10 Jahren 3 mm (Abb. 20). Die Aufweitung der eisgefüllten Klüfte schwächt das Gebirge. Dies kann eine erhöhte Anfälligkeit für Instabilitäten zur Folge haben.

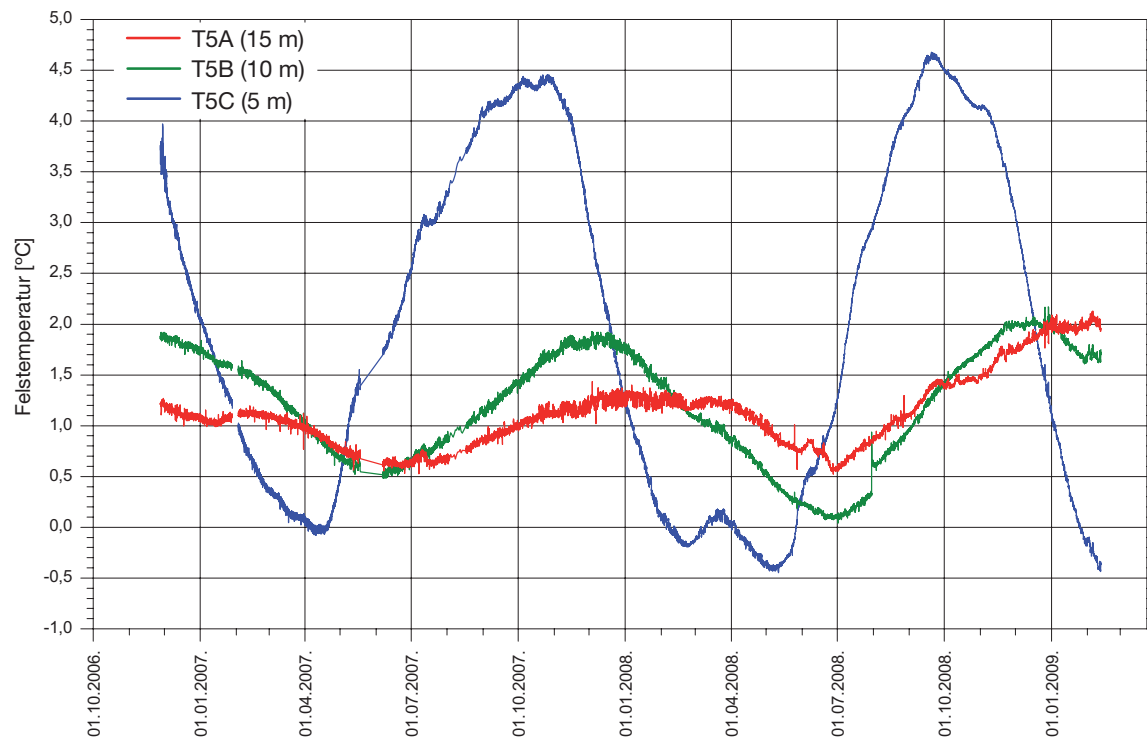


Abb. 19: Temperaturgänge im Gebirge des Jungfrauochs in Abhängigkeit der Tiefenlage (Gebirge: Gneis; Standort: Gletscherausgang; Exposition: Süd). Mit zunehmender Tiefe wird die Amplitude des Temperaturgangs gedämpft und zeitlich verschoben (Daten Geotest, Zollikofen).

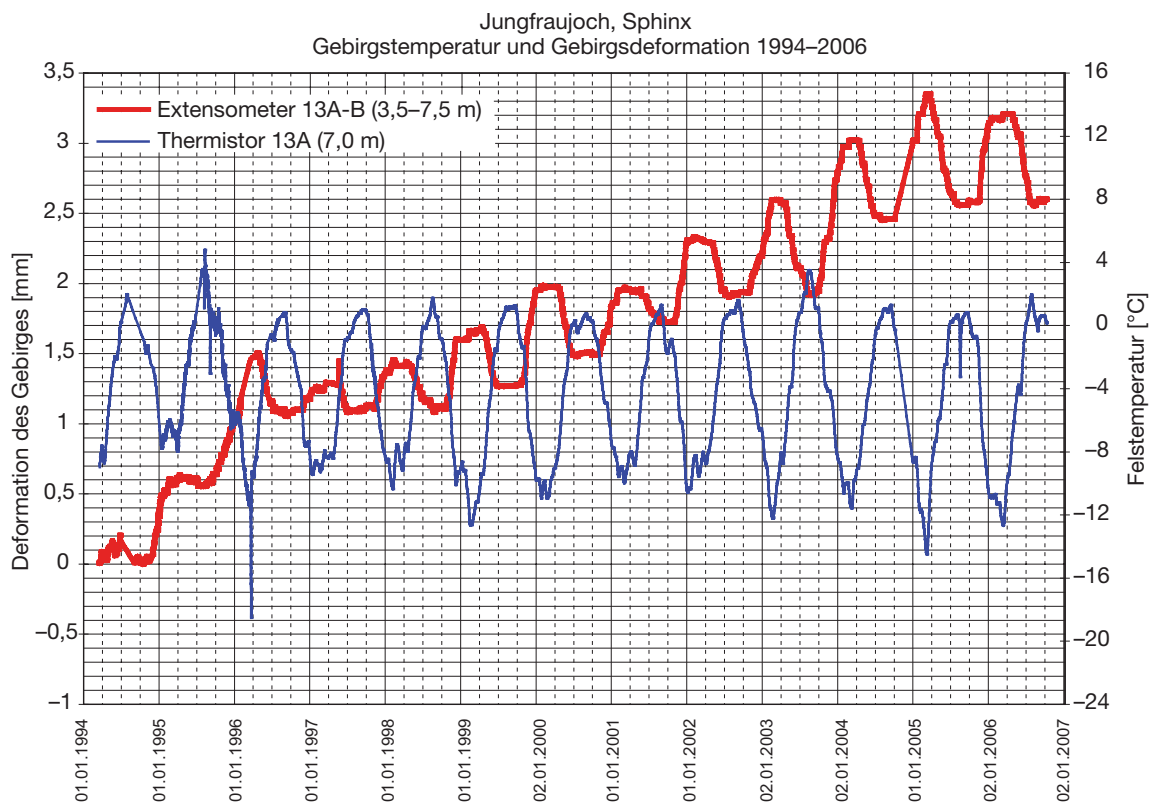


Abb. 20: Antizyklische und teilweise irreversible Deformation (rot) des Gebirges auf dem Jungfrauoch (Gebirge: Gneis mit eisgefüllten Klüften). Das Gebirge wird durch die Eissegregation aufgeweitet (Daten Geotest, Zollikofen).

Die Prozesse b) bis d) werden durch Stabilitätsverlust im auftauenden Permafrost verursacht. Im intakten Permafrost verhindert das Eis ein Eindringen von Wasser und versiegelt den Untergrund. Taut das Poren- oder Klufteis auf, kann Wasser ins Gebirge eindringen. Dabei ist nebensächlich, ob das Wasser von aussen (Regen, Schneeschmelze) oder von auftauendem Eis des Permafrosts stammt. Kann das Wasser nicht voll abfließen, entstehen im Gebirge Wasserdrücke, welche zum plötzlichen Stabilitätsverlust führen können. Ein eindrückliches Beispiel eines solchen Vorgangs ist der Bergsturz in der Brenvaflanke vom 18. Januar 1997 (Abb. 21).

Im Hitzesommer 2003 traten in den Alpen an vielen Orten Felsstürze auf. Sie waren vorwiegend in nördlich exponierten Flanken oberhalb etwa 3000 m ü.M. zu beobachten, das heisst im noch intakten Permafrost. Über Wochen anhaltende hohe Lufttemperaturen, welche auch nachts nicht unter den Gefrierpunkt sanken, führten zum Auftauen des Permafrosts mit dem oben beschriebenen Stabilitätsverlust. Solche Felsstürze ereigneten sich beispielsweise in der Eigerwand (6. 8. und 17. 8. 2003), am Matterhorn (Juli 2003; Abb. 22) und an der Drus (8. 8. 2003).

Setzungsprozesse im auftauenden Permafrost sind vom Eisgehalt abhängig. Im ungestörten, eisreichen Permafrost mit Raumgewichten von $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ($1,2 \text{ t m}^{-3}$) werden Auftausetzungen gegen 60 % erreicht (WATSON 1973). Der Eisverlust durch Auftauen kann im Permafrost eine fragile Bodenstruktur hinterlassen, welche besonders anfällig ist für Erosion und Murgänge.



Abb. 21: Ausbruchnische des Bergsturzes in der Brenvaflanke (Mt. Blanc ca. 3600 m ü.M.) vom 18.1. 1997. Gut sichtbar ist das im Ausbruchbereich austretende Schmelzwasser (Foto Maurizio Fonte).



Abb. 22: Felssturz Matterhorn / Hörnligrat vom Juli 2003. Die Klüfte waren mit Eis gefüllt. Dunkle Stellen markieren Schmelzwasseraustritte (Foto Geotest, Zollikofen).

Die seit 1980 stärker bemerkbare Klimaerwärmung setzt dem Permafrost zu und löst Tauprozesse aus. Als Folge davon ist eine Zunahme von Felsstürzen und Rutschungen in Permafrostgebieten zu erwarten. Eine 2007 durchgeführte Umfrage bei den SAC-Hüttenbetreibern hat ergeben, dass die auf Hüttenzustiegen beobachteten Naturereignisse teilweise durch auftauenden Permafrost bedingt sind. Für touristische Anlagen im Gebirge kann auftauender Permafrost lokal durchaus erhebliche Risiken verursachen.

1.8 Abklärung von Permafrostvorkommen

Um ein Vorkommen von Permafrost abzuklären werden schrittweise Methoden mit steigender Aussagekraft und grösserem Aufwand eingesetzt. In einer ersten Phase – falls es einen Verdacht auf Permafrostvorkommen gibt – werden bestehende Informationen über den Standort gesammelt, sowie das betreffende Gelände beurteilt und Messungen durchgeführt. Diese Arbeitsschritte liefern Hinweise über die Wahrscheinlichkeit eines Permafrostvorkommens oder ermöglichen bereits Oberflächenbewegungen zu erfassen.

Um einen konkreten Nachweis über ein Permafrostvorkommen zu erhalten und wichtige Informationen über Bodentemperatur und Eisgehalt zu gewinnen, muss in einer zweiten Phase der Baugrund direkt durch Sondierschlitzte oder Bohrungen untersucht werden. Sämtliche Abklärungen sollten durch Fachspezialisten durchgeführt werden. Sie werden im Ablaufdiagramm zur Abklärung von Permafrostvorkommen zusammengefasst (Abb. 23).

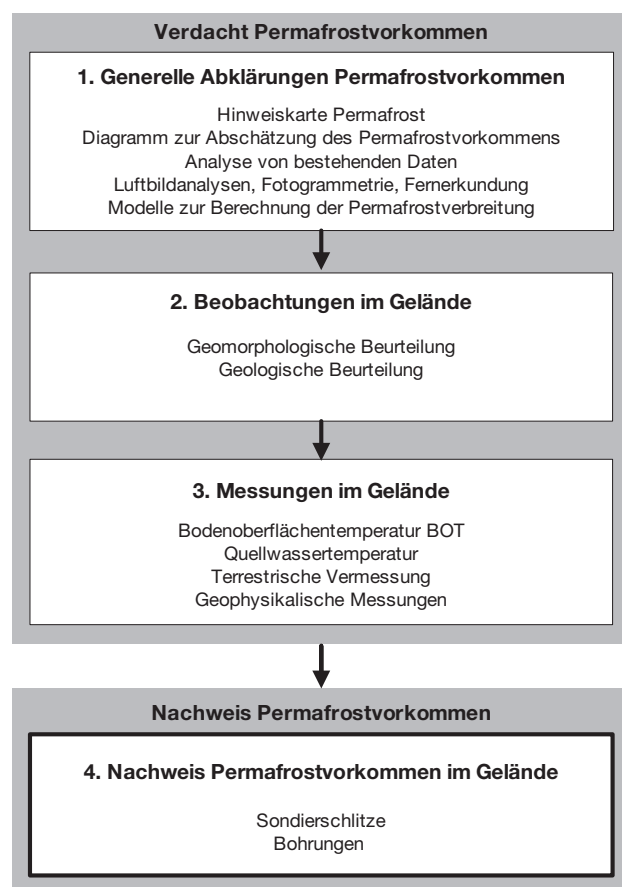


Abb. 23: Ablaufdiagramm zur Abklärung von Permafrostvorkommen mit Beispielen der jeweiligen Untersuchungen für jede Abklärungsstufe (angepasst nach HARRIS *et al.* 2001).

1.8.1 Verdacht auf Permafrostvorkommen

Generelle Abklärungen von Permafrostvorkommen

Hinweiskarte der potentiellen Permafrostverbreitung in der Schweiz

Die Hinweiskarte Permafrost Schweiz (BAFU 2005) zeigt die Gebiete in den Schweizer Alpen, in welchen Permafrost lokal möglich, beziehungsweise flächenhaft wahrscheinlich ist. Diese Karte gibt erste Hinweise zu möglichen Permafrostvorkommen. Es gilt allerdings zu beachten, dass die Karte auf sehr vereinfachten Modellberechnungen basiert, so dass weitere Abklärungen vor Ort unbedingt erforderlich sind. Aussergewöhnliche Permafrostvorkommen wie azonaler Permafrost oder künstlich erzeugter Permafrost erscheinen auf dieser Karte nicht (Abb. 24, Anhang A). Die Karte im Massstab 1:50 000 ist beim BAFU erhältlich.

Regionale Permafrost Hinweiskarten

Neben der Hinweiskarte des BAFU sind für einzelne Regionen separat Karten erstellt worden. So gibt es beispielsweise für das Oberengadin eine Glaziologische Karte Julier-Bernina (1998, Synthesekarte NFP 31) im Massstab 1:60 000. Auf der Karte sind die Gletscher sowie die Permafrostverbreitung und die Kriechformen im Oberengadin dargestellt. Die Karte ist beim vdf Verlag erhältlich (Webseite: www.vdf.ethz.ch).

Abschätzung des Permafrostvorkommens in Hanglagen als Funktion der Meereshöhe und der Exposition

Mit Hilfe eines einfachen Diagramms (Abb. 25) kann die Wahrscheinlichkeit eines Permafrostvorkommens im Gebirge grob abgeschätzt werden. Bei Verwendung des Diagramms ist zu beachten, dass Permafrost auch in tieferen Höhenlagen auftreten kann und dass weitere Abklärungen unbedingt erforderlich sind, da die Topographie, die Bodenbedeckung und die Schneedecke lokal einen sehr grossen Einfluss auf die Permafrostverbreitung haben.

Das Diagramm zeigt, dass in den Expositionen E bis SW über S die untere Grenze, an der Permafrost wahrscheinlich vorkommt, knapp unter 3000 m ü.M. liegt – und somit wesentlich höher liegt als im Sektor W bis NE über N, wo 2500 m ü.M. als untere Grenze gilt. Ursachen für Permafrostvorkommen in tieferen Lagen sind beispielsweise Lawinenablagerungen. In Hangfusslagen kann Permafrost in 200–300 m tieferen Lagen vorkommen, falls sich dort Lawinenschnee ablagert und im Sommer liegen bleibt. Analog zu Abbildung 25 gibt es ein Diagramm zur Abschätzung des Permafrostvorkommens in Hangfusslagen (HAEBERLI 1975).

Bestehende Messdaten in Permafrostgebieten

In den Schweizer Alpen werden seit mehreren Jahren Messungen im Permafrost sowie an diversen Standorten auch meteorologische Messungen durchgeführt. Die vorhandenen Daten liefern wertvolle Informationen zur Permafrostverbreitung, zum Zustand des Permafrosts und zu seiner Entwicklung – sowie zu den meteorologischen Verhältnissen.

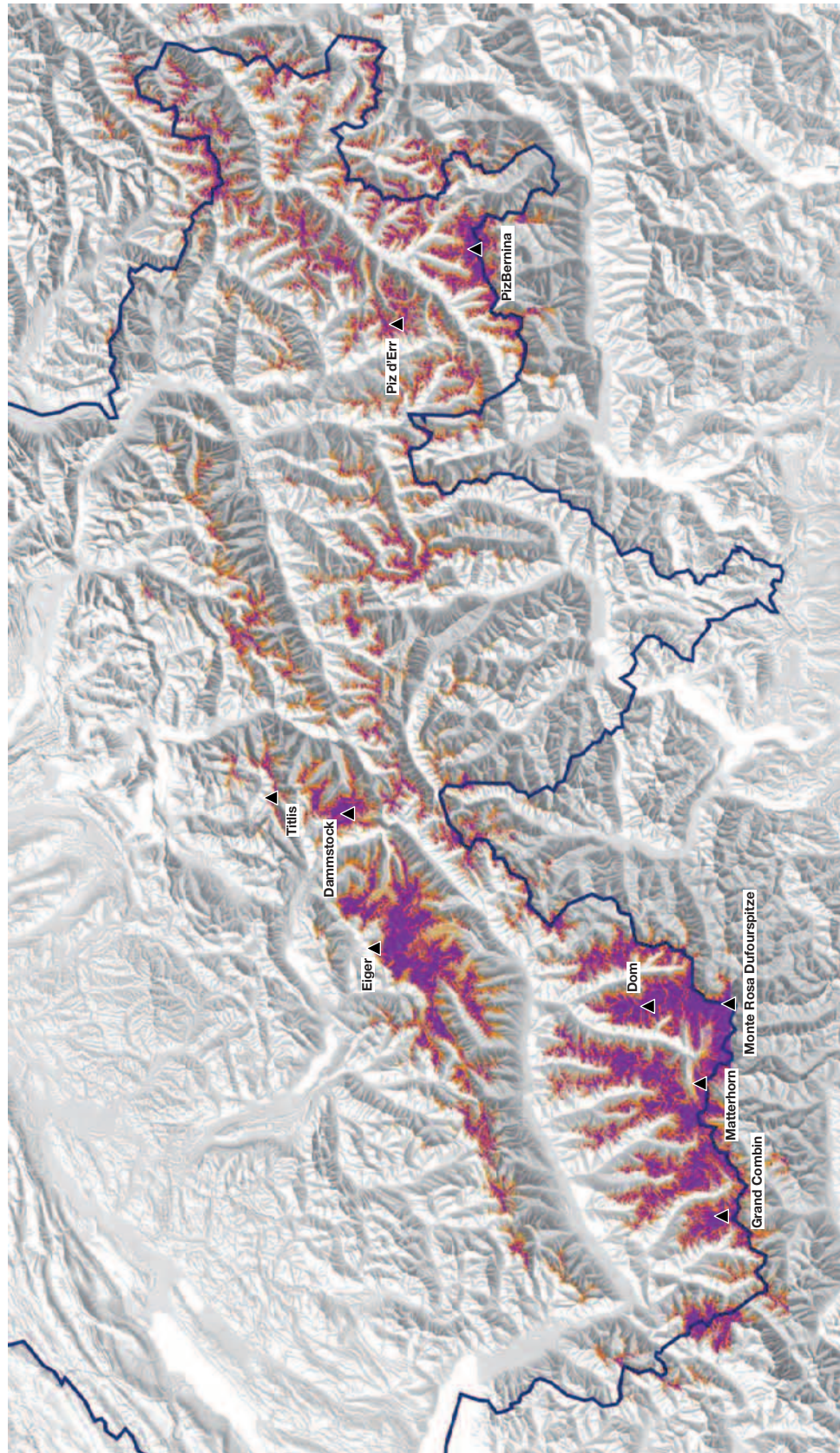
Im Auftrag der Schweizerischen Akademie für Naturwissenschaften (ScNAT), der Meteoschweiz und des BAFU wird der Zustand und die Veränderung des Permafrosts in den Schweizer Alpen durch das Messnetz PERMOS (Permafrost Monitoring Schweiz) beobachtet (Webseite: www.permos.ch). PERMOS koordiniert automatische Temperaturmessungen in Bohrlöchern und an der Bodenoberfläche an ausgewählten Standorten in verschiedenen Geländetypen (Abb. 26). Zudem organisiert PERMOS regelmässig fotogrammetrische Analysen von Bewegungen auf Blockgletschern.

Hinweiskarte Permafrost Schweiz

Potentielle Permafrostverbreitung aufgrund von Modellierungen mit dem DHM25 (BAFU 7/06)

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Legende:

Permafrost lokal möglich

Permafrost flächenhaft wahrscheinlich

Abb. 24: Hinweiskarte der potentiellen Permafrostverbreitung in der Schweiz (Quelle: BAFU 2005).

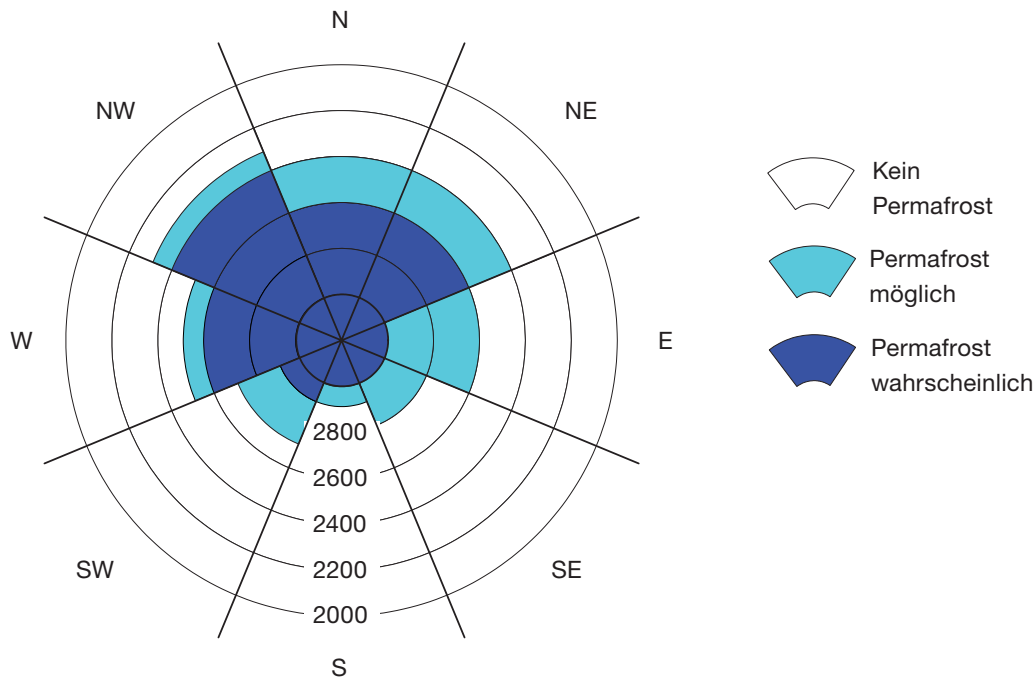


Abb. 25: Diagramm zur Abschätzung des Permafrostvorkommens in Hanglagen als Funktion der Meereshöhe und der Exposition (vereinfacht nach den Faustregeln von HAEBERLI 1975).

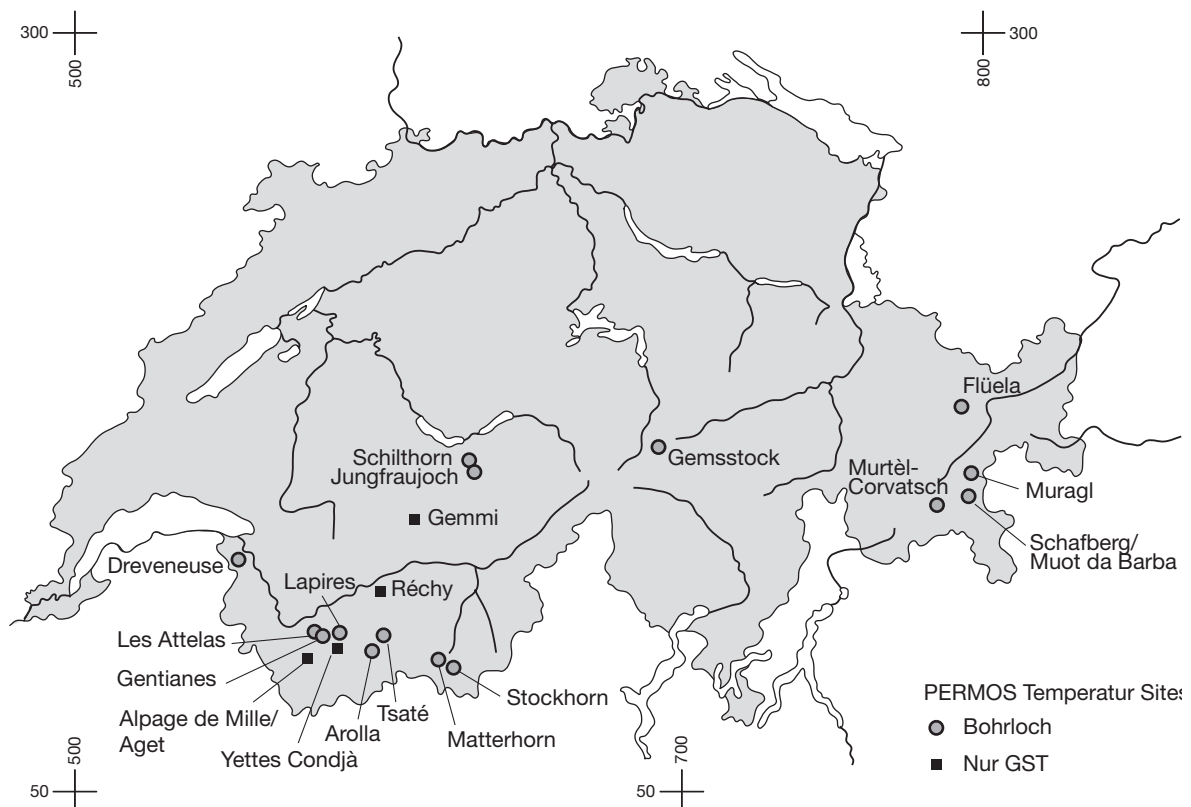


Abb. 26: PERMOS Messstandorte (Bohrloch- und Bodenoberflächentemperaturmessungen [GST: ground surface temperature, Bodenoberflächentemperatur]) in den Schweizer Alpen (Stand 2009). (Quelle: PERMOS, Webseite www.permos.ch).

Folgende Informationen können aus Bohrlochtemperaturdaten herausgelesen werden:

- Maximale und minimale Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen
- Mächtigkeit der Auftauschicht im Sommer
- Bodentiefe, ab welcher keine saisonalen Temperaturschwankungen mehr auftreten (Lage der Jahresnullamplitude)
- Mächtigkeit des Permafrostkörpers (je nach Bohrlochtiefe)
- Position, vertikale Ausdehnung und Temperatur von Taliks im Permafrost
- Wärmetransport-Mechanismen (z.B. Wärmeleitung / Konvektion)

Meteorologische und schneeklimatologische Daten, die an diversen Standorten im Hochgebirge durch ENET (ENET Station: Ergänzungsnetz der Meteoschweiz) und IMIS-Stationen (Interkantonaless Mess- und Informationssystem) erhoben werden, können bei Meteoschweiz (Webseite: www.meteoschweiz.ch) und beim WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Webseite: www.slf.ch) angefragt werden (Abb. 27). Diverse andere Institutionen besitzen ebenfalls Meteostationen im Hochgebirge und die Daten sind z.T. direkt im Internet erhältlich.

Die folgenden Parameter werden generell durch automatische Meteostationen gemessen:

- Lufttemperatur
- Schneehöhe
- Windstärke, Windrichtung
- Kurzwellige Strahlung
- Luftfeuchtigkeit
- Schnee- resp. Bodenoberflächentemperatur
- Temperatur innerhalb der Schneedecke

Besonders relevante Informationen für Bauprojekte im Permafrost sind die mittlere jährliche Lufttemperatur, der Frost- und Auftauindex, die Bodenoberflächentemperatur sowie die mittleren und extremen Schneehöhen.

Mit den PERMOS Bodenoberflächentemperaturen und den Schneehöhendaten einer nahe liegenden Meteostation kann die Basis-Temperatur der Schneedecke (BTS) bestimmt, und so die Wahrscheinlichkeit eines Permafrostvorkommens nachgeprüft werden (Abschnitt Messungen im Gelände).

Für gewisse Gebiete und bestehende Bauten sind bereits Daten und nützliche Informationen von früheren Untersuchungen vorhanden. Es wird empfohlen, sich über mögliche Voruntersuchungen an einem Standort beim Kanton und der Gemeinde zu erkundigen.

Luftbildanalysen

Einen ersten groben Überblick über das Gelände ermöglichen die wenig hochaufgelösten Bilder, welche von optischen Weltraumsensoren aufgenommen werden (z.B. Google-Earth-Aufnahmen, Abb. 28). Hochaufgelöste Luftbildaufnahmen aus verschiedenen Jahren und in diversen Massstäben sind beim Bundesamt für Landestopographie erhältlich und können online bestellt werden (Webseite: www.swisstopo.ch) (Abb. 29). Luftbilder liefern eine Gesamtübersicht, die direkt im Gelände kaum zu erlangen ist. Die folgenden Parameter können auf Luftbildern erkannt werden und geben wichtige Hinweise über die Wahrscheinlichkeit eines Permafrostvorkommens:

- Besondere Geländeformen, z.B. Blockgletscher, schattige Felswände, Kriechstrukturen
- Perennierende Schneeflecken
- Steilheit (z.B. Blockgletscherstirn)



Abb. 27: ENET- und IMIS-Stationen in den Schweizer Alpen, Winter 2008–2009 (Quelle: SLF).

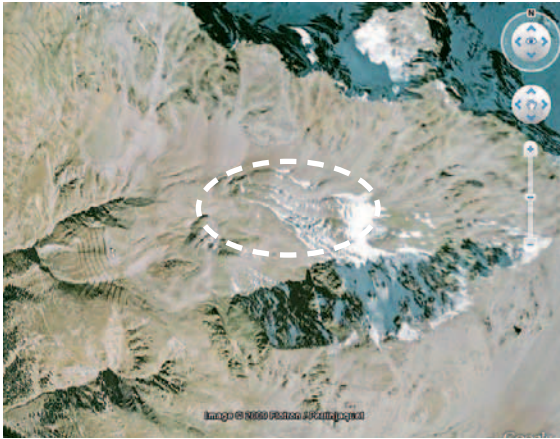


Abb. 28: Aufnahme eines Blockgletschers im Oberengadin (Foura da l'amd' Ursina, oberhalb Pontresina, GR; in der Bildmitte). (© Google-Earth 2009).



Abb. 29: Luftbild Aufnahme desselben Blockgletschers (Bildmitte) wie Abbildung 28. In dieser Aufnahme sind die Kriechstrukturen des Blockgletschers besser sichtbar. Datum der Aufnahme nicht bekannt. (Quelle: Swisstopo)

- Oberflächenrauigkeit
- Vegetationslose Gebiete
- Anriss- und Ablagerungsflächen von Massenbewegungen
- Verschiebungen und Höhenänderungen

Fotogrammetrie

Die digitale Luftbild-Fotogrammetrie erlaubt durch Vergleiche zu verschiedenen Zeiten Kriech- und Rutschprozesse, sowie Setzungen und Hebungen in Permafrostgebieten zu eruieren. Beim Vergleich von Bildern verschiedener Befliegungen werden Hanginstabilitäten und potentielle Gefahrenzonen sichtbar. Entsprechende Bildreihen ermöglichen zudem, das Gelände langfristig zu überwachen und die Bewegungsraten und Massenänderungen zu quantifizieren. In der Praxis ist diese Methode zur Ergänzung und Extrapolation von punktuellen geodätischen Deformationsmessungen, sowie zur grossräumigen Gefahrenabschätzung geeignet (KÄÄB 2001). Die Anwendung und Interpretation dieser Methode benötigt spezielle Geräte und Kenntnisse. Schliesslich gilt es auch bei der Luftbild-Fotogrammetrie festzuhalten, dass damit Permafrost nicht zwingend erkannt wird.

Fernerkundung

In den letzten Jahren ist eine Methode der Fernerkundung, die «Interferometric synthetic aperture radar» (InSAR) Methode (Radarbilder, die von Satelliten aufgenommen werden), vermehrt in Permafrostgebieten im Alpenraum eingesetzt worden (DELALOYE *et al.* 2007). Mit dieser Methode können grossflächige Bewegungen der Erdoberfläche detektiert und die Bewegungsraten quantifiziert werden. Im Abstand von Tagen, Monaten oder Jahren werden durch Satelliten Radarbilder von der Erdoberfläche aufgenommen. Eine Verschiebung der Landoberfläche zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten führt zu Phasenverschiebungen in den entsprechenden Radarbildern. Aus diesen Interferenzen und unter Berücksichtigung des Geländereiefs sowie der meteorologischen Bedingungen lassen sich für das gegebene Zeitintervall horizontale Bewegungen räumlich berechnen.

Die InSAR Methode birgt einige Probleme in sich. Radarschatten (Relief bedingte Lücken in den Satellitenbildern), Schneebedeckung und Vegetation erschweren die Interpretation der Bilder. Zudem lässt sich auch mit dieser Methode Permafrost nicht eindeutig feststel-

len. Ein grosser Vorteil der Methode ist jedoch, dass die Grössenordnung der Bewegungsraten von Hangbewegungen im Hochgebirge einfach bestimmt werden kann.

Modelle zur Berechnung der Permafrostverbreitung

Mit numerischen Modellen kann die Permafrostverbreitung im Gebirge flächenhaft abgeschätzt werden. Zudem können Zukunftsszenarien berechnet werden, um beispielsweise die Einflüsse der Klimaänderung oder die Einflüsse eines Bauwerks auf den Permafrost zu simulieren.

Numerische Modelle bestehen aus verschiedenen Annahmen und Berechnungen. Die Energiebilanz an der Bodenoberfläche wird anhand von meteorologischen Daten berechnet. Der geothermische Wärmefluss vom Erdinneren ist im Hochgebirge meist gering und wird deshalb im Modell als konstant angenommen. Sind die Bodeneigenschaften (z.B. die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, der Eisgehalt usw.) bekannt, können die Temperaturen im Untergrund mit grösserer Genauigkeit berechnet werden. In einer komplexen Topographie müssen auch dreidimensionale Effekte in Betracht gezogen werden, da die Bodentemperaturen zum Beispiel an der Süd- und an der Nordseite eines Grats stark variieren können (NOETZLI und GRUBER 2005, Abb. 30). Solche Phänomene zeigen sich in entsprechenden Bohrlochmessungen (Abb. 31). Eine weitere Herausforderung der Modellierung ist die Simulation von Prozessen wie von Luft- und Wasserflüssen im Boden. Messungen in Bohrlöchern und an der Bodenoberfläche sind nützlich, um rechnergestützte Modelle zu kalibrieren und zu testen.

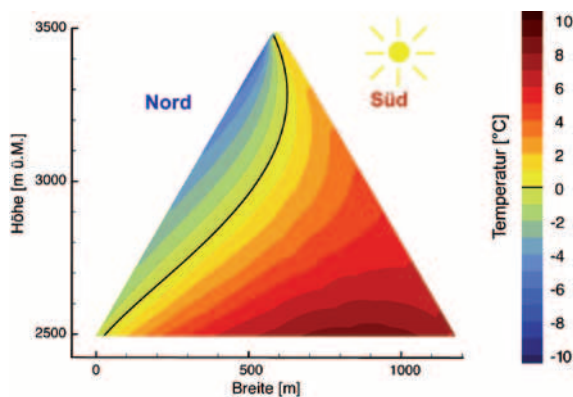


Abb. 30: Im Querschnitt modellierte Temperaturverhältnisse in einem von West nach Ost verlaufenden Grat. Die Temperaturen im Untergrund werden entscheidend durch die lateralen Wärmeflüsse von der warmen Süd- zur kälteren Nordseite geprägt (aus NOETZLI und GRUBER 2005).

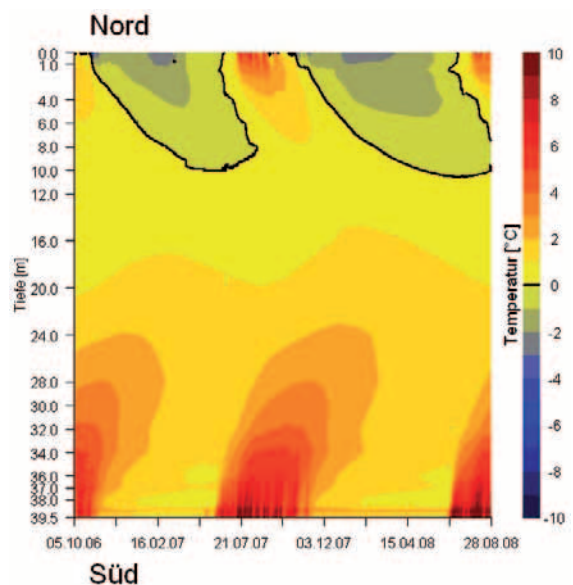


Abb. 31: Temperaturwerte aus einem 40 m langen, horizontalen Bohrloch im Gemsstockgrat (Andermatt, UR) auf 2940 m ü.M., gemessen zwischen Oktober 2006 und August 2008. Die X-Achse zeigt die Zeit. Auf der Y-Achse sind die Distanzen im Bohrloch von der Nord- zur Südseite aufgetragen. Die farbigen Flächen zeichnen die Felstemperaturen nach (Legende). Auf der Südseite des Grats ist der Fels viel wärmer als auf der Nordseite (Daten SLF, Davos).

Beobachtungen im Gelände

Geomorphologische Beurteilung

Die geomorphologische Beurteilung gibt erste Hinweise darüber, ob im Untergrund Permafrost vorkommt oder eher nicht. Sie wird anhand von Karten- und Luftbildanalysen und insbesondere im Rahmen von Geländebegehungen durchgeführt und benötigt geomorphologische Kenntnisse. Die wichtigsten geomorphologischen Erscheinungen in Permafrostgebieten werden im Kapitel 1.5 beschrieben.

Geologische Beurteilung

Die geologische Beurteilung gibt wichtige Hinweise zur Zusammensetzung, Struktur, Stabilität und zum potentiellen Eis- und Wassergehalt des Untergrunds. Sie basiert auf geologischen Karten (Geologische Karte der Schweiz, verschiedene Massstäbe), und Untersuchungen im Gelände. Dazu gehört die Entnahme von Materialproben und Bohrkernen, die im Labor analysiert werden.

Zusätzlich zu den herkömmlichen geologischen Untersuchungen muss bei geologischen Beurteilungen in alpinen Permafrostgebieten besonders auf folgende Aspekte eingegangen werden:

- Dauer und Art der letzten Vergletscherung (beeinflusst die Bodentemperatur und den Eisgehalt des Untergrunds)
- Geschätzte Mächtigkeit der Überdeckung des Grundgesteins, Ursprung des Materials (z.B. Schutt, Moräne, Felssturzmaterial)
- Eisgehalt, Eisverteilung, Eistyp (z.B. Linsen, Schichten, Klufteis, überdecktes Eis, Poreneis), Eissegregation (führt zu Spaltenwachstum und Gebirgsaufweitung)
- Erosion, Verwitterungsgrad, Frostempfindlichkeit (chemisch / mechanisch, Eissprengung, Frostwitterung)
- Kriechende Masse
- Instabilitäten in der Umgebung
- Wasserführende Schichten, Wasserzufuhr (natürlich / künstlich), Abdichtung durch Eis
- Erdbebengefährdung (Erdbeben können zu einer Verflüssigung von eisreichem Lockergestein führen, sowie zu Felsstürzen in eishaltigen Felswänden)
- Verbotene Ankerrichtungen (die durch eine Trennfläche oder einer Verschneidung zweier Trennflächen besetzt sind) und empfohlene Ankerrichtungen

Messungen im Gelände

Erste Messungen können mit relativ kleinem Aufwand durchgeführt werden, benötigen jedoch spezielle Messgeräte und Kenntnisse zur Interpretation der Daten.

Bodenoberflächentemperatur (BOT) und Basis Temperatur der Schneedecke (BTS)

Die Messung der Bodenoberflächentemperatur im Winter (die Basis Temperatur der Schneedecke BTS) ist eine einfache und effiziente Methode, um Informationen über die räumliche Verteilung des Permafrosts zu erhalten. Im Frühjahr, wenn die Schneehöhe etwa einen Meter oder mehr beträgt und die Schneeschmelze noch nicht eingesetzt hat, bleibt die Bodenoberflächentemperatur unter dem Schnee mehr oder weniger konstant, da die Schneedecke den Boden isoliert. Die BTS wird durch die unterliegende Bodentemperatur sowie durch die Mächtigkeit der Schneedecke, respektive ihrer isolierenden Wirkung gegen tiefe Lufttemperaturen geprägt.

Um möglichst aussagekräftige Daten zu erhalten, sollten automatische Temperaturlogger an der Bodenoberfläche während mindestens eines ganzen Winters die Temperatur registrieren und parallel dazu die Schneehöhen gemessen werden (automatisch oder manuell, anhand von Schneepegeln). Um Verluste zu vermeiden, sollten die Temperaturmessgeräte fixiert und ihre Positionen mit einem GPS festgehalten werden. Sie sollten wasserfest und robust sein, um langfristig im Hochgebirge funktionieren zu können (Abb. 32, rechts) (Webseite: www.utl.ch).

Ist die Schneehöhe während einem grossen Teil des Winters mächtiger als 80 cm, können die Bodentemperaturen, die im Spätwinter (Ende Februar bis Anfang April) an der Basis der Schneedecke gemessen werden (Abb. 32, links), wie in Tabelle 7 dargestellt, interpretiert werden.

Tab. 7: Wahrscheinlichkeit von Permafrostvorkommen in Abhängigkeit der Basis Temperatur der Schneedecke (BTS) beziehungsweise der Bodenoberflächentemperatur im Winter (Winter BOT) bei einer Schneehöhe > 80 cm.

BTS / Winter BOT	Wahrscheinlichkeit von Permafrostvorkommen
< -3°C	Permafrost wahrscheinlich
-2°C bis -3°C	Permafrost möglich
> -2°C	Permafrost unwahrscheinlich

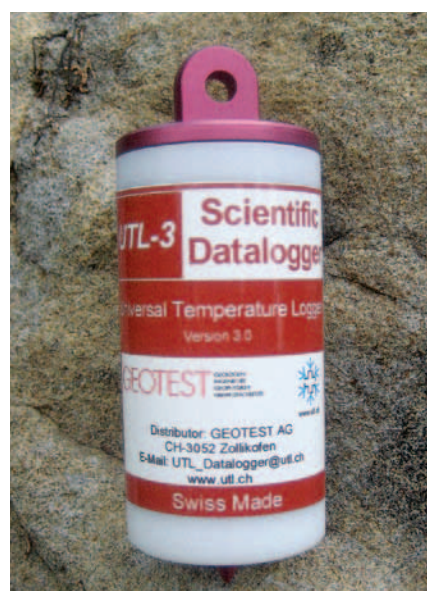
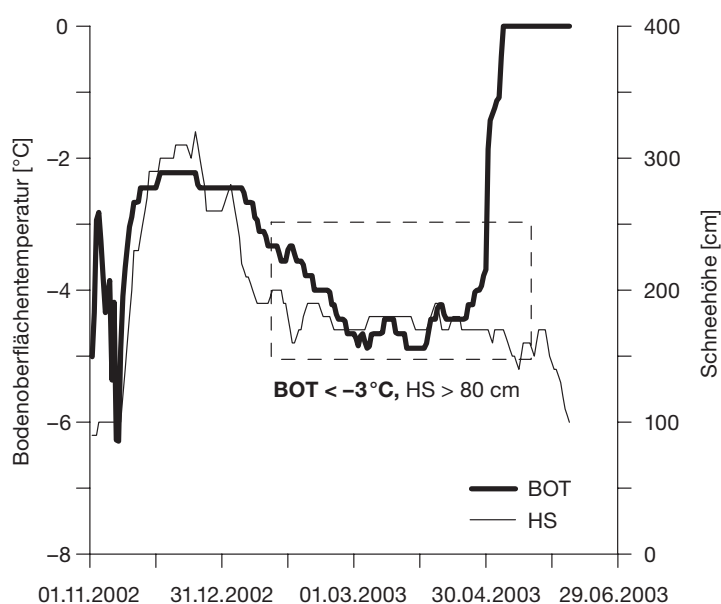


Abb. 32: (Links) BOT Messungen und Schneehöhen (HS) am Schafberg Pontresina auf 2900 m ü.M. im Winter 2002–2003. Die Schneehöhen wurden mittels einer automatischen Kamera an einem Schneepegel abgelesen. Die tiefen Bodenoberflächentemperaturen im Frühling bei einer > 80 cm mächtigen Schneedecke deuten auf ein Permafrostvorkommen (gestrichelter Rahmen). (Rechts) Robuster, wasserdichter Temperatur-Datenlogger für BOT Messungen im Hochgebirge.

Quellwassertemperaturen

Quellwassertemperaturen, die im Sommer kälter sind als 3 °C, deuten auf tiefe Bodentemperaturen und möglicherweise auf Eis im Boden hin. Die Wassertemperatur sollte so nahe wie möglich an der Quelle gemessen werden. Die Messung muss nach der Vollendung der Schneeschmelze und mit einem kalibrierten Thermometer erfolgen.

Sonnenkompass Aufnahmen

Mit einem Sonnenkompass kann die potentielle Sonneneinstrahlungsdauer für jeden Monat an einem beliebigen Punkt im Gelände festgestellt werden. Das Gerät ermöglicht die visuelle Bestimmung des Einflusses des Horizonts (inkl. Berge, Bauten und andere Gegenstände) auf die Sonneneinstrahlungsdauer. Mit einem einfachen Programm wird daraus die einfallende kurzwellige Strahlung in GJ m^{-2} für verschiedene Höhenlagen und Expositionen abgeschätzt. Somit kann die Wahrscheinlichkeit eines Permafrostvorkommens grob diagnostiziert werden (KRUMMENACHER und BUMANN 2004). Der Sonnenkompass wird vor allem in der Forstpraxis und Architektur zur Bestimmung der Lichtverhältnisse im Wald respektive in einem Gebäude angewendet.

Terrestrische Vermessung

Anhand von terrestrischen Vermessungen mit dem Theodolit, dem Tachymeter oder mit dem Laserscanner können allfällige Kriechbewegungen und deren Geschwindigkeiten, sowie Senkungen, Hebungen und Volumenänderungen an Fels- und Bodenoberflächen sowie an bestehenden Bauten festgestellt werden. Diese Messungen weisen jedoch nicht schlüssig darauf hin, ob Permafrost vorhanden ist oder nicht.

Das Gelände wird von Fixpunkten aus terrestrisch vermessen, wobei Referenzpunkte an stabilen Standorten mit einbezogen werden. Die Fixpunkte müssen vorsichtig gewählt und ihre Positionen mit einem genauen GPS regelmässig kontrolliert werden, da grossflächige Hangbewegungen und Setzungen in Permafrostgebieten häufig vorkommen. Regelmässig durchgeführte Vermessungen erlauben es, allfällige Änderungen der Deformationsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Geophysikalische Messungen

Geophysikalische Messmethoden wie Geoelektrik, Georadar oder Seismik erlauben einen Einblick in den Untergrund von der Bodenoberfläche aus. Die Temperatur, der Wasser- und der Eisgehalt des Bodens, sowie die Stratigraphie können damit bestimmt werden. Gemessen wird entlang linearer Profile und ergänzt somit Punktmessungen wie Bohrlochmessungen. Sie sind weniger zeitaufwändig und kostengünstiger als alle Untersuchungen, die einen mechanischen Eingriff in den Boden benötigen. Zeitreihen geophysikalischer Messungen erlauben es, Änderungen im Permafrost festzustellen (z.B. Eisschmelzen oder das Vorrücken und Zurückweichen von Gefrierfronten im Boden).

Beim Verfahren der Geoelektrik werden zum Beispiel die verschiedenen spezifischen elektrischen Widerstände der Bodenmaterialien erkannt (VONDER MÜHLL 1993). Strom wird über zwei Elektroden in den Boden geführt und die resultierende Spannungsdifferenz wird über weitere, dazwischen liegende Elektroden gemessen. Die gemessenen Strom- und Spannungsdifferenzen werden gebraucht, um den elektrischen Widerstand der Bodenschichten zu berechnen (Abb. 33).

Da der Gefrierpunkt einen markanten Anstieg des elektrischen Widerstands bewirkt, sind geoelektrische Methoden gut geeignet, um gefrorenes Bodenmaterial zu lokalisieren. Die elektrische Leitfähigkeit – und somit der Widerstand – sind für verschiedene Materialien bekannt (Tab. 8, Hauck und KNEISEL 2008). Im gefrorenen Boden können die elektrischen Widerstände stark variieren, da sie vom Eisgehalt, von der Bodentemperatur und von diversen Unreinheiten beeinflusst werden. Da in verschiedenen Bodenschichten der Wassergehalt variieren kann, können sich die Widerstandswerte auch überlappen (HAUCK und KNEISEL 2008). Die Messdaten müssen daher mit Vorsicht interpretiert werden. Womöglich sollten zwei geophysikalische Methoden kombiniert werden.

Tab. 8 : Elektrische Widerstände einer Auswahl an Materialien (aus HAUCK und KNEISEL 2008).

Material	Elektrischer Widerstand [Ωm]
Ton	1 – 100
Sand	100 – 5×10^3
Kies	100 – 4×10^2
Granit	5×10^3 – 10^6
Schiefer	100 – 10^4
Bodenwasser	10 – 300
Gefrorenes Lockermaterial, Bodeneis, Gebirgspermafrost	1 – 10^3 – 10^6
Gletschereis (temperiert)	10^6 – 10^8
Luft	unendlich

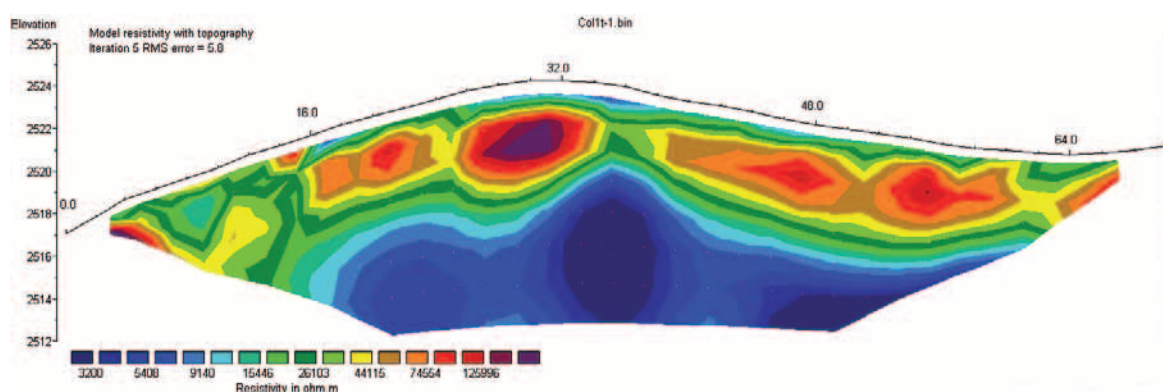


Abb. 33: Geoelektrisches Profil (2D Tomographie) eines Gebirgsstandorts auf 2500 m ü.M. Der kompakte Fels ist durch die blaue Farbe wiedergegeben. Darüber steht grober Blockschutt an (gelb und rot), der möglicherweise Eis enthält (Widerstände $> 50\,000\,\Omega\text{m}$) (Daten Geotest, Davos).

1.8.2 Nachweis Permafrost

Sondierschlitz

Sondierschlitz bieten die Möglichkeit, direkte Informationen über die Eigenschaften des Baugrunds in den obersten Metern zu erhalten. Sie werden am besten maschinell (z.B. mit einem Schreitbagger) und wenn möglich an verschiedenen Standorten im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Bei hohen Eisgehalten im Lockergestein (Abb. 34) können technische Schwierigkeiten beim Aushub entstehen. Meistens ist die Tiefe solcher Schlitz auf etwa 5 m beschränkt.

Messinstrumente wie Thermometer (z.B. in einem Schutzrohr) können in einem Sondierschlitz eingebaut werden, wenn dieser nach möglichst kurzer Zeit wieder sorgfältig aufgefüllt wird, um die thermische Störung zu minimieren. Eine Störung der Stratigraphie und der Baugrundeigenschaften ist jedoch unvermeidlich. Falls möglich, sollten eishaltige Bodenproben zur Analyse im Labor entnommen werden und gekühlt transportiert und gelagert werden (Kap. 2.1.3). Folgende Aspekte sollten beim Graben von Sondierschlitz dokumentiert werden:

- Genauer Standort (Meereshöhe, Exposition, Koordinaten)
- Dimensionen des Sondierschlitzes (Länge, Breite, Tiefe)
- Stratigraphie, Mächtigkeit der Schichten
- Korngrößenverteilung
- Stabilität des Baugrundmaterials
- Wassergehalt
- Eisgehalt, Eisverteilung, Eiseigenschaften
- Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen
- Schätzung der Baugrundwerte



Abb. 34: Eisreiches Lockermaterial in einem Sondierschlitz.

Bohrungen

Bohrungen liefern direkte Angaben über die Baugrundeigenschaften bis in eine grosse Tiefe, sind allerdings räumlich punktuell (Nadelstiche). Sie gehören zu den teuersten und zeitaufwändigsten Untersuchungsmethoden, sind aber auch besonders wertvoll, da sie die Möglichkeit bieten, nachträglich und langfristig zum Beispiel Bodentemperatur oder Deformationen in verschiedenen Tiefen zu erheben.

In einem schnellen und relativ preisgünstigen Verfahren können Bohrungen destruktiv abgeteuft werden (Imlochhammer). Das Bohrgut wird mit Druckluft ausgespült. Erfahrenes Bohrpersonal kann bei solchen Bohrungen das Baugrundmaterial anhand des Verhaltens des Bohrgeräts und der Eigenschaften des Bohrguts identifizieren und zum Beispiel zwischen Fels, Schutt, eishaltigem Schutt und Eis differenzieren. Falls Bodeneis vorhanden ist, sind meistens Eissplitter im Bohrgut erkennbar und das Bohren ist zudem erschwert.

Aufwändiger und teurer sind Kernbohrungen, bei welchen das Baugrundmaterial in möglichst intaktem Zustand mit einem Doppelkernrohr extrahiert wird. Die entnommenen Bohrkern werden anschliessend gekühlt gelagert und zur Laboranalyse transportiert.

Je nach Bohrgerät können zwischen einigen wenigen Metern bis zu Hunderten von Metern tief gebohrt werden. 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. Es ist ebenfalls wichtig, dass der Bohrkopf nicht im Bohrloch immobil bleibt, da die Gefahr besteht, dass der Bohrer einfriert und blockiert wird. Die grosse Heterogenität von gefrorenem Untergrund macht Kernbohrungen generell schwierig. Folgende Parameter sind im Bohrprotokoll zu dokumentieren:

- Genauer Standort (Meereshöhe, Exposition, Koordinaten)
- Tiefe des Bohrlochs
- Stratigraphie, Mächtigkeit der Schichten
- Korngrössenverteilung
- Bohrlochstabilität
- Wassergehalt
- Eisgehalt, Eisverteilung, Eisform
- Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen (Thermometer mit langem Kabel)
- Bohrfortschritt, besondere Probleme (z.B. Einklemmen des Bohrkopfes)

Um nachträglich Messungen zu ermöglichen (Tab. 9), sollten Bohrlöcher mit einem wasserdichten Rohr bestückt werden. Die Rohrstücke müssen zusammengeschweisst sein und mit wasserdichtem Klebband versiegelt werden. Wichtig ist, dass der untere Deckel des Rohrs ebenfalls fest montiert und wasserdicht ist.

Das Rohr sollte eingemörtelt und mit einem Schacht (mit Deckel) an der Oberfläche geschützt werden (Abb. 35). Beim Versetzen des Rohrs muss ein Mörtelschlauch parallel installiert werden, um die Injizierung des Mörtels zu vereinfachen und ein Ausmörteln des Zwischenraums zwischen Untergrund und Rohr zu gewährleisten (Abb. 36).

Falls im Rohr ausschliesslich Bodentemperaturmessungen geplant sind, kann Sand den Mörtel ersetzen. Dies führt zu einer geringeren thermischen Störung, da kein Abbindeprozess stattfindet. Falls Deformationsmessungen (Inklinometer- und Extensometermessungen) vorgesehen sind, sollten Bohrlöcher mit Inklinometer- und Inkrex Rohren ausgerüstet und ausgemörtelt werden.



Abb. 35: Schacht mit Deckel zum Schutz des Bohrlochs, des Rohrs und der Messinstrumente.



Abb. 36: Ein Inkrexrohr wird von einer Bohrmannschaft während der Installation im Bohrloch zusammengeschweisst und wasserdicht gemacht. Parallel zum Inkrexrohr wird ein Schlauch zur Injizierung des Mörtels in das Bohrloch eingeführt.

Bohrlochmessungen

In Bohrlöchern können verschiedene Daten erhoben werden (Tab. 9), um den Zustand des Baugrunds und allfällige Veränderungen im Permafrost festzuhalten. Bei Bohrlochmessungen, die ohne Rohr erfolgen, ist grosse Vorsicht geboten, da die Wände des Bohrlochs jederzeit einstürzen können. In kriechenden Permafrostkörpern (z.B. Blockgletscher, steile Schutthalden) werden Bohrlöcher oft nach kurzer Zeit so stark verformt, dass es nicht mehr möglich ist, Instrumente einzuführen oder zu extrahieren. Deshalb sollten für langfristige Bodentemperaturmessungen Bohrlöcher möglichst schnell mit einer Thermistorenkette instrumentiert werden und der Datenlogger an einem sicheren Standort, zum Beispiel in einem Schacht, an der Bodenoberfläche gelagert werden. Die Messungen laufen im Allgemeinen weiter, bis das Bohrloch vollständig abgesichert wird. Inklinometer- und Inkrexmessungen benötigen spezielle Rohre, welche mit internen Führungsrillen oder externen Messingringen ausgestattet sind. Diese können direkt beim Bohrunternehmen bestellt werden.

Tab. 9: Bohrlochmessungen, die ohne beziehungsweise mit Rohr durchgeführt werden.

Bohrlochmessung (ohne Rohr)	Messbare Grössen
Bodentemperatur (manuell / automatisch)	Bodentemperaturverteilung im Bohrloch Mächtigkeit der Auftauschicht Mächtigkeit des Permafrostkörpers Position von allfälligen Taliks Kurz- und langfristige Änderungen
Bohrlochkameraaufnahmen	Stratigraphie Eisgehalt Korngrössenverteilung Wasserführende Schichten
Bohrlochgeophysik	Eisgehalt Wassergehalt Stratigraphie
Pressuremeter Test (schwierig ausführbar)	Spannungs-Dehnung Eigenschaften Festigkeit
TDR Kabel (Time-domain reflectometry) (relativ neu) NB: besonders geeignet bei hohen Deformationsraten und für tiefe Bohrlöcher	Horizontale Verschiebungen Scherhorizonte
Bohrlochmessung (mit Rohr)	Messbare Grössen
Bodentemperaturmessungen (manuell / automatisch)	Temperaturverteilung im Bohrloch Mächtigkeit der Auftauschicht Mächtigkeit des Permafrostkörpers Position von allfälligen Taliks Kurz- und langfristige Änderungen ACHTUNG: falls das Bohrlochrohr eingemörtelt ist, wird während mindestens einem Monat Abbindungswärme erzeugt!
Inklinometermessungen – mit Inklinometerrohr (manuell / automatisch)	Horizontale Verschiebungen Scherhorizonte
Extensometermessungen – mit Inkrexrohr	Setzungen im Untergrund Hebungen im Untergrund

Fazit

In den Schweizer Alpen besteht je nach Hanglage und Exposition oberhalb von etwa 2200 m ü.M. ein Verdacht auf Permafrostvorkommen. Die Permafrostverbreitung wird durch diverse Faktoren beeinflusst, aber insbesondere durch Lufttemperatur, Strahlung, Bodenbeschaffenheit, Topographie und Schnee. Permafrostböden können je nach Standort sehr unterschiedliche thermische, strukturelle und geotechnische Eigenschaften aufweisen. Erwärmung und Starkniederschläge im Sommer können Naturgefahren und Hangbewegungen in Permafrostgebieten auslösen. Für die Abklärung von Permafrostvorkommen werden schrittweise Methoden mit steigender Aussagekraft und zunehmendem Aufwand eingesetzt. Um einen konkreten Nachweis zu erhalten, müssen Untersuchungen direkt am Standort durchgeführt werden.

Projektablauf

Für Bauten im Permafrost ist die Vorstudie (Kap. 2) der wichtigste Schritt in der Projektierungsphase. Um ein Bauprojekt im Permafrost erfolgreich zu realisieren, ist ein optimales Einbinden des Knowhows aller beteiligten Disziplinen eine Grundvoraussetzung (Multidisziplinarität). Fachspezialisten ermitteln zunächst die Verteilung des Permafrosts (Kap. 1.3), dessen Eigenschaften (Kap. 1.4) sowie die Gefahr von Naturereignissen an potenziellen Standorten (Kap. 1.7). Das Permafrostvorkommen sollte, wie im Ablaufdiagramm in Kapitel 1.8 beschrieben, in vier Stufen abgeklärt und nachgewiesen oder ausgeschlossen werden. Für bestehende Bauten wird in der Vorstudie (Kap. 2.2) untersucht, durch welche Ursachen Schäden am Bauwerk bedingt sind oder ob mit Problemen und Schäden künftig gerechnet werden muss.

Diese Grundlagen dienen den Fachpersonen aus dem Bereich Bauingenieurwesen zur Beurteilung des Verhaltens einer Baute mit speziellen Baugrundbedingungen. In der Vorprojektphase können damit bereits die erforderlichen Anpassungen und Massnahmen eingeplant werden (Kap. 3). Danach wird das Bauprojekt erarbeitet (Kap. 4) und in Zusammenarbeit mit den Architekten und Fachplanern die weitere Realisierung (Kap. 5) geplant. Mit dem dargestellten, pragmatischen und schrittweisen Vorgehen können die Erkenntnisse verständlich und in geeigneter Form kommuniziert werden. Dies gilt auch für die Nutzung und die Erhaltung eines Bauwerks (Kap. 6). In Kapitel 7 sind einige Punkte aufgelistet, welche beim Rückbau beachtet werden sollten. Der empfohlene Projektablauf für Bauten im Permafrost ist in Abbildung 37, Projektierungselemente, und in Tabelle 10, Ablauf der Projektphasen, ersichtlich.

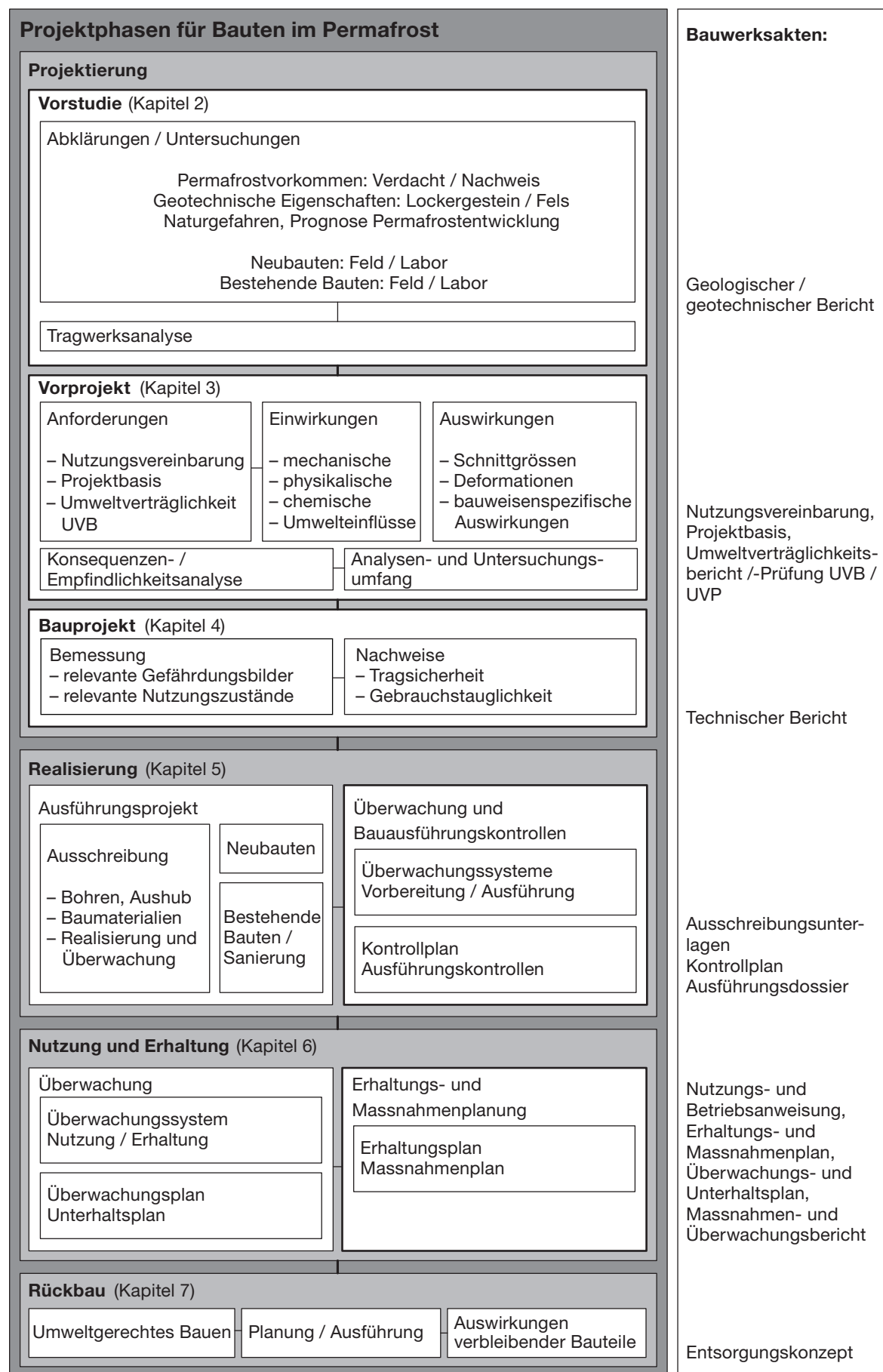


Abb. 37: Beziehung der Projektierungselemente.

Tab. 10: Ablauf der Projektphasen mit Verantwortlichkeiten der Baubeteiligten.

Ablaufschritte	Bauherr	Projektverfasser	Permafrostspezialist	Baubehörde
Projektierung	Vorstudie (Kapitel 2)	Definiert Projektvorstellungen, Lage	Konsultiert Hinweiskarte Permafrost, und sammelt vorhandene Daten	Gibt Auskunft über bestehende Unterlagen bezüglich Permafrost
		Lässt bei fehlenden Permafrost Grundlagen erste Untersuchungen durchführen um den geeigneten Standort zu evaluieren	Stellt vorhandene Unterlagen zusammen, erarbeitet Tragwerksanalyse	Führt bei fehlenden Daten erste Untersuchungen bezüglich des Vorhandenseins von Permafrost, evtl. Standortoptimierung (Ausweichen), durch, erstellt Prognose der Permafrostentwicklung
	Vorprojekt (Kapitel 3)	Definiert Nutzungsanforderungen und Nutzungsdauer	Erarbeitet die <i>Nutzungsvereinbarung und Projektbasis</i> mit Bauherr	Unterstützt bei permafrostspezifischen Fragen
		Lässt bei Bedarf eine UVP durchführen	Prüft die Umweltverträglichkeit UVP, erstellt UVB bei Bedarf	Unterstützt die Umweltverträglichkeit abzuklären
		Definiert im Rahmen der Nutzungsvereinbarung die Schutzziele und Sonderrisiken	Erarbeitet die Ein- und Auswirkungen auf ein Tragwerk	Gibt Auskunft über bewährte Baumethoden im Permafrost
		Lässt bei Bedarf eine Baugrunduntersuchung durchführen	Skizziert mögliches Fundationskonzept im Permafrost	Führt eine Baugrunduntersuchung durch, erstellt <i>geotechnischen Bericht</i>
	Bauprojekt (Kapitel 4)	Wählt definitive Projektvariante aus	Bestimmt Fundationskonzept aufgrund der Baugrunduntersuchung und ermittelt Nutzungszustände und Gefährdungsbilder	Geotechnische Beratung betreffend Fundationskonzept
			Führt Bemessung und Nachweise der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit durch, erstellt <i>technischen Bericht</i>	Projektiert erforderliche Messungen und Überwachungen
Bewilligung		Reicht die Projektunterlagen stellvertretend für den Bauherr als Baugesuch ein		Prüft das Projekt, erteilt die Baubewilligung evtl. unter Vorbehalt weiterer Bauauflagen
Realisierung (Kapitel 5)		Erstellt <i>Ausschreibungsunterlagen</i>		
		Erstellt <i>Kontrollplan</i> , begleitet und überwacht die Bauausführung	Vergleicht Prognose mit Realität (Anpassungen), überwacht die korrekte Realisierung der baulichen Massnahmen im Permafrost gemäss <i>Kontrollplan</i> , realisiert Messungen und Überwachungen	Kontrolliert die Ausführung gemäss Baubewilligung
		Erstellt <i>Ausführungsdossier</i>		
Nutzung und Erhaltung (Kapitel 6)	Definiert Nutzungsvorstellungen	Erarbeitet mit Bauherr die <i>Nutzungs- und Betriebsanweisungen</i>	Unterstützt bei permafrostspezifischen Fragen	
	Definiert Erhaltungsvorstellungen	Erarbeitet mit Bauherr den <i>Erhaltungs- und Massnahmenplan</i>	Unterstützt bei permafrostspezifischen Fragen	
	Lässt regelmässige Überwachungen durchführen	Führt Überwachung und Unterhalt gemäss <i>Überwachungs- und Unterhaltsplan</i> durch	Wertet Überwachung im Zusammenhang mit permafrostspezifischen Fragen aus, erstellt <i>Überwachungsbericht</i>	
		Erstellt den <i>Massnahmenbericht</i>		
Rückbau (Kapitel 7)	Erteilt Auftrag für den Rückbau	Lässt <i>Entsorgungskonzept</i> erarbeiten, prüft Auswirkungen verbleibender Bauteile		Bewilligt Entsorgungskonzept

2 Vorstudie

2.1 Notwendige Vorabklärungen für Neubauten im Permafrost

2.1.1 Voruntersuchung

Um einen Neubau im Permafrost zu realisieren, sind als erstes Abklärungen bezüglich des Permafrostvorkommens und dessen Eigenschaften vorzunehmen. Diese sind ausführlich in Kapitel 1.3, 1.4 und 1.8 beschrieben. Durch eine frühzeitige, spezifische Untersuchung und Instrumentierung eines potenziellen Standorts können Aussagen zur Temperatur und zum Deformationsverhalten des Untergrunds gemacht werden.

Eine geeignete Standortwahl eines Neubaus ist von grösster Wichtigkeit. Liegt ein eisreicher Baugrund vor, ist ein Standortwechsel (Verschiebung) in vielen Fällen zweckmässig. Damit können frühzeitig Probleme vermieden werden (Abschnitt 2.3.1).

Am gewählten Standort sind, je nach Anforderungen an eine Baute, weitere Analysen und Untersuchungen durchzuführen (Abschnitt 3.6.1). Auf eine Baugrunduntersuchung kann in den wenigsten Fällen verzichtet werden. Die geotechnischen Eigenschaften des Permafrosts sind in der Baugrunduntersuchung abzuklären (Abschnitt 1.4.2), zu interpretieren, sowie die baulichen Massnahmen mit Bezug auf das geplante Bauvorhaben aufzuzeigen und in einem Bericht zusammenzustellen. Der Umfang und Inhalt einer Baugrunduntersuchung hat gemäss Norm SIA 267 zu erfolgen. Weitere Feld- und Laboruntersuchungen sind in den nachfolgenden Abschnitten 2.1.2 und 2.1.3 beschrieben.

Die Vorstudie für Bauten im Permafrost ist im Vergleich zu klassischen Bauten zeitintensiv. Vor allem die Baugrunduntersuchungen benötigen eine lange Vorlaufzeit. Die längere Vorlaufzeit verteuert die Kosten der Vorstudienphase. Diese anfänglichen Mehrinvestitionen zahlen sich jedoch nach kurzer Zeit aus. Diverse Fallstudien in den Alpen haben gezeigt, dass durch detaillierte Vorstudien die Lebensdauer verlängert und hohe Sanierungs- oder Neubaukosten von Bauten im Permafrost verhindert werden können.

2.1.2 Felduntersuchungen

Für komplexe, deformationsanfällige Bauten und schwierige, geotechnische Verhältnisse muss die Baugrundbeschaffenheit am gewählten Standort sorgfältig abgeklärt werden. Felduntersuchen mit Baggerschlitzern oder Bohrlöchern ermöglichen es, direkte Informationen über die Eigenschaften des Baugrunds zu gewinnen. In Kapitel 1.8.2 werden diese beiden Felduntersuchungsmethoden genauer beschrieben.

Viele Felduntersuchungen, die für einen ungefrorenen, feinkörnigen Baugrund entwickelt wurden, eignen sich nicht für den gefrorenen, grobkörnigen Baugrund im Gebirgspermafrost. So sind Flat Dilatometer (DMT) oder Standart Penetration Tests (SPT) zum Beispiel nicht geeignet im grobkörnigen Permafrost.

2.1.3 Laboruntersuchungen

Zusätzlich zu den oberflächlichen Aufnahmen und Felduntersuchungen können Kernbohrungen abgeteuft, und die Proben anschliessend im Labor untersucht werden. In Tabelle 11 sind verschiedene Labortests mit den jeweiligen Erkenntnissen sowie die entsprechenden Normen zu den einzelnen Untersuchungen zusammengestellt.

Laboruntersuchungen von Permafrost-Baugrundproben erfordern einige logistische Vorbereitungen. Um eine möglichst ungestörte Probenahme im Permafrost zu gewährleisten, muss eine luftgekühlte Rotationskernbohrung (Doppel- oder Dreifachkernrohr) abgeteuft werden. Die gefrorenen Proben sollten danach in einem gekühlten Behälter ins Labor transportiert, und im Labor je nach Untersuchung in einem gekühlten Raum vorbereitet und getestet werden. Wichtig ist, dass die Proben gekühlt werden, um ein Auftauen zu vermeiden.

2.2 Notwendige Vorabklärungen für bestehende Bauten im Permafrost

2.2.1 Voruntersuchung

Eine Voruntersuchung für bestehende Bauten im Permafrost ist nötig, wenn diese sanierungsbedürftig sind, um- bzw. ausgebaut oder nicht rückgebaut werden. Das Ziel einer Voruntersuchung ist, zu erkennen, welche Ursachen zu Schäden geführt haben und eine Sanierung notwendig erscheinen lassen. Schäden können verschiedene Ursachen haben. Diese zu erkennen und ihre Wirkung zu verstehen ist schwierig. Durch die Interaktion des Tragwerks mit dem Permafrost-Baugrund sind Ein- und Auswirkungen eng aneinander gekoppelt. In Kapitel 3 sind die verschiedenen Ein- und Auswirkungen auf ein Tragwerk im Permafrost zusammengestellt. Diese Zusammenstellung gibt einen Anhaltspunkt, um die verschiedenen Ursachen und deren Wirkung besser zu verstehen.

Tab. 11: Zusammenstellung verschiedener Laboruntersuchungen im Permafrost.

Labortest	Erkenntnisse	Normen
Geotechnische Kenngrössen	Festsubstanz-, Eis-, Wasser-, Luft-, Salzgehalt	SN EN 1097-5, SN 670 903-5, SN 670 335
Kornverteilung	Korngrössenverteilung, Klassifikation nach USCS Frostbeständigkeit	SN 670 008a, SN 670 140b
Einfacher Druckversuch	Scherfestigkeit, Festigkeitsverhalten	SN 670 352
Direktscherversuch	max. Scherfestigkeit und Restscherfestigkeit (für lange Scherwege), Festigkeitsverhalten	ASTM D 3080 DIN 18137-3
Triaxialer Scherversuch konstante Deformationsrate	max. Scherfestigkeit und Restscherfestigkeit, Festigkeitsverhalten	ASTM D 2850, ASTM D 4767
Triaxialer Scherversuch konstante Druckspannung	Kriechverhalten, Deformationsverhalten	SN 670 340
Oedometer	Zusammendrückbarkeit, Zeit- / Deformationsverhalten, Wasserdurchlässigkeit	ASTM D 2435
Thermische Kenngrössen	Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität	ASTM D 5334-00

Als Schadensursachen kommen hauptsächlich zwei Entwicklungen in Frage. Im einen Fall (I) wird Bodeneis abgebaut und im anderen Fall (II) wird Bodeneis gebildet. Der Sanierungsgrund in Fall I ist durch einen Wärmeeintrag in den Untergrund verursacht (Permafrost-Degradation). Diese kann eine Vertiefung der Auftauschicht oder eine Veränderung des Eisgehalts im Permafrost und somit der geotechnischen Eigenschaften (Scherfestigkeit, Tragfähigkeit) zur Folge haben. Daraus können Kriechdeformationen, Setzungen oder Risse des Tragwerks resultieren, die zu Nutzungseinschränkungen führen. Der Wärmeeintrag in den Untergrund kann verschiedene Ursachen haben und zum Beispiel von der vorübergehenden Abbindewärme des Betons, von beheizten Räumlichkeiten, Wasserleitungen und wärmeerzeugenden Geräten stammen oder auch durch Klimaerwärmung ausgelöst werden.

In Fall II wird der Sanierungsgrund durch sich bildenden Permafrost verursacht (Permafrost Aggradation). Dies kann durch aktive Kühlung (Eisstadion), Bildung von Segregationseis oder tiefe Temperaturen im Untergrund geschehen. Die Volumenzunahme von Wasser durch den Gefrierprozess kann Auswirkungen auf das Tragwerk zur Folge haben wie Hebungsdruck, Schnittkräfte, Durchbiegungen und Risse.

Eine Sanierung von bestehenden Bauten kann durch einen dieser Fälle oder aus einer Kombination von beiden notwendig werden. Wichtig ist, dass das räumliche Ausmass und der zeitliche Ablauf des Problems in der Voruntersuchung erkannt wird, um mit geeigneten Sanierungsmassnahmen deren Wirkung zu minimieren.

2.3 Tragwerksanalyse

2.3.1 Standortwahl

Die wesentliche Herausforderung der Tragwerksanalyse von Bauten im Permafrost stellt die Standortwahl dar. Die anstehenden Baugrundverhältnisse eines Permafrost Standorts können je nach Belastungsart, Richtung und Eisgehalt ein ausgeprägtes Kriechverhalten aufweisen. Dies ist auf das visko-plastische Deformationsverhalten von Eis zurückzuführen. Ist am vorgesehenen Standort eisreicher Baugrund anzutreffen, kann es zu grossen Kriechdeformationen und Setzungen kommen, die eine nachhaltige Tragwerkslösung erschweren oder gar verunmöglichen und einen kostenintensiven Unterhalt während der Nutzung mit sich bringen. Diese Einwirkungen können sich im schlimmsten Fall verkürzend auf die Lebensdauer von Bauten auswirken. In solchen Fällen sollte eine Standortverschiebung oder ein Bauverzicht in Erwägung gezogen werden. Die zeitabhängigen Kriechprozesse müssen in einem robusten, angepassten Tragwerk, mit einem geeigneten Fundations- und Verankerungskonzept (Kap. 8.1.1 und 8.2.1) und eingeplanten Redundanzen berücksichtigt werden. Dies ist entscheidend, um Nutzungseinschränkungen während der Lebensdauer einer Baute zu vermeiden.

Infrastrukturanlagen an exponierter Lage können zusätzlich durch Naturgefahren wie Steinschläge, Rutschungen, Murgänge und Lawinen aus Permafrostgebieten gefährdet sein (Kap. 1.7). Dies ist in die Gefährdungsbilder einzubeziehen und das Restrisiko ist bezüglich der Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks abzuschätzen. Bei der Wahl eines Standorts sollten diese Einflüsse berücksichtigt, oder ein bestehendes Bauwerk auf das Gefahrenpotenzial untersucht werden. Zeigt die Untersuchung ein nicht akzeptierbares Gefahrenpotenzial, werden Schutzbauten nötig. Diese werden den Naturgefahren entsprechend und auf den Standort bezogen ausgelegt. Beispiele für Schutzbauten sind Steinschlagnetze, Felsvernagelungen und Felsverankerungen, Schutzwälle, Stützmauern oder Lawinenverbauungen (Abb. 38).

2.3.2 Tragwerkskonzept

Ein Tragwerkskonzept sollte folgende Überlegungen beinhalten:

- Geeignete Standortwahl
- Alle relevanten Gefährdungsbilder abdecken (berechnete Szenarien, Lastfälle)
- Robustes, angepasstes Tragwerk mit nachvollziehbaren Reserven (keine versteckten Sicherheiten)
- Flexibles Tragwerk, das an effektive Verhältnisse angepasst werden kann
- Tragende Elemente / Bauteile sind in den so gut als möglich ungestörten Permafrostkörper einzubinden (Hebungskräften aus der Auftauschicht berücksichtigen)
- Deformationen während der Nutzungsdauer einer Baute dürfen nicht zu Nutzungseinschränkungen führen (Gebrauchstauglichkeit), evtl. sind Nachstellmöglichkeiten vorzusehen
- Naturgefahren in die Gefährdungsbilder einbeziehen und das Restrisiko bezüglich der Gebrauchstauglichkeit einer Baute abschätzen



Abb. 38: Felsverankerungsarbeiten zur Sicherung eines Stollenausgangs gegen Steinschlag (Foto Gasser, Lungern).

Fazit

Die Vorstudie ist der wichtigste Schritt in der Projektierungsphase für Bauten im Permafrost. Im Vergleich zu Bauten die nicht im Permafrost liegen, muss mit einer längeren Vorlaufzeit für die Baugrunduntersuchung, die Messungen des saisonalen Luft- und Bodentemperaturgangs beinhaltet, gerechnet werden. Dadurch verteuert sich die Vorstudienphase. Die Mehrkosten zahlen sich jedoch durch eine längere Lebensdauer und geringere Sanierungs- oder Neubaukosten aus.

Für komplexe, deformationsanfällige Bauten und problematische, geotechnische Verhältnisse sollte die Baugrundbeschaffenheit am gewählten Standort zusätzlich mit Feld- und evt. Laboruntersuchen abgeklärt werden.

Für bestehende, sanierungsbedürftige Bauten im Permafrost, die nicht rückgebaut werden, muss während der Voruntersuchung erkannt werden, welche Ursachen zu Schäden führten und die Sanierung auslösen konnten. Schäden können verschiedene Ursachen haben. Diese zu erkennen und deren Wirkung zu verstehen ist schwierig, da eine enge Interaktion des Tragwerks mit dem Permafrost-Baugrund besteht. Es wird deshalb empfohlen, erfahrene Fachleute beizuziehen.

Die Standortwahl ist für ein Tragwerkskonzept von zentraler Bedeutung. Es muss abgeklärt werden, ob der geplante Standort sich im Permafrost befindet, und welche Baugrundbedingungen und Naturgefahren vorkommen. Liegt der Standort im eishaltigen Permafrost, sollte eine Standortverschiebung oder ein Bauverzicht in Erwägung gezogen werden. Das Tragwerkskonzept sollte robust und angepasst sein sowie Redundanzen eingeplant haben, um Nutzungseinschränkungen während der Lebensdauer eines Bauwerks zu vermeiden.

3 Vorprojekt

3.1 Nutzungsvereinbarung

Während der Nutzung eines Gebäudes gibt es vielfältige Anforderungen, die in der Nutzungsvereinbarung definiert werden. Die Grundlagen dafür sind in der Vorstudie in einem Dialog zwischen der Bauherrschaft und den Projektverfassern zu schaffen.

Das Vorgehen sowie die inhaltlichen Angaben einer Nutzungsvereinbarung sind der Norm SIA 260 zu entnehmen. Für Bauten im Permafrost sind zusätzliche Punkte abzuklären (Tab. 12, linke Spalte).

Die wesentlichen Gefährdungsbilder und Szenarien sind zu erarbeiten (Abschnitt 3.4.2, 3.5.2 und 3.6), und die nicht abgedeckten Restrisiken, die aus Überlastfällen, Naturgefahren und andern Sonderrisiken resultieren, sind mit der Bauherrschaft zu besprechen.

Tab. 12: Zusätzliche Abklärungen für Bauten im Permafrost, welche in die Nutzungsvereinbarung und die Projektbasis einfließen.

Abklärungen Nutzungsvereinbarung	Abklärungen Projektbasis
<i>Anforderungen definieren</i>	<i>Anforderungen umsetzen</i>
Standortevaluation / -wahl (Baugrundverhältnisse, Permafrost Nachweis, Eisgehalt)	Umfangreiche Standort- und Baugrundabklärungen zur Permafrost Situation (im Verhältnis zur Objektbedeutung) in der Vorstudienphase zählen sich aus (Kapitel 2)
Standort und Baugrund angepasstes Tragwerkssystem (Tragsicherheit gewährleisten)	Wahl eines geeigneten Tragwerkssystems, evtl. mit erforderlichen Korrekturmöglichkeiten für deformationssensible Bauten (z.B. nachjustierbares Tragwerk)
Nutzungsdauer (Folgen von Veränderungen im Baugrund während der Lebensdauer einer Baute)	Wahl der geeigneten Fundationsart um die Nutzung einer Baute durch Deformationen nicht einzuschränken
Zulässige Deformationen (Gebrauchstauglichkeit gewährleisten)	Geotechnische Eigenschaften des Baugrunds / Konsequenzen einer Veränderung des Eisgehalts: – Kriechen von eishaltigem Baugrund durch Krafteinleitung – Setzungsberechnungen (Schmelzen des Eises im Baugrund) – Hebungsberechnungen (Eisbildung im Baugrund) – Scherfestigkeits- und Tragfähigkeitsberechnungen (Verminderung der Baugrundwerte)
Erwarteter Wärmeeintrag in den Untergrund (z.B. während Realisierung, Nutzung)	Schutz vor Wärmeeintrag in den Untergrund durch (Kapitel 8): – Angepasste Baumethoden (Bauphase) – Angepasste bauliche Massnahmen (Nutzungsphase)
Kostenunsicherheiten (durch Höhenlage, Logistik, Klima)	Genaue Budgetierung, Beschränkung der Kostenunsicherheiten durch: – Vollständige Ausschreibungsunterlagen – Planung und Ausführung mit erfahrenen Unternehmern

3.2 Projektbasis

In der Projektbasis werden die Anforderungen und die Nutzung einer Baute, die in der Nutzungsvereinbarung definiert worden sind, umgesetzt. Sie dienen dem Projektverfasser als Leitfaden für die normgerechte und fachgemässe Umsetzung der definierten Anforderungen.

Das Vorgehen sowie die inhaltlichen Angaben einer Projektbasis sind der Norm SIA 260 zu entnehmen. Umfang und Inhalt der Projektbasis richten sich nach der Bedeutung und Gefährdung des Bauwerks. Für Bauten im Permafrost sind die in Tabelle 12, rechte Spalte aufgeführten, zusätzlichen Punkte zu berücksichtigen.

3.3 Umweltverträglichkeit

Während des Vorprojekts muss die Notwendigkeit einer UVP oder UVB (Umweltverträglichkeitsprüfung oder -bericht) geprüft werden. Eine Prüfung der Umweltverträglichkeit sollte möglichst frühzeitig durchgeführt werden. Da sich die Mehrzahl der Bauten im Permafrost ausserhalb der Bauzone befinden, muss in den meisten Fällen ein Umweltgutachten erstellt werden. Umfang und Inhalt richtet sich nach dem Umweltschutzgesetz des Bundes (USG) und den Richtlinien der Umweltschutzfachstellen der Kantone.

3.4 Einwirkungen

3.4.1 Einwirkungen auf das Tragwerk

Die Einwirkungen beziehen sich auf das Tragwerk und werden nach ihrem Ursprung und ihrer Art sowie der zeitlichen und örtlichen Wirkungsdauer und Variabilität unterteilt. Die genaue Charakterisierung der Einwirkungen ist der Norm SIA 260 und Norm SIA 261 zu entnehmen.

In Tabelle 13 sind mögliche nicht permafrostspezifische Einwirkungen und Einwirkungen aus dem Permafrost auf ein Tragwerk an einem alpinen Hochgebirgsstandort zusammengestellt.

Die massgebenden Kombinationen von möglichen Einwirkungen sind zu erarbeiten und in die Bemessung einfließen zu lassen (Kap. 4.1).

3.4.2 Mögliche Veränderungen der Einwirkungen auf das Tragwerk wegen des Permafrosts

In Tabelle 14 wird in drei Szenarien aufgezeigt, was die Konsequenzen einer Veränderung der Einwirkungen auf ein Tragwerk wegen des Permafrosts sein können: 1) keine Veränderung im Permafrost-Baugrund, 2) Veränderung des Permafrost-Baugrunds durch Degradation von Bodeneis, 3) Veränderung des Permafrost-Baugrunds durch Aggradation von Bodeneis.

Tab. 13: Mögliche Einwirkungen auf das Tragwerk.

Einwirkungen (Beschreibung)	ständig	veränderlich	aussergewöhnlich
Aus Umwelt (Hochgebirgsstandort, nicht permafrostspezifisch):			
– Lufttemperatur (tägliche und saisonale Temperatur Änderungen)	x	x	x
– Schneelast (saisonale Schneelast Änderungen)	x	x	x
– Wind (tägliche und saisonale Wind Änderungen)		x	x
– Eislast (saisonale Eislast Änderungen)	x	x	x
– Naturgefahren (Steinschlag, Lawinen, Murgang, Eisabbruch)			x
Aus Baugrund (permafrostspezifisch):			
– Bodentemperatur (negativ, saisonale Schwankungen)	x	x	
– Eigenlast Boden (Raumlaster, Eisgehalt)	x	x	
– Erddruck (Scherfestigkeit, Raumlaster)	x	x	
– Kriechdruck (Temperatur Boden, Eisgehalt, Deformationsverhalten)	x	x	
– Wasserdruck (saisonale Schwankung, Verteilung, Strömung)		x	x
– Porenwasserdruck (saisonale Schwankung, Scherfestigkeit)		x	
– Deformationen (Kriechen, Volumenverlust, Scherfestigkeit, Segregationseis)		x	x
– Salzgehalt Boden (tieferer Gefrierpunkt Wasser)	x	x	

Tab. 14: Veränderung der Einwirkungen und ihre Konsequenzen auf das Tragwerk wegen des Permafrosts.

Veränderung Einwirkungen	Konsequenzen
Szenario 1: keine Veränderung im Permafrost-Baugrund	Siehe Tabelle 13 oben
Szenario 2a: Veränderung des Permafrost-Baugrunds durch Degradation, Abbau von Bodeneis	Zunahme Erddruck durch Verminderung Scherfestigkeit Abnahme Tragfestigkeit durch Verminderung Scherfestigkeit, Instabilitäten Zunahme Kriechdruck durch Eistemperaturanstieg Zunahme Baugrunddeformationen, Volumenverlust (Setzung) Zunahme Mächtigkeit Auftauschicht Zunahme Porenwasserdruck durch Schmelzen von Bodeneis Zunahme Wasserdruck, hydrostatische Verteilung oder Strömungsdruck
Szenario 2b: kein Permafrost mehr vorhanden im Baugrund (Endzustand von Szenario 2a)	Baugrunddeformationen durch Volumenverlust, Konsolidierung (Setzung) Abnahme Tragfestigkeit, Instabilitäten durch Verminderung Scherfestigkeit Abnahme Porenwasserdruck Abnahme Wasserdruck und Strömungsdruck
Szenario 3: Veränderung des Permafrost-Baugrunds durch Aggradation, Zunahme von Bodeneis	Zunahme Zugkräfte an Bauteilen (Pfähle, Anker) Zunahme Baugrunddeformationen, Volumenzunahme (Hebungsdruck) Abnahme Mächtigkeit Auftauschicht Abnahme Porenwasserdruck durch Gefrieren von Porenwasser Abnahme Wasserdruck, hydrostatische Verteilung oder Strömungsdruck

3.5 Auswirkungen

3.5.1 Auswirkungen auf das Tragwerk

Die Auswirkungen auf das Tragwerk sind als Antworten des Tragwerks auf die Einwirkungen zu verstehen. In diesem Leitfaden werden nur die Auswirkungen auf das Tragwerk aus dem Baugrund mit Bezug auf Permafrost behandelt. Aus den in Tabelle 13 aufgezeigten möglichen Einwirkungen können die resultierenden Auswirkungen auf das Tragwerk zusammengestellt werden (Tab. 15).

3.5.2 Mögliche Veränderungen der Auswirkungen auf das Tragwerk wegen des Permafrosts

In Tabelle 14 werden drei Szenarien, die eine Veränderung der Einwirkungen wegen des Permafrosts beschreiben (1) keine Veränderung im Permafrost-Baugrund, 2) Veränderung im Permafrost-Baugrund (Degradation), 3) Veränderung im Permafrost-Baugrund (Aggradation) aufgezeigt. Die daraus resultierenden Auswirkungen sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Tab. 15: Mögliche Auswirkungen auf das Tragwerk.

Einwirkungen aus Baugrund	Auswirkungen
Bodentemperatur	Materialschaden (Abbindeprozess, Abplatzungen)
Eigenlast Boden	Schnittkräfte, Durchbiegung, Risse
Erddruck	Schnittkräfte, Durchbiegung, Risse
Kriechdruck	Schnittkräfte, Durchbiegung, Risse
Wasserdruck	Schnittkräfte, Durchbiegung, Risse, Wasserschaden
Porenwasserdruck	Schnittkräfte, Durchbiegung, Risse, Wasserschaden
Deformationen	Schnittkräfte, Risse, Tragwerksversagen
Salzgehalt Boden	Materialschaden (Korrosion, Abplatzungen)

Tab. 16: Auswirkungen auf das Tragwerk wegen einer Veränderung im Permafrost.

Einwirkungen aus Baugrund	Auswirkungen
Szenario 1 (keine Veränderung im Permafrost-Baugrund)	Siehe Auswirkungen Tabelle 15 oben
Szenario 2a (Veränderung im Permafrost-Baugrund, Degradation)	Schnittkräfte, Durchbiegung, differenzielle Baugrunddeformationen (Setzungen), Risse, Tragwerksversagen, Wasserschaden
Szenario 2b (kein Permafrost mehr vorhanden im Baugrund)	Schnittkräfte, Durchbiegung, Risse, differenzielle Baugrunddeformationen
Szenario 3 (Veränderung im Permafrost-Baugrund, Aggradation)	Schnittkräfte, Durchbiegung, differenzielle Baugrunddeformationen (Hebungsdruck), Risse, Tragwerksversagen

3.5.3 Auswirkungen auf den Baugrund

Die Auswirkungen die sich auf den Baugrund beziehen, sind als Antworten des Baugrunds auf die Einwirkungen zu verstehen. Die Auswirkungen auf den Baugrund mit Bezug auf den Permafrost haben nur eine Relevanz, wenn diese das Tragwerk betreffen. Diese Auswirkungen sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 aufgelistet. Auf eine Zusammenstellung der Auswirkungen auf den Baugrund, die das Tragwerk nicht betreffen, wurde verzichtet.

In die Bemessung gehen die Einwirkungen und die Auswirkungen ein. Die Einwirkungen werden in verschiedenen Gefährdungsbildern miteinander kombiniert, um die Nachweise der Tragfähigkeit zu erbringen. Die Auswirkungen werden durch die Anforderungen, welche in der Nutzungsvereinbarung und Projektbasis definiert wurden, beschränkt, und mit den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit untersucht.

3.6 Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse

In der Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse werden die Empfindlichkeiten des Baugrunds einer Baute im Permafrost auf diverse Einwirkungen untersucht. Als Grundlagen dazu dienen eine Projektbeschreibung, eine einfache Baugrunduntersuchung sowie eine Beschreibung der Einwirkungen. Im Projektbeschrieb wird auf den Zweck, die Lage und die Anforderungen an die Nutzung (Nutzungsvereinbarung und Projektbasis) eingegangen. Eine Baugrunduntersuchung hat den Ausgangszustand des Baugrunds (Ist-Zustand) zu charakterisieren. Dies gilt sowohl für einen Neubau wie auch für eine bestehende Baute. Die Einwirkungen auf das Tragwerk sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Zusätzlich wird in Tabelle 14 in drei Szenarien aufgezeigt, welche Konsequenzen eine Veränderung der Einwirkungen auf das Tragwerk durch den Permafrost haben kann. Daraus resultiert die Baugrundempfindlichkeit auf Einwirkungen (Empfindlichkeitsanalyse («Y», Abb. 39). Die Baugrundempfindlichkeit wird auf Grund der Bodentemperatur, des Eisgehalts und der Struktur von Boden oder Fels definiert (Kap. 1.4.2).

Auswirkungen können unterschiedliche Konsequenzen erzeugen je nach Bauwerkstypen und Standorten im Permafrost. Mit dem Ausmass der Konsequenzen wird die Wichtigkeit der Auswirkungen qualitativ erfasst. Setzungen einer Berg- oder Schutzhütte können durch tauenden Permafrost Unannehmlichkeiten und steigende Unterhaltskosten erzeugen. Andererseits können differenzielle Setzungen von Seilbahnstationen oder Stützenfundamenten von Seilbahnen zu Instabilitäten führen, die Seilentgleisungen oder sogar Seilabwürfe erwirken können, bis hin zum Versagen der Tragwerke. Solche Ereignisse würden von Betriebsstörungen bis zu Gefährdungen hoher Sachwerte und Menschenleben auslösen und verursachen hohe Folgekosten. Diese Risiken sind mit den entsprechenden Dispositionen und Dimensionierungen, welche in der Nutzungsvereinbarung und Projektbasis festzuhalten sind, auf ein akzeptierbares Mass zu reduzieren, wozu eine Konsequenzenanalyse («X») durchzuführen ist. Die nach Abbildung 39 durchzuführende Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse liefert für die Interaktion von Baugrund und Tragwerk die notwendigen Erkenntnisse.

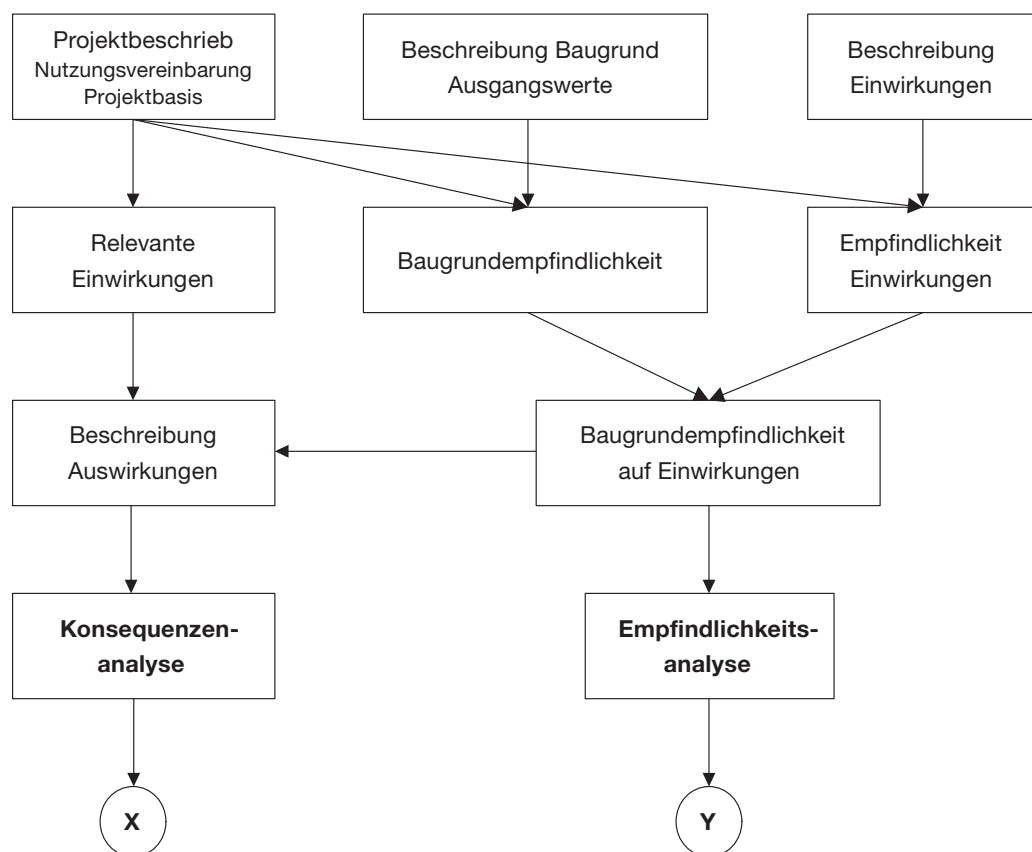


Abb. 39: Flussdiagramm der Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse für Bauten im Permafrost (angepasst nach PERD, 1998).

3.6.1 Analysen- und Untersuchungsumfang

In Risikoabschätzungen wird das Risiko aus der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen Konsequenzen (Schaden) definiert. Diese Wahrscheinlichkeiten entsprechen bei Risikoabschätzungen für Bauten im Permafrost der Empfindlichkeit auf Einwirkungen. Eine Einwirkung (z.B. durch Erwärmung) im Permafrost stellt eine Gefahr für ein Tragwerk dar, da die bestehenden Einwirkungen verschärft und dadurch die möglichen Auswirkungen (z.B. Tragwerksversagen) verschlimmert werden können. Mit den Konsequenzen wird die Wichtigkeit der Auswirkungen qualitativ definiert.

In Abbildung 40 werden verschiedene Bauwerkstypen im Permafrost in einem Konsequenzen- und Empfindlichkeits-Diagramm eingestuft. Darin lässt sich qualitativ darstellen, welche Konsequenzen «X» ein Tragwerksversagen haben könnten und wie sensibel ein Tragwerk auf Einwirkungen «Y» reagieren würde. Ausserdem dient diese Einstufung als Grundlage, um den Analysen- und Untersuchungsumfang «Z» zu bestimmen. Je nachdem in welchem Quadrant die Einstufung einer Baute im Permafrost zu liegen kommt, sind unterschiedliche Analysen und Untersuchungen durchzuführen (Tab. 17). Die Einstufungen der verschiedenen Bauwerkstypen in Abbildung 40 sind als Beispiele zu verstehen, und müssen für jede Baute wieder neu bestimmt werden.

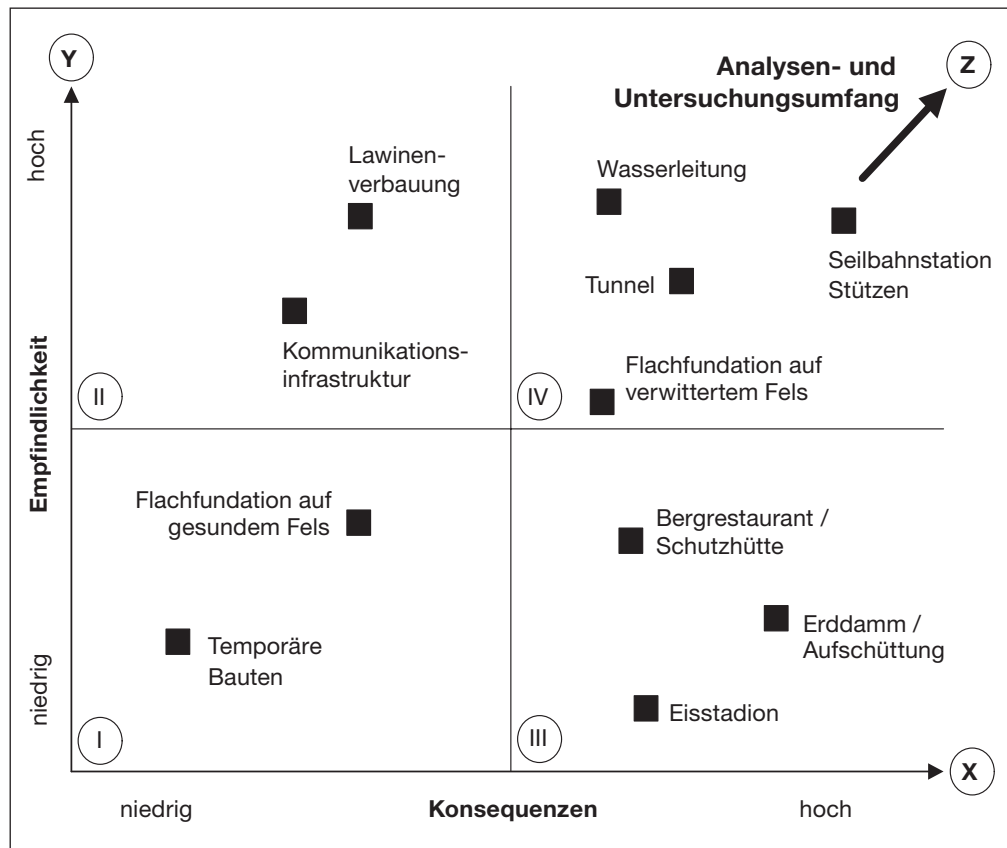


Abb. 40: Beispiele einer Einstufung in das Konsequenzen- und Empfindlichkeits-Diagramm für Bauten im Permafrost (angepasst nach PERD, 1998). Die Quadranten I-IV werden in der Tabelle 17 erläutert.

Tab. 17: Analysen- und Untersuchungsumfang nach Quadranten der Konsequenzen- und Empfindlichkeits-Analyse.

* Qualitative Analyse: Analytische Modellierung der veränderlichen Einwirkungen / Auswirkung auf das Tragwerk. + Quantitative Analyse: Detaillierte numerische Modellierung (computerbasiert) der veränderlichen Einwirkungen / Auswirkung auf das Tragwerk.

Quadrant	Empfohlener Analysen- und Untersuchungsumfang
I	Keine vertiefte Analyse und Untersuchung erforderlich
II	Qualitative Analyse* durchführen, Expertenbeurteilung, Baugrunduntersuchung, quantitative Untersuchung wenn kein vergleichbares Projekt vorhanden
III	Limitierte quantitative Analyse* durchführen, Ingenieurbeurteilung der verwendeten Parameter, Überwachung des Baugrunds, volle quantitative Untersuchung wenn kein vergleichbares Projekt vorhanden
IV	Detaillierte quantitative Analyse* durchführen, detaillierte Baugrund- mit Feld- und Laboruntersuchung, unabhängige Expertenbeurteilung einholen (Prüfingenieur), Überwachung des gesamten Bauwerks

Mit einer angemessenen Überwachung und dem Unterhalt von Bauten im Permafrost während aller Projektphasen können Konsequenzen meist frühzeitig erkannt, und sichernde Massnahmen ergriffen werden (Kap. 5 und 6).

3.7 Anwendungsbeispiel 1

An zwei Beispielen soll gezeigt werden, welche Überlegungen für jede Einwirkung und Auswirkung anzustellen sind, und wie diese in die Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse einfließen, um den Analysen- und Untersuchungsumfang zu bestimmen.

3.7.1 Ausgangslage Beispiel 1

Eine unbeheizte Seilbahnstation ist auf einer Streifenfundation talseitig in der Auftauschicht im zerklüfteten Fels und bergseitig im eishaltigen zerklüfteten Fels fundiert. Für diese Ausgangslage wird eine Einwirkung aus dem Baugrund betrachtet (Abb. 41).

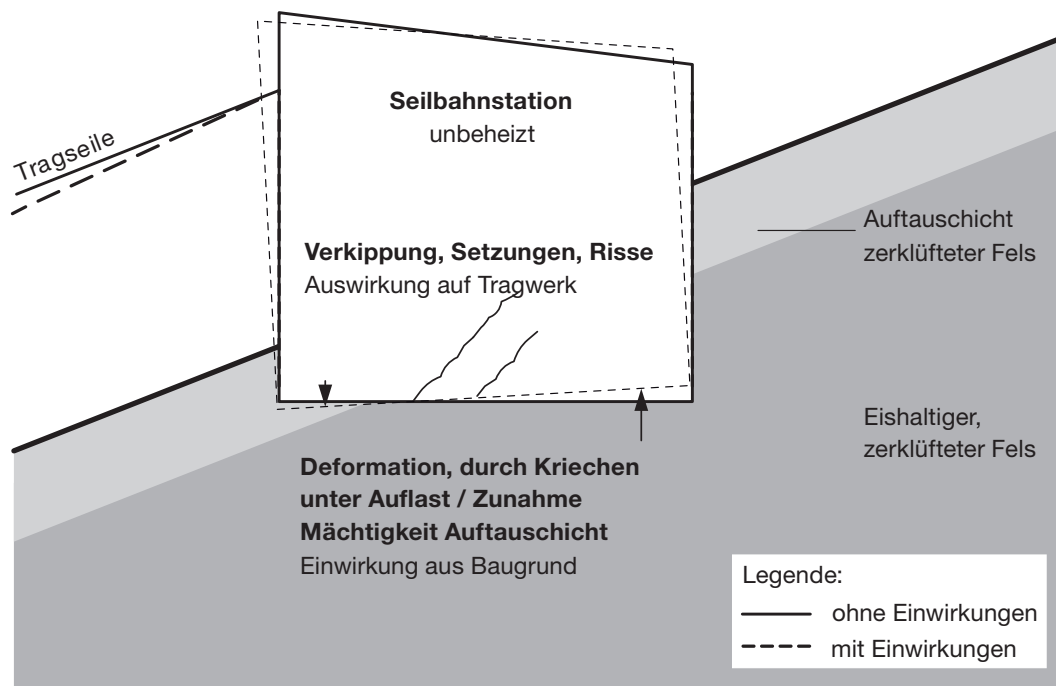


Abb. 41: Schematische Darstellung einer Seilbahnstation in einem eishaltigen zerklüfteten Fels mit einer Einwirkung resp. Auswirkung aus dem Baugrund.

3.7.2 Einwirkungen auf das Tragwerk

Als Einwirkung aus dem Baugrund wurden Deformationen (Setzungen), die durch Kriechen unter einer Auflast oder durch eine Zunahme der Mächtigkeit der Auftauschicht entstehen, gewählt, was gemäss Tabelle 13 eine veränderliche sowie eine aussergewöhnliche Einwirkung darstellen kann. Dieser Bemessungssituation ist bei den Nachweisen der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entsprechend Rechnung zu tragen (Norm SIA 260).

3.7.3 Auswirkungen auf das Tragwerk

Die Auswirkungen aus dem Baugrund auf das Tragwerk sind in Abbildung 41 schematisch dargestellt. Die Auswirkungen der veränderlichen, aussergewöhnlichen Einwirkung (differenzielle Setzung des Baugrunds) können zu einer Verkipfung, sowie gemäss Tabelle 15 und Tabelle 16 (Szenario 2a) zu zusätzlichen Schnittkräften und Rissen im Tragwerk führen. Diesen Bemessungssituationen ist bei den Nachweisen der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entsprechend Rechnung zu tragen (Norm SIA 260). Den zu erwartenden Veränderungsprozessen muss mit einem adäquaten Tragwerkskonzept und mit gezielten Überwachungsmethoden zur Früherkennung begegnet werden.

3.7.4 Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse

Erste Baugrund Abklärungen haben gezeigt, dass unter dem zerklüfteten Fels der Auftauschicht eishaltiger, zerklüfteter Fels ansteht. Durch die Auflast und die Klimaerwärmung muss mit Einwirkungen aus dem Baugrund gerechnet werden. Krafteinleitungen in eishaltigen Baugrund können Kriechdeformationen hervorrufen. Durch die Erwärmung kann die Mächtigkeit der Auftauschicht zunehmen, was zu einer Degradation des Gebirges führen und differenzielle Setzungen unter dem Gebäude verursachen kann. Setzungen des Baugrunds im Bereich der hoch beanspruchten, talseitigen Kippkante der Station führen zu einer Verminderung der Kippsicherheit und falls dies unerkannt bleibt, zu einer Verkipfung der Seilbahnstation. Abhängig von der Baugrundempfindlichkeit entsteht eine Einwirkung auf das Bauwerk und kann je nach Wahl des Tragwerkskonzepts und den installierten Baugrund- und Tragwerksüberwachungen als niedrig bis hoch angenommen werden (Y-Achse Abb. 40).

Die in der Nutzungsvereinbarung und Projektbasis festgelegten Anforderungen an eine Seilbahnstation zeigen, dass Einwirkungen die eine Verminderung der erforderlichen Bauwerksstabilität oder Verschiebungen der Seilachse bewirken (Auswirkung), schwerwiegende Konsequenzen zur Folge haben können. Die Einwirkung aus dem Baugrund (Deformationen durch Kriechen unter Auflast / Zunahme Mächtigkeit Auftauschicht), können solche Verschiebungen oder Instabilitäten veranlassen. Wenn eine erhöhte Wahrscheinlichkeit einer spontanen Tragwerksverschiebung oder eines -Versagens besteht, müssen die Konsequenzen für das Bauwerk in der Regel als hoch angenommen werden (X-Achse Abb. 40).

3.7.5 Analysen- und Untersuchungsumfang

Die Einstufung einer Seilbahnstation oder auch der Foundationen einer Seilbahnstütze im Permafrost ist abhängig von den prognostizierten Veränderungen des Baugrunds, dem gewählten Tragwerkskonzept und der Fundationsart sowie den angewendeten Überwachungsmethoden. Fallweise sind die Empfindlichkeiten des Baugrunds und die Konsequenzen für das Bauwerk zu ermitteln. Auf Grund der hohen Beanspruchungen aus den Seilkräften und grosser Sicherheitsrelevanz wird das Ergebnis im dritten oder vierten Quadranten zu liegen kommen (Abb. 40). Damit wird aus Tabelle 17 ersichtlich, welche Analysen, Untersuchungen und Überwachungen durchgeführt werden sollten.

3.8 Anwendungsbeispiel 2

3.8.1 Ausgangslage Beispiel 2

Ein beheiztes Restaurant ist auf einer Flachfundation in der Auftauschicht im Lockergestein fundiert. Darunter steht ein eishaltiges Lockergestein an. Für diese Ausgangslage werden eine Einwirkung aus der Umwelt und eine aus dem Baugrund betrachtet (Abb. 42).

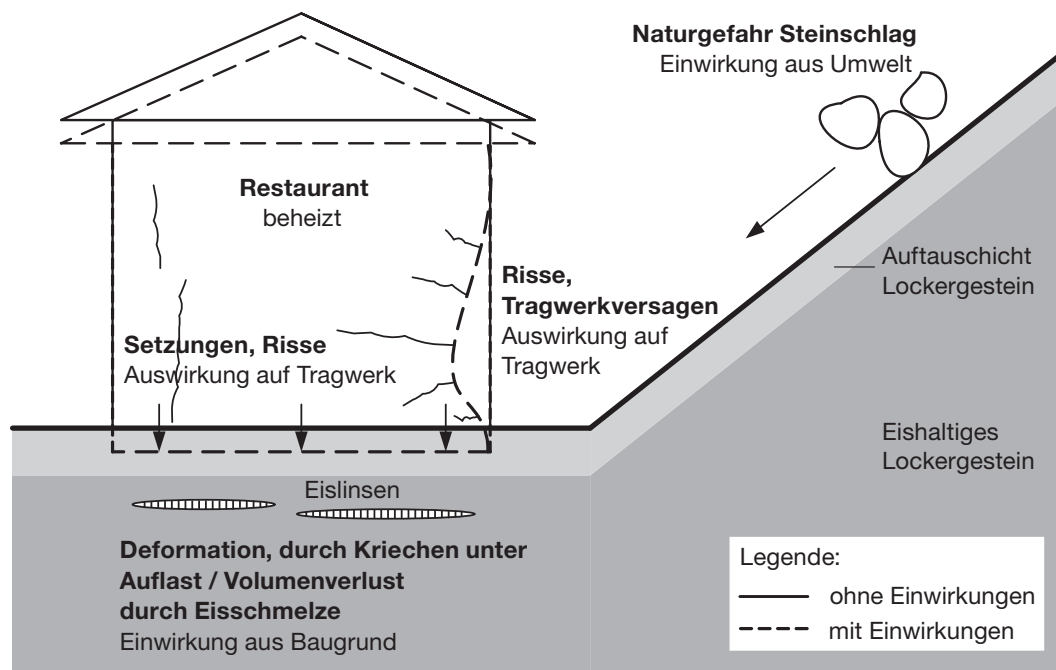


Abb. 42: Schematische Darstellung eines beheizten Restaurants in einem Permafrost Lockergestein mit jeweils einer Einwirkung resp. Auswirkung aus der Umwelt und dem Baugrund.

3.8.2 Einwirkungen auf das Tragwerk

Als Einwirkung aus der Umwelt wurde die Naturgefahr Steinschlag gewählt, was gemäss Tabelle 13 eine aussergewöhnliche Einwirkung darstellt. Als Einwirkung aus dem Baugrund wurden Deformationen durch Kriechen unter einer Auflast oder einem Volumenverlust, ausgelöst durch Eisschmelze, gewählt, was gemäss Tabelle 13 eine veränderliche sowie eine aussergewöhnliche Einwirkung darstellen kann. Diesen Bemessungssituationen ist bei den Nachweisen der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entsprechend Rechnung zu tragen (Norm SIA 260).

3.8.3 Auswirkungen auf das Tragwerk

Die Auswirkungen aus der Umwelt und dem Baugrund auf das Tragwerk sind in Abbildung 42 schematisch dargestellt. Die Auswirkungen der aussergewöhnlichen Einwirkung Steinschlag und Deformationen können Risse im Tragwerk und ein Tragwerksversagen verursachen. Die Auswirkungen der veränderlichen Einwirkung Deformationen können gemäss Tabelle 15 und 16 (Szenario 2a) zu Schnittkräften, Setzungen und Rissen im Tragwerk führen. Diesen Bemessungssituationen ist bei den Nachweisen der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entsprechend Rechnung zu tragen (Norm SIA 260).

3.8.4 Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse

Erste Baugrund Abklärungen haben gezeigt, dass unter der Auftauschicht eishaltiges Lockergestein ansteht. Durch die Auflast sowie durch die geheizten Räumlichkeiten des Restaurants, muss mit Einwirkungen aus dem Baugrund gerechnet werden. Krafteinleitungen in eishaltigen Baugrund können Kriechdeformationen hervorrufen. Durch die Erwärmung kann das Eis schmelzen, was zu einem Volumenverlust des Baugrunds, und somit zu Setzungen der Baute führt. Die Baugrundempfindlichkeit auf diese Einwirkungen muss somit als mittel bis hoch angenommen werden (Y-Achse Abb. 40).

Die in der Nutzungsvereinbarung und Projektbasis festgelegten Anforderungen an ein Restaurant zeigen, dass Einwirkungen die Deformationen und Risse bewirken (Auswirkung), Nutzungseinschränkungen zur Folge haben können. Die Einwirkungen aus dem Baugrund (Deformationen durch Kriechen unter Auflast / Eisschmelzen), können solche Deformationen und Risse veranlassen. Die Konsequenzen können dennoch als niedrig angenommen werden (X-Achse Abb. 40).

Nutzungsunterbrüche die durch ein Tragwerksversagen durch die Steinschlaggefahr entstehen könnten, sollten mit geeigneten Schutzmassnahmen (Steinschlagnetze, Felsicherung) vermieden werden. Das Restrisiko ist abzuschätzen und mit der Bauherrschaft zu besprechen. Diese Restrisiken gehen nicht in die Konsequenzen-Empfindlichkeitsanalyse ein.

3.8.5 Analysen- und Untersuchungsumfang

Die Einstufung des Restaurants kommt durch die hohe Empfindlichkeit des Baugrunds und die niedrigen Konsequenzen in den zweiten Quadranten zu liegen (Abb. 40), so dass der Analysen- und Untersuchungsumfang (Z-Achse, Abb. 40) bestimmt werden kann. Damit wird aus Tabelle 17 ersichtlich, welche Analysen, Untersuchungen und Überwachungen durchgeführt werden sollten.

Fazit

Die zusätzlichen Abklärungen für die Nutzungsvereinbarung und die Projektbasis, die für Bauten im Permafrost nötig sind, werden aufgezeigt. Die Ein- und Auswirkungen auf das Tragwerk einer Baute im Permafrost sind zusammengestellt.

Aufgrund einer Konsequenzen- und Empfindlichkeitsanalyse werden die Empfindlichkeiten des Baugrunds einer Baute im Permafrost auf Einwirkungen untersucht. Je nach Empfindlichkeit eines Baugrunds auf die Einwirkungen und die Konsequenzen der Auswirkungen, kann der Baugrund Analysen- und Untersuchungsumfang festgelegt werden.

4 Bauprojekt

4.1 Bemessung

In der Bemessung werden die Dimensionen, die Baustoffe und die konstruktive Durchbildung eines Tragwerks auf Basis der relevanten Gefährdungsbilder und Nutzungszustände nach den Tragwerksnormen SIA 262 bis 267 bestimmt. Gestützt auf die Projektbasis werden für Bemessungssituationen mit schwer abschätzbaren Risiken und komplexen Baugrundverhältnissen – was im Permafrost oft der Fall ist – die charakteristischen Baugrundwerte gewählt. Die Klimaerwärmung sowie die Einflüsse der Bauarbeiten und der Nutzung auf den Eisgehalt des Baugrunds sollten ebenfalls in Betracht gezogen werden. In einer Prognose über die Lebensdauer des Bauwerks sollten für einen allfälligen veränderten Zustand charakteristische Baugrundwerte abgeschätzt werden.

Die Bemessungswerte eines Permafrost-Baugrunds sind gemäss Norm SIA 267 aus den charakteristischen Baugrundwerten und mit den erforderlichen Partial- und Umrechnungsfaktoren zu bestimmen. Die entsprechenden Werte gehen in die Nachweise der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit ein.

4.2 Nachweise

Es ist gemäss Norm SIA 260 grundsätzlich ein Nachweis der Tragsicherheit und ein Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu erbringen. Für Bauten im Permafrost sind, sofern massgebend, die vier Typen von Grenzzuständen der Norm SIA 267 für die Tragsicherheit nachzuweisen. Diese sind: Verlust des Gleichgewichts, Erreichen des Tragwiderstands, Verlust der Standfestigkeit und Erreichen der Ermüdungsfestigkeit.

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind gemäss der Nutzungsvereinbarung umzusetzen. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit für Bauten im Permafrost erfordert gemäss Norm SIA 267 vor allem das Berechnen von Setzungen, Verkippungen, Verschiebungen und Verformungen.

- Für Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken in Beton, Stahl, Holz und Mauerwerk gelten die Bestimmungen der Tragwerksnormen SIA 262 bis 267.

5 Realisierung

5.1 Ausführungsprojekt

5.1.1 Ausschreibung

Vollständige Ausschreibungsunterlagen sind eine wichtige Grundlage, um entsprechende Angebote für die Realisierung des Projekts einzuholen. Nachfolgend sind einige Aspekte aufgeführt, die in der Ausschreibung für Bauarbeiten im Permafrost zu berücksichtigen sind:

Bohr- und Erdarbeiten

- Durch das Anfrieren oder Einklemmen der Bohrausrüstung im eishaltigen Bohrloch kann es zu Verzögerungen, Materialschäden oder -verlusten kommen.
- Bohrungen sollten ausschliesslich mit Luftspülung durchgeführt werden, um den Wärmeeintrag im Baugrund möglichst gering zu halten.
- Eishaltiger Baugrund im Permafrost kann mit dem Bagger nur schwer ausgehoben werden. Nach Normpositionen-Katalog (NPK) kann dieser als «schwer baggerfähig» mit Erschwernissen (Blöcke müssen mit Abbauhammer zerkleinert werden) erfasst werden. Zusätzlich ist der Baugrund in den allgemeinen Bedingungen klar zu umschreiben. Für Aushubarbeiten muss deshalb mit dem Einsatz eines Abbauhammers oder mit einem Sprengaushub gerechnet werden. Der Standard Penetration Test (SPT) kann im Permafrost nicht ausgeführt werden. Die zu erwartende Zusammensetzung und Lagerungsdichte des Baugrunds sollten deshalb gut beschrieben werden.
- Eishaltige Fels- und Lockergesteine sind schlechter sprengbar und benötigen deshalb mehr Sprengmittel sowie engere Bohrabstände.

Baumaterialien

- Das Abbinden von Mörtel und Beton wird durch negative Bodentemperaturen verzögert. Aus diesem Grund sind Zusatzmittel oder ein Bindemittel zu verwenden, die auch bei negativen Temperaturen die gewünschte Festigkeit erreichen. Zusätzlich können das Anmachwasser für den Mörtel oder Beton und die Zuschlagstoffe erwärmt werden. Die Auswirkungen von Warmwasser, Zusatzmitteln und Abbindewärme auf den eishaltigen Baugrund müssen bei der Bemessung beachtet werden.
- Mörtel und Beton sollten mit Luftporenbildner frostbeständig oder durch einen geringeren Wasser/Zement Wert wasserdicht gemischt werden.
- Als Rückfüllmaterial oder Kofferung sollten frostbeständige Materialien wie Sand, Splitt, Kies oder Schotter verwendet werden (Kap. 8.4.4).
- Um den Wärmeaustausch zwischen dem Bauwerk und dem Baugrund gering zu halten, sollten wärmedämmende Materialien eingesetzt werden (Kap. 8.6.1).

Realisierung und Überwachung

- Meistens kann nur während einer kurzen Periode gebaut werden.
- Die klimatischen Bedingungen am Standort sollten berücksichtigt werden, denn ein Einschneien ist im Hochgebirge jederzeit möglich. Dies kann die kurze Periode, in der das Bauen möglich ist, zusätzlich verkürzen.
- Anker und Felsnägel sind unmittelbar nach der Vollendung des jeweiligen Bohrlochs einzubringen und zu injizieren, da die Bohrlöcher rasch zufrieren können, wenn sie nicht geheizt werden.
- Es gilt zu beachten, dass das Leistungsvermögen von Mensch und Maschine mit zunehmender Höhenlage geringer wird.

- Bauarbeiten im Permafrost verlangen spezielle Anforderungen. Die Vergabe an diesbezüglich erfahrene Firmen ist von Vorteil.
- Ein Überwachungssystem sollte während der Projektierung eingeplant und vor dem Baubeginn eingerichtet werden (Tab. 18).

5.1.2 Neubauten im Permafrost

Das Ausführungsprojekt eines Neubaus im Permafrost sollte sicherstellen, dass die Bauweise dem Standort optimal angepasst ist (Kap. 2.3). Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Voruntersuchung müssen in die Tragwerkswahl einfließen, was eine Anpassung der Nutzungsvereinbarung mit sich bringen kann. Falls sich der Standort als ungünstig erweist oder das Tragwerk die gestellten Anforderungen (Kap. 3) nicht erfüllen kann, sollte eine Standortverschiebung oder ein Verzicht des Neubaus in Betracht gezogen werden.

5.1.3 Sanierung bestehender Bauten im Permafrost

Vor dem Ausführungsprojekt von sanierungsbedürftigen Bauten im Permafrost sollte eine Analyse durchgeführt werden, um den Sanierungsgrund zu bestimmen. In Kapitel 6.2 ist der Ablauf eines solchen Erhaltungs- und Massnahmeplanverfahrens beschrieben und es sind mögliche Sanierungsmassnahmen aufgezeigt. Dadurch kann eine bestehende Konstruktion entsprechend stabilisiert, und falls notwendig der Degradation des Permafrosts entgegen gewirkt werden. Bei nur noch geringem Permafrostvorkommen im Untergrund kann ein Permafrost auftauendes Bauverfahren eine weitere Lösung darstellen (Kap. 8.7.4).

Als stabilisierende Massnahmen können zum Beispiel Mörtel-Injektionen in den Untergrund oder eine zusätzliche Verankerung in Frage kommen. Um der Permafrost-Degradation entgegen zu wirken, könnten Kühlsysteme installiert oder die Wärmedämmung zwischen Bau und Baugrund verbessert werden. Der Einsatz von beweglichen Bau- und Korrektursystemen (Kap. 8.5), stellt in einigen Fällen die nachhaltigste Technik dar, ist jedoch für bestehende Bauten oft nur schwer umsetzbar.

Falls der Schaden auch mit angepassten Massnahmen nicht behoben werden kann, muss kurz- bis mittelfristig auf eine Sanierung verzichtet und ein Rückbau (Kap. 7) mit eventuellem Neubau in Betracht gezogen werden.

5.2 Überwachung und Bauausführungskontrollen

5.2.1 Vorbereitung des Überwachungssystems

Eine optimale Überwachung von Baugrund und Bauwerk beginnt mit der Einrichtung von Messsystemen. Die Messungen sollten vor Beginn der Bauarbeiten starten, so dass Veränderungen im Baugrund und der Umgebung, wie zum Beispiel Deformationen und Temperaturänderungen im Boden, nach Beginn der Bauarbeiten frühzeitig erkannt werden. Durch ein sorgfältig konzipiertes Messsystem können so allfällige Veränderungen oder Gefahren besser erkannt und damit die Sicherheit erhöht werden.

Die Wahl eines Messsystems wird beeinflusst durch die Deformationsempfindlichkeit des Bauvorhabens. Werden wenig präzise Messinstrumente verwendet, so können die erhobenen Verschiebungen oder Temperaturdifferenzen im Bereich der Messgenauigkeit liegen und lassen damit keine aussagekräftigen Schlüsse über den Baugrund zu. Es sollten

deshalb Messsysteme mit einer hohen Genauigkeit zum Einsatz kommen, trotz der meist höheren Anschaffungskosten.

Die Dauer der gewünschten Überwachung kann die Wahl eines Messsystems ebenfalls beeinflussen. Wenn eine Überwachung während der ganzen Lebensdauer einer Baute bestehen bleiben soll, muss ein dauerhaftes oder auswechselbares Überwachungssystem gewählt werden. Oft dient eine Überwachung gleichzeitig als Frühwarnsystem, so dass durch einen Ausfall wichtige Informationen die Sicherheit betreffend verloren gehen. Deshalb sollten die wichtigsten Messsysteme redundant vorhanden und der Ersatz von Überwachungssystemen möglich sein.

Das gewählte Überwachungssystem einer Baute sollte idealerweise bestehende Messnetze oder weitere Datenquellen integrieren. Dadurch können Synergien genutzt und Kosten gespart werden. In Kapitel 1.8 sind die verschiedenen bestehenden Messnetze beschrieben.

5.2.2 Überwachungssysteme während der Ausführung

Nachfolgend sind in Tabelle 18 verschiedene Überwachungssysteme aufgeführt, die für die Überwachung von Bauten im Permafrost während oder unmittelbar nach der Ausführung geeignet sind.

Ein Beispiel eines Kontrollplans ist in Anhang B zu finden.

Tab. 18: Überwachungssysteme während oder unmittelbar nach der Ausführung.

Überwachungssystem	Gegenstand der Überwachung	Spezielle Anforderungen	Messfrequenz
Visuelle Überwachung	– Risse, Hohlräume – Eis – Änderungen allgemein	Einsehbarkeit	Täglich – Wöchentlich
Automatische Boden- / Luft-Temperaturmessungen	– Entwicklung der Temperatur auf Oberflächen, in Bohr- löchern und an Tragwerken	Zugänglichkeit	Stündlich – Täglich
Geodätische Vermessung	– Verschiebungen auf der Geländeoberfläche	Stabile Fixpunkte im Gelände	Wöchentlich / Monatlich
3D Laserscanning	– Verschiebungen des Geländes – Grosse Volumenänderungen im Gelände (z.B. durch Felsbewegungen, Eisschwund, Eisbildung, usw.) – Verschiebungen von Infrastrukturen	Vermessene Referenzpunkte im Gelände	1 Mal / Jahr
Bohrloch-Inkrex Messungen	– Hebungen im Baugrund – Setzungen im Baugrund	Inkrex-Rohr in Bohrloch	Monatlich
Bohrloch-Inklinometer Messungen	– Horizontale Verschiebungen im Baugrund	Inklinometer-Rohr in Bohrloch	Monatlich
Extensometer-messungen	– Verschiebungen von Felsklüften – Verschiebungen von Bauten	Zugänglichkeit	Täglich – Wöchentlich
Kraftdosens-messungen	– Bodenpressungen unter Foundationen – Ankerkräfte	Zugänglichkeit	Monatlich bis 1 Mal / Jahr
Ankerzugversuch	– Ankerkräfte	Zugänglichkeit zum Ankerkopf	Einmalig

5.2.3 Kontrollplan

In einem Kontrollplan werden vorgängig die Messfrequenzen und die Alarmwerte festgesetzt, die sichernden Sofortmassnahmen beschrieben und die Verantwortlichkeiten klar definiert. Die regelmässigen Überwachungsmessungen werden in einem Messprotokoll aufgezeichnet und den Verantwortlichen unmittelbar zugestellt. Diese interpretieren die Daten und geben eine Empfehlung zum weiteren Vorgehen ab, oder ordnen eine sichernde Sofortmassnahme an. Ein Beispiel eines Kontrollplans ist in Anhang B zu finden.

5.2.4 Ausführungskontrollen

Während der Ausführung sollten die Arbeiten, die Baugrube und die Umgebung anhand des Kontrollplans regelmässig kontrolliert und protokolliert werden. Eine solche systematische Überwachung dient einerseits dem Schutz der Arbeiter, andererseits steigert es die Qualität der Arbeiten und somit die Lebensdauer einer Baute. Im Weiteren kann eine systematische Überwachung als Frühwarnsystem dienen, um Gefahren besser einschätzen zu können. Ein Beispiel eines Kontrollplans ist in Anhang B zu finden.

Die Messfrequenz eines gewählten Systems sollte der Komplexität und der Deformationsempfindlichkeit einer Baute angepasst sein. Es empfiehlt sich in jedem Fall frühzeitig ein passendes Messsystem einzurichten, welches vor, während und nach der Ausführung die Baute und ihre Umgebung überwacht.

Ausführungskontrollen sind sorgfältig durchzuführen. An einem gespannten Anker müssen zum Beispiel Ausführungskontrollen in der Form von Ankerversuchen und Spannproben für die Qualitätssicherung gemäss der Norm SIA 267 und Norm SIA 267/1 erfolgen. Andere Arbeiten oder Bauteile müssen gemäss den entsprechenden SIA Normen kontrolliert und geprüft werden.

Die Ausführungskontrollen und Messungen müssen laufend aufgezeichnet, ausgewertet und die Daten interpretiert werden. Nur so können diese dem Schutz der Arbeiter und als Frühwarn- und Überwachungssystem dienen.

Fazit

Vollständige Ausschreibungsunterlagen senken das Risiko für Kostenüberschreitungen. Für

- Bohr- und Aushubarbeiten,
- Baumaterialien und
- die Realisierung und Überwachung

sind einige Aspekte aufgeführt, die in der Ausschreibung für Bauten im Permafrost speziell zu berücksichtigen sind.

Für die Überwachung und für Bauausführungskontrollen sind Überwachungssysteme zusammen gestellt, die für Bauten im Permafrost während der Ausführung verwendet werden können. Die Nullmessung sollte vor dem Beginn der Arbeiten erfolgen. Mit regelmässigen Messungen können allfällige Probleme oder Gefahren besser erkannt und die Sicherheit erhöht werden. Systematische Aufzeichnungen und Auswertungen der Messungen können als Frühwarnsystem dienen.

Ein Beispiel eines Kontrollplans ist in Anhang B zu finden.

6 Nutzung und Erhaltung

6.1 Überwachung

6.1.1 Anpassung des Überwachungssystems

Meist wird das während der Ausführung gewählte und eingerichtete Überwachungssystem in die Nutzungs- und Erhaltungsphase übernommen und angepasst. Die Beobachtungen dienen dazu, die Anforderungen an eine Baute, die in der Nutzungsvereinbarung und Projektbasis definiert wurden, zu gewährleisten (Kap. 3).

6.1.2 Überwachungs- und Unterhaltsplan

In der Nutzungs- und Erhaltungsphase wird aus dem Kontrollplan der Überwachungs- oder Unterhaltsplan abgeleitet. Dieser muss entsprechend angepasst werden. Er legt die Messfrequenzen und die Alarmwerte fest, beschreibt die sichernden Sofortmassnahmen und definiert die Verantwortlichkeiten. Die regelmässigen Messungen werden in einem Messprotokoll aufgezeichnet und den Verantwortlichen zugestellt. Diese interpretieren die Daten und geben, falls nötig, eine Empfehlung zum weiteren Vorgehen ab, oder sie ordnen eine sichernde Sofortmassnahme an.

6.1.3 Überwachungssysteme während der Nutzung und Erhaltung

Die dynamischen, zeitabhängigen Prozesse, denen ein Tragwerk aufgrund des Permafrost-Baugrunds ausgesetzt ist, sollten mit einem einfachen, aber regelmässigen Überwachungssystem überprüft werden. Für jedes Objekt kann dadurch die Entwicklung in Abhängigkeit der Zeit bestimmt werden (Checkliste). Nachfolgend in Tabelle 19 sind einige Überwachungssysteme aufgezählt, die für Bauten im Permafrost während der Nutzung und Erhaltung verwendet werden können. Diese sind ähnlich wie die während der Ausführung gebräuchlichen Überwachungssysteme, unterscheiden sich jedoch in der Messfrequenz.

Ein Beispiel eines Überwachungs- oder Unterhaltsplans ist in Anhang B zu finden.

6.2 Erhaltungs- und Massnahmenplanung

6.2.1 Erhaltungs- und Massnahmenplan

Die Analyse der Überwachungsergebnisse und Beobachtungen (Beobachtungsmethode, Norm SIA 267) eines Tragwerks im Permafrost-Baugrund ist wesentlich. Wenn diese zeigen, dass die Anforderungen an eine Baute, die in der Nutzungsvereinbarung und Projektbasis definiert wurden, während der Nutzung und Erhaltung nicht erfüllt werden können, müssen Massnahmen getroffen werden. Diese werden in einem Erhaltungs- und Massnahmenplan ausgearbeitet. Durch eine optimale Überwachung sowie durch das Treffen der geeigneten Massnahmen wird die Erhaltung und Nutzung während der geplanten Nutzungsdauer sichergestellt und die Lebensdauer verlängert.

Tab. 19: Überwachungssysteme während der Nutzung und Erhaltung.

Überwachungssystem	Gegenstand der Überwachung	Spezielle Anforderungen	Messfrequenz
Visuelle Überwachung im Gelände und an Infrastrukturanlagen	– Risse – Deformationen – Änderungen allgemein		Monatlich / Jährlich
Automatische Boden / Luft Temperaturmessungen	– Oberflächentemperaturen – Bohrlochtemperaturen – Tragwerktemperaturen	Zugänglichkeit	Dauernd (tägliche Mittelwerte)
Klinometermessungen	– Verschiebungen an der Infrastruktur	Messkonsole an Infrastruktur	Monatlich
Geodätische Vermessung	– Verschiebungen auf der Geländeoberfläche – Verschiebungen an der Infrastruktur	Stabile Fixpunkte im Gelände	1–2 Mal / Jahr
3D Laserscanning	– Verschiebungen im Gelände – Grosse Volumenänderungen im Gelände (z.B. durch Felsbewegungen, Eisschwund, Eisbildung usw.) – Verschiebungen von Infrastrukturen	Vermessene Referenzpunkte im Gelände	1 Mal / Jahr
Bohrloch-Inkrex Messungen	– Hebungen im Baugrund – Setzungen im Baugrund	Inkrex-Rohr in Bohrloch	1–2 Mal / Jahr
Bohrloch-Inklinometer Messungen	– Horizontale Verschiebungen im Baugrund	Inklinometer-Rohr in Bohrloch	1–2 Mal / Jahr
Extensometermessungen	– Verschiebungen von Felsklüften – Verschiebungen von Bauten	Zugänglichkeit	Monatlich bis 1 Mal / Jahr
Kraftdosenmessungen	– Bodenpressungen unter Foundationen – Ankerkräfte	Zugänglichkeit	Monatlich bis 1 Mal / Jahr
Widerstandsmessungen	– Ankerkorrosion	Zugänglichkeit zum Ankerkopf	1 Mal / Jahr
Anklopfen von Anker- und Nagelköpfen	– Ankerspannung – Allgemeiner Ankerzustand	Zugänglichkeit	1 Mal / Jahr

6.2.2 Mögliche Massnahmen

Nachfolgend sind einige Massnahmen aufgezählt, die zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Bauten im Permafrost während der Nutzung und Erhaltung angewandt werden können.

- Mörtelinjektionen in Risse oder Klüfte
- Installation von zusätzlichen Mikropfählen
- Vernagelung mit Armierung und Spritzbetonüberdeckung (Lockergestein und Fels)
- Vernagelung oder Verankerung (Fels)
- Unterfangung der Foundation, Ausrichten der Foundation
- Installation von aktiven oder passiven Kühlsystemen
- Installation von Wärmedämmung

Eine Kombination der verschiedenen Massnahmen ist ebenfalls möglich.

Fazit

Im Überwachungs- und Unterhaltsplan werden für die Nutzungs- und Erhaltungsphase die Messfrequenzen und die Alarmwerte festgelegt, die sichernden Sofortmassnahmen beschrieben und die Verantwortlichkeiten definiert.

Für die Überwachung während der Nutzung sind Überwachungssysteme zusammen gestellt, die für Bauten im Permafrost verwendet werden können.

Im Erhaltungs- und Massnahmenplan werden Massnahmen definiert, die zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Bauten im Permafrost beitragen. Einige mögliche Massnahmen sind aufgezählt.

Ein Beispiel eines Überwachungs- oder Unterhaltsplans ist in Anhang B zu finden.

7 Rückbau

7.1 Umweltgerechtes Bauen

Die Wahl der Baustoffe sowie die Konstruktionsart und das Bauverfahren bestimmen die Bauabfälle eines Rückbaus. Die Menge, Verwert- und Entsorgbarkeit von Bauabfällen und damit die Rückbaukosten hängen davon ab, ob möglichst unproblematische Baumaterialien verwendet werden. Es sollte deshalb auf untrennbare Verbundwerkstoffe oder Verbindungstechniken, problematische Stoffe und Zusätze (z.B. Betonverflüssiger) sowie schwermetallhaltige Materialien verzichtet werden. Werden diese Kreislaufgedanken in der Projektierungsphase miteinbezogen, wird die Abfallbewirtschaftung bei einem Um- oder Rückbau einfacher und kostengünstiger.

7.2 Planung und Ausführung

Während des Rückbaus ist die Demontage- und Abbruchtechnik darauf auszurichten, dass die anfallenden Bauabfälle bereits auf der Baustelle entsorgungsgerecht getrennt und wenn möglich einer Verwertung zugeführt werden (Mehrmulden Prinzip). In der Empfehlung SIA 430 wird ebenfalls die getrennte Entsorgung als Stand der Technik ausgewiesen. Des Weiteren wird darin auf den Umfang und Inhalt eines Entsorgungskonzeptes näher eingegangen, das den Ablauf eines Rückbaus, die Entsorgung und Verwertung der anfallenden Baumaterialien regelt.

Oft sind durch Platzmangel während des Rückbaus einer Baute im Hochgebirge nur kleine Zwischenlager vor Ort möglich und deshalb ein effizienter Abtransport der Bauabfälle wichtig. Die Transporte sind vorausschauend zu planen, da diese je nach Zugänglichkeit kostspielig sein können. Die Leistungsfähigkeit von Abbruchmaschinen kann durch die Höhenlage eingeschränkt sein. Ein Schlechtwettereinbruch während des Sommers kann die Rückbauarbeiten verzögern.

Mit dem Rückbau geht die stützende Wirkung einer Baute verloren und anstehendes Material kann instabil werden. Um die Arbeitssicherheit zu gewährleisten, sollte in Etappen rückgebaut, oder temporäre Sicherungsmassnahmen ausgeführt werden.

7.3 Verbleibende Bauten und Bauteile

Für Bauten oder Bauteile die nach der Nutzung nicht rückgebaut werden, ist abzuklären, welche langfristigen Auswirkungen diese haben könnten. Tragende, im Untergrund verbleibende Bauteile wie Anker, müssen entspannt werden. Für hangstabilisierende Massnahmen wie Stützmauern, müssen die Konsequenzen eines Tragwerksversagens analysiert werden.

Wurden die vor Ort verbleibenden Bauteile während der Nutzung nicht chemisch verschmutzt (z.B. durch Öl, Treibstoff), kann nicht von einem belasteten Standort im Sinne der Altlasten-Verordnung AltIV gesprochen werden. Ein Rückbau sollte jedoch zum Ziel haben, den ursprünglichen, natürlichen Zustand wieder herzustellen, und den grössten Teil einer bestehenden Baute rückzubauen. Auf grossflächige Versiegelungen der Oberfläche sollte

generell verzichtet werden. Falls diese trotzdem ausgeführt und nicht rückgebaut werden, ist eine Perforierung vorzunehmen. Dies ermöglicht wieder eine naturnahe Wasserzirkulation.

7.4 Finanzierung

Die Finanzierung eines Rückbaus sollte bereits in der Bau- oder Betriebsbewilligung geregelt sein. Mit einem Fonds der die Rückbaukosten deckt, kann sichergestellt werden, dass keine Bauten vor Ort verbleiben und der ursprüngliche, natürliche Zustand wieder hergestellt werden kann.

Fazit

Stoffkreislaufgedanken sollten schon in der Projektierungsphase miteinbezogen werden. Dies gestaltet die Abfallbewirtschaftung bei einem Um- oder Rückbau einfacher und kostengünstiger. Auf untrennbare Verbundwerkstoffe oder Verbindungstechniken sowie schwermetallhaltige Materialien sollte verzichtet werden.

Im Entsorgungskonzept wird die umweltgerechte Trennung und Verwertung der Bauabfälle geregelt. Die Auswirkungen von vor Ort verbleibenden Bauteilen ist abzuklären. Für tragende Bauteile müssen die Konsequenzen eines Tragwerksversagens analysiert werden.

Die Finanzierung eines Rückbaus sollte während der Bau- oder Betriebsbewilligung geregelt werden.

Technische Lösungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten technischen Lösungsmöglichkeiten für verschiedene Fragestellungen aufgezeigt, die während der Ausführung oder Sanierung von Bauten im Permafrost auftreten können. Dabei werden Lösungen zu den folgenden Themen beschrieben:

- Foundationen auf instabilem Baugrund
- Verankerungen in veränderlichem Baugrund
- Erschwerter Aushub der Block-, Gesteins- oder Eismatrix
- Verzögertes Abbinden von zementgebundenen Baumaterialien in der Kälte
- Bauen im eisreichen und stark kriechenden Permafrost-Baugrund
- Unerwünschter Wärmeeintrag in den Untergrund
- Verminderte Tragfähigkeit des Baugrunds
- Ausbruch und Ausbau von Tunnel und Stollen im Permafrost

Die Tragwerksanalyse beinhaltet die Bemessung, die konstruktive Durchbildung, die Ausführungskontrollen und die Überwachung von allen in diesem Kapitel beschriebenen bautechnischen Lösungen. Diese haben gemäss den einschlägigen SIA Normen zu erfolgen.

8 Technische Lösungen

8.1 Foundationen

8.1.1 Foundationskonzept

Die Wahl eines Foundationssystems wird einerseits durch die Tragfähigkeit des Baugrunds, die Einwirkungsart wie Auflastgrösse oder Richtung, und andererseits durch Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit der Baute beeinflusst. In der Nutzungsvereinbarung, Kapitel 3, werden die Nutzungsanforderungen wie zulässige Setzungen und horizontale Verschiebungen einer Baute festgelegt. Diese dienen neben der Projektbasis, den Resultaten der Baugrunduntersuchung und der Grösse der einzuleitenden Schnittkräfte als Grundlagen zur Ausarbeitung eines Foundationskonzepts. Ein Foundationskonzept sollte folgende Überlegungen beinhalten (basierend auf Kap. 2.3):

- Robuste, verlässliche Foundation mit nachvollziehbaren Reserven (keine versteckten Sicherheiten), müssen aus den Szenarien und Gefährdungsbildern abgeleitet werden
- Geeignete, versteifte oder flexible Foundation, die an effektive Verhältnisse angepasst werden kann
- Foundation in den «ungestörten» Baugrund einbinden (Hebungskräfte aus der Auftauschicht berücksichtigen)
- Verkipfung, Durchbiegung und Risse während der Nutzungsdauer einer Baute dürfen nicht zu Nutzungseinschränkungen führen (Gebrauchstauglichkeit)

8.1.2 Flachfoundationen

Das Hauptmerkmal einer Flachfoundation ist der oberflächennahe Lastabtrag in den Untergrund. Flachfoundationen können als Einzel-, Streifen- und Plattenfoundationen ausgeführt werden. Welche dieser verschiedenen Foundationsarten gewählt wird, hängt von der Tragfähigkeit des Untergrunds ab. Wirken einzelne konzentrierte Kräfte, wird die Wahl eher auf ein Einzelfundament fallen. Wenn die Lasten hauptsächlich unter den Aussen- und Innenwänden anfallen (Linienlast), ist ein Streifenfundament unter den belasteten Wänden die beste Foundationsart. Streifenfundamente reagieren jedoch empfindlich auf differenzielle Setzungen, so dass in solchen Fällen ein steifes Tragwerk von Vorteil ist. Bei grossen Flächenlasten oder schlechtem Baugrund kann die Auflast am besten durch eine Plattenfoundation, die Schnittkraftumlagerungen zulässt, aufgenommen und verteilt werden. Weitere Faktoren, welche die Dimensionierung beeinflussen, sind die Einbindetiefe und die Geometrie des Fundaments. In Abbildung 43 ist ein Streifenfundament in felsigem Baugrund einer Berghütte zu sehen.

Die einfache Ausführbarkeit einer Foundation im Permafrost ist ebenfalls ein wichtiger Faktor, den es zu berücksichtigen gilt. Muss durch hohe Auflasten der tragfähige Fels gesucht werden, ist der Aushub für eine Streifenfoundation weniger zeit- und arbeitsaufwändig als der Aushub einer Plattenfoundation und reduziert dadurch die Baukosten.

Die Foundation sollte verhindern, dass Wärme in den Untergrund transportiert wird (Abschnitt 8.6), denn das Schmelzen von Eis führt zu einem Volumenverlust im Baugrund, welches differenzielle Setzungen und damit Nutzungseinschränkungen zur Folge haben kann.

→ Die Flachfoundationen sind gemäss Norm SIA 267, Kapitel 8 zu erstellen.



Abb. 43: Streifenfundation einer Berghütte auf felsigem Baugrund (Foto Ruch Architekten, Meiringen).

8.1.3 Tiefenfundation

Eine Tiefenfundation im Gebirgspermafrost stellt ein Ausnahmefall dar. Wenn gut tragfähiger Baugrund oberflächennah anzutreffen ist, können bereits grosse Auflasten mit einer einfach ausführbaren Flachfundation aufgenommen werden. Tiefenfundationen werden meist mit Mikropfählen aus perforierten Stahlmantelrohren oder Gewindestangen aus Stahl ausgeführt. Diese werden vorwiegend auf Druck, Druck und Querkraft aber auch auf Zug (Windlast, Erdbeben) beansprucht.

In Abbildung 44 sind schematische Darstellungen der Wirkungsweise von Pfahlfundationen zu sehen. Die Krafteinleitung in den Untergrund basiert auf der Mantelreibung und dem Spitzenwiderstand der Pfähle, welche zusammen den Tragwiderstand bilden. In der Auftauschicht können durch Gefrier- und Tauprozesse Hebungskräfte (Zugkräfte) an Pfählen entstehen. Diese lassen sich durch eine Geotextil-Ummantelung der Pfähle über die Tiefe der Auftauschicht reduzieren (Abb. 44).

Für die Bemessung der Pfähle wird die Mantelreibung über die Einbindetiefe des Pfahls im Permafrostkörper berücksichtigt. Durch das Anfrieren des Pfahls an den Untergrund er-

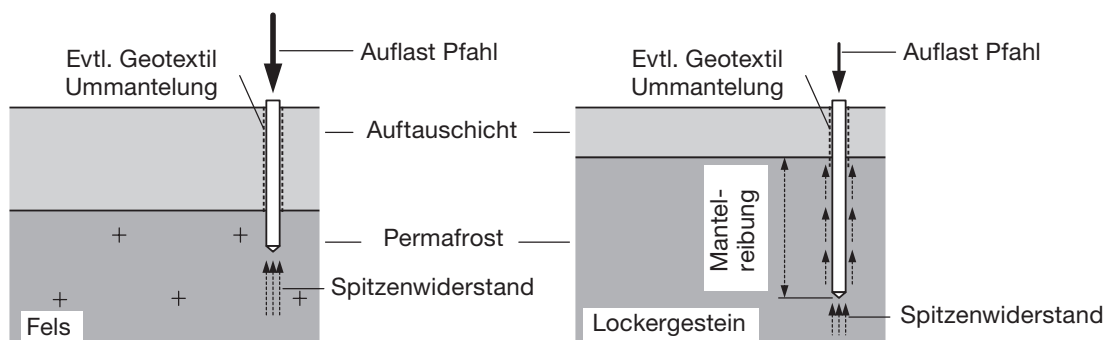


Abb. 44: Schematische Darstellung der Wirkungsweisen von Pfahlfundationen. (Links) im Fels nur über Spitzenwiderstand. (Rechts) im Lockergestein mit Spitzenwiderstand und Mantelreibung.

hört sich die Mantelreibung. Dieser Verbund (Anfrierfestigkeit) ist temperaturabhängig, was bei der Bemessung in Abhängigkeit der erwarteten Lebensdauer berücksichtigt werden muss. Mit einem aktiven oder passiven Kühlsystem kann der Verbund konserviert werden (Abschnitt 8.6.4). Ein Kühlsystem kann nicht nachträglich in die Pfähle eingebaut werden. Dies muss bei der Bemessung oder Erstellung der Pfähle berücksichtigt werden. Wenn keine Geotextil-Ummantelung vorgesehen ist, sollten die Hebungskräfte ebenfalls in die Bemessung der Pfahlfundation eingehen.

Bis ein Pfahl an den Untergrund anfriert, verstreicht je nach Bodentemperatur, Eisgehalt und Kornzusammensetzung eine gewisse Zeit. Erfahrungen aus Alaska und Russland mit feinkörnigen Böden zeigen, dass dort nach etwa einer Woche der Pfahl an den Untergrund angefroren ist. Generell ist im Gebirgsprefmafrost mit längeren Anfrierungszeiten zu rechnen da höhere Bodentemperaturen vorherrschen.

→ Die Tiefenfundationen sind gemäss Norm SIA 267, Kapitel 9 zu erstellen.

8.1.4 Pfahlbelastungsversuche

Die dynamischen Pfahlbelastungsversuche dienen zur Bestimmung des charakteristischen, äusseren Tragwiderstands sowie des Verformungsverhaltens von Einzelpfählen. Um repräsentative Resultate zu erzielen, sollten die Versuche mit möglichst vergleichbaren Pfählen und unter vergleichbaren Einbaubedingungen (Baugrundzusammensetzung, Eisgehalt, -temperatur, Bohrgerät) ausgeführt werden. Da die Versuchspfähle meist kurz nach der Ausführung geprüft werden, sind sie nur teilweise angefroren, und erreichen deshalb den kurzzeitigen, äusseren Tragwiderstand, respektive zeigen das langzeitige Verformungsverhalten. Mikropfähle sollten je nach Beanspruchung zusätzlich auf Zug geprüft werden.

→ Allfällige Pfahlbelastungsversuche haben gemäss Norm SIA 267/1, Kapitel 5 zu erfolgen.

8.1.5 Überwachungs- und Unterhaltsplan Fundationen

Der Unterhaltsplan hält fest, wer, wann, welche Messungen ausführt, was die Alarmwerte (z.B. max. Verschiebung pro Zeiteinheit) sind und welche sichernden Sofortmassnahmen getroffen werden sollten. Je nach Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit können Überwachungssysteme wie periodische, geodätische Vermessungen an der Infrastrukturoberfläche oder Neigungsmessungen an der Gebäudefassade sowie Rissprotokolle Aufschluss über die Bewegungen im Untergrund geben. Siehe dazu auch Kapitel 6. Um Bewegungsbeschleunigungen zu erkennen, ist eine Periodik (z.B. monatlich, jährlich) dieser Kontrollmessungen wichtig.

Unterhaltsarbeiten an der Fundation einer Infrastruktur gestalten sich schwierig, da die Zugänglichkeit meist nicht gewährleistet ist. Mit einem an die Gegebenheiten angepassten Fundationskonzept (Abschnitt 8.1.1) können Unterhaltsarbeiten an der Fundation während der Lebensdauer der Baute minimiert werden. Eine andere Möglichkeit ist auf ein flexibles System auszuweichen (Abschnitt 8.5), das sich den Bewegungen im Untergrund anpassen kann.

8.2 Verankerungen

8.2.1 Verankerungskonzept

Die Wahl eines Verankerungssystems im Permafrost wird durch die Tragfähigkeit des Untergrunds, die Grösse der einzuleitenden Kräfte und durch das potenzielle Risiko beim Versagen der Verankerung bestimmt. Des Weiteren ist die Gebrauchstauglichkeit der Baute ein wichtiger Faktor bei der Wahl der Verankerung. In der Nutzungsvereinbarung, Kapitel 3, werden die Nutzungsanforderungen einer Baute festgelegt. Diese dienen neben der Projektbasis und der Baugrunduntersuchung als Grundlagen für die Ausarbeitung eines Verankerungskonzepts. Im Verankerungskonzept sollten ähnliche Überlegungen wie für das Fundationskonzept angestellt werden (basierend auf Kap. 2.3):

- Robuste, verlässliche Verankerung mit eingeplanten Redundanzen und Reservestandorte gemäss Norm SIA 267
- Flexible, überprüfbare Verankerung, die an effektive Verhältnisse angepasst werden kann
- Verankerungskörper (Verankerungslänge) ist im «ungestörten» Permafrost auszuführen
- Wahl eines langfristigen, charakteristischen Tragwiderstands einer Verankerung während der Nutzungsdauer einer Baute (keine Nutzungseinschränkungen, Gebrauchstauglichkeit)

Grosse Krafteinführungen ins Gebirge, die bei einem Versagen ein hohes Schadenpotenzial aufweisen, sollten mit einem Verankerungsstollen oder -schacht ausgeführt und überwacht werden (Abb. 45). Durch die Zugänglichkeit beider Ankerenden (Köpfe) wird die Kontrollierbar- und Ersetzbarkeit gewährleistet und dadurch die Sicherheit erhöht. Auf die

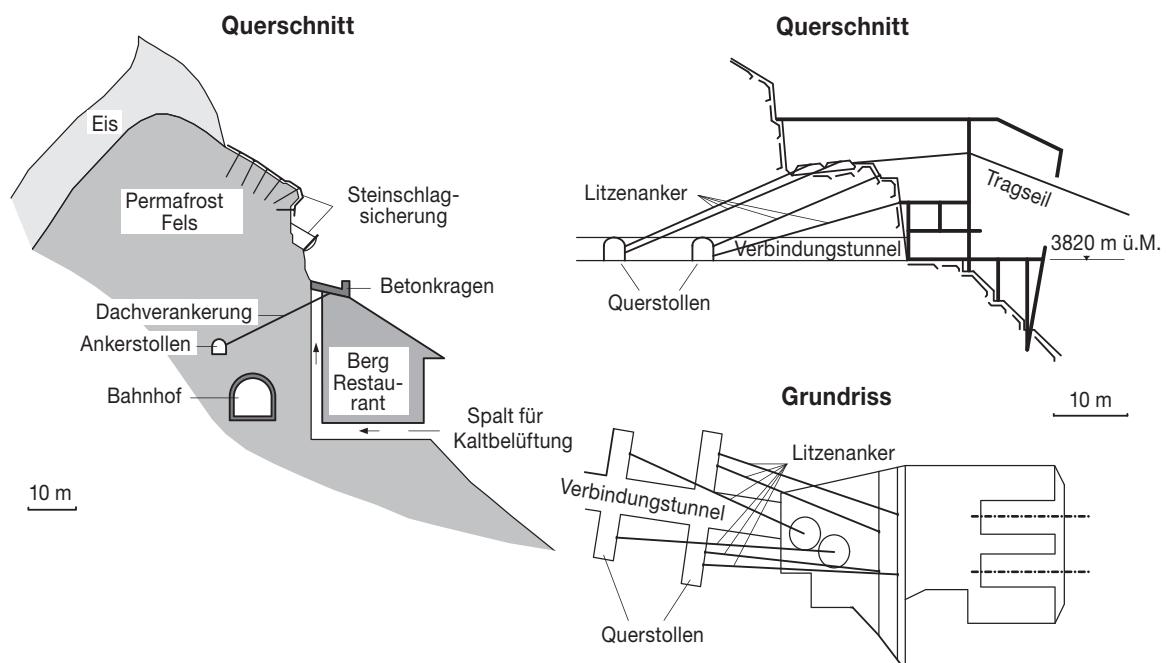


Abb. 45: Schematische Darstellung von zwei Rückverankerungen aus einem Stollen. (Links) Jungfraujoch, Bergrestaurant (angepasst nach KEUSEN und AMIGUET 1987). (Rechts) Kleines Matterhorn, Seilbahnbergstation (angepasst nach KEUSEN und HAEBERLI 1983).

Rückverankerung von grossen Lasten durch eine reine Reibungsverbindung sollte im Permafrost nach Möglichkeit verzichtet werden. Kleinere Lasten mit geringerem Schadenpotenzial können konventionell rückverankert werden.

8.2.2 Felsanker und Vernagelung

Verankerungen sind gebohrte Tragelemente, die hauptsächlich auf Zug beansprucht werden. Im Permafrost wird wie im ungefrorenen Untergrund zwischen gespannten Felsankern (Stahllitzen oder Stäbe) und meist ungespannten Vernagelungen oder Verdübelungen (profilierte Stahlstangen) unterschieden. Die Krafteinleitung in den Untergrund basiert auf einer Reibungsverbindung, die empfindlich auf Veränderungen im Untergrund reagiert. Eine Erwärmung des Untergrunds kann eine Scherfestigkeitsreduktion bewirken und somit den äusseren Tragwiderstand einer bestehenden Verankerung herabsetzen, sowie Querkkräfte in Verankerungen entstehen lassen. Dies kann zu einem Tragfähigkeitsverlust der Verankerung führen, und Deformationen oder ein Versagen des Tragwerks zur Folge haben. Bei der Bemessung einer Verankerung muss der charakteristische äussere Tragwiderstand deshalb so gewählt werden, dass dieser über die in der Nutzungsvereinbarung gewählte Nutzungsdauer einer Baute bestehen bleibt.

Eine erfolgreiche Ausführung von Verankerungen setzt Erfahrung und die richtige Ausrüstung voraus. Injektionsverankerungen sollten an ein und demselben Tag gebohrt oder nachgebohrt, versetzt und injiziert werden. Damit kann ein guter Verbund mit dem Untergrund sichergestellt und Eisbildung zwischen dem Verankerungskörper und der Bohrlochwand verhindert werden. Ein weiterer Ansatz ist die abgeteufte Bohrlöcher zu beheizen (Heizschlangen), so dass bei guter Witterung mehrere Anker am selben Tag versetzt und injiziert werden können. Der Ankermörtel muss vorgewärmt und den Bohrlochtemperaturen angepasst injiziert werden. Nachverpressungen in einem zweiten Injektionssystem sind technisch schwierig ausführbar. Dies muss bei der Wahl des Verankerungssystems berücksichtigt werden.

→ Die Verankerungen sind gemäss Norm SIA 267, Kapitel 10 und 11 zu erstellen.

8.2.3 Bohrtechnik

Die Ausführung von Bohrarbeiten im Permafrost ist herausfordernd, insbesondere wenn in eisreichem Lockergestein gebohrt wird. Werden die Bohrungen durch einen Imlochhammer mit Luftspülung ausgeführt, mischt sich das Bohrgut zusammen mit dem schmelzenden Eis zu einer zähen Masse. Dies kann den Bohrfortschritt verringern oder den Bohrkopf blockieren. Die Lafette muss deshalb häufig zurückgezogen und das Bohrloch ausgeblasen werden. Sehr eisreiche Untergrundmaterialien stellen die ungünstigsten Verhältnisse zum Bohren mit einem Imlochhammer dar. Werden solche Verhältnisse angetroffen, muss der Bohrkopf durch einen Kernbohrer ersetzt werden.

Um eine bessere Stabilität des Bohrlochs im eisarmen Lockergestein oder in der Auftauschicht zu gewährleisten, kann eine Bohrlochkonsolidierung oder eine Verrohrung von Vorteil sein. Wird eine Verrohrung ausgeführt, steigen die Installations- und Bohrkosten, da das Bohrsystem von den auftretenden Kräften abhängig ist.

8.2.4 Ankerzugversuche

Grundsätzlich sollten vor der Ausschreibung und Ankerwahl Ausziehversuche, unter vergleichbaren Bedingungen wie die geplante Verankerung, ausgeführt werden. Damit kann der charakteristische äussere Tragwiderstand einer Verankerung, die erforderliche Verankerungslänge, die geeignete Bohrmethode, die Injektionsart und der Mörtel bestimmt werden.

→ Die Ankerversuche resp. Spannproben sind gemäss der Norm SIA 267/1, Kapitel 6 und 7 auszuführen.

8.2.5 Überwachungs- und Unterhaltsplan Verankerungen

Beim Einsatz von Verankerungen muss in jedem Fall ein Überwachungs- und Unterhaltsplan erstellt, und die Verankerungen periodisch überprüft werden (Kap. 6). Für grössere Lasten wird eine permanente Überwachung mit Kraftmessdosen empfohlen. Es wird ebenfalls empfohlen Redundanzen einzuplanen. Diese erlauben Unterhaltsarbeiten ohne Sicherheitsreduktionen oder Betriebsunterbrüche zu erledigen.

8.3 Aushub

8.3.1 Aushubarbeiten

Aushubarbeiten in einem eishaltigen Baugrund erfolgen unter erschwerten Bedingungen. Im Lockergestein ist grundsätzlich mit schwer abbaufähigem Material, das heisst mit grossen Blöcken und Steinen in einer Eismatrix zu rechnen, so dass für die Aushubarbeiten allenfalls ein grösserer Bagger (evtl. mit schmaler Schaufel) oder ein Abbauhammer benötigt wird. Erfolgt der Aushub im Fels, muss je nach Klüftigkeit ein Abbauhammer oder ein Sprengaushub in Betracht gezogen werden. Wie diese Erschwernisse in der Ausschreibung zu berücksichtigen sind, wird in Kapitel 5.1.1 beschrieben.

Finden die Aushubarbeiten im Sommer statt, sollten die Böschungen mit Vlies abgedeckt werden. Dies reduziert die Erwärmung des Permafrosts durch Sonneneinstrahlung und hohe Lufttemperaturen und verhindert das Herausschmelzen von Blöcken und Instabilitäten durch Niederschläge. Das Vlies dient zudem als einfacher Schutz der Arbeiter vor Steinen, die sich aus der Böschung lösen. Werden die Aushubarbeiten im Winter bewerkstelligt, kann sich der Permafrost durch die tiefen Lufttemperaturen abkühlen.

8.3.2 Böschungen

Der Böschungswinkel von Baugruben im Permafrost Lockergestein wird insbesondere durch die Kornzusammensetzung und Lagerungsdichte und den Eis- und Wassergehalt bestimmt. Eisarme, grobkörnige Lockergesteine können wie in einem ungefrorenen Baugrund etwa 1:1 (vertikal : horizontal) geböscht werden, während eisreiche Lockergesteine steiler, etwa 3:2 bis 2:1, ausgeführt werden können. Je nach Steilheit und Höhe der Böschung sollten Bermen oder eine Baugrubensicherung eingeplant werden. Generell kann im Winter und für kurze Bauzeiten (< halbes Jahr, je nach Höhenlage und Exposition) steiler (kurzfristig auch vertikal) geböscht werden als im Sommer und für lange Bauzeiten (> 1 Jahr). Die tieferen Lufttemperaturen im Winter lassen keine Schmelzprozesse zu, so dass die Böschungen stabil bleiben.

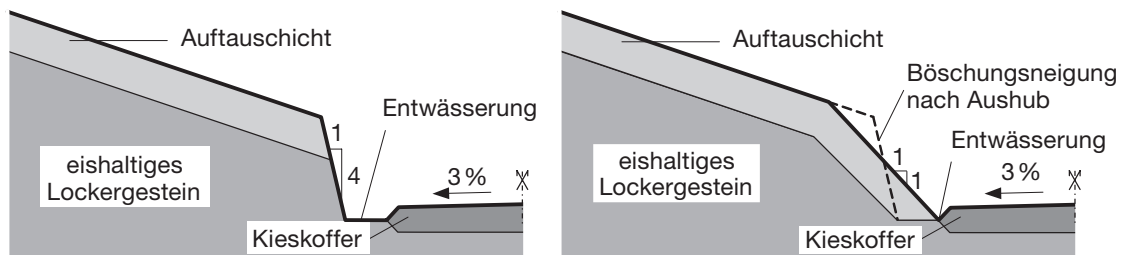


Abb. 46: Natürliche Entwicklung der Böschungsneigung eines Aushubs in einem eishaltigen Lockergestein mit Auftauschicht über einige Jahre. (Links) Querschnitt direkt nach Aushubausführung. (Rechts) Querschnitt einige Jahre danach (angepasst nach BERG und SMITH 1976).

In Abbildung 46 ist die natürliche Entwicklung der Böschungsgeometrie in einem eisreichen Lockergestein schematisch dargestellt. Der anfänglich steile Böschungswinkel wird durch schmelzendes Eis über die Zeit reduziert. Wichtig ist, genügend Platz am Fuss der Böschung einzuplanen, so dass durch Böschungsinstabilitäten die Nutzung zum Beispiel einer Strasse nicht beeinträchtigt wird.

Die Böschungswinkel sowie die Baugrubensicherung von Aushubarbeiten im Permafrost Fels richten sich nach der Kluftdichte und -richtung sowie dem Eisgehalt. Gesunder Fels mit wenig Klüften und günstiger Klufttrichtung kann steil und meist ohne Baugrubensicherung und Bermen geböschet werden. Stark zerklüfteter Fels mit ungünstigen Klufttrichtungen hingegen, erfordert je nach Steilheit und Höhe der Böschung Bermen und eine temporäre Baugrubensicherung wie Spritzbeton und Vernagelung.

- Vom Ingenieur sind die entsprechenden geotechnischen Nachweise gemäss Norm SIA 267 durchzuführen.

8.4 Baumaterialien

8.4.1 Zementgebundene Mörtel

Anker- oder Injektionsmörtel

Im Permafrost können herkömmliche Anker- oder Injektionsmörtel die geforderten Festigkeiten nicht erreichen. Durch die negativen Bodentemperaturen wird der Abbindeprozess verlangsamt oder verhindert, und gefrierendes Wasser kann Frostrisse im Verankerungskörper erzeugen. Dies führt dazu, dass die Verankerungen nur ungenügend belastet werden können. Im Permafrost sind deshalb spezielle Ankermörtel und Einbauverfahren zu verwenden, um die geforderten Druckfestigkeiten zu erreichen.

Das Bundesamt für Umwelt BAFU unterhält für den Lawinenverbau im Permafrost eine Typenliste von Spezialmörteln, Webseite: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung. Diese Mörtel müssen für alle Projekte im Lawinen- und Steinschlagverbau verwendet werden, die der Bund mitfinanziert. Je nach Fabrikat können die Mörtel bis zu einer Bodentemperatur von -4°C eingesetzt werden. Tiefere Bodentemperaturen sind im Permafrost im Bereich der Verankerungen eher selten.

Die Wahl eines Ankermörtels im Permafrost sollte auf Grund der vorherrschenden Bodentemperaturen im Bohrloch gefällt werden. Die Bodentemperatur ist am Bau vor dem Versetzen und Injizieren der Anker zu kontrollieren und zu dokumentieren. Ankermörtel für Bodentemperaturen unter 0 °C weisen eine etwas gröbere Körnung auf. Deshalb sollte der Durchmesser der verwendeten Injektionsschläuche > 15 mm gewählt werden, da es sonst zu Verstopfungen kommen kann. Dabei wird empfohlen, sich an die Angaben des Bindemittelherstellers zu halten.

Um den Abbindeprozess eines Mörtels im Permafrost-Untergrund zu aktivieren, muss das verwendete Anmachwasser vorgewärmt werden, so dass der fertig gemischte Mörtel eine Temperatur von etwa 20 °C erreicht. Die notwendige Wassertemperatur ist von der Temperatur des Trockenmörtels abhängig (Annahme Mischverhältnis Wasser / Trockenmörtel = 0,18) und in nachfolgender Tabelle 20 dargestellt.

Tab. 20: Notwendige Wassertemperaturen in Abhängigkeit der Temperatur des Trockenmörtels.

Ursprungstemperatur des Trockenmörtels	Wassertemperatur nach Erwärmung
0 °C	44 °C
4 °C	39 °C
8 °C	34 °C
12 °C	29 °C
16 °C	24 °C
20 °C	20 °C

Diese Erkenntnisse stammen aus der technischen Richtlinie «Lawinenverbau im Anbruchgebiet» (MARGRETH 2007) (Webseite: www.umwelt-schweiz.ch/uv-0704-d). Darin werden die Mörtelanwendungen im Permafrost ausführlich beschrieben.

Weitere Möglichkeiten, den Abbindeprozess des Mörtels zu beschleunigen, sind das Erwärmen des Bohrlochs mit Wasser oder Elektro-Heizschlangen. Vor dem Versetzen des Ankers und injizieren des Mörtels wird das Wasser ausgeblasen respektive die Heizschlange entfernt.

8.4.2 Beton

Abbindeprozess

Negative Luft- und Bodentemperaturen verlangsamen oder verhindern den Abbindeprozess von Beton. Dies kann dazu führen, dass die geforderten Betondruckfestigkeiten nicht erreicht werden. Aus diesem Grund ist die Vor- und Nachbearbeitung von Beton sehr wichtig und zusätzliche Massnahmen, wie nachfolgend aufgeführt, sind vorzusehen:

- Einlage einer druckfesten Wärmedämmung im Untergrund. Der Beton wird durch die Einlage einer druckfesten Wärmedämmung zwischen Untergrund und Betonkörper isoliert. Dies unterstützt einerseits das vollständige Abbinden, andererseits minimiert es den Eintrag von Abbindewärme in den Untergrund.
- Wärmen von Zuschlagstoffen und Anmachwasser. Vor dem Mischen des Betons werden die Zuschlagstoffe und das Anmachwasser erwärmt. Dies verhindert, dass der Frischbeton gefriert und beschleunigt gleichzeitig den Abbindeprozess. Dabei gilt es zu beachten, dass nach Norm SIA 262 die Temperatur des Frischbetons während des Einbringens +5 °C nicht unterschreiten darf.

- Schutz vor negativen Lufttemperaturen. Den Auswirkungen von negativen Lufttemperaturen kann durch Abdecken der Betonoberflächen mit Thermomatten oder dem Wärmen der Schalung entgegen gewirkt werden. Ein Austrocknen der Betonoberfläche sollte jedoch vermieden werden, da dies zu Schwindrissen führen kann.
 - Die Transportzeit von Beton auf die Baustelle (z.B. Lastwagen, Helikopter) muss berücksichtigt werden, so dass der Beton vor Ort verarbeitbar bleibt. Es empfiehlt sich, mit dem Betonieren nicht am frühen Morgen zu beginnen, da sich tiefe Lufttemperaturen negativ auf die Betonqualität auswirken.
- Beim Transport, Einbringen und Verdichten von Frischbeton sind die Angaben der Norm SIA 262 zu berücksichtigen (Ziffer 6.4.5).

Abbindewärme

Die Erhöhung des Zementgehalts, die Verwendung von Feinzement und verschiedener Zusatzmittel um den Abbindeprozess zu beschleunigen, bewirken eine erhöhte Abbindewärme. Diesem Dilemma zwischen erhöhtem Wärmeeintrag in den Untergrund und erhöhter Frühfestigkeit des Betons muss bei der Produktwahl sowie bei der Bemessung Rechnung getragen werden.

Portlandzement CEM I entwickelt 375–525 kJ Abbindewärme pro Kilogramm Zement, so genannte Hydrationswärme (Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke). Ein Kubikmeter Beton enthält etwa 325 kg Zement, so dass bei seiner Bindung etwa 120 000 –170 000 kJ Wärme anfällt. Um das Eis im Baugrund nicht zum Schmelzen zu bringen, ist es wichtig, Betonfundationen gegen den Untergrund thermisch zu trennen (Abschnitt 8.6). So kann der Wärmeeintrag und somit der Eisschwind minimiert werden. Um ein Kilogramm Eis zu schmelzen ist eine Energie von 333 kJ nötig.

Die Dauer des Abbindeprozesses ist von der Umgebungstemperatur abhängig. Tiefe Umgebungstemperaturen verlangsamen den Abbindeprozess, während hohe Umgebungstemperaturen eine beschleunigende Wirkung haben. Bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C ist nach 7 Tagen 50–75 % der Abbindewärme freigesetzt. Wird der Abbindeprozess vor der vollständigen Hydratation durch negative Umgebungstemperaturen gestoppt, kann nicht die ganze Abbindewärme freigesetzt werden (Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke). Dies führt zu Festigkeitseinbussen des Betons.

Eigenschaften

In der Regel ist Beton als «Beton nach Eigenschaften» zu verwenden (SN EN 206-1). Je nach Umgebung und Art des Angriffs, dem der Beton ausgesetzt ist, wird er in verschiedene Expositionsklassen eingeteilt (SN EN 206-1:2000). Für Betonbauteile von Bauten im Permafrost, die im direkten Kontakt zum Baugrund oder zur Aussenumgebung stehen, wird meist die Expositionsklasse XF, Gefügeschädigung des Betons bei Frosteinwirkung mit oder ohne Taumittel, gewählt. Diese Expositionsklasse berücksichtigt die Durchfeuchtung des Betons und die Frost-Tau-Einwirkungen.

Die gewählten Eigenschaften eines Betons beeinflussen die Festigkeit und somit die Bemessung eines Tragwerks. Diese Überlegungen haben in die Wahl des Tragwerkkonzepts einzufließen.

- Betonprüfungen haben generell gemäss Norm SIA 262/1 zu erfolgen. Um die Qualitätssicherung zu gewährleisten sind Frischbetonprüfungen von grossen Projekten zwingend, für kleinere Objekte jedoch nur schwer durchführbar.

8.4.3 Zusatz- und Injektionsmittel Mörtel / Beton

Abbindbeschleunigung

Verschiedenste Zusatz- oder Injektionsmittel werden verwendet, um das Abbindeverhalten und die Festigkeit eines zementgebundenen Mörtels oder Betons zu beeinflussen. Dabei wird meist ein höherer Zementgehalt (400 kg) eines hochwertigen, feinen Zements verwendet, der eine grosse Frühfestigkeit entwickelt. Vielfach kommt zusätzlich ein Abbindbeschleuniger zum Einsatz, welcher die erzeugte Abbindewärme nochmals erhöht. Dieser Wärmeeintrag in den Untergrund kann zu einer lokalen Permafrost-Degradation führen.

Schwindreduktion

Das Schwindreduktionsmittel bewirkt eine Volumenzunahme des Mörtels von 1–2 %. Damit kann dem Trocknungsschwinden des Mörtels entgegen gewirkt werden. Generell ist die minimale Rissarmierung gemäss Norm SIA 262 vorzusehen.

Fliessfähigkeit

Die Fliessfähigkeit eines Mörtels ist ein Indikator dafür, wie weit dieser in eine Kluft oder Felsspalte fließen kann. Sie wird durch das Ausbreit- oder Walzmass eines Mörtels gemessen, und durch Zusatzmittel wie ein Fliessmittel (Verflüssiger) oder ein thixotropes Mittel (Ansteifen ohne Scherbelastung) beeinflusst. Ein thixotroper Injektionsmörtel reduziert die benötigte Mörtelmenge, da das Verlaufen des Füllguts in Felsspalten oder Klüften verhindert wird.

Frostbeständigkeit

Die Frostsicherheit von Beton kann durch zwei unterschiedliche Ansätze erreicht werden. Der Erste sieht vor, den Beton durch einen niedrigen W / Z-Wert (Wasser- zu Zementanteil) anzufertigen. Dabei kann der Wasseranteil durch Beimischen eines Fliessmittels zusätzlich gesenkt werden. Im Zweiten wird die Frostsicherheit durch einen erhöhten Luftporengehalt gewährleistet. Dieser wird durch Beigeben eines Luftporenbildners von $\geq 3\%$ des Bindemittelgewichts erreicht. Der Luftporengehalt sollte bei Frischbeton zwischen 6–10 % liegen, um eine erhöhte Frostbeständigkeit zu erhalten. Die Mindestfestigkeit, die ein Beton erreichen muss, um ein einmaliges Durchfrieren schadlos zu überstehen, liegt erfahrungsgemäss bei etwa 10 N mm^{-2} . Diese so genannte Gefrierfestigkeit sollte so schnell als möglich erreicht werden.

→ Der Frostwiderstand wird nach der Norm SIA 262/1, Anhang C: Frost-Tausalzwiderstand geprüft.

Die Verwendung eines Frostschutzmittels bewirkt ein Beschleunigen des Abbindeprozesses um etwa 1 Stunde (Abschnitt 8.4.3). Um eine Frostbeständigkeit zu erreichen, müssen die oben beschriebenen Ansätze angewandt werden. Ein Frostschutzmittel kann keine Frostbeständigkeit garantieren, hilft jedoch, den Abbindeprozess zu beschleunigen und somit Frostschäden zu minimieren.

→ Für Zusatzmittel von Mörtel und Beton gelten generell die Normen SN EN 934-1 bis SN EN 934-6.

8.4.4 Frostsichere Materialien

Um die Einwirkungen aus dem Baugrund auf das Tragwerk durch Hebungen oder Setzungen zu minimieren, sollten frostsichere Verfüllmaterialien verwendet werden. Insbesondere das Rückfüllmaterial eines Aushubs, einer Ausgleichsschicht oder eines Materialaustauschs unter der Foundation sollte frostsicher ausgeführt werden. Ein gut abgestufter, sauberer Kies oder Sand (GW oder SW nach USCS, Unified Soil Classification System) mit einem Feinanteil ($< 0,02$ mm) von ≤ 3 Gewichtsprozenten gilt als froststabiler Baugrund. Liegt der Feinanteil über 3 Gewichtsprozent ist eine Frostbeständigkeitsprüfung vorzunehmen. Die Prüfung erfolgt durch aufwändige CBR-Versuche (CBR: California Bering Ratio), diese werden in der Norm SN 670 320 und SN 670 321 beschrieben. Eine einfache Siebanlage vor Ort kann helfen den zu hohen Feinanteil des anstehenden Materials heraus zu sieben.

- Die Klassierung eines Baugrunds bezüglich seiner Frostempfindlichkeit ist in der Norm SN 670 140b festgelegt. Die maximale Frosteindringtiefe ist generell gemäss SN 670 140b einzuhalten.

8.4.5 Geeignete Baumaterialien

Das Tragwerk von Bauten im Permafrost besteht in den meisten Fällen aus einer armierten Betonfundation und einer Oberkonstruktion aus Stahl, Holz, Stahlbeton oder Mauerwerk. Durch die flexible Bauweise eines Stahlbetons können Foundationen lokal kraftschlüssig mit dem Untergrund verbunden werden. Bei frostsicherer Ausführung und unter Beachtung der minimalen Bewehrungsüberdeckung, gemäss Norm SIA 262, ist ausserdem eine gute Witterungsbeständigkeit zu erwarten. Aus diesen Gründen ist Stahlbeton ein geeignetes Baumaterial um Bauten im Permafrost zu fundieren. Für die Oberkonstruktion haben sich verzinkte Stahlträger, Holz, Stahlbeton oder Mauerwerk aus Kalksand- und Blocksteinen bewährt.

Stützenfundamente mit geringen Auflasten (Skilift, Meteostationen) werden häufig mit so genannten Grundplattenfundamenten aus Stahl ausgeführt. Diese eignen sich insbesondere für Foundationen in eisreichem, kriechendem Untergrund wie Blockgletscher oder Gletscher, da sie mit wenig Aufwand wieder ausgerichtet werden können.

Abhängig von der Erschliessung und Erreichbarkeit einer Baute verteuern sich die Transportkosten von Baumaterialien. Durch ein optimiertes Tragwerk vermindert sich das Eigengewicht von Stahlbetonfundationen, Mauerwerk oder Stahlkonstruktionen, und die Transport- und Baukosten können gesenkt werden.

8.5 Flexible Systeme

Bewegliche Bau- und Korrektursysteme gewinnen vor allem im eisreichen und stark kriechenden Permafrost zunehmend an Bedeutung. Flexible, sich den Bewegungen des Untergrunds anpassende oder nachjustierbare Systeme verlängern die Lebensdauer und wurden bereits für verschiedene Infrastrukturen erfolgreich angewandt. Kriecht der Untergrund jedoch zu stark, sollte eine Standortverschiebung in Betracht gezogen werden, deshalb ist eine frühzeitige Prospektion wichtig.

8.5.1 Querverschiebbare Seilbahnstützen

Infrastrukturen wie Seilbahnstützen erlauben fallweise nur mässige Verschiebungen aus der Bahnachse, da ansonsten die sichere Seilführung nicht gewährleistet werden kann. Eine kleine differenzielle Setzung eines Stützenfundaments kann eine grosse Auslenkung am Stützenkopf zur Folge haben und Seilentgleisungen oder gar den Seilabwurf bewirken. Deshalb ziehen differenzielle Setzungen eines Fundaments oft bauliche Massnahmen (Unterfangung, Einlegen von Stahlplatten) mit sich. Kriechdeformationen oder Verschiebungen eines Fundaments quer zur Seilachse können hingegen durch querverschiebbare Seilbahnstützen nachjustiert werden. In einzelnen Skigebieten in Österreich werden solche Seilbahnstützen bereits standardmässig gebaut. Auf Grund der geologischen Gutachten kommen in Kriech- und Rutschhängen solche Konstruktionen zur Anwendung. Je nach den prognostizierten Verschiebemechanismen werden die Verschiebemöglichkeiten der Stützenfüsse in einer, zwei oder drei Richtungen gewählt.

In Abbildung 47 sind zwei Ausführungsvarianten von querverschiebbaren Seilbahnstützen festgehalten. Auf dem linken Bild sind verzinkte Stahlschienen 1) zu sehen, die in das Betonfundament eingelassen und mit der Armierung verbunden sind. Der Bereich der Nachjustierung ist durch die Stahlschienenlänge gegeben und liegt bei mehreren Zentimetern bis Dezimetern. Der Nachteil dieser Ausführungsvariante ist, dass der Korrosionsschutz (stehendes Wasser in der Stahlschiene) zwischen der Verbindung Stahlschiene / Armierung nur schwer kontrollierbar ist. Da die Verbindung innerhalb des Betonfundamentes liegt, kann diese nur mit grossem Aufwand kontrolliert werden.

In der Abbildung 47 ist auf dem Bild rechts eine etwas aufwändigere Variante zu sehen, bei welcher, während der Nachjustierung der Stütze der verzinkte Stahlträger 2), innerhalb des Stahlrahmens 3), auf einer Stahlplatte 4) verschoben wird. Die Vorteile gegenüber der Variante auf dem linken Bild sind, dass alle Bauteile ohne grossen Aufwand bezüglich des Korrosionsschutzes kontrolliert werden können, und dass der Bereich zur Nachjustierung viel grösser ist (Meterbereich). Auf der rechten Abbildung ist gut zu erkennen, in welche Richtung die Verschiebungen erwartet werden, steht doch der Stützenfuss links aussen, so dass die ganze Fundamentbreite nach rechts zur Nachjustierung genutzt werden kann.



Abb. 47: Zwei Ausführungsvarianten von querverschiebbaren Seilbahnstützen, (links) Stahlschienen, (rechts) Stahlplatten (Foto Bundesamt für Verkehr, BAV, Bern).

Die geschickte Standortwahl einer Seilbahnstütze bezieht, falls vorhanden, Hangdeformationsmessungen respektive die Abschätzung der Hauptdeformationsrichtung anhand der Geologie und Hangneigung mit ein. Ein neues Stützenfundament sollte aus der Seilbahnachse und entgegen der Hauptdeformationsrichtung erstellt werden. Dadurch werden die Lebensdauer verlängert und die Unterhaltskosten minimiert.

8.5.2 Drei Punkte Lagerung

Eine drei Punkte Lagerung stellt ein statisch bestimmtes System dar. Ein solches System erzeugt keine Schnittkraftumlagerungen, so dass keine zusätzlichen Beanspruchungen, die zu Deformationen, Rissen und im schlimmsten Fall zur Zerstörung des Tragwerks führen, entstehen können. Über drei Einzelfundamente werden die gesamten Eigen- und Auflasten der Infrastruktur als Punktlasten abgeleitet. Unterhalb dieser Einzelfundamente kommt es zu einer konzentrierten Lastabgabe (Abb. 48, links), die nur durch einen tragfähigen Baugrund aufgenommen werden können. Die Fundamente sind entsprechend zu bemessen, so dass die höhere Belastung aufgenommen werden kann. Es muss allenfalls eine Plattenfundation, Tiefenfundation oder eine tragfähigkeitsverbessernde Massnahme des Baugrunds ausgeführt werden (Abschnitt 8.1 oder 8.7). Auftretende Setzungen können durch Anheben des Tragwerks mit hydraulischen Pressen und dazwischen eingelegten Stahlplatten korrigiert werden (Abb. 48, rechts).

Eine weitere drei Punkte Lagerung ist in Abbildung 49 dargestellt. Das Tragwerk der Seilbahn Mittelstation besteht aus einem T-förmigen Betonbalken. Die zwei bergseitigen und das talseitige Lager werden jeweils auf zwei eigenständigen und abgetrennten Fundamentplatten gegründet. Alle drei Lager sind horizontal als Gleitlager ausgebildet, um die Verschiebung der gesamten Station zu ermöglichen. Im Betriebszustand werden nur die zwei bergseitigen Lager horizontal gehalten. Damit bleibt das talseitige Lager horizontal frei beweglich und ermöglicht so die unabhängige Bewegung der talseitigen Fundamentplatte. Die Verschiebung bzw. Hebung des Balkens erfolgt hydraulisch. Im entlasteten Zustand können die Lager entsprechend den eingetretenen Verschiebungen korrigiert werden (PHILLIPS *et al.* 2007).



Abb. 48: (Links) Punktlager einer Stahlkonstruktion auf einem Betoneinzelfundament, (rechts) Setzungskorrektur durch eine hydraulische Presse und Einlegen von Stahlplatten (Fotos Markus Walser, Ischgl).

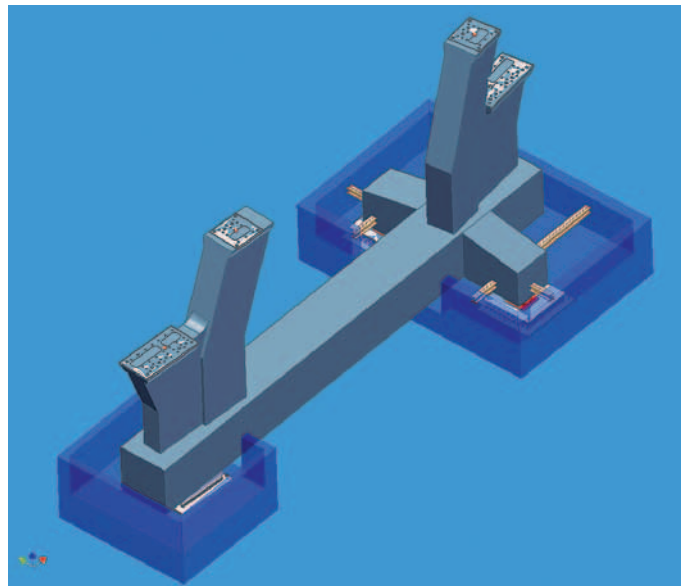


Abb. 49: Drei Punkte Lagerung einer Seilbahn Mittelstation mit Stationssteher, T-Balken und Fundamentkästen (© Leitner AG, PHILLIPS *et al.* 2007).

8.5.3 Lawinenverbauungen

Um den Kriechbewegungen einer im Permafrost verankerten Lawinenverbauung Rechnung zu tragen, dürfen die Verbauungen nicht starr mit dem Untergrund verbunden sein. Solchen Verhältnissen angepasste Verbaumassnahmen sind Schneenetze mit Pendelstützen und einer Grundplatte aus Stahl, gemäss Typenliste Lawinenverbauung BAFU (Webseite: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung). Diese bewegen sich mit der Kriechverformung des Untergrunds und können nach einer Geometrieänderung wieder neu ausgerichtet werden (Abb. 50).

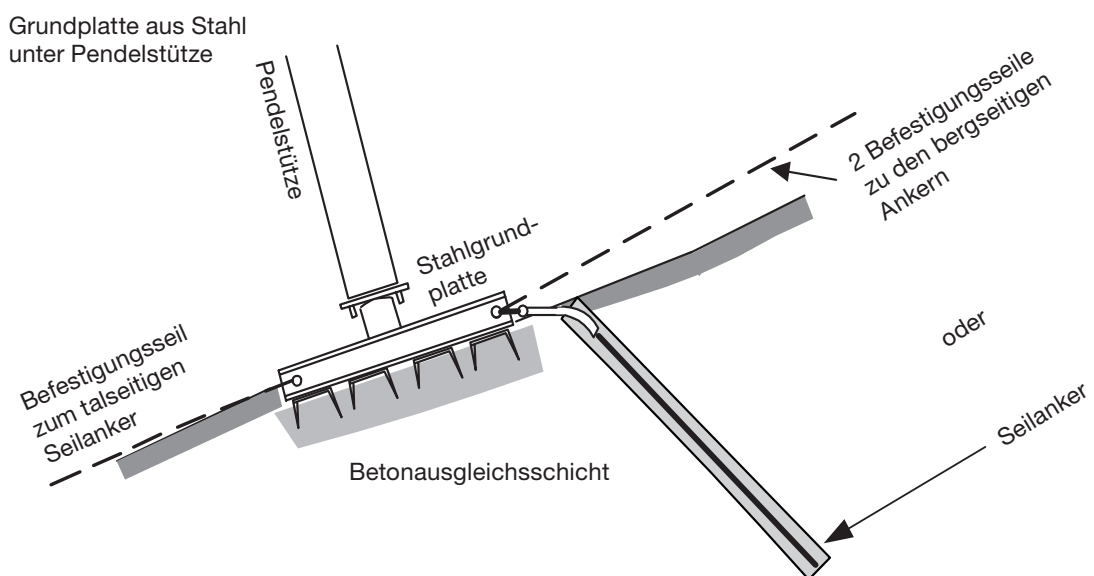


Abb. 50: Lawinenverbauung, Foundation unter Pendelstütze in kriechenden Permafrostverhältnissen (aus Richtlinie Lawinenverbau im Anbruchgebiet, MARGRETH 2007).

In einem stabilen, nicht kriechenden Permafrost-Baugrund (vorwiegend Fels) können sämtliche Verbauungsmassnahmen gemäss Typenliste Lawinenverbauung BAFU (Webseite: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung) ausgeführt werden. In der technischen Richtlinie Lawinenverbau im Anbruchgebiet, 2007, Kapitel 7, (Bezugsquelle: BAFU, Bundesamt für Umwelt, Dokumentation, Bern), sind verschiedene Kriechraten und die dazu möglichen Verbaumassnahmen zusammengestellt. Die Tragwerksanalyse, die Bemessung, die konstruktive Durchbildung, die Ausführungskontrollen und Überwachung von Lawinenverbauungen haben gemäss dieser Richtlinie zu erfolgen.

8.5.4 Wasserleitungen

Um Frostschäden vorzubeugen, sollten im Permafrost oder in der Auftauschicht verlegte Wasserleitungen mit frostsicherem Material ummantelt und fundiert werden (Abschnitt 8.4.4, Frostsichere Materialien). Die maximale Frosteindringtiefe ist generell gemäss SN 670 140b einzuhalten. Leitungsverbindungen sollten mit Dilatationsmöglichkeiten in Längsrichtung von mehreren Zentimetern ausgeführt werden um Bewegungen ausgleichen zu können. Schächte mit wärmegeprägten Deckeln in regelmässigen Abständen entlang der Leitungen verbessern die Kontrollierbarkeit.

Um Schäden durch Vereisung an den Wasserleitungen zu vermeiden, sollte warmes Abwasser schwallweise abgelassen, und Trinkwasser- oder Schneileitungen sollten nach Gebrauch entleert und mit trockener Luft ausgeblasen werden. In Abbildung 51 sind flexible Wasserleitungen dargestellt.



Abb. 51: Zwei Beispiele für flexible Wasserleitungen. (Links) Flexibles Zwischenstück zur Anwendung im Gebäudeinnern. (Rechts) Flexible Wasserleitung über dem Boden hängend.

8.6 Massnahmen zur Verminderung von Wärmeeintrag in den Untergrund

8.6.1 Wärmedämmung

Um den Wärmeeintrag durch Abbindewärme, beheizte Räumlichkeiten, Wasserleitungen, wärmeerzeugende Geräte oder Maschinen in den Permafrost Untergrund zu minimieren, sollte eine wärmedämmende Schicht zwischen dem entsprechenden Bauteil und dem Untergrund eingelegt werden (Abb. 52e). Die Festigkeitseigenschaften des Dämmstoffs richten sich nach der aufgetragenen Belastung bzw. Einwirkung auf den Boden. Vielfach wird ein extrudiertes Polystyrol oder ein Schaumglas (Platten oder Schotter) verwendet, da diese Dämmstoffe eine hohe Druckfestigkeit aufweisen. Auf expandiertem Polystyrol, Polyurethan, Stein- oder Glaswolle als Wärmedämmung unter einer Foundation sollte hingegen verzichtet werden, da diese nicht die gewünschten Druckfestigkeiten aufweisen, oder beim Kontakt mit Feuchtigkeit ihre wärmedämmenden Eigenschaften nachlassen.

Die Materialeigenschaften in Tabelle 21 sind als Mittelwerte zu verstehen. Die genauen Werte sind bei den Herstellern der verschiedenen Wärmedämmmaterialien zu beziehen.

Tab. 21: Wärmeleitfähigkeiten und Druckfestigkeiten von Wärmedämmmaterialien. *Dauerbelastung bei $\leq 2\%$ Stauchung nach 50 Jahren.

Wärmedämmmaterial	Wärmeleitfähigkeit [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Druckfestigkeit [kPa] (1 kPa = 1 kNm ⁻²)
Expandiertes Polystyrol, Hartschaumstoff	0,032–0,040	10–60*
Extrudiertes Polystyrol	0,032–0,040	60–250*
Schaumglas (Schotter / Platten)	0,045–0,090	200–680, je nach Marke
Kies	0,520	300–700, je nach Verdichtungsgrad
Luft	0,025	–

Eine Wärmedämmung kann den Wärmefluss nur reduzieren nicht aber verhindern. Selbst kleine Wärmeflüsse können langfristig zu Schäden führen. Die Wärmedämmung ist nachhaltig nur mittels aktiver oder passiver Kühlung möglich.

8.6.2 Kälteedämmung

Gewisse Bauten, wie Eisstadion, können eine Abkühlung des Untergrunds verursachen, die zu Permafrostbildung in tiefen Höhenlagen führen kann. In einem Eisstadion sollte der Kälteeintrag in den Untergrund minimiert werden. Um Eis zu produzieren wird die Eisplatte eines Eisstadions mit einem Kühlmittel auf etwa minus 10 °C gekühlt. Durch den Kälteeintrag über mehrere Jahre kann es zur Bildung von Permafrost im Untergrund kommen. Die Folgen sind Hebungen durch die Volumenzunahme von gefrierendem Wasser unter der Eisplatte und Nutzungsbeeinträchtigungen. Aus diesem Grund sollte unter der Eisplatte eines Eisstadions eine druckfeste Kälteedämmung über einer frostsicheren Kiesschicht verlegt werden. Die Dämmung dient einerseits dazu Kälteenergie einzusparen und andererseits den Kälteeintrag in den Untergrund zu minimieren. Die frostsichere Kiesschicht homogenisiert den Baugrund und unterbindet die Bildung von Permafrost und die daraus resultierenden Hebungen.

8.6.3 Bauliche Massnahmen

Luftzwischenraum / Hohlraum

Mit diversen baulichen Massnahmen kann der Permafrost Untergrund vor Erwärmung durch beheizte Räume, wärmeerzeugende Geräte oder Maschinen usw. geschützt werden. Ein Hohlraum zwischen warmer Infrastruktur und Untergrund oder Felswand hilft den Wärmeeintrag in den Permafrost zu minimieren (Abb. 56a, b). Eine freie Luftzirkulation erhöht diesen Effekt. Die Abschattung der Geländeoberfläche durch das Gebäude beeinflusst die Erhaltung des Permafrosts ebenfalls positiv.

Kellerräume

Kellerräume sollten wenn möglich unbeheizt sein und keine wärmeerzeugende Geräte enthalten (Abb. 56d). Solche Kellerräume können nur einer Nutzung (Beheizung, wärmeerzeugende Geräte) überführt werden, wenn entsprechende bauliche Massnahmen (Einbau Wärmedämmung) getroffen werden.

Abwasser

Abwasser aus Küche oder WC-Anlagen erzeugen in der Klärgrube Abwärme. Mit baulichen Massnahmen wie einer Wärmedämmung der Klärgrube oder durch den Einsatz einer wasserfreien Toilette (Trockentrenn-, Vakuumtoilette) kann der Wärmeeintrag in den Untergrund minimiert werden.

8.6.4 Aktive und passive Kühlsysteme

Mit Kühlsystemen wird die Temperatur im Untergrund beeinflusst. Das Ziel dabei ist, die Mächtigkeit der Auftauschicht stabil zu halten oder zu verringern, so dass die Tragfähigkeit des Baugrunds nicht abnimmt, respektive keine Hebungen entstehen. Aktive Kühlsysteme benötigen eine Energiezufuhr, während dem passive Kühlsysteme ohne zusätzliche Energie auskommen und keine mechanisch bewegten Teile enthalten. Die gebräuchlichsten Kühlsysteme sind in Tabelle 22 und Abbildung 52 mit der Funktionsweise und dem Anwendungsgebiet dargestellt. Kühlsysteme wie beispielsweise gekühlte Pfähle oder Thermosyphons (Abb. 53) werden bis heute im Gebirgspermafrost nur selten angewandt.

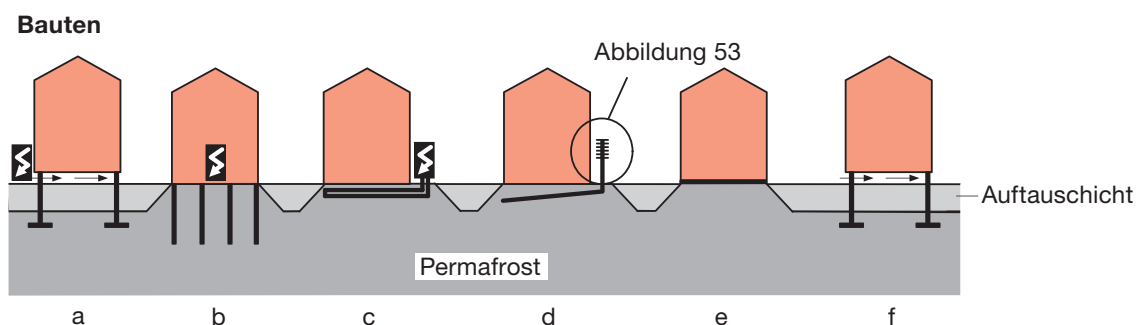


Abb. 52: Schematische Darstellung von aktiven und passiven Kühlsystemen. Aktive: a) Zwangslüftung, b) gekühlte Pfähle, c) künstliches Kühlen, Gefrieren mit Flüssigkeit. Passive: d) Thermosyphon, e) Wärmedämmung, f) Luftzwischenraum (angepasst nach ARENSON *et al.* 2009).

Tab. 22: Kühlsysteme mit Funktionsweise und Anwendungsbereichen.

Kühlsysteme aktiv	Funktionsweise	Anwendung
Zwangslüftung Abbildung 52 (a)	In einem Kieskoffer unter der Fundation werden Lüftungsrohre / -schlitze eingebaut und durch eine aktive Ventilation die warme Innenluft mit kalter Aussenluft getauscht.	Unter wärmegeprägten Flachfundationen, Strassen, Wasserleitungen. Variante: Zweite Wärmedämmschicht unter dem Kieskoffer.
Gekühlter Pfahl Abbildung 52 (b)	Eine am Pfahl befestigte Kühlflüssigkeitsleitung kühlt den Untergrund ab, oder konserviert den Permafrost. Variante: Zwangslüftung innerhalb des Pfahls.	An vorgefertigten Stahl- oder Betonpfählen als Tiefenfundationen. Variante: Pfahl aus Stahlmantelrohr als Tiefenfundation.
Künstliches Kühlen, Gefrieren Abbildung 52 (c)	Horizontales oder vertikales Leitungssystem mit Kühlflüssigkeit das den Untergrund abkühlt oder den Permafrost konserviert.	Unter Fundationen, Bodenplatten, Strassen, Wasserleitungen, die hohe Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit stellen.
Kühlsysteme passiv		
Thermosyphon, gekühlter Pfahl Abbildung 52 (d), Abbildung 53	Ein- oder Zweiphasen Flüssigkeits- / Gassystem in Rohren oder Pfählen, welche Wärme aus dem Untergrund durch einen Zirkulations- und Konvektionsprozess entfernen.	Unter wärmegeprägten Flachfundationen, Strassen, Wasserleitungen.
Wärmedämmung Abbildung 52 (e)	Wärmeeintrag in den Untergrund und aufsteigende Feuchtigkeit wird durch ein Material mit gasgefüllten Poren minimiert.	Unter Fundationen, Bodenplatten, Strassen, Wasserleitungen. Falls beheizte Räume darüber liegen, wird die Wärmedämmung direkt auf die Sauberkeitsschicht verlegt.
Luftzwischenraum Abbildung 52 (f)	Infrastruktur wird mind. 1 m über dem Untergrund gebaut. Luftzwischenraum verhindert Wärmeeintrag in den Untergrund und unterstützt die Erhaltung des Permafrosts.	Unter Fundationen, Bodenplatten, Wasserleitungen. Luftspalt ist auch zwischen Aussenwänden und Fels anwendbar.

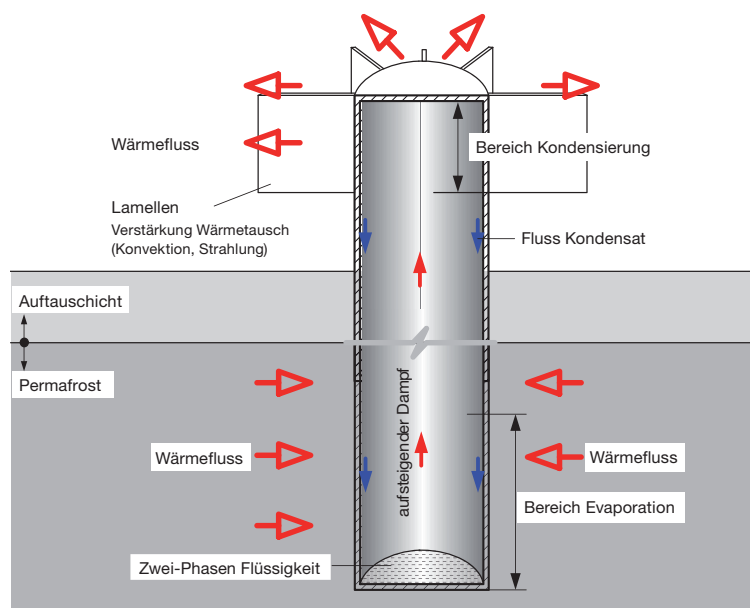


Abb. 53: Schematische Darstellung (Querschnitt) eines Zwei-Phasen Flüssigkeits-Thermosyphons (Rohrdurchmesser etwa 2–20 cm).

Es empfiehlt sich, die Wirkungsweise dieser Kühlsysteme vor der Ausführung abzuschätzen. In den meisten Fällen wird dazu ein thermodynamisches Modell benutzt, basierend auf einem Finite Element (FE) Programm (numerisches Modell). Damit lässt sich der Temperaturverlauf und die Wirkungsweise des Kühlsystems im Untergrund modellieren, was zu einer optimierten Bemessung führt.

8.6.5 Sammeln von Schneeschmelz- und Regenwasser

Der Eintrag von Wasser um ein Gebäude ist generell zu vermeiden, da Wasser Wärme in den Untergrund transportiert. Auf dem Dach einer Baute sollte anfallendes Schmelz- und Regenwasser gesammelt und kontrolliert in genügend grosser Entfernung vom Objekt wieder versickert werden, so dass keine Instabilitäten durch Permafrost-Degradation entstehen können. Vielerorts wird im Hochgebirge das Schmelz- und Regenwasser gesammelt und zu Trinkwasser aufbereitet.

8.6.6 Modifikation der Baugrundoberfläche

Vliesabdeckung

Das temporäre Abdecken der Baugrundoberfläche mit einem isolierenden, weissen Vlies minimiert den Wärmeeintrag in den Untergrund und hilft somit den Schmelzprozess von Schnee und Eis zu reduzieren. Das Vlies schützt den Untergrund vor direkter Sonneneinstrahlung und hohen Lufttemperaturen, so dass dieser weniger stark erwärmt wird und somit den Permafrost konserviert. Die Abdeckfolie sollte eine gewisse Reissfestigkeit (z.B. Gletscherschutzvlies $> 25 \text{ kN m}^{-2}$) aufweisen und wetterbeständig sein, so dass sie den verschiedenen Witterungseinflüssen und kleineren Steinschlägen standhalten kann.

Grobblockiges Material aufschütten

Das Aufschütten von grobblockigem Material auf der Bodenoberfläche kann den Permafrost konservieren. Kalte Luft sinkt zwischen den Blöcken auf den Untergrund ab, was einen kühlenden Effekt auf den Permafrost hat.

Wenn das verwendete Schüttmaterial Eis enthält, kann es durch Schmelzen des Eises zu einer Volumenverkleinerung kommen. Dies führt zu differenziellen Setzungen innerhalb des Schüttkörpers.

Veränderung der Schneedecke

Eine künstliche Veränderung der Schneedecke kann sich positiv auf die Erhaltung von Permafrost auswirken. In Pistennähe, wo Maschinen vorhanden sind, kann im Frühling durch eine Verdichtung der Schneedecke um eine Baute eine Langzeit-Kühlung erzielt werden, da verdichteter Schnee länger liegen bleibt. Andererseits können im Winter, durch den Abtrag der Schneedecke um eine Baute, die tiefen Lufttemperaturen den Untergrund auskühlen. Diese Effekte wirken sich positiv auf die Erhaltung von Permafrost aus.

8.7 Baugrund-Tragfähigkeitsverbesserung

8.7.1 Materialaustausch

Zur Verbesserung der Fundationsverhältnisse wird schlecht abgestuftes oder feinkörniges Lockergesteinsmaterial, sowie stark zerklüfteter, zerbrochener Fels bis auf eine Tiefe mit tragfähigem Permafrost-Baugrund ausgehoben und durch einen gut abgestuften, frostsicheren Kiessand ersetzt (Abschnitt 8.3, Abb. 54). Der modifizierte Untergrund hilft die Lasten gleichmässiger über einem inhomogenen Untergrund zu verteilen. Die Verdichtung des Materials sollte in Schichten mit einem erdfeuchten Wassergehalt ausgeführt werden (optimalen Wassergehalt (w_{opt}) durch Proctor Versuch zu ermitteln (SN 670 330). Die Schichtstärke richtet sich nach dem Grösstkorn und sollte 0,50 m nicht überschreiten. Das Einlegen von Netzbewehrungen oder Geotextilien, bewirkt eine Erhöhung der Tragfähigkeit. Durch das Einstreuen von Zement kommt es zur Bildung einer Sekundärstruktur. Diese bewirkt ebenfalls einen Anstieg der Tragfähigkeit des Baugrunds.

Die Prüfung der Tragfähigkeit der Auffüllung und des Materialersatzes vor Ort kann durch einen Plattenversuch oder mit einer γ -Sonde (Dichte) erfolgen.

8.7.2 Injektion und Vernagelung

Das Ziel der Injektions- und Vernagelungstechnik, welche insbesondere im zerklüfteten Fels angewandt wird, ist eine Verbesserung der Gesamtstabilität und Tragfähigkeit des Baugrunds. Nach dem Abteufen eines vertikalen Bohrlochs wird darin meist eine Stange (Gewindestange) oder ein Mantelrohr aus Stahl versetzt (Mikropfahl, Abb. 55). Durch Injektionsschläuche wird in das Bohrloch eine Zementsuspension injiziert und die Klüfte und Hohlräume in der nähere Umgebung werden verfüllt. Dabei kann durch die Fliesseigenschaften des Mörtels (Abschnitt 8.4) oder durch Netzstrümpfe die Ausbreitung in eine Kluft begrenzt und dadurch die Mörtelmenge reduziert werden. Die Reduktion der Mörtelmenge minimiert ebenfalls den Wärmeeintrag in den Untergrund, der durch das Abbinden des Mörtels entsteht. Durch das Verfüllen der Klüfte und Spalten mit Injektionsmörtel werden wieder homogenere Fundationsverhältnisse hergestellt. Die Stahlstangen oder Mantelrohre bewirken eine Verdübelung des Baugrunds und sind in den entsprechenden geotechnischen Nachweisen zu berücksichtigen.

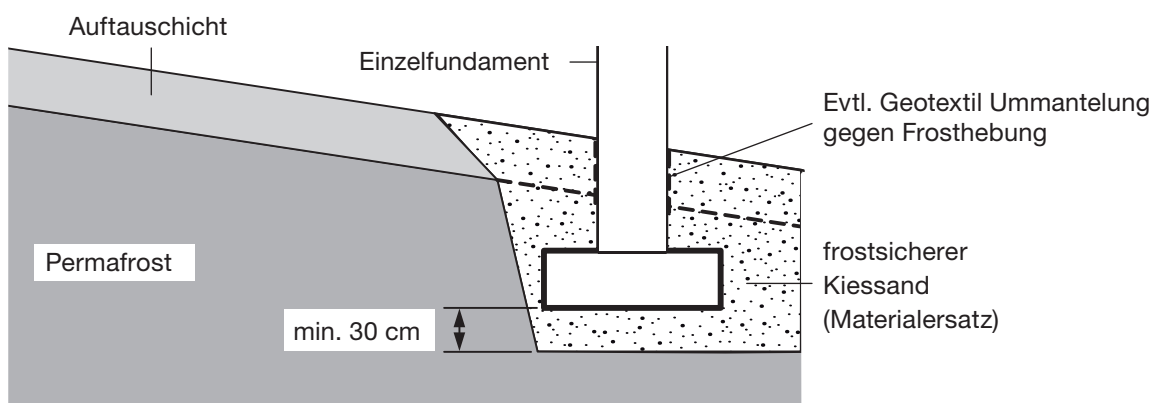


Abb. 54: Schematischer Querschnitt durch einen Permafrost-Baugrund mit Materialaustausch unter dem Einzelfundament zur Verbesserung der Fundationsverhältnisse.

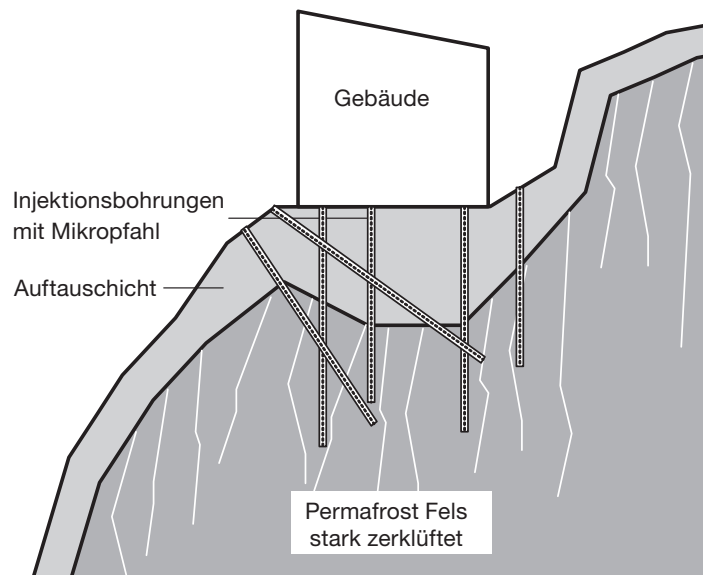


Abb. 55: Schematischer Querschnitt durch einen stark zerklüfteten Permafrost Fels mit Injektionsbohrungen und Mikropfählen zur Verbesserung der Gesamtstabilität und Tragfähigkeit des Baugrunds.

Dieselbe Technik wird auch bei horizontalen oder geneigten Bohrungen angewandt. Die Gewindestangen oder Mantelrohre aus Stahl werden in diesem Zusammenhang Felsnägel genannt. Wirkungsweise und Ziel dieser Anwendung der Injektionstechnik bleiben jedoch die selben (Abb. 55).

8.7.3 Drainage

Das Erstellen einer funktionsfähigen Drainageleitung im Permafrost ist schwierig, da die Leitungen durch Vereisung schnell ihre Wirkung verlieren können. Mit Spülstützen kann sichergestellt werden, dass Drainageleitungen kontrolliert werden können. Eine Drainagebohrung kann kurz- bis mittelfristig den Wasser- und Staudruck lokal minimieren, und die Tragfähigkeit und Stabilität eines Baugrunds verbessern.

8.7.4 Permafrost auftauende Bauverfahren

Um die Tragfähigkeit des Baugrunds zu verbessern oder zu homogenisieren kann der Permafrost aufgetaut werden. Diese so genannten Permafrost auftauenden Bauverfahren sollten jedoch nur angewandt werden, wenn der Permafrost fleckenhaft vorhanden ist und nur geringe Eismengen enthält. Je nach verfügbarer Zeit, kann das Auftauen durch verschiedene Methoden geschehen. Die einfachste dieser Methoden ist die Nutzung der Sonneneinstrahlung und hoher Lufttemperaturen in einer offenen Baugrube. Diese Methode benötigt jedoch viel Zeit. Erfahrungen aus Alaska und Russland zeigen, dass dort, nachdem die Vegetationsschicht entfernt wurde, über einen Sommer etwa 1–4 m tief aufgetaut werden kann (ESCH 2004, TSYTOVICH 1975). Die Werte der Tautiefe sind ortsabhängig und müssen deshalb im Gebirgspermafrost durch Untersuchungen bestätigt werden. Generell ist jedoch von einer geringeren Tautiefe auszugehen da tiefere Lufttemperaturen vorherrschen.

Bohrlöcher abzuteufen und durch diese Wärme in den Untergrund zu transportieren, ist eine schnellere Methode um den Permafrost aufzutauen. Die Bohrlöcher werden je nach Eigenschaften des Untergrunds (z.B. Bodentemperatur, Eisgehalt) in einem Raster ausgeführt. Der Wärmeeintrag in den Untergrund kann durch warmes Wasser, Dampf oder heiße Luft, elektrische Heizschlangen oder Stahlnadeln mit integrierter Heizspirale erfolgen. Abhängig von den am Standort vorhandenen Mitteln, kann die eine oder andere Variante effizienter sein um den Baugrund aufzutauen.

8.7.5 Permafrost erhaltende Bauverfahren

Ein Permafrost erhaltendes Bauverfahren hat zum Ziel, die Mächtigkeit der Auftauschicht und die Permafrosttemperatur durch ein Bauvorhaben nicht zu verändern. Dadurch können Probleme an Bauten, die aus wechselnden Baugrundbedingungen resultieren, wie Deformationen und Instabilitäten, verkleinert werden. Das Einbinden der tragenden Elemente und Bauteile in den «ungestörten» Permafrostkörper hilft ebenfalls die Verschiebungen von Bauten zu minimieren. Die Erhaltung des Permafrosts kann mit Massnahmen, die den Wärmeeintrag in den Untergrund verhindern oder mit Massnahmen die den Untergrund aktiv kühlen geschehen. Die verschiedenen Massnahmen sind im Abschnitt 8.6 und in Tabelle 22 detailliert beschrieben. In Abbildung 56 sind verschiedene Permafrost erhaltende Bauverfahren schematisch dargestellt. Eine Kombination der verschiedenen Bauverfahren ist ebenfalls möglich.

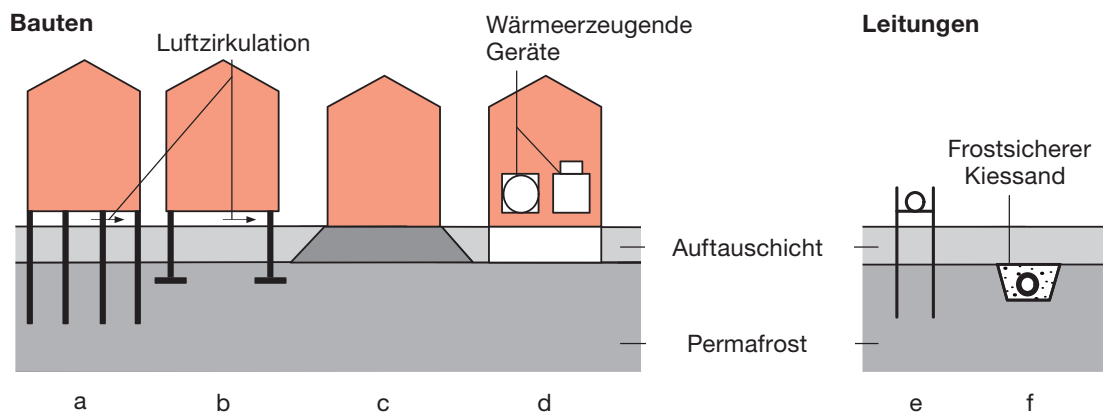


Abb. 56: Schematische Darstellung verschiedener Permafrost erhaltender Bauverfahren. Die Baute wird a) erhöht durch Pfähle, b) erhöht durch Einzelfundamenten, c) auf Schüttung fundiert (Materialersatz), d) unterkellert (ungenutzter, kalter Keller). Die Leitung wird e) erhöht durch Pfähle, f) vergraben und wärme-gedämmt (angepasst nach ARENSON *et al.* 2009).

8.8 Stollen und Tunnel

8.8.1 Eisarmer, standfester Fels

Im gesunden, eisarmen Fels mit wenig eisgefüllten Klüften, kann der Ausbruch und Ausbau von Stollen und Tunnel wie im ungefrorenen Fels ausgeführt werden. Den Auswirkungen der negativen Luft- und Felstemperaturen muss jedoch trotzdem während aller Projektphasen entsprechend Rechnung getragen werden. Um den Permafrost zu erhalten, sollte die durchschnittliche, jährliche Lufttemperatur im Stollen oder Tunnel unter 0 °C gehalten werden. Dies kann mit einem aktiven Kühlsystem, wie einer Zwangslüftung, erreicht werden (Abschnitt 8.6). Das Sprengen von eishaltigem Fels und Lockergestein sollte in der Ausschreibung berücksichtigt werden, da im gefrorenen Baugrund mehr Sprengstoff benötigt wird als im ungefrorenen Baugrund und dadurch höhere Kosten anfallen.

8.8.2 Eisreicher, nicht standfester Fels und Lockergestein

Im stark zerklüfteten, eisreichen Fels und Lockergestein, mit warmem oder auftauendem Eis ($> -2\text{ °C}$), ist der Ausbruch und Ausbau von Stollen und Tunnel problematisch. Der Ausbruch, die Ausbruchsicherung und der Ausbau kann je nach Standfestigkeit des anstehenden Materials, mit der eines ungefrorenen Lockergesteins verglichen werden. Je nach First-, Ortsbruststabilität und Wasserdruck kann ein Schildmaschinen- oder maschinenunterstützter Vortrieb mit einem wasserdichten Ausbau zur Anwendung kommen. Kleine, schlecht zugängliche Stollen und Tunnel können mit einem Sprengvortrieb und einer «Marciavanti» Ausbruchsicherung ausgebrochen werden. Diese Methode zeichnet sich durch eine grosse Flexibilität aus und es sind keine grossen Baumaschinen für den Vortrieb notwendig.

Fazit

Im Kapitel 8 sind die technischen Lösungsmöglichkeiten für Bauten im Permafrost während der Ausführung oder Sanierung zusammen gestellt. Nachfolgend sind die wichtigsten Fragestellungen und Lösungen in Kürze aufgelistet:

Foundationen:

- Fragestellung: Tragfähigkeit instabiler Baugrund
- Lösungen: Einzel- oder Streifenfundamente für gut tragfähigen Baugrund (Fels), Platten- oder Tiefenfundation für nicht tragfähige Auftauschicht und sehr grosse Lasten, steife Bauweise

Verankerungen:

- Fragestellung: Ausführung und Sicherheit von Verankerungen in veränderlichem Baugrund
- Lösungen: Ausführung erfordert Erfahrung; Verankerungstollen oder -Schacht für grosse Lasten mit hohem Schadenpotenzial; Reibungsverankerung für kleinere Lasten mit geringem Schadenpotenzial

Aushub:

- Fragestellung: Im Lockergestein erschwerter Aushub der Block-, Gesteins- / Eismatrix
- Lösungen: Aushub mit grösserem Bagger, Abbauhammer oder Sprengungen
- Fragestellung: Im Fels je nach Klüftigkeit erschwerter Aushub, Sprengen eishaltiger Böden
- Lösungen: Aushub mit Abbauhammer oder Sprengaushub (erhöhte Sprengstoffmenge)

Baumaterialien:

- Fragestellung: Verzögertes Abbinden von zementgebundenen Baumaterialien in der Kälte; Hydratationswärme
- Lösungen: Abbindeprozess von Mörtel und Beton durch Zusatzstoffe beschleunigen, Erwärmung Anmachwasser, Verwendung von Spezialmörtel; Abbindewärme in Bemessung und Produktwahl berücksichtigen
- Fragestellung: Einwirkungen auf das Tragwerk durch Hebungen oder Setzungen
- Lösung: Für Rückfüllarbeiten und Materialaustausch frostbeständiges Material verwenden

Flexible Systeme:

- Fragestellung: Bauen im eisreichen und stark kriechenden Permafrost-Baugrund
- Lösungen: Querverschiebbare Seilbahnstützen; Drei Punkte Lagerung, keine Schnittkraftumlagerung, Deformationskorrekturen möglich; Lawinenverbauung, Schneenetze mit schwimmender Foundation und Pendelstützen auf kriechendem Permafrost

Massnahmen zur Verminderung des Wärmeeintrags in den Untergrund:

- Fragestellung: Unerwünschter Wärmeeintrag in den Untergrund
- Lösungen: Druckfeste Wärmedämmung zwischen warmer Infrastruktur und kaltem Baugrund; Bauliche Massnahmen wie Lufthohlraum, ungeheizte Kellerräume; Aktive und passive Kühlsysteme; Modifikation der Bodenoberfläche wie Vliesabdeckung, Veränderung der Schneedecke, um Permafrost zu erhalten

Baugrundtragfähigkeitsverbesserung:

- Fragestellung: Verminderte Tragfähigkeit von Boden und Fels
- Lösungen: Homogenisierung des Baugrunds durch Materialaustausch; Mörtelinjektion in zerklüfteten Fels

Stollen und Tunnel:

- Fragestellung: Erstellen von Tunnels und Stollen im eishaltigen Permafrost
- Lösung: Im eisarmen, standfesten Fels Ausbruch und Ausbau von Stollen und Tunnel wie im ungefrorenen Fels
- Lösungen: Im eisreichen, nicht standfesten Fels und Lockergestein Ausbruch mit Schildmaschinen- oder maschinenunterstütztem Vortrieb mit einem wasserdichten Ausbau; Für kleine, schlecht zugängliche Stollen und Tunnel Sprengvortrieb mit einer Marciavanti Ausbruchssicherung

Anhänge

- A Hinweiskarte Permafrost, BAFU Bundesamt für Umwelt, 2005
- B Beispiel eines Kontrollplans oder eines Überwachungs- / Unterhaltplans
- C Grafische Definition der Frost- und Auftauindices
- D Literaturverzeichnis Bauen im Permafrost
- E Quellenverzeichnis Bauen im Permafrost

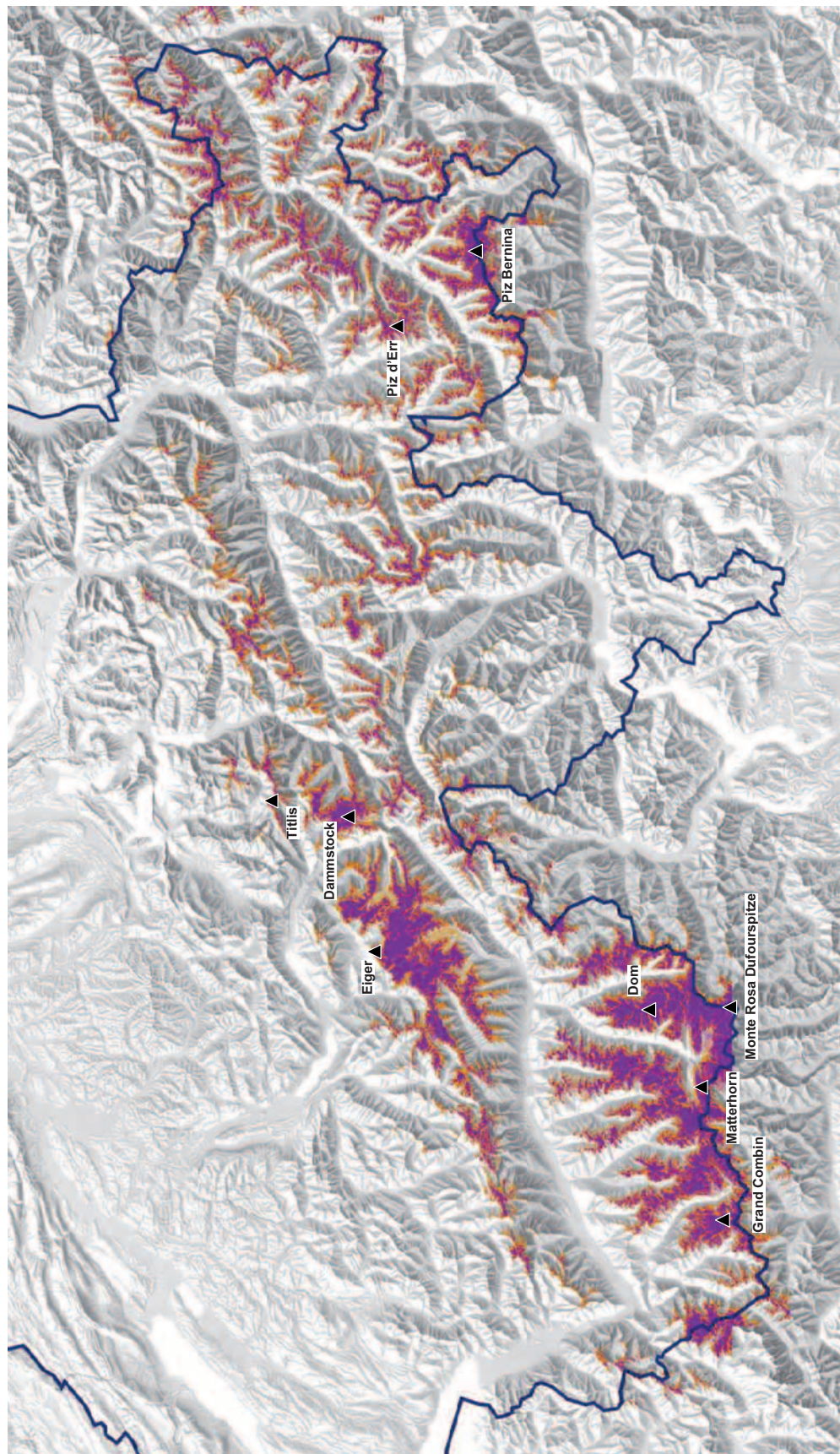
Anhang A

Hinweiskarte Permafrost Schweiz

Hinweiskarte Permafrost Schweiz
Potentielle Permafrostverbreitung aufgrund von Modellierungen mit dem DHM25 (BAFU 7/06)

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Legende:



Permafrost lokal möglich



Permafrost flächenhaft wahrscheinlich

Anhang B

Beispiel eines Kontrollplans oder eines Überwachungs- / Unterhaltplans (Auszug)

Objektbezeichnung: Ort: Beschreibung:									
Gegenstand der Kontrolle / Bauteil	zu prüfende Eigenschaft	Überwachungs-system	Messfrequenz	Grenzwert / Toleranz	Gemessener / erreichter Wert	Datum	Verantwort-licher für Kontrolle / Daten	Zuständig-keiten, Infor-mationsfluss / Daten	Aufzeich-nung
5 Realisierung (Baugrube)									
Böschungen	Zustandsbeurteilung, Standfestigkeit, sichtbare Eislinsen, Böschungswinkel, Wasseraustritte, Abdeckung usw.	Visuelle Überwachung	täglich / wöchentlich					Bauleitung	Messprotokoll
		Geodätische Vermessung	wöchentlich / monatlich	10 mm / Woche				Bauleitung	Messprotokoll
Baugrubensicherung	Position Anker- / Nagelkopf	Bohrlochinklinometer, Inkrex, Extensometer	wöchentlich / monatlich					Bauleitung	Messprotokoll
Baugrubensohle	Aufnahme Geologie, Homogenität, Klüfte, sichtbares Eis, vorhandene Bodenpressung, Bodentemperatur (Lastplatte), Thermometer	Visuelle Überwachung, Kraftmessdose (Lastplatte), Thermometer	einmalig					Bauleitung	Messprotokoll
6 Nutzung und Erhaltung									
Stützenfundament, Gebäude	Verschiebungen in Höhe und Lage (Oberfläche)	geodätische Vermessungen	1 Mal / Jahr	10 mm / Jahr				Ingenieur / Geologe	Messprotokoll
	Verschiebung Baugrund	Bohrlochinklinometer, Inkrex, Bodentemperatur							
Verankerung	Ankerkraft	Kraftmessdose	monatlich bis 1 Mal / Jahr	Abnahme Ankerkraft > 10 % / Jahr				Ingenieur / Geologe	Messprotokoll

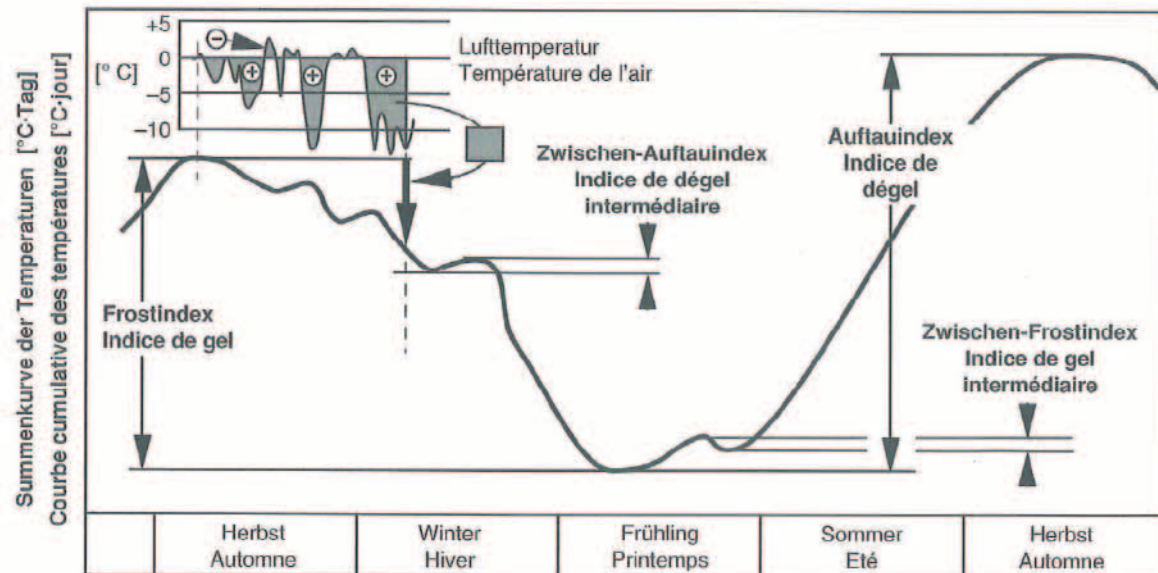
Kontrollplan

Überwachungs- / Unterhaltsplan

Anhang C

Grafische Definition der Frost- und Auftauindices

Nach der Norm SN 670 140b.



Anhang D

Literaturverzeichnis Bauen im Permafrost

- ANDERSLAND OB, LADANYI B. 2004. Frozen Ground Engineering. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- ARENSEN L. 2002. Unstable Alpine Permafrost: A potentially important natural hazard – Variation of geotechnical behavior with time and temperature. PhD Thesis, ETH, Zurich.
- ARENSEN L, PHILLIPS M, SPRINGMAN SM. 2009. Geotechnical Considerations and Technical Solutions for Infrastructure in Mountain Permafrost. In: MI Krugger and HP Stern (Editors), New Permafrost and Glacier Research.
- ARENSEN L, SPRINGMAN SM, SEGO DC. 2007. The Rheology of Frozen Soils. Applied Rheology, 17, 1: 12147–1 – 12147–14.
- BERG R, SMITH M. 1976. Observations along the Pipeline Haul Road between Livengood and the Yukon River, US Army CRREL.
- 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.
- DEERE DU. 1963. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. Rock Mech. Eng. Geol.: 18.
- DELALOYE R, LAMBIEL C, LUGON R, RAETZO H, STROZZI T. 2007. Typical ERS InSAR signature of slope movements in a periglacial mountain environment (Swiss Alps). ESA (SP-636).
- ESCH DC (Editor). 2004. Thermal analysis, construction and monitoring methods for frozen ground. Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 492 pp.
- GIORGI F, HURRELL JW, MARINUCCI MR. 1997. Elevation dependency of the surface climate change signal: a model study. Journal of Climate, 10: 288–296.
- HAEBERLI W. 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialettsch (Graubünden), Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zurich.
- HAEFELI R. 1954. Kriechprobleme im Boden, Schnee und Eis. Wasser- und Energiewirtschaft 3: 19.
- HARRIS C, DAVIES MCR, ETZELMÜLLER B. 2001. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. Permafrost and Periglacial Processes, 12: 145–156.
- HAUCK C, KNEISEL C. 2008. Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007. Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger: vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4)/deutsche Übersetzung hrsg. von ProClim – Forum for Climate and Global Change, ProClim-, Bern.
- JOHNSTON GH. 1981. Permafrost engineering design and construction. John Wiley & Sons, 540 pp.
- KÄÄB A. 2001. Digitale Fotogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Fotogrammetrie und Fernerkundung 10: 451–458.
- KEUSEN HR, AMIGUET JL. 1987. Die Neubauten auf dem Jungfrauoch. Geologie, Felseigenschaften, Permafrost. Schweizer Ingenieur und Architekt 30–31: 905–906.
- KEUSEN HR, HAEBERLI W. 1983. Site investigation and foundation design aspects of cable car construction in alpine permafrost at the «Chli Matterhorn», Wallis, Swiss Alps, Permafrost Fourth International Conference, pp. 601–604.
- KRUMMENACHER B, BUMANN D. 2004. Handbuch zur lokalen Abschätzung des Permafrostvorkommens im Alpenraum, Geotest.
- MARGRETH S. 2007. Defense structures in avalanche starting zones. Technical Guideline as an aid to enforcement. Environment in Practice. FOEN, SLF, Bern and Davos, 134 pp.
- MARINOS V, MARINOS P, HOEK E. 2005. The geological strength index: applications and limitations. Bull Geol Environ, 64: 55–65.
- MARTY C, PHILLIPS M, LEHNING M, WILHELM C, BAUDER A. 2009. Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden. Schweiz Z Forstwes 160 7: 201–209.
- NOETZLI J, GRUBER S. 2005. Alpiner Permafrost – ein Überblick. Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt (München) 70: 111–121.
- LUETSCHG M, LEHNING M, HAEBERLI W. 2008. A sensitivity study of factors influencing warm / thin permafrost in the Swiss Alps. Journal of Glaciology 54: 696–704.

- PERD. 1998. Climate change impacts on permafrost engineering design, Environment Canada.
- PHILLIPS M, LADNER F, MULLER M, SAMBETH U, SORG J, TEYSSEIRE P. 2007. Monitoring and reconstruction of a chairlift midway station in creeping permafrost terrain, Grächen, Swiss Alps. Cold Regions Science and Technology. A Selection of papers presented at the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, Wyoming, September 19–24, 2004, 47, 1–2: 32–42.
- RIEDER U, KEUSEN HR, AMIGUET JL. 1980. Geotechnische Probleme beim Bau der Luftseilbahn Trockener Steg-Klein Matterhorn. Schweizer Ingenieur und Architekt 18: 428–431.
- TSYTOVICH NA. 1975. The mechanics of frozen ground. Scripta Book Company; McGraw-Hill Book Company, 426 pp.
- VONDER MÜHLL D. 1993. Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Unterengadins, Eigenössische Technische Hochschule Zürich, Zurich, 222 pp.
- WATSON GH, SLUSARCHUK WA, ROWLEY RK. 1973. Determination of Some Frozen and Thawed Properties of Permafrost Soils. Canadian Geotechnical Journal, 10, 4: 592–606.
- WILLIAMS PJ. 1967. Properties and behaviour of freezing soils. Oslo.

Anhang E

Quellenverzeichnis Bauen im Permafrost

Schweizer Normen

- SN EN 206-1. Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, und Konformität.
SN EN 934-1 bis 6. Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel.
SN EN 1097-5. Bestimmung des Wassergehaltes von Gesteinskörnungen durch Ofentrocknung.

SN 670 005a. Identifikation der Lockergesteine: Feldmethode mit Klassifikation nach USCS.
SN 670 008a. Identifikation der Lockergesteine: Labormethode mit Klassifikation nach USCS.
SN 670 140b. Frost.
SN 670 320. CBR Versuche.
SN 670 321. Frosthebungsversuche.
SN 670 330. Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt (ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische); Proctorversuch.
SN 670 335. Bestimmung der Dichte des Bodens (Pyknometermethode, Tauchwägung).
SN 670 340. Bestimmung des Wassergehaltes von Böden.
SN 670 352. Bestimmung der einfachen Druckfestigkeit (Böden).
SN 670 903-5. Bestimmung des Wassergehaltes von Gesteinskörnungen durch Ofentrocknung.

- SIA 260, 2003. Grundlagen der Projektierung von Tragwerken.
SIA 261, 2003. Einwirkungen auf Tragwerke.
SIA 261/1, 2003. Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen.
SIA 262, 2003. Betonbau.
SIA 262/1, 2003. Betonbau – Ergänzende Festlegungen.
SIA 263, 2003. Stahlbau.
SIA 264, 2003. Stahl-Beton-Verbundbau.
SIA 265, 2003. Holzbau.
SIA 266, 2003. Mauerwerk.
SIA 267, 2003. Geotechnik.
SIA 267/1, 2003. Geotechnik – Ergänzende Festlegungen.
SIA 430 Empfehlung, 1993. Entsorgung von Bauabfällen bei Neubau-, Umbau- und Abbrucharbeiten.

Internationale Normen

- ASTM D 2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
ASTM D 2850. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
ASTM D 4767. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
ASTM D 5334-00. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
ASTM D 6032. Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core.

- DIN 18137-3. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch.

Fachbuch

- Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke.

Webseiten

- Bundesamt für Landestopographie swisstopo: www.swisstopo.ch
Bundesamt für Umwelt BAFU, Lawinenverbau im Anbruchgebiet: www.umwelt-schweiz.ch/uv-0704-d
Bundesamt für Umwelt BAFU, Typenliste von Spezialmörteln: www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung

Hochschulverlag AG an der ETH Zürich vdf: www.vdf.ethz.ch
International Permafrost Association IPA (2005). Multi-language glossary of permafrost and related
ground-ice terms: <http://nsidc.org/fgdc/glossary/>
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteoschweiz: www.meteoschweiz.ch
Permafrost Monitoring Switzerland Permos: www.permos.ch
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA: www.sia.ch
Universal Temperature Datenlogger: www.utl.ch
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos: www.slf.ch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

armasuisse



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Verkehr BAV