



# Costruire sul permafrost

Guida pratica

Christian Bommer, Marcia Phillips, Hans-Rudolf Keusen  
e Philipp Teyssaire



WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF



Istituto federale di ricerca per la foresta,  
la neve e il paesaggio WSL



# **Costruire sul permafrost**

**Guida pratica**

Christian Bommer, Marcia Phillips, Hans-Rudolf Keusen e Philipp Teyssiere

**Editore**

Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL,  
Birmensdorf, 2012

**Responsabile dell'edizione**

James Kirchner, Direttore del WSL

**Autori**

Christian Bommer, WSL Istituto federale per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos

Marcia Phillips, WSL Istituto federale per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos

Hans-Rudolf Keusen, Geotest AG, Zollikofen; Philipp Teyssiere, Teyssiere e Candolfi AG, Visp

**Committenti**

armasuisse Immobilier; Ufficio federale dei trasporti UFT

**Comitato direttivo**

Ulrich Appenzeller, armasuisse Immobilier, Berna; Toni Eder, Ufficio federale dei trasporti UFT, Berna; Michael Lehning, WSL Istituto federale per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos

**Gruppo di accompagnamento tecnico**

Christian Tellenbach, armasuisse Immobilien, Berna; Rolf Keiser, armasuisse Immobilien, Berna;

Urs Dietrich, Ufficio federale dei trasporti UFT, Berna; Charly Wuilloud, Servizio delle foreste e del paesaggio del Canton Vallese, Sion

**Partner del progetto**

Geotest AG; Club alpino svizzero; Canton Vallese

**Correzione della versione originale (in tedesco)**

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

**Revisione tecnica**

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

**Bibliografia**

Bommer, C.; Phillips, M.; Keusen, H.-R.; Teyssiere, P., 2012: Costruire sul permafrost: guida pratica. Birmensdorf, Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL. 128 p.

**Traduzione**

Dott.ssa Maristella La Manna, TTS Aosta, Italia

**Revisione**

Giorgio Valenti, geologo, Bellinzona

Dott. Ing. Antonino Raso, Aosta, Italia

Dott.ssa Chiara Raso, TTS Aosta, Italia

**Grafica, impaginazione**

Jacqueline Annen, WSL

**Foto in copertina**

Dall'alto verso il basso

Scavo di un terreno, ricco di ghiaccio, con un escavatore (foto SLF)

Costruzione di un rifugio alpino in alta montagna (foto SLF)

Reti da neve danneggiate da una caduta di massi su un pendio instabile e gelato in permanenza (foto SLF)

Fondazione continua di un rifugio alpino su terreno roccioso (foto architetti Ruch, Meiringen)

Pilone traslavile di un impianto a fune (foto SLF)

Foro di sondaggio nel permafrost dotato di strumenti di misura (foto SLF)

**Distribuzione**

Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL

WSL Shop

Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

Prezzo: 26 franchi, e-shop@wsl.ch, www.wsl.ch/eshop

Per scaricare il file PDF: [www.wsl.ch/publikationen/pdf/11661.pdf](http://www.wsl.ch/publikationen/pdf/11661.pdf)

ISBN 978-3-905621-50-1

© Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL, Birmensdorf, 2012

## Prefazione

Le stazioni e i piloni di impianti a fune, come le stazioni e gli edifici connessi agli impianti ferroviari, sono costruiti in modo stabile e sicuro. Anche in alta montagna, nella neve e nel ghiaccio, le loro fondazioni poggiano su roccia stabile. I turisti e i viaggiatori contano su questa sicurezza. Tuttavia, in questi ultimi anni questa certezza è stata minata dalla pubblicazione di numerosi comunicati stampa: «le montagne si sgretolano», «il permafrost si scioglie, le fondazioni diventano instabili». Il problema dello scioglimento del permafrost è nuovo, ma non lo è la costruzione sul permafrost. Finora sono state utilizzate varie tecniche di costruzione sulle Alpi; alcune si sono dimostrate valide, altre meno. Un fatto è certo: in questi ultimi anni sono stati rilevati sempre più danni su costruzioni già esistenti. Il surriscaldamento climatico e il disgelo di alcune aree di permafrost hanno ulteriormente accelerato questo processo. Ecco perché l’Ufficio federale dei trasporti (UFT), nella sua funzione di autorità di sorveglianza delle ferrovie e degli impianti a fune, si è posto alcune domande: la sicurezza degli impianti esistenti è ancora garantita? I gestori sono coscienti dei pericoli e dei rischi? Quali sono gli interventi di risanamento economicamente appropriati e finanziariamente vantaggiosi? Come garantire una costruzione adeguata dei nuovi impianti?

Da decenni, il Dipartimento federale della difesa, della protezione della popolazione e dello sport (DDPS) costruisce e cura la manutenzione di numerose opere in montagna. Ne fanno parte gli impianti a fune, le strade, le opere delle trasmissioni, di combattimento e di comando. L’efficienza di queste infrastrutture è di primaria importanza per permettere all’esercito di svolgere la sua missione. Anche per quanto riguarda gli impianti civili, il permafrost e la sua scomparsa impongono esigenze sempre più severe per la costruzione di tali opere. In quanto organo di gestione immobiliare del DDPS, armasuisse Immobilier si è chiesta come affrontare al meglio questo problema.

I buoni esempi di costruzioni non mancano. La ricerca è attiva e si acquisiscono sempre nuove nozioni fondamentali. Da qui è nata l’idea di tracciare un bilancio dello stato delle conoscenze attuali e di rendere accessibile una documentazione completa. Con questo intento, l’Ufficio federale dei trasporti (UFT), in collaborazione con armasuisse Immobilier, ha conferito un incarico al WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF. L’obiettivo era quello di riunire le esperienze acquisite nei progetti, determinare le lacune nelle conoscenze e colmarle attraverso una ricerca mirata, nonché identificare metodi di sorveglianza efficaci in diversi casi al fine di aumentare la sicurezza e la robustezza delle opere.

La presente guida è il risultato di questo lavoro. Essa è da intendersi come opera di riferimento rivolta a tutti i geologi, studi tecnici e di progettazione, proprietari e committenti, autorità federali, cantonali e comunali, nonché agli imprenditori coinvolti nella costruzione di opere e di impianti nelle regioni con presenza di permafrost.

L’incarico dell’UFT e di armasuisse Immobilier è stato realizzato con la collaborazione dei migliori esperti, sotto la direzione dell’SLF. È quindi a disposizione un’opera che potrà servire da punto di partenza per la realizzazione di molteplici lavori di costruzione e di risanamento e che contribuirà a ridare fiducia ai gestori, viaggiatori e turisti che contano sulla sicurezza e la stabilità delle costruzioni e degli impianti su permafrost.

I nostri più sentiti ringraziamenti vanno a tutti coloro che hanno contribuito, sia con i loro lavori che con i loro consigli, al successo di questa guida.

Toni Eder, vicedirettore  
Ufficio federale dei trasporti

Ulrich Appenzeller, vicedirettore  
Responsabile armasuisse Immobilier

## Ringraziamenti

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 (CAS)  
 Danoth Carlo (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)  
 Degelo Ruedi (Gasser Felstechnik AG)  
 Delang Ulrich (CAS)  
 Eberle Toni (Eberle AG)  
 Elmiger Urs (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)  
 Feuz Peter (Schilthornbahn AG)  
 Heinzer Peter (Andermatt Gotthard Sportbahnen AG)  
 Horntich 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 (CAS)  
 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 (Università di Zurigo)  
 Raetzo Hugo (UFAM)  
 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)



La traduzione in italiano del presente manuale è stata realizzata nell'ambito dell'attività *B.1 – C.1 «Rischi derivanti dall'evoluzione dell'ambiente di alta montagna»* del progetto strategico Alcotra **RiskNat – Gestione in sicurezza dei territori di montagna transfrontalieri** (Obiettivo Cooperazione territoriale europea Italia – Francia (Alpi) 2007–2013). [www.risknat-alcotra.org](http://www.risknat-alcotra.org)

---

## 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

## Sintesi

Il successo di un progetto di costruzione su permafrost di alta montagna è per tutti una sfida tecnica e logistica. Per realizzare una costruzione duratura, la scelta del sito e della struttura portante è di primaria importanza.

Il sito deve essere sottoposto a uno studio preliminare dettagliato al fine di determinare se si trova su permafrost e di analizzare le condizioni di costruzione. Se il sito si trova su permafrost ricco di ghiaccio, si dovrebbe considerare la possibilità di ricercare un altro sito o di abbandonare il progetto. L'analisi della temperatura, del contenuto di ghiaccio e del comportamento in deformazione del terreno può essere effettuata osservando attentamente ed equipaggiando precedentemente il sito in oggetto.

Per quanto riguarda l'analisi della struttura portante, occorre considerare ulteriori problemi a causa delle possibili modifiche del permafrost. Il surriscaldamento climatico, la costruzione di opere e il loro uso possono contribuire al deterioramento del permafrost nel terreno di fondazione e produrre vari effetti, quali cedimenti differenziali e scorimenti. Conviene quindi prevedere l'evoluzione del permafrost nel corso della durata di vita di un'opera e determinare di conseguenza le caratteristiche a lungo termine del terreno. Anche le infrastrutture situate su terreni esposti possono essere sottoposte a pericoli naturali provenienti da regioni con presenza di permafrost. Questa ipotesi deve essere presa in considerazione nell'analisi dei pericoli; è anche necessario valutare il rischio residuo legato all'uso di un'opera. I rischi residui non considerati, come i pericoli naturali e altri rischi specifici, devono essere comunicati al committente. Per garantire l'affidabilità di una costruzione per tutta la sua durata d'uso, è importante che l'opera sia dotata di una struttura robusta e idonea nonché di fondazioni adeguate. È possibile rilevare eventuali problemi o pericoli esercitando una sorveglianza sistematica durante tutte le fasi del progetto. Questa precauzione permetterà di garantire ancora maggiore sicurezza. Un sistema di rilevamento e di valutazione delle misure può inoltre fungere da sistema d'allarme preventivo.

Questa guida pratica è divisa in tre parti. La prima contiene informazioni generali sul fenomeno del permafrost, ne descrive le proprietà ed espone i metodi pratici di prospezione. La parte centrale include alcune raccomandazioni per la direzione di un progetto e sottolinea l'importanza di uno studio preliminare e di una sorveglianza integrata durante tutte le fasi del progetto. La terza parte presenta soluzioni tecniche per la realizzazione delle fondazioni, degli ancoraggi, degli scavi e dei sistemi flessibili. Queste soluzioni riguardano anche il miglioramento della capacità portante del terreno, nonché la costruzione di gallerie e di cunicoli. Questa parte descrive anche le misure volte a ridurre l'apporto di calore nel sottosuolo, insieme all'uso di materiali da costruzione nel permafrost.

Nel permafrost di alta montagna, ogni progetto di costruzione è unico e richiede soluzioni specifiche e appropriate per affrontare varie situazioni eccezionali. Di fronte alla complessità del problema, è impossibile fornire «ricette» generali per costruire in modo duraturo su questo tipo di terreno ma ciononostante, in questo manuale sono presentate varie sfide e soluzioni possibili che si basano su un bilancio delle conoscenze tecniche e scientifiche attuali – bilancio che non è tuttavia da considerarsi esaustivo.

Parole chiave: permafrost di montagna, infrastrutture su permafrost, riconoscimento del terreno, scelta del sito, analisi della struttura portante, soluzioni tecniche, sorveglianza.

## 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



# Indice

Prefazione	3
Ringraziamenti	4
Abstract	5
Sintesi	6
Zusammenfassung	7
<b>Basi generali</b>	<b>13</b>
<b>Campo di applicazione e delimitazione dell'ambito di validità</b>	<b>14</b>
<b>1 Spiegazioni</b>	<b>15</b>
1.1 Glossario del permafrost	15
1.2 Il permafrost: definizione e spiegazioni	17
1.3 Distribuzione del permafrost	20
1.4 Proprietà del permafrost	20
1.4.1 Proprietà termiche del permafrost	20
1.4.2 Proprietà geotecniche	23
1.5 Forme di terreno e geomorfologia del permafrost alpino	35
1.6 Permafrost e cambiamenti climatici	40
1.7 I pericoli naturali	40
1.8 Rilevamento del permafrost	43
1.8.1 Supposta presenza di permafrost	44
1.8.2 Verifica della presenza di permafrost	57
<b>Svolgimento del progetto</b>	<b>63</b>
<b>2 Studio preliminare</b>	<b>66</b>
2.1 Analisi preliminari necessarie per le nuove costruzioni su permafrost	66
2.1.1 Analisi preliminari	66
2.1.2 Esami sul terreno	66
2.1.3 Analisi in laboratorio	66
2.2 Indagini preliminari per costruzioni esistenti	67
2.2.1 Analisi preliminare	67
2.3 Analisi della struttura portante	68
2.3.1 Scelta del sito	68
2.3.2 Concetto di struttura portante	69
<b>3 Progetto preliminare</b>	<b>71</b>
3.1 Convenzione d'uso	71
3.2 Base del progetto	72
3.3 Impatto ambientale	72
3.4 Azioni	72
3.4.1 Azioni sulla struttura portante	72
3.4.2 Modifiche delle azioni sulla struttura portante dovute al permafrost	72
3.5 Effetti	74
3.5.1 Effetti sulla struttura portante	74
3.5.2 Modifiche degli effetti sulla struttura portante dovute al permafrost	74
3.5.3 Effetti sul terreno di fondazione	75

3.6 Analisi delle conseguenze e della sensibilità	75
3.6.1 Portata delle indagini	76
3.7 Esempi di applicazione	78
3.7.1 Situazione iniziale – primo esempio	78
3.7.2 Azioni sulla struttura portante	79
3.7.3 Effetti sulla struttura portante	79
3.7.4 Analisi delle conseguenze e della sensibilità	79
3.7.5 Portata delle indagini	80
3.8 Secondo esempio di applicazione	80
3.8.1 Situazione iniziale	80
3.8.2 Azioni sulla struttura portante	81
3.8.3 Effetti sulla struttura portante	81
3.8.4 Analisi delle conseguenze e della sensibilità	81
3.8.5 Portata delle indagini	82
<b>4 Progetto di costruzione</b>	<b>83</b>
4.1 Dimensionamento	83
4.2 Verifiche	83
<b>5 Realizzazione</b>	<b>85</b>
5.1 Progetto esecutivo	85
5.1.1 Gara d'appalto	85
5.1.2 Nuove costruzioni su permafrost	86
5.1.3 Risanamento di costruzioni su permafrost	86
5.2 Sorveglianza e controlli durante la costruzione	86
5.2.1 Preparazione del sistema di sorveglianza	86
5.2.2 Sistema di sorveglianza durante l'esecuzione dei lavori in cantiere	87
5.2.3 Piano di controllo	88
5.2.4 Controlli durante l'esecuzione	88
<b>6 Uso e manutenzione</b>	<b>89</b>
6.1 Sorveglianza	89
6.1.1 Adattamento del sistema di sorveglianza	89
6.1.2 Piano di sorveglianza e di manutenzione	89
6.1.3 Sistema di sorveglianza durante l'uso e la manutenzione	89
6.2 Pianificazione della manutenzione e degli interventi	89
6.2.1 Piano di manutenzione e d'intervento	89
6.2.2 Interventi possibili	91
<b>7 Smontaggio</b>	<b>93</b>
7.1 Costruire gestendo l'ambiente	93
7.2 Pianificazione e realizzazione	93
7.3 Costruzioni ed elementi rimanenti	93
7.4 Finanziamento	94
<b>Soluzioni tecniche</b>	<b>95</b>
<b>8 Soluzioni tecniche</b>	<b>96</b>
8.1 Fondazioni	96
8.1.1 Concetto di fondazione	96
8.1.2 Fondazioni superficiali	96

---

8.1.3 Fondazioni profonde	97
8.1.4 Prove di carico su pali	98
8.1.5 Piano di sorveglianza e di manutenzione delle fondazioni	98
8.2 Ancoraggi	99
8.2.1 Concetto di ancoraggio	99
8.2.2 Tiranti in roccia e chiodi	100
8.2.3 Tecnica di perforazione	100
8.2.4 Prove di trazione	101
8.2.5 Piano di sorveglianza e di manutenzione degli ancoraggi	101
8.3 Scavo	101
8.3.1 Lavori di scavo	101
8.3.2 Scarpe	101
8.4 Materiali da costruzione	102
8.4.1 Malte cementizie	102
8.4.2 Calcestruzzo	103
8.4.3 Additivi e prodotti di iniezione per la malta e il calcestruzzo	105
8.4.4 Materiali resistenti al gelo	106
8.4.5 Materiali da costruzione adeguati	106
8.5 Sistemi flessibili	106
8.5.1 Piloni traslabilibili di impianti a fune	107
8.5.2 Sistema d'appoggio tripode	108
8.5.3 Opere antavalanghe	109
8.5.4 Condutture d'acqua	110
8.6 Misure per attenuare l'apporto di calore nel sottosuolo	111
8.6.1 Isolamento dal calore	111
8.6.2 Isolamento dal freddo	111
8.6.3 Misure costruttive	112
8.6.4 Sistemi di raffreddamento attivi o passivi	112
8.6.5 Raccolta d'acqua piovana e di scioglimento delle nevi	114
8.6.6 Modifica della superficie del terreno di fondazione	114
8.7 Miglioramento della capacità portante del terreno	115
8.7.1 Sostituzione del materiale	115
8.7.2 Iniezione e chiodatura	115
8.7.3 Drenaggio	116
8.7.4 Procedimenti di disgelo del permafrost	116
8.7.5 Procedimenti di conservazione del permafrost	117
8.8 Cunicoli e tunnel	118
8.8.1 Roccia stabile, povera di ghiaccio	118
8.8.2 Roccia e terreni instabili e ricchi di ghiaccio	118
<b>Allegati</b>	<b>121</b>
Allegato A: Carta indicativa del permafrost, UFAM Ufficio federale dell'ambiente, 2006	122
Allegato B: Esempio di un piano di controllo o di un piano di sorveglianza e di manutenzione	123
Allegato C: Definizione grafica dell'indice di gelo e di disgelo	124
Allegato D: Bibliografia	125
Allegato E: Elenco delle fonti	127



# Basi generali

Il successo di un progetto di costruzione su permafrost di montagna è una sfida per tutti. Di fronte alla grande complessità del problema, è impossibile fornire «ricette» generali per costruire in modo duraturo su questo tipo di terreno ma, ciononostante, in questo manuale sono presentate varie sfide e soluzioni possibili.

Il primo capitolo definisce le basi necessarie per comprendere il fenomeno del permafrost e per usare efficacemente questa guida riguardante la costruzione su questo tipo di suolo. Dopo una descrizione del campo di applicazione della guida, viene presentato un breve glossario della terminologia inherente la costruzione su permafrost. Questi elementi sono seguiti da una spiegazione dei principali termini in materia e da una presentazione della distribuzione del permafrost sulle Alpi svizzere. Seguono una descrizione dettagliata delle proprietà termiche e geotermiche del permafrost alpino, nonché una definizione delle principali forme di terreno legate al fenomeno. Sono anche presi in considerazione gli effetti del cambiamento climatico sul permafrost e i possibili rischi naturali nelle regioni con presenza di permafrost. Questo capitolo si conclude con la presentazione di una procedura pratica e sistematica di localizzazione di permafrost.

## Campo di applicazione e delimitazione dell'ambito di validità

Gli autori hanno elaborato questa **guida pratica** per facilitare lo studio e la progettazione, oltre che l'uso, la manutenzione e lo smontaggio delle opere impiantate sul permafrost alpino. La prima parte contiene **informazioni generali**. Descrive le principali proprietà del permafrost alpino, la sua distribuzione e la sua presenza, nonché i rischi naturali possibili ad esso legati. Questa parte si conclude con la presentazione di metodi riconosciuti e applicabili per determinare la presenza di permafrost.

La seconda parte del manuale, dedicata allo **sviluppo del progetto**, si basa sulle norme SIA della Società svizzera degli ingegneri e degli architetti. È su questa base che sono state definite le fasi della progettazione:

- Studio preliminare
- Progetto preliminare
- Progetto di costruzione
- Realizzazione
- Uso e manutenzione
- Smontaggio

La terza parte, riservata alle **soluzioni tecniche**, contiene le domande più frequenti, i metodi che è possibile adottare per le fondazioni e gli ancoraggi e le soluzioni tecniche riguardanti gli scavi, i materiali da costruzione, i sistemi flessibili, l'isolazione termica, il miglioramento della portanza del terreno e la costruzione di tunnel nel permafrost.

Tutti i capitoli si concludono con un breve riassunto di quanto presentato.

La presente guida si riferisce alle norme SIA 261, 261/1 e 267, 267/1. Salvo diversa menzione, sono valide le norme SIA sulle strutture portanti. Tali norme rappresentano le regole dell'arte riconosciute e costituiscono la raccolta di norme svizzere in materia edile (sito web: [www.sia.ch](http://www.sia.ch)).

I termini utilizzati in questo manuale corrispondono alla terminologia dell'ingegneria civile e sono completati all'occorrenza dai termini del glossario dell'Associazione internazionale del permafrost (International Permafrost Association IPA).

Per lo studio di progetti di costruzione di opere antivalanghe sul permafrost, si fa riferimento alla Direttiva tecnica sulla Costruzione di opere antivalanghe nella zona di distacco (MARGRETH 2007). Questo manuale tratta l'analisi della struttura portante, il dimensionamento, la costruzione, i controlli di esecuzione e la loro sorveglianza. La costruzione di opere con pilastri articolati su permafrost è menzionata brevemente al capitolo 8.5.

Tale guida non è da considerarsi esaustiva. Il suo obiettivo è di informare sullo stato attuale delle conoscenze scientifiche e tecniche riguardanti la realizzazione e la manutenzione di costruzioni su permafrost.

# 1 Spiegazioni

## 1.1 Glossario del permafrost (detto anche «gelo permanente» o «permagelo»)

Il presente glossario contiene i termini utilizzati in questo manuale o nella letteratura specializzata. Questa terminologia corrisponde per la maggior parte al glossario dell'Associazione internazionale del permafrost (IPA), (IPA, Italian terms (2005), sito web: <http://nsidc.org/fgdc/glossary>).

### **Accrescimento del permafrost**

Aumento dello spessore o dell'estensione del permafrost.

### **Indebolimento da disgelo**

Riduzione della resistenza al taglio in caso di disgelo di un terreno contenente ghiaccio (riduzione della compattezza del terreno di fondazione).

### **Compattazione da disgelo**

Rafforzamento del suolo che varia nel corso del tempo e che viene provocato dallo scioglimento e lo scolo dell'acqua interstiziale in eccesso (aumento della compattezza del terreno di fondazione).

### **Deterioramento del permafrost**

Diminuzione dello spessore o dell'estensione del permafrost.

### **Gradi-giorno**

Differenza tra la temperatura giornaliera media dell'aria e la temperatura di riferimento ( $0^{\circ}\text{C}$ ) cumulata su tutti i giorni dell'anno civile con  $T < 0^{\circ}\text{C}$  (per l'indice di gelo) o  $T > 0^{\circ}\text{C}$  (per l'indice di disgelo).

### **Crioclastismo / gelifrazione**

Disgregazione meccanica dei materiali che ha luogo, per effetto della pressione, quando l'acqua contenuta entro le fessure rocciose ghiaccia.

### **Dilatazione**

Aumento del volume o innalzamento del coefficiente di attrito di un terreno granuloso che si presenta sotto l'azione delle forze di taglio.

### **Eiezione criogenica**

Sollevamento di oggetti (per es. fondazioni) nel permafrost per effetto del gelo. Questo processo può comportare l'eiezione dell'oggetto.

### **Fusione per pressione**

Riduzione del punto di fusione del ghiaccio in seguito ad una pressione.

### **Geliflusso**

Produzione artificiale o conservazione di un suolo ghiacciato.

### **Congelamento aderente**

Processo con il quale due oggetti sono uniti dal ghiaccio.

**Azione del gelo**

Effetto prodotto su oggetti nel suolo dall'alternanza di gelo e disgelo dell'acqua interstiziale.

**Ghiaccio di segregazione**

Ghiaccio che si forma nel suolo lungo un gradiente di temperatura negativo per effetto della migrazione dell'acqua interstiziale o dell'evaporazione.

**Ghiaccio del terreno**

Designazione generale delle forme di ghiaccio in terreni ghiacciati.

**Franamento da disgelo**

Instabilità del pendio provocata dal disgelo del ghiaccio del terreno.

**Gradiente di temperatura**

Differenza di temperatura per unità di lunghezza, espressa in °C m<sup>-1</sup>.

**Indice di disgelo**

Differenza tra un minimo relativo e un massimo della curva delle frequenze cumulate delle temperature giornaliere medie dell'aria (fornisce un indice in «gradi-giorno») durante un periodo di temperature dell'aria positive (in estate) (SN 670 140b) (allegato C).

**Indice di gelo nell'aria**

Differenza tra un massimo relativo e un minimo della curva delle frequenze cumulate delle temperature giornaliere medie dell'aria (fornisce un indice in «gradi-giorno») durante un periodo di temperature dell'aria negative (in inverno) (SN 670 140b) (allegato C).

**Permafrost sensibile al disgelo**

Terreno che subisce un notevole assestamento o una perdita di resistenza in caso di disgelo.

**Permafrost stabile rispetto al disgelo**

Terreno che non presenta cedimenti notevoli né perdita di resistenza in caso di disgelo.

**Pilone raffreddato**

Pilone dotato di un sistema di raffreddamento.

**Pressione di sollevamento**

Pressione ascendente prodotta dal gelo del terreno e che può provocare il sollevamento delle infrastrutture.

**Profondità del gelo**

Profondità massima di penetrazione del gelo nel terreno, misurata normalmente fino alla superficie del terreno (per maggiori dettagli: SN 670 140b, gelo).

**Reptazione**

Lenta deformazione (deformazione da taglio che varia nel corso del tempo) provocata da uno sforzo di lunga durata troppo debole per comportare una rottura.

**Resistenza per congelamento aderente**

Resistenza alla rottura o al taglio che deve essere superata per separare due oggetti uniti dal ghiaccio.

**Terreno gelivo**

Terreno nel quale la segregazione permette la formazione di lenti di ghiaccio capaci di provocare danni dovuti a un sollevamento durante il gelo o a una diminuzione della portanza in caso di disgelo (SN 670 140b).

**Terreno non gelivo**

Terreno nel quale l'acqua interstiziale ghiacciata non provoca un sollevamento capace di arrecare danni e il disgelo non causa nessuna riduzione notevole della portanza (SN 670 140b).

**Criosollevamento**

Movimento ascendente o laterale del terreno o di oggetti che si trovano nel o sul terreno e provocato dalla formazione del ghiaccio.

**Tecniche di conservazione del permafrost**

Metodi di costruzione che permettono di conservare il permafrost.

**Tecniche che favoriscono il disgelo del permafrost**

Metodi di costruzione applicati se il deterioramento del permafrost non può essere evitato:

- Il terreno è disgelato / compattato / sostituito
- I cedimenti dovuti al disgelo sono considerati in sede di analisi della struttura portante e del dimensionamento dell'infrastruttura.

**Contenuto d'acqua non gelata**

Quantità d'acqua non gelata (allo stato liquido) nel permafrost.

**Tensione di suzione o criosuzione**

Sviluppo di una tensione di suzione che si produce in un terreno gelato o parzialmente gelato e che risulta da un gradiente di temperatura nella parte d'acqua non gelata.

**Termosifone**

Scambiatore passivo di calore (sistema di pompaggio di gas o di liquido a una o due fasi) che estrae il calore dal sottosuolo tramite un processo di circolazione o di convezione.

## 1.2 Il permafrost: definizione e spiegazioni

Il **permafrost** è un terreno ghiacciato che presenta temperature negative tutto l'anno ed è quindi un fenomeno puramente termico: è determinante soltanto la temperatura del sottosuolo e non la percentuale di ghiaccio. Sulle Alpi il permafrost è anche detto «permafrost alpino» o «permafrost di montagna».

Lo strato di terreno situato tra la superficie del terreno e il tetto del permafrost è la zona di disgelo o **strato attivo** (fig. 1), che disgela in estate e congela in inverno. Il suo spessore varia da alcuni centimetri a diversi metri e può variare di anno in anno. Dato che lo strato attivo subisce cambiamenti di fase stagionali (formazione o fusione di ghiaccio), può creare problemi dal punto di vista geotecnico.

La sommità della parte gelata, detta **tetto del permafrost**, è il limite superiore del **corpo del permafrost** (fig. 1). Sotto questa il terreno presenta temperature negative tutto l'anno. Lo spessore del corpo del permafrost può variare da qualche metro a diverse decine di metri.

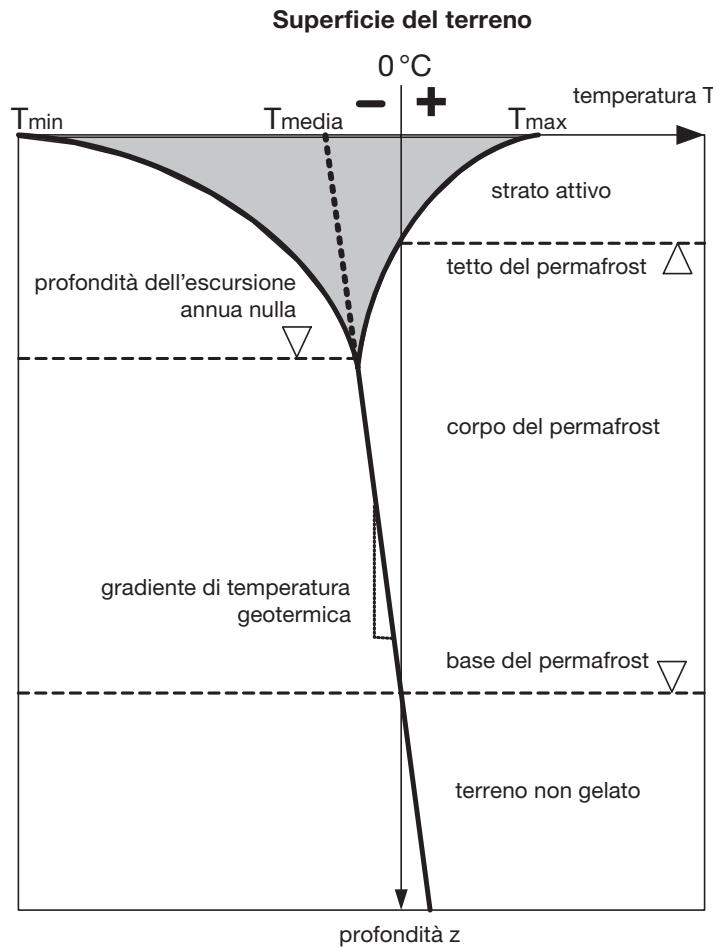


Fig. 1: Termini fondamentali e distribuzione tipica delle temperature (curve nere) nel permafrost. La zona grigia indica l'ampiezza delle variazioni stagionali nel sottosuolo.

La **base del permafrost** è il limite inferiore del corpo del permafrost (fig. 1). Al di sotto di questo limite, il terreno resta non gelato tutto l'anno a causa del **flusso di calore geotermico** proveniente dall'interno della terra. Essendo la topografia alpina molto complessa, il flusso costante di calore può mostrare, a seconda del sito, diverse intensità.

A partire da una certa profondità nel sottosuolo, ovvero alla **profondità dell'escursione annua nulla** (fig. 1), la temperatura del terreno non presenta più alcuna variazione stagionale.

Il permafrost può contenere **ghiaccio del terreno** (cap. 1. 4. 2). Questo ghiaccio è formato dal gelo dell'acqua piovana e da quello dell'acqua di scioglimento della neve, di depositi di valanga o di un vecchio ghiacciaio. Nella roccia, il ghiaccio si trova principalmente nelle fessure e nelle diaclasie, mentre nei terreni (ad es. morene, detriti), il ghiaccio può trovarsi in pori e in cavità. Il ghiaccio del terreno può presentarsi in modo disperso o sotto forma di ghiaccio massiccio (lenti di ghiaccio). Il congelamento dell'acqua contenuta negli interstizi forma il **ghiaccio interstiziale**, senza ulteriore apporto d'acqua. Quando l'acqua gela, il suo volume aumenta di circa il 9% (sollevamenti) e diminuisce quando fonde (assestamenti).

I gradienti di temperatura possono comportare lo spostamento del vapore acqueo nel terreno da un punto più caldo a uno più freddo dove gela e forma quindi un ghiaccio detto **ghiaccio di segregazione**. Questo fenomeno è anche possibile nella roccia, dove provoca una dilatazione delle fessure e un'espansione della roccia stessa.

La **percentuale di ghiaccio** è determinata dalle proprietà del terreno (granulometria, volume dei pori, cavità) e influisce sulle proprietà meccaniche e sulla capacità portante del terreno. Il contenuto di ghiaccio in peso è determinato dalla frazione ponderale di ghiaccio rispetto al terreno secco e si esprime in percentuale. Per tassi compresi tra il 50 e il 150%, si parla di percentuale di ghiaccio elevata. La percentuale di ghiaccio volumica si calcola come rapporto tra il volume di ghiaccio e il volume totale del terreno. La percentuale di ghiaccio volumica massima raggiunge quindi un volume del 100%. Nel capitolo 1.4.2 sono descritte varie percentuali di ghiaccio.

I terreni fini possono anche contenere **acqua non gelata** a temperature inferiori a 0 °C, in quanto la mineralogia (struttura dei cristalli e proprietà chimiche) e la dimensione dei grani del terreno possono abbassare il punto di congelamento.

Le zone non gelate che si trovano nel corpo del permafrost sono dette **talik** – quando sono situate sopra il tetto del permafrost, prendono il nome di strato disgelato residuo (fig. 2). Nei talik possono prodursi flussi d'acqua (e quindi anche flussi di calore). Durante il riconoscimento del terreno in prossimità della superficie, gli strati disgelati residui possono dare la falsa impressione che il permafrost sia assente. Tra le altre cause, i talik possono essere generati dall'acqua del suolo o dall'attività legata alla costruzione.

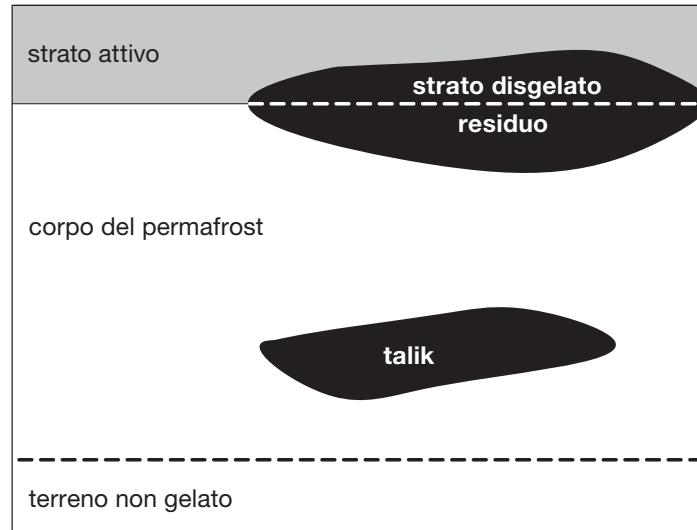


Fig. 2: I talik sono zone non gelate ( $T > 0^{\circ}\text{C}$ ) presenti all'interno del corpo del permafrost e nella zona del tetto del permafrost.

## 1.3 Distribuzione del permafrost

Sulle Alpi, il permafrost può essere presente sopra i 2200 m di altitudine, a seconda dell'esposizione e della posizione sul pendio (cap. 1.8). Circa il 6% della superficie delle Alpi svizzere si trova in una zona di permafrost.

In alcuni casi particolari, si può incontrare il **permafrost azonale** a bassa quota (verso i 1000 m di altitudine) – generalmente sotto i depositi detritici situati all'ombra ai piedi di pareti rocciose scoscese. Tali posti sono spesso caratterizzati dalla presenza di alberi stranamente poco sviluppati. Il permafrost azonale si può anche produrre artificialmente, ad esempio sotto piste di ghiaccio artificiali che non dispongono di uno strato isolante dal freddo tra la base di ghiaccio e il terreno sottostante.

In montagna, la presenza di permafrost è fortemente influenzata dalla topografia, dal mantello nevoso (LUETSCHG *et al.* 2008), dalla temperatura dell'aria e dall'irraggiamento solare, nonché dalle caratteristiche della superficie del suolo, dalla geologia e dall'idrologia (tab. 1).

## 1.4 Proprietà del permafrost

### 1.4.1 Proprietà termiche del permafrost

Sulle Alpi le temperature del permafrost si collocano generalmente tra  $-3^{\circ}\text{C}$  e  $0^{\circ}\text{C}$ . Possono essere più basse sulle pareti rocciose esposte ad alta quota.

Le temperature del suolo sono influenzate dal flusso geotermico proveniente dall'interno della terra; tale flusso, che rimane costante nel tempo, è leggermente inferiore in montagna. D'altronde, le condizioni stagionali e i processi sulla superficie del terreno influenzano considerevolmente le temperature del terreno (tab. 1).

La velocità delle variazioni della temperatura del terreno è anche influenzata dalle proprietà fisiche del terreno. Queste sono a loro volta determinate dalla percentuale di materiale solido, di aria, di ghiaccio e di acqua presenti, nonché dalle loro proprietà termiche. A causa dell'effetto isolante dell'aria contenuta in forte percentuale, i detriti sono meno conduttori rispetto alla roccia.

Le fluttuazioni delle temperature orarie e giornaliere si registrano in prossimità della superficie del terreno, mentre nelle zone più profonde si evidenziano soltanto le fluttuazioni stagionali. Più aumenta la profondità, più i segnali delle temperature sono filtrati e ritardati. Ad esempio, a una profondità di 10 m, la temperatura è in ritardo di circa 6 mesi rispetto alla superficie del suolo (fig. 3). Il calore estivo raggiunge quindi questa profondità soltanto durante l'inverno – cosa che è importante sapere, ad esempio, prima di installare ancoraggi nel permafrost.

### Trasporto di calore nel terreno

Nel permafrost, lo scambio di calore avviene per **conduzione** (flusso di calore nei materiali solidi lungo un gradiente di temperatura) oppure per **convezione** (ad es. se l'aria e l'acqua circolano attraverso le fessure e gli interstizi, fig. 4). La conduzione dipende dalla conduttività termica  $K(\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$  del terreno, mentre nei processi convettivi, entrano in gioco ulteriori fattori nel trasferimento del calore (ad es. la velocità di scorrimento dell'aria e dell'acqua).

Inoltre, il **calore latente** ( $0,334 \text{ MJ kg}^{-1}$  nel caso della formazione del ghiaccio,  $2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$  nel caso della condensazione) viene prodotto o assorbito durante il gelo o il disgelo (azione del gelo) o durante la condensazione dell'acqua o la sublimazione del ghiaccio (cambiamenti di fase).

Tab. 1: Parametri che influenzano la temperatura del terreno e quindi la distribuzione del permafrost in alta montagna.

Parametro	Spiegazione
Topografia	Le temperature del terreno sono in generale più basse ai piedi dei versanti (depositi di valanghe), sulle creste (neve soffiata dal vento, debole flusso geotermico), sulle pareti rocciose scoscese (poca o nessuna presenza di neve), nei versanti all'ombra (scarso soleggiamento) e nelle zone più elevate (temperature dell'aria più basse). Essendo la topografia complessa (ad es. sulle creste), le temperature del terreno presentano forti contrasti tra i versanti soleggiati e quelli all'ombra – possono influenzarsi vicendevolmente nel sottosuolo.
Distribuzione spaziale e temporale del manto nevoso	È principalmente l'effetto isolante del manto nevoso a determinare se e come la temperatura viene scambiata tra l'aria e il terreno. Il terreno si raffredda maggiormente dove la neve è stata soffiata via dal vento, dove la sua distribuzione è eterogenea (ad es. sui terreni con grossi blocchi sparsi) o dove è scivolata (isolamento più debole). La temperatura del terreno è anche più bassa dove la neve dura più a lungo in estate (piedi dei versanti, depressioni del terreno, piste di neve artificiale) (protezione contro l'irraggiamento del sole e temperature elevate dell'aria). Distribuzione temporale del manto nevoso che favorisce il permafrost: poca neve in autunno e all'inizio dell'inverno, molta neve in primavera e in estate. Il manto nevoso ha un'influenza essenziale sulla distribuzione del permafrost, in quanto spesso, in alta montagna, il terreno è innevato per 8–10 mesi.
Temperatura dell'aria	Nelle regioni con presenza di permafrost, la temperatura media annua dell'aria è inferiore a $0^\circ\text{C}$ (eccezione: a bassa quota, questa media può essere superata sui siti con presenza di permafrost azonale). In montagna, il gradiente termico è di circa $0,6^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$ .
Irraggiamento	L'irraggiamento diretto a onde corte accelera lo scioglimento della neve e aumenta la temperatura del terreno durante le stagioni senza neve. Tali temperature sono quindi più basse sui versanti e sui siti all'ombra.
Caratteristiche della superficie del terreno	I terreni rugosi, costituiti da grossi blocchi, sono generalmente più freddi (circolazione dell'aria, buon drenaggio, manto nevoso eterogeneo) rispetto ai terreni a granulometria fine.
Proprietà del suolo	Le proprietà termiche e geotecniche del suolo di fondazione sono fortemente influenzate dalle proprietà fisiche della roccia (ad es. conduttività termica, albedo) e da altri aspetti, quali la stratificazione e la composizione del terreno).
Idrologia	La temperatura del terreno è fortemente influenzata dall'acqua di scolo. Una parte dell'acqua che scola (durante lo scioglimento delle nevi ad es.) può gelare e formare ghiaccio del sottosuolo. Nel corpo del permafrost, possono formarsi dei talik attraverso cui l'acqua scola. I laghi riscaldano il terreno (alta capacità termica). Le basse temperature delle sorgenti ( $< 3^\circ\text{C}$ ) possono far presagire la presenza di ghiaccio nel sottosuolo.
Ghiacciai	Dato che sotto i ghiacciai alpini la temperatura del terreno è di $0^\circ\text{C}$ , generalmente non esiste permafrost in questi posti, fatta eccezione per la zona situata a monte del crepaccio terminale, sotto i ghiacciai sospesi e alla base dei nevai.

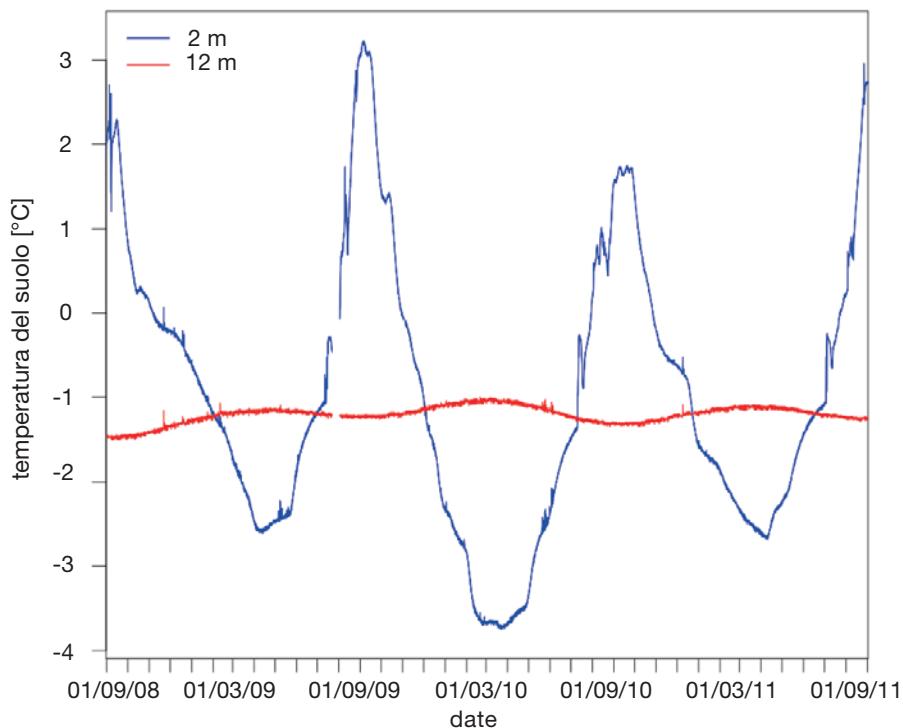


Fig. 3: Temperature del suolo misurate in condizioni di permafrost a 2 m e a 12 m di profondità dal 1 settembre 2008 al 31 agosto 2011 (Colle Superiore di Cime Bianche, Valtournanche, AO) a 3100 m di quota. A 12 m di profondità il massimo di temperatura viene raggiunto con uno sfasamento di circa 6 mesi rispetto al dato più superficiale (dati ARPA Valle d'Aosta).

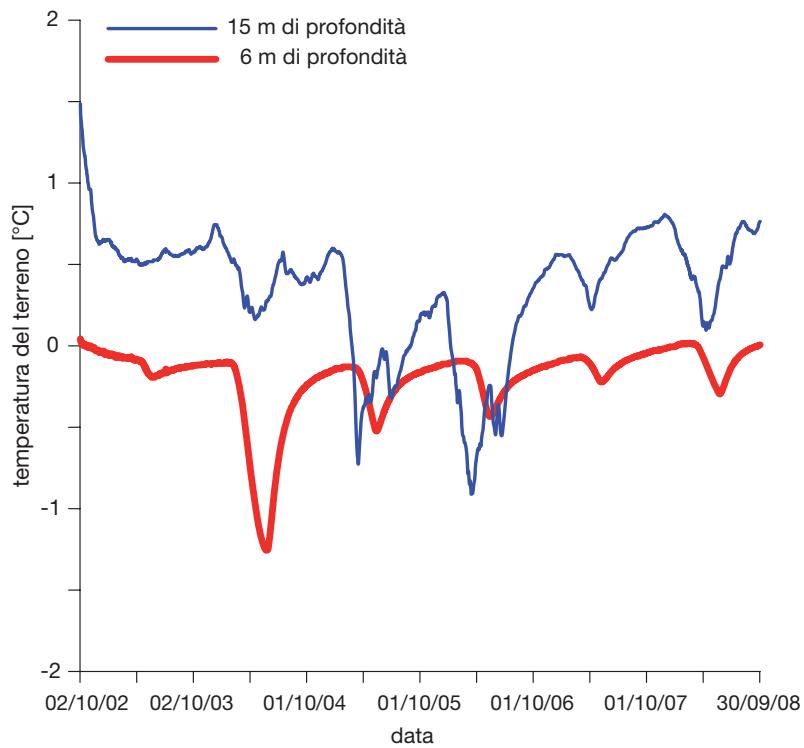


Fig. 4: Temperature nei fori di sondaggio misurate in una falda di detrito a 6 m e a 15 m di profondità, a 2400 m di altitudine (Passo della Flüela, GR) tra il 2002 e il 2008. A 15 m di profondità, si assiste a uno spostamento convettivo del calore provocato dalla circolazione dell'aria nelle cavità che genera brusche fluttuazioni di temperatura. A 6 m di profondità, invece, la conduzione termica è preponderante nel ghiaccio del terreno. Il tipo di fluttuazione delle temperature fornisce così indicazioni sulla costituzione del sottosuolo (dati SLF, Davos).

### 1.4.2 Proprietà geotecniche

Le proprietà geotecniche di un terreno di fondazione contenente ghiaccio dipendono dalla temperatura. Quando per esempio questa aumenta, la resistenza al taglio diminuisce, il che può causare deformazioni o cedimenti della struttura portante. Di seguito saranno analizzate le proprietà geotecniche dei terreni e della roccia situati nel permafrost. Verrà descritta l'influenza di ogni componente (ghiaccio, materiale solido, acqua e aria) le cui percentuali influenzano il comportamento del terreno relativamente alle resistenza e alle deformazione.

#### Proprietà strutturali

I materiali terrosi e rocciosi gelati sono un sistema complesso, multifase, che comprende le quattro componenti seguenti:

- materiale solido minerale (terreno, roccia)
- ghiaccio
- acqua non gelata
- aria

Nel permafrost, il volume dei pori e il grado di saturazione possono essere determinati come in un terreno non gelato. Il grado di saturazione indica la misura in cui gli interstizi sono pieni di ghiaccio e di acqua non gelata.

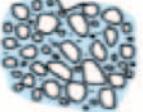
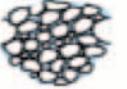
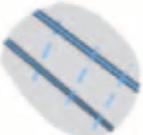
Il ghiaccio è la componente del sottosuolo gelato che crea maggiori problemi: gioca un ruolo cruciale per quanto riguarda le proprietà fisiche e meccaniche del suolo e della roccia. Maggiore è la percentuale di ghiaccio e più le proprietà del permafrost si avvicinano a quelle del ghiaccio puro. Il ghiaccio si deforma in modo viscoplastico e possiede proprietà fisiche e meccaniche particolari. Il comportamento plastico (scorrimento) del ghiaccio sottoposto a un carico riveste un'importanza essenziale dal punto di vista geotecnico (HAEFELI 1954).

Oltre al ghiaccio, l'acqua non gelata è una componente importante del permafrost che ne influenza le proprietà. L'acqua non gelata appare, da un lato, sotto forma di pellicola d'acqua sulla superficie della fase minerale e, dall'altro, all'interno del ghiaccio stesso. Può avere un punto di congelamento inferiore agli 0 °C in funzione della mineralogia e della granulometria del terreno o della composizione chimica dell'acqua, come la sua percentuale di sale, o ancora per effetto di pressioni. Alcune ricerche effettuate nel Grande Nord hanno mostrato che anche in un permafrost con temperatura inferiore ai -5 °C si può trovare una percentuale d'acqua del 5% e oltre. Quando il permafrost si riscalda, la percentuale di acqua non gelata può passare dal 10 al 40%, a seconda del tipo di terreno (WILLIAMS 1967; TSYTOVICH 1975). Secondo ARENSEN *et al.* (2009), si può presupporre che sulle Alpi, la maggior parte dell'acqua contenuta nel terreno è gelata a temperature inferiori ai -2 °C, in quanto la sua percentuale salina è generalmente debole.

Si possono distinguere diversi tipi di permafrost in funzione della loro struttura (tab. 2). Oltre ai terreni con percentuale di ghiaccio interstiziale relativamente debole, si trovano spesso grosse lenti di ghiaccio, come nelle morene ricche di ghiaccio (RIEDER *et al.* 1980).

Nella letteratura canadese (JOHNSTON 1981) si fa una distinzione, a fini geotecnici, tra tre tipi di permafrost: «permafrost rigido» («hard frozen», terreno di fondazione che presenta solo deboli percentuali di acqua non gelata), «permafrost plastico» («plastic frozen», terreno di fondazione che presenta percentuali elevate di ghiaccio e di acqua non gelata) e «permafrost secco» («dry frozen», terreno di fondazione che non contiene praticamente ghiaccio). Il permafrost plastico, esattamente come il ghiaccio puro, tende a deformarsi e a scorrere, mentre il permafrost secco presenta proprietà meccaniche simili a quelle dei terreni non

Tab. 2: Esempi di tipi di ghiaccio contenuti in un terreno (ghiaccio interstiziale) e nella roccia (ghiaccio di fessura). I valori indicati possono variare a livello locale e dovrebbero essere verificati sul terreno o testati in laboratorio.

Struttura dei materiali	Rappresentazione schematica	Percentuale volumica di ghiaccio (grado di saturazione di ghiaccio)	Comportamento meccanico allo stato gelato
<b>Quasi isotropo</b> <i>(proprietà simili in tutte le direzioni)</i> Terreno con molto ghiaccio		ricco di ghiaccio, 55–85 % (soprassaturo)	scorrimento notevole per effetto di un carico (effetto della forza di gravità, sovraccarico)
Terreno con poco ghiaccio		povero di ghiaccio, 0–20 % (insaturo-saturo)	scorrimento per effetto di un carico
<b>Anisotropo</b> <i>(proprietà che dipendono dalla direzione)</i> Roccia fessurata con molto ghiaccio		ricca di ghiaccio, 10–30 % (saturo)	scorrimento sulle fessure
Roccia fessurata con poco ghiaccio		povera di ghiaccio, 0–10 % (insatura)	pochi problemi, eventuale scivolamento lungo fessure con andamento sfavorevole

gelati. La deformabilità del permafrost rigido è strettamente dipendente dalla sua percentuale di ghiaccio. Accanto alle proprietà strutturali e statiche del permafrost, sono di particolare importanza i processi criogenici, dei quali principalmente fanno parte:

- modifica della struttura e della tessitura, dovuta
  - al gelo delle frazioni d'acqua,
  - all'espansione delle lenti di ghiaccio,
  - allo scioglimento del ghiaccio o della neve;
- trasferimento di umidità dal caldo verso il freddo (segregazione del ghiaccio)

Durante lo scioglimento delle nevi o durante le forti precipitazioni, l'acqua trasferisce, per esempio, il calore nel sottosuolo (convezione). A seconda della temperatura del terreno, il ghiaccio si scioglie o si forma nel terreno. Oltre a conseguenze quali la riduzione della stabilità o la comparsa di cedimenti o di sollevamenti, l'aumento o la diminuzione della percentuale di ghiaccio modificano continuamente le proprietà geotecniche del terreno.

Le differenze di temperatura tra il terreno non gelato e quello gelato creano il cosiddetto gradiente di temperatura negativo. Per effetto di questo gradiente, combinato con la tensione di suzione che compare durante la formazione di ghiaccio, l'acqua interstiziale o il vapore acqueo migrano dal terreno non gelato verso quello gelato (fig. 7). In funzione dell'appor- to di acqua, possono formarsi lenti di ghiaccio per effetto di un processo detto di segregazione (sezione «ghiaccio di segregazione»). Il capitolo 1.7 riprende più nel dettaglio questi meccanismi e processi criogenici attivi nel permafrost.

## **Terreni nel permafrost**

Le proprietà geotecniche dei terreni situati nel permafrost dipendono essenzialmente dal loro contenuto di ghiaccio, dalla loro composizione granulometrica e dalla loro temperatura. Di seguito sono presentate le proprietà geotecniche di questi materiali e il loro comportamento in resistenza e in deformazione.

### *Forma dei grani e granulometria*

La forma dei grani e la distribuzione granulometrica dei terreni, nonché le proporzioni di materia solida e di ghiaccio, influenzano il comportamento della resistenza e della deformazione di un terreno di fondazione gelato. Le curve granulometriche indicano generalmente una composizione ben strutturata, ma che presenta poche o nessuna componente fine delle dimensioni dell'argilla. La composizione e la tessitura dei terreni situati nel permafrost sono paragonabili a quelle di un terreno non gelato. Il permafrost può quindi contenere tutte le classi di terreni menzionate nel sistema unificato di classificazione dei terreni (USCS Unified Soil Classification System). In Svizzera, la classificazione dei terreni è definita nelle norme SN 670 004-1a e SN 670 004-2a.

L'influenza della composizione granulometrica sulla gelività del terreno è trattata al capitolo 8.4.4. Le frazioni fini influenzano la formazione di ghiaccio e di conseguenza la gelività dei terreni di fondazione. Le componenti fini di questi terreni possono trattenere più acqua e quindi creare problemi, quali sollevamenti in caso di gelo o perdita di resistenza al taglio e cedimenti in caso di disgelo.

### *Compattezza e porosità*

Essendo la compattezza legata alla porosità, queste due proprietà geotecniche, difficilmente separabili, sono trattate nella stessa sezione. La compattezza determina in gran parte le proprietà meccaniche di un terreno contenente poche frazioni fini (sabbia, ghiaia). Una forte compattezza aumenta la resistenza al taglio grazie alla dilatanza e diminuisce la sensibilità al cedimento del permafrost. Una porosità ridotta ha come conseguenza una bassa percentuale di ghiaccio e aria. Una debole compattezza determina proprietà opposte: la porosità è più elevata e questo comporta maggiori contenuti di aria e di ghiaccio. Generalmente si constata un aumento della compattezza alla base dello strato attivo, dovuta alla pressione dei livelli superiori.

La porosità influenza la percentuale di ghiaccio e di acqua nei terreni. Le dimensioni dei pori giocano un ruolo importante: mentre in quelli più grandi, l'acqua scola principalmente per effetto della gravità, nei pori piccoli può essere trasportata in qualsiasi direzione del terreno, in forma liquida, condotta dalla capillarità e dalla tensione di suzione o sotto forma di vapore seguendo un gradiente di temperatura. Gli interstizi assicurano così l'apporto di acqua allo stato liquido e di vapore acqueo necessari alla formazione di ghiaccio di segregazione.

### *Contenuto di aria interstiziale*

La percentuale di aria interstiziale nei terreni di fondazione gelati è variabile. In caso di sovraccarico o di movimento di taglio, una percentuale elevata può comportare una diminuzione della resistenza, un aumento delle deformazioni o un cedimento del terreno. I cedimenti sono dovuti a una diminuzione del volume conseguente a una compattazione. La percentuale di aria interstiziale in un terreno di fondazione può aumentare quando il ghiaccio contenuto si scioglie.

### *Permeabilità idraulica*

L'idrologia di un terreno di fondazione gelato è complicata, in quanto soggetta a processi di gelo e disgelo. Varia ad esempio quando l'acqua penetra in un permafrost poroso insaturo e vi forma uno strato di ghiaccio continuo, quando l'acqua circola nel corpo di un permafrost (talik) o quando l'arrivo di acqua più calda innesca un processo di fusione. Tali fattori modificano di continuo la permeabilità del terreno.

In generale, la permeabilità è determinata dalla proporzione di materiali fini, dal contenuto di ghiaccio e dalla porosità (compattezza). Nello strato attivo si riscontra un aumento verso il basso della proporzione di materiali fini (segregazione inversa) e della compattezza (pressione esercitata dai livelli superiori). La permeabilità diminuisce quindi con la profondità. Nello strato attivo, è varie decine di volte maggiore che nel corpo del permafrost ricco di ghiaccio, che viene generalmente ritenuto impermeabile.

### *Contenuto di ghiaccio*

La maggior parte dell'acqua contenuta nel permafrost si trova sotto forma di ghiaccio. La percentuale di ghiaccio in un terreno di fondazione gelato è variabile. Il ghiaccio può essere disperso oppure concentrarsi per effetto di un processo di segregazione. La figura 5 presenta schematicamente varie percentuali volumiche di ghiaccio in un terreno sciolto grossolanamente. Oltre alla temperatura del terreno, è la percentuale di ghiaccio che influenza maggiormente la resistenza e la deformabilità di un terreno di fondazione nel permafrost.

Lo scioglimento del ghiaccio contenuto nel terreno può generare una diminuzione del suo volume e, di conseguenza, comportare dei cedimenti (fig. 6). Nella figura 6 sono presentati la diminuzione del volume dovuta al cambiamento di stato e il drenaggio dell'acqua di fusione da un terreno. La linea bc descrive il disgelo del ghiaccio contenuto nel terreno a una temperatura di 0 °C. In un terreno fine, si constata anche un consolidamento continuo dovuto al disgelo. Questo dura finché non si ristabilisce l'equilibrio nel terreno di fondazione per una pressione esercitata dai livelli superiori  $\sigma_0$  e un sovraccarico  $\Delta\sigma$ . La diminuzione di volume dovuta al cedimento indotto dal disgelo e all'aumento dello sforzo di compressione è descritta dalla linea cd della figura 6.

### *Ghiaccio di segregazione*

La migrazione di acqua interstiziale o di vapore acqueo lungo un gradiente di temperatura negativo (dal caldo verso il freddo) fino al fronte del gelo può creare zone ricche di ghiaccio (lenti o strati di ghiaccio di diverso spessore) nel permafrost. Queste formazioni, suscettibili di generare sollevamenti del terreno (movimenti verso l'alto o verso l'esterno dovuti all'espansione del terreno), possono influenzarne la resistenza al taglio e la portanza a seconda della temperatura del ghiaccio. Nella figura 7 è schematizzato il processo di segregazione (formazione di ghiaccio di segregazione).

### *Temperatura*

L'abbassamento della temperatura in un permafrost ricco di ghiaccio può aumentarne la resistenza e diminuirne le deformazioni per scorrimento (fig. 8). Il ghiaccio freddo ( $\leq -2^{\circ}\text{C}$ ) si deforma in modo meno duttile rispetto al ghiaccio temperato ( $\geq -2^{\circ}\text{C}$ ). L'aumento della temperatura in un permafrost ricco di ghiaccio ne diminuisce la resistenza e ne accelera i movimenti di scorrimento. Secondo ARENSEN *et al.* (2009), la maggior parte dell'acqua contenuta in un terreno è gelata a partire dai  $-2^{\circ}\text{C}$ , il che aumenta la resistenza del permafrost.

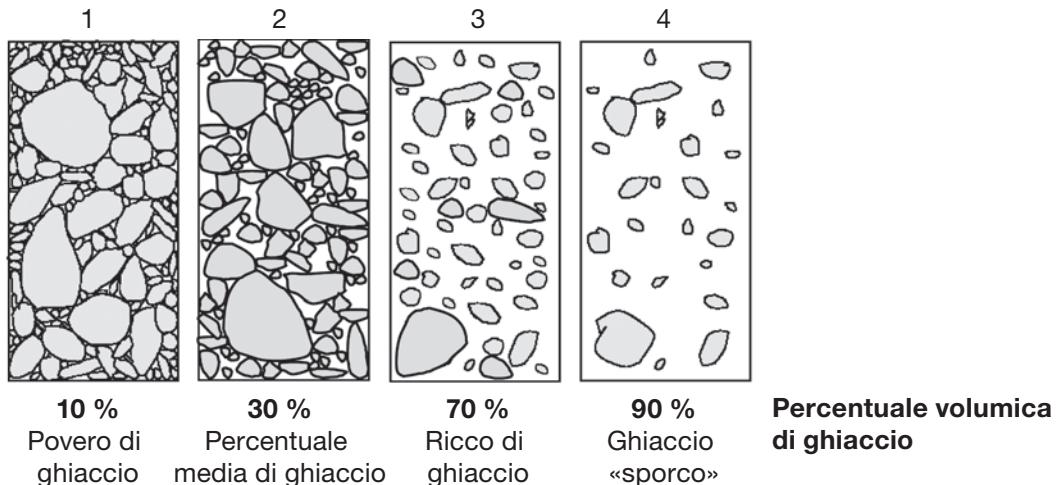


Fig. 5: Percentuale volumica di ghiaccio in terreno a grana fine; 1. Ghiaia, povera di ghiaccio, 2. Ghiaia gelata, 3. Ghiaia ricca di ghiaccio (sovrasatura di ghiaccio), 4. Ghiaccio contenente ghiaia «ghiaccio sporco» (adattato da ARENSEN *et al.* 2007).

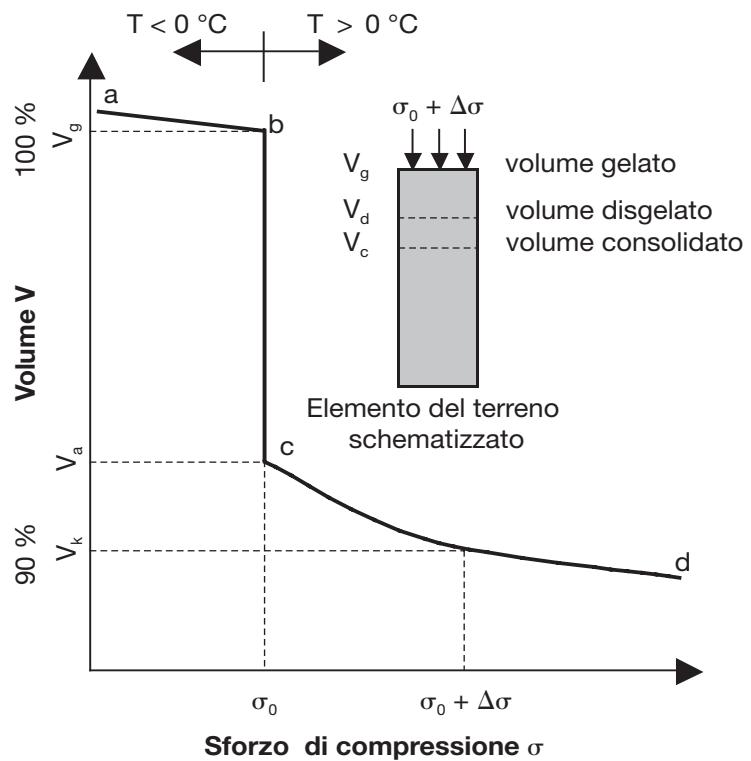


Fig. 6: Relazione tra lo sforzo di compressione e la diminuzione di volume di un terreno che disgela (adattato da ANDERSLAND e LADANYI 2004).  $V_g$  = volume gelato,  $V_d$  = volume disgelato,  $V_c$  = volume consolidato,  $\sigma_0$  = pressione esercitata dai livelli superiori,  $\Delta\sigma$  = sovraccarico.

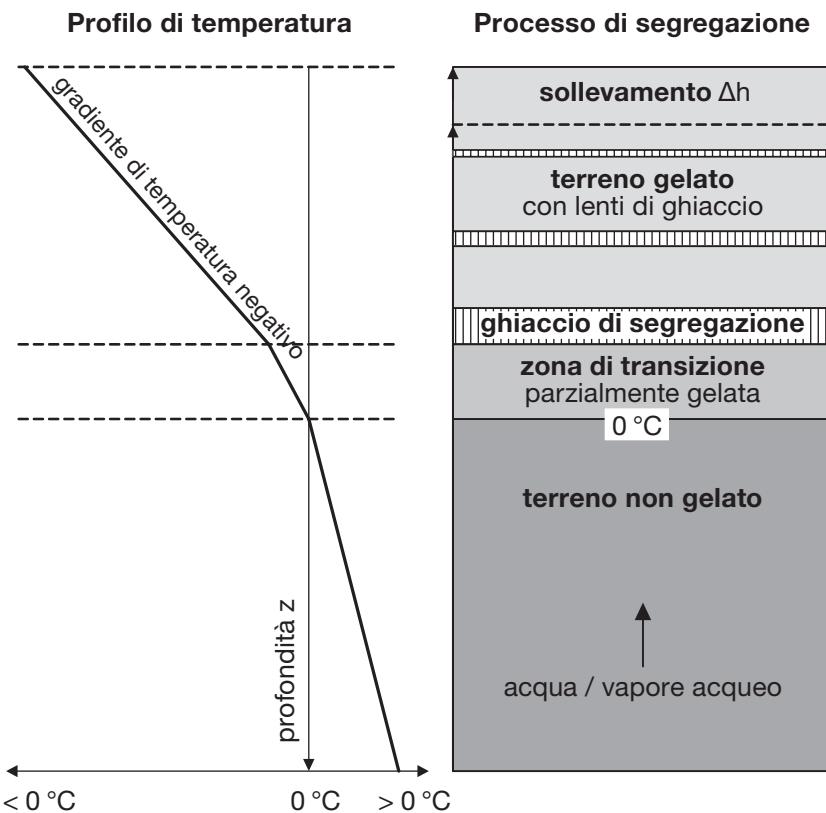


Fig. 7: Rappresentazione schematica di un processo di segregazione, formazione di ghiaccio di segregazione.

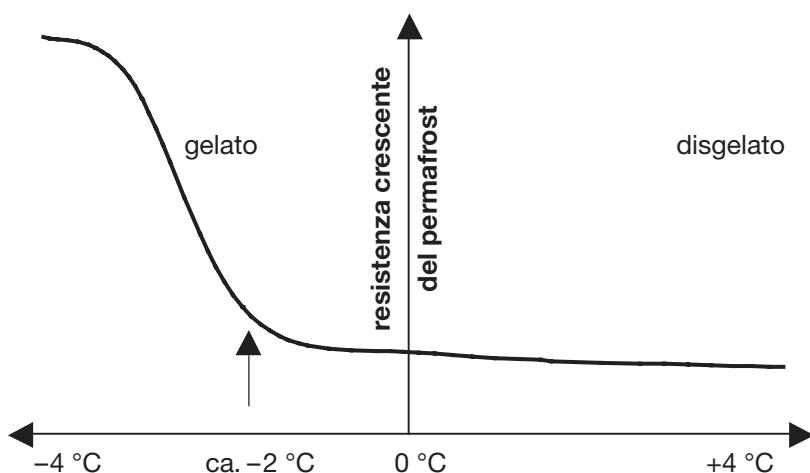


Fig. 8: Rappresentazione schematica della resistenza del permafrost in funzione della temperatura (adattata da ANDERSLAND e LADANYI 2004).

### *Comportamento della resistenza*

La resistenza di un terreno di fondazione nel permafrost dipende essenzialmente dalla sua granulometria, dalla sua compattazione, dal suo contenuto di ghiaccio e dalla sua temperatura. La resistenza al taglio di un terreno grossolano ben compattato è determinata dal suo angolo di attrito e dalla sua dilatanza. In un terreno di fondazione gelato, la resistenza al taglio può aumentare grazie ai legami intergranulari assicurati dal ghiaccio, paragonabili a una cementazione.

Si constata che la resistenza al taglio della matrice ghiacciata di un terreno aumenta fino alla saturazione di ghiaccio, poiché le forze sono trasmesse principalmente allo scheletro minerale. Quando la percentuale di ghiaccio supera il grado di saturazione (soprassaturazione di ghiaccio), la resistenza al taglio del terreno si riduce a causa dello scorrimento. Questa è allora determinata dal ghiaccio, poiché il contatto intergranulare, generatore di attrito interno, è scomparso (fig. 5). In queste condizioni, la resistenza al taglio diminuisce.

Quando la temperatura del permafrost è leggermente inferiore a 0 °C, la resistenza al taglio è leggermente superiore a quella di un terreno non gelato. In caso di disgelo completo o di forti deformazioni, l'effetto di cementazione del ghiaccio scompare e la resistenza al taglio dimuisce nuovamente per diventare paragonabile a quella di un terreno non gelato.

Un terreno fine gelato resiste meglio al taglio che allo stato non gelato, purché non sia soprassaturo di ghiaccio. Quando disgela, possono nascere importanti pressioni interstiziali. Ne consegue una riduzione degli sforzi effettivi e quindi una diminuzione della resistenza al taglio che può generare instabilità.

La resistenza di un terreno di fondazione nel permafrost dipende dalla velocità a cui viene caricato e dalle deformazioni che subisce. Questo comportamento è presentato in figura 10, in funzione della percentuale volumica di ghiaccio, e descritto nel paragrafo seguente.

### *Comportamento relativo alla deformazione*

Il comportamento di un terreno di fondazione, gelato e ricco di ghiaccio che si deforma per effetto di un carico costante è strettamente dipendente dalla durata del processo. In questo caso il movimento di scorrimento è influenzato dalla percentuale di ghiaccio e dalla sua temperatura. Quando la percentuale di ghiaccio di un terreno supera il grado di saturazione (soprassaturazione di ghiaccio), i contatti intergranulari, generatori di attrito interno, scompaiono e le deformazioni per scorrimento aumentano.

La figura 9 presenta le curve di scorrimento di un terreno contenente ghiaccio sottoposto a un sovraccarico, per diverse percentuali di ghiaccio e secondo le tre fasi di scorrimento dominanti. La curva di scorrimento standard comprende tre fasi caratteristiche dipendenti dal tempo: la fase primaria (immediata, decrescente), la fase secondaria (costante) e la fase terziaria (crescente fino alla rottura, raggiunta raramente).

La velocità con la quale un carico è applicato così come la percentuale volumica di ghiaccio influenzano il comportamento in deformazione di un terreno gelato contenente ghiaccio. Un carico rapido può provocare una rottura brusca, mentre un carico lento indurrà, a seconda della percentuale di ghiaccio, una deformazione dilatante o duttile comprendente uno scorrimento (fig. 10).

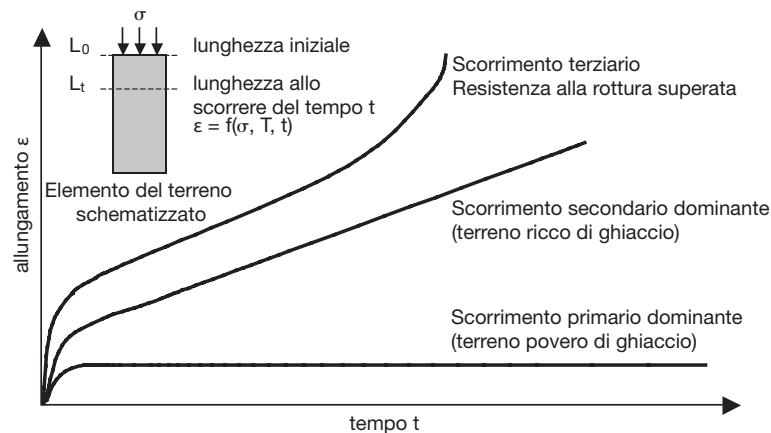


Fig. 9: Curve di scorrimento in funzione delle diverse percentuali di ghiaccio in un terreno (adattato da ANDERSLAND e LADANYI 2004).  $L_0$  = lunghezza iniziale,  $L_t$  = lunghezza nello spazio di tempo  $t$ ,  $\epsilon$  = dilatazione,  $\sigma$  = carico supplementare,  $T$  = temperatura.

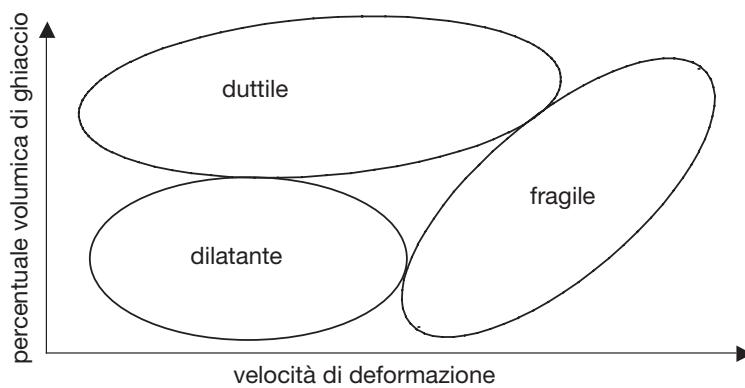


Fig. 10: Comportamento della deformazione e della resistenza di un terreno nel permafrost, in funzione della percentuale volumica di ghiaccio (adattato da ARENSEN et al. 2002).

### Sintesi

Le proprietà geotecniche dei terreni situati nel permafrost sono determinate dalla temperatura del terreno e dalle proporzioni di ghiaccio e di materia solida. La resistenza dipende essenzialmente dalla distribuzione granulometrica, dalla compattezza, dal contenuto di ghiaccio e dalla temperatura del terreno. La resistenza al taglio di un terreno gelato può aumentare, a seconda del contenuto di ghiaccio, grazie ai legami intergranulari assicurati dal ghiaccio.

Il comportamento della deformazione, particolarmente dipendente dal tempo, è influenzato dal contenuto di ghiaccio e dalla sua temperatura. Quando la percentuale di ghiaccio di un terreno supera il grado di saturazione, i contatti intergranulari scompaiono e le deformazioni per scorrimento aumentano.

La tabella 3 presenta qualitativamente l'influenza delle diverse proprietà geotecniche sulla resistenza al taglio e sul comportamento della deformazione di un terreno nel permafrost. I valori indicati possono variare localmente e dovrebbero essere verificati da test sul terreno o in laboratorio a seconda del contesto.

La tabella 4 presenta i valori caratteristici dei terreni di fondazione, nonché i meccanismi di deformazione e di resistenza al taglio esercitati nei terreni gelati. I valori indicati possono variare localmente e dovrebbero essere verificati da test sul terreno o in laboratorio.

Tab. 3: Proprietà geotecniche di terreni gelati che influenzano la resistenza al taglio e il comportamento in deformazione. \* SA: strato attivo; P: permafrost.

Terreno	Resistenza al taglio		Comportamento in deformazione	
	+ (aumento)	- (diminuzione)	+ (aumento)	- (diminuzione)
Distribuzione granulometrica	ben strutturata, a grana grossolana	uniforme, a grana fine	a grana fine	ben strutturata, a grana grossolana
Compattezza	densa	sciolta	sciolta	compatta
Permeabilità: SA / P*	elevata	debole	elevata, > scorrimento	debole, < scorrimento
Percentuale di aria interstiziale	debole, < scorrimento	forte, > scorrimento	elevato, > scorrimento	debole, < scorrimento
Percentuale di ghiaccio	fino a saturo	soprassaturo, secco	soprassaturo da	secco a saturo
Temperatura	$\leq -2^{\circ}\text{C}$	$\geq -2^{\circ}\text{C}$	$\geq -2^{\circ}\text{C}$ , > scorrimento	$\leq -2^{\circ}\text{C}$ , < scorrimento

Tab. 4: Valori caratteristici e meccanismi in un terreno gelato.

Descrizione, valori del terreno di fondazione	Terreno gelato, povero di ghiaccio	Terreno gelato	Terreno ricco di ghiaccio	Ghiaccio sporco o con ghiaia
Massa volumica [kg m <sup>-3</sup> ]	2000–2300	1550–2000	1100–1550	900–1100
Compattezza	densa	debole	—	—
Percentuale di ghiaccio [%]	0–20	20–55	55–85	85–100
Attrito	attrito, dilatazione	poco attrito	pochissimo attrito	pochissimo attrito
Composizione della resistenza al taglio, meccanismi	resistenza del ghiaccio, resistenza del terreno, ostacoli strutturali, dilatazione	resistenza del ghiaccio, resistenza del terreno, ostacoli strutturali,	resistenza del ghiaccio aumentata dalla presenza di componenti lapidee	resistenza del ghiaccio
Meccanismi di scorrimento e di deformazione	scorrimento attenuato, deformazione impedita dalla forma dei grani	scorrimento, deformazione impedita dalla forma dei grani	scorrimento, spostamenti eventualmente impediti dalle componenti lapidee	nessun ostacolo allo scorrimento, le impurità favoriscono la ricristallizzazione

## La roccia nel permafrost

Le proprietà geotecniche della roccia all'interno del permafrost sono essenzialmente dettate dal suo contenuto di ghiaccio, dalla sua fessurazione e dalla sua temperatura. Sulla superficie della roccia e nello strato attivo, sono influenzate dall'alterazione dovuta al gelo (gelifrazione). Questa sezione descrive le proprietà geotecniche della roccia e il suo comportamento in resistenza e in deformazione.

### Proprietà della roccia

Dal punto di vista costruttivo, la qualità della roccia nel permafrost dipende essenzialmente dalla densità di fratturazione, dalla larghezza delle fessure e dal loro contenuto di ghiaccio. La sezione seguente descrive una possibile tecnica per determinare la qualità della roccia (frequenza delle fessure), mentre le sezioni «Percentuale di ghiaccio» e «Ghiaccio di segregazione» forniscono indicazioni sul contenuto di ghiaccio.

Nel caso di costruzioni complesse e soggette a deformazioni, si raccomanda di determinare attentamente le caratteristiche della roccia di fondazione. Oltre alla densità (frequenza) delle fessure e alla loro larghezza, si stabilirà la loro giacitura e la loro persistenza, così come il grado di separazione. Il rilievo del riempimento delle fessure permette di determinare l'attrito sulle discontinuità mentre le misurazioni della temperatura forniscono indicazioni sulla coesione tra la roccia e il ghiaccio.

Si possono anche studiare le caratteristiche della roccia procedendo a un carotaggio. I campioni indisturbati prelevati sono successivamente analizzati in laboratorio allo scopo di determinarne la resistenza alla compressione e l'attrito. È anche importante rilevare la giacitura delle fessure nelle carote. Le discontinuità possono essere esaminate più da vicino con una telecamera per sondaggio. Altre analisi realizzabili sono presentate ai capitoli 2.1.2 e 2.1.3.

#### *Rock Quality Designation Index (Indice RQD)*

L'indice RQD (ASTM D6032) è un valore utilizzato per classificare la qualità delle carote di roccia. È definito come il rapporto tra la somma dei tronchi di lunghezza superiore agli 0,10 m e la lunghezza del tratto di carotaggio scelto (1 m). Il valore ottenuto è confrontato con i dati empirici presenti in una tabella di classificazione (tab. 5), il che fornisce una prima valutazione della qualità della roccia.

Tab. 5: Rock Quality Designation (RQD) – Dati empirici per la classificazione della resistenza alla compressione delle rocce o della qualità della roccia (adattato da DEERE 1963).

RQD	Qualità della roccia
< 25 %	molto debole
25–50 %	debole
50–75 %	media
75–90 %	buona
90–100 %	ottima

#### *Geological Strength Index (GSI)*

Il metodo GSI è utilizzato per classificare la qualità di una roccia molto fessurata e alterata dal gelo. L'indice GSI si basa su osservazioni geologiche di superficie, riguardanti particolarmente la natura della roccia (litologia), la sua struttura e le sue caratteristiche superficiali (fratturazione, alterazione, riempimento delle fessure). Le stime che ne risultano permettono di effettuare una prima valutazione della qualità della roccia senza dover procedere a sondaggi. In MARINOS e HOEK (2005) è descritta nel dettaglio la determinazione della qualità delle rocce secondo il metodo GSI.

#### *Porosità*

La porosità influenza il contenuto di acqua della roccia. Le dimensioni dei pori sono di particolare importanza. In quelli più grandi, l'acqua scorre principalmente per effetto della forza di gravità, mentre in quelli piccoli, può essere trasportata in qualsiasi direzione, in forma liquida, condotta dalla capillarità e dalla tensione di suzione o sotto forma di vapore seguendo un gradiente di temperatura. Nella roccia, l'apporto di acqua liquida o del vapore acqueo necessario alla formazione di ghiaccio di segregazione non è assicurato dai pori, ma dalle fessure.

### *Stratificazione e fessurazione*

Il substrato roccioso e le pareti rocciose causano problemi solo quando sono stratificati o fessurati in modo sfavorevole e quando contengono ghiaccio. In questo caso, un riscaldamento del ghiaccio può compromettere la stabilità della roccia provocando cadute di blocchi o crolli di roccia.

La circolazione di acqua e di aria più calda nelle fessure favorisce il riscaldamento della roccia e del permafrost contribuendo quindi allo scioglimento del ghiaccio. Ma è possibile che lo scorrimento dell'acqua nelle fratture aperte venga ostacolato e che l'acqua così accumulata eserciti una pressione suscettibile di provocare cadute di blocchi o crolli.

### *Contenuto di ghiaccio*

In una roccia sana, il contenuto di ghiaccio dipende essenzialmente dalla densità delle discontinuità, ed è raro che una roccia non presenti né fessure né fratture. A volte queste sono piene di ghiaccio. Oltre al loro «effetto di cementazione» (coesione apparente), le fessure ghiacciate possono impermeabilizzare una parete rocciosa al punto che l'acqua non riesce più ad infiltrarsi nella roccia. La tabella 2 fornisce indicazioni sul volume di ghiaccio contenuto nella roccia.

### *Ghiaccio di segregazione*

La segregazione del ghiaccio può comportare un allargamento delle discontinuità della roccia. Nuove fessure si formano generalmente in prossimità della superficie del permafrost o alla base dello strato attivo. La segregazione del ghiaccio è favorita dalle seguenti condizioni:

- gradiente di temperatura negativo (fig. 7);
- sistema di fessure (permeabilità) che permette la migrazione di acqua liquida o il trasferimento di vapore acqueo;
- apporto di acqua (non gelata).

Il ghiaccio di segregazione è essenziale per quanto riguarda i sollevamenti della roccia (movimenti verso l'alto o verso l'esterno dovuti all'espansione della roccia) (cap. 1.7, fig. 20).

### *Temperatura*

Una diminuzione della temperatura del terreno ha un effetto positivo sulla stabilità delle rocce contenenti ghiaccio, poiché rinforza la coesione dell'insieme roccia-ghiaccio. Un aumento della temperatura provoca invece un deterioramento e, di conseguenza, una destabilizzazione del permafrost. Test di laboratorio hanno mostrato che il ghiaccio raggiunge una temperatura leggermente inferiore al punto di congelamento, il legame roccia-ghiaccio si indebolisce e si destabilizza (indice di stabilità: < 1,0 rottura del legame roccia-ghiaccio; > 1,0 legame roccia-ghiaccio solido; fig. 11; DAVIES *et al.* 2001).

Un riscaldamento del permafrost si ripercuote più rapidamente sulla superficie di pareti rocciose che su terreni. Poiché le pareti rocciose non presentano nessuno strato isolante costituito da grandi blocchi (spazi pieni d'aria) e sono poco innevate, sono influenzate direttamente dalla temperatura dell'aria e dall'irraggiamento solare.

### *Comportamento della resistenza*

La resistenza alla compressione di una roccia sana è principalmente determinata dal tipo di roccia. Se questa è fessurata, la resistenza dipende dalla direzione delle fessure e dal loro riempimento. Quando si esercita una forza perpendicolare a un'apertura piena di ghiaccio, la resistenza alla compressione dipende dalle proprietà del ghiaccio e della roccia.

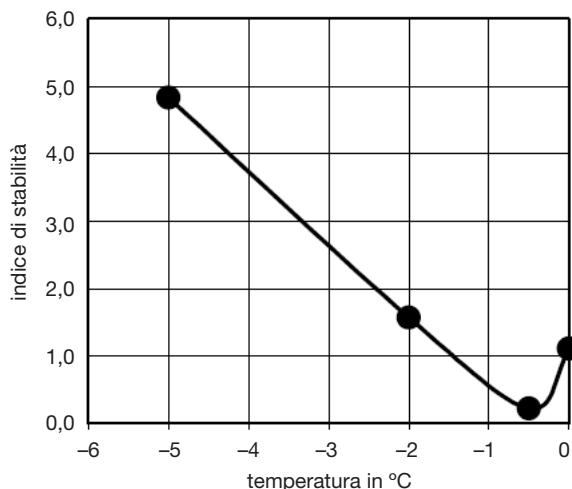


Fig. 11: Relazione tra la temperatura del ghiaccio nelle fessure e l'indice di stabilità della roccia (adattato da DAVIES *et al.* 2001).

Le forze che si esercitano parallelamente a una fessura sono dette forze di taglio. La resistenza al taglio di una fessura piena di ghiaccio dipende dalla temperatura della roccia e del ghiaccio. Un riscaldamento del ghiaccio riduce la stabilità. Questo comportamento si spiega con la comparsa di una sovrappressione di acqua interstiziale dovuta a un blocco delle vie di drenaggio. Ne risulta una diminuzione della tensione effettiva e della resistenza al taglio delle fessure. Le fessure prive o piene di ghiaccio ( $T \leq -2^{\circ}\text{C}$ ) sono più stabili (fig. 11).

La resistenza del ghiaccio è influenzata dalla temperatura, dalla pressione idrostatica, dalle condizioni della sua formazione, dalla struttura dei suoi cristalli, dalle impurità e dai materiali fini che contiene.

#### *Comportamento in deformazione*

Il comportamento della deformazione di una roccia sana è principalmente determinato dal modulo di elasticità corrispondente a questo tipo di roccia. Se è fessurata, la deformazione dipende dalla direzione delle fessure e dal loro riempimento. Quando si esercita una forza perpendicolare a una fessura piena di ghiaccio, la deformazione dipende dalle proprietà del ghiaccio e della roccia. Forze esercitate parallelamente a una fessura generano una deformazione da taglio. Questa dipende dalla temperatura del ghiaccio contenuto nella fessura. Un riscaldamento di questo ghiaccio accelera le deformazioni da taglio (accelerazione dello scorrimento) e può, nel peggior caso, rompere il legame tra il ghiaccio e la roccia.

#### *Sintesi*

Nella pratica, la proprietà geotecnica più importante di una roccia contenente ghiaccio è il suo comportamento relativamente alle deformazione e allo scorrimento per effetto di un carico. A seconda del contenuto di ghiaccio, occorre aspettarsi una deformazione viscoplastica. Nelle rocce fessurate contenenti ghiaccio, le deformazioni sono determinate dalla direzione delle fessure e dal loro riempimento. A seconda della forza esercitata, la deformazione e la resistenza alla compressione e al taglio dipendono dalle proprietà del ghiaccio o della roccia. Un riscaldamento del ghiaccio nelle fessure accelera le deformazioni da taglio (accelerazione dello scorrimento) e può, nel peggior caso, rompere il legame tra il ghiaccio e la roccia.

Tab. 6: Proprietà geotecniche di una roccia gelata che determinano la resistenza al taglio e il comportamento in deformazione.

Roccia	Resistenza al taglio		Comportamento in deformazione	
	+ (aumento)	- (diminuzione)	+ (aumento)	- (diminuzione)
Indice RQD	> 50%	< 50%	< 50%	> 50%
Porosità	bassa	elevata	elevata	bassa
Fessurazione	debole, opposta alla direzione di taglio	elevata, in direzione di taglio	elevata, in direzione di taglio	debole, opposta alla direzione di taglio
Ghiaccio di segregazione	nessuna, appena qualche lente di ghiaccio	molte lenti di ghiaccio	molte lenti di ghiaccio	nessuna, appena qualche lente di ghiaccio

La tabella 6 presenta qualitativamente l'influenza delle diverse proprietà geotecniche sulla resistenza al taglio e sul comportamento della deformazione di una roccia gelata. I valori indicati possono variare e dovrebbero essere verificati, in funzione del tipo di problema, da test sul terreno o in laboratorio a seconda del contesto.

## 1.5 Forme del terreno e geomorfologia del permafrost alpino

Il permafrost è un fenomeno termico, generalmente poco visibile. Esistono tuttavia alcune forme del terreno e alcuni fenomeni che rivelano la presenza di permafrost (cap. 1.8).

I **ghiacciai rocciosi attivi** sono terreni lobati, ricoperti di detriti e costituiti da massi e ghiaccio; scorrono a valle a una velocità che va da qualche centimetro ad alcuni metri all'anno. Hanno forma convessa e presentano in superficie strutture di reptazione e bordi ripidi ( $> 38^\circ$ ). Quest'ultima caratteristica rivela la presenza di ghiaccio, in quanto l'angolo naturale di deposito dei terreni è generalmente inferiore a  $38^\circ$  circa. La temperatura dell'acqua di eventuali sorgenti sul fronte è inferiore ai  $3^\circ\text{C}$ . I ghiacciai rocciosi attivi misurano da qualche decina a varie centinaia di metri di lunghezza e il loro spessore può raggiungere diverse decine di metri. Sono facilmente riconoscibili sulle mappe, sulle foto aeree o sul terreno e assomigliano a colate di lava viscosa (fig. 12, a sinistra).

I **ghiacciai rocciosi relitti** non contengono ghiaccio, sono leggermente bombati e avvallati. I loro bordi hanno una pendenza inferiore ai  $38^\circ$ . Sulla loro superficie possono trovarsi licenzi e vegetazione. Eventuale acqua sorgiva ha una temperatura superiore ai  $3^\circ\text{C}$ , e questo indica la probabile assenza di ghiaccio all'interno (fig. 12, a destra).

Nei depositi, come le falde di detrito o le morene, possono presentarsi anche **lobi di soliflusso** più piccoli, a forma convessa. Questi lobi si estendono per qualche metro fino a poche decine di metri e il loro spessore varia da qualche centimetro a qualche decimetro. Nelle regioni con presenza di permafrost, sono generalmente privi di vegetazione e i loro bordi sono scoscesi, il che indica la presenza di ghiaccio nel terreno. Sono facilmente reperibili sulle foto aeree e sul terreno (fig. 13).



Fig. 12: (a sinistra) ghiacciaio roccioso attivo caratterizzato da strutture di flusso e dal fronte ripido (Vallone di Arbolle, Charvensod, AO), a 2850 m di quota; (a destra) ghiacciaio roccioso relitto abbondantemente ricoperto da vegetazione, anche arborea e con evidenti depressioni della superficie, indice di assenza di movimento e della perdita del ghiaccio interno (conca di Pila, Charvensod, AO, 2300 m di quota).



Fig. 13: Lobi di soliflusso su una falda detritica (regione dello Julier, a 2700 m s.m. di altitudine, GR).

Le **chiazze di neve perenne** durano uno o più anni senza sciogliersi in estate, isolando così il terreno dalle temperature elevate dell'aria e dall'irraggiamento solare. Si trovano generalmente ai piedi dei pendii (depositi di valanghe) o nelle depressioni (neve soffiata dal vento) e sono facilmente visibili sulle foto aeree e sul terreno in autunno (fig. 14).

Si producono **depressioni termocaristiche** se il ghiaccio del terreno si scioglie e se il terreno perde parte del suo volume (si formano spazi vuoti). Possono comparire nell'arco di alcuni giorni fino a diversi anni e avere una profondità di vari metri. Il terreno che li circonda può ancora contenere ghiaccio (fig. 15).



Fig. 14: Chiazze di neve perenne (depositi di valanga) ai piedi di un ripido pendio (Vallone di Arbole, Charvensod, AO), a 2950 m di quota.



Fig. 15: Depressione termocarstica su una pista di sci.



Fig. 16: Suolo strutturato su terreno a pendenza moderata (Colle Superiore di Cime Bianche, Valtournenche, AO) a 3100 m di quota.



Fig. 17: Ghiaccio fessurale in una zona di stacco di una frana (Gemsstock, a 2960 m di altitudine, UR. Foto: Carlo Danioth).

I **terreni strutturati**, o suoli poligonali, si sviluppano generalmente su terreno sciolto. Sui terreni piani, ad esempio, possono formare cerchi di massi mentre sui terreni acclivi possono generare delle strisce di blocchi. Tali strutture indicano la presenza di terreni contenenti ghiaccio e l'alternanza di processi di gelo e disgelo, ma non sono un indicatore affidabile di permafrost (fig. 16).

Nelle zone aperte di frane, nei punti di innesco di lave torrentizie e in zone di crolli di roccia, possono essere visibili alcune forme di **ghiaccio del terreno** o di **ghiaccio fessurale** e questo dimostra chiaramente la presenza di permafrost. Purtroppo però questo ghiaccio è raramente visibile sul terreno (fig. 17).

Le pareti rocciose che si trovano sotto i **ghiacciai sospesi** sono gelate in permanenza, in quanto se così non fosse, il ghiaccio scivolerebbe sulla superficie della roccia. Esse sono quindi una prova evidente della presenza di permafrost (fig. 18).



Fig. 18: Ghiacciaio sospeso e pareti di ghiaccio (Grandes Jorasses, Courmayeur, AO). I ghiacciai sospesi, «incollati» al ripido substrato roccioso, rivelano la presenza di permafrost.

## 1.6 Permafrost e cambiamento climatico

I rapporti nazionali e internazionali sul clima pubblicati nel 2007 prevedono un surriscaldamento da 2 a 3 °C nel corso dei prossimi 50 anni in Svizzera (OcCC, 2007; IPCC, 2007). Diversi scenari climatici prevedono persino surriscaldamenti più marcati in alta montagna sull'arco alpino (fino a 4 °C; GIORGI *et al.* 1997). Parallelamente a questo aumento, le precipitazioni dovrebbero diminuire dal 5 al 30% in estate e aumentare del 20% in inverno. Bisogna anche aspettarsi un aumento delle precipitazioni estreme nonché ondate di calore e periodi di siccità in estate, le cui conseguenze sono difficilmente stimabili. È però certo che il surriscaldamento generale e l'aumento degli eventi estremi esercitano un effetto distruttivo sul permafrost e sul ghiaccio presente nel terreno (MARTY *et al.* 2009). Se il permafrost si riscalda o addirittura si scioglie, potrebbero verificarsi eventi franosi (cap. 1.7). L'attuale surriscaldamento climatico rappresenta quindi una sfida tecnica particolare da tenere in considerazione nella realizzazione e nella manutenzione di costruzioni ancorate nel permafrost.

## 1.7 I pericoli naturali

Nelle aree di permafrost possono verificarsi pericoli naturali specifici, dovuti alla presenza del ghiaccio. Di seguito i principali processi attivi:

- a) scivolamento di pendii, ghiacciai rocciosi (aumento della produzione di materiali mobilizzabili);
- b) cedimenti dovuti allo scioglimento del ghiaccio interstiziale o fessurale;
- c) frane e smottamenti del terreno dovuti alla pressione dell'acqua di scioglimento nel permafrost;
- d) erosione dei corpi di permafrost disgelati dovuta a una struttura instabile

Il processo a) è un fenomeno continuo che si svolge su un lungo periodo. È paragonabile ai movimenti permanenti di pendii, frequenti sulle Alpi, talvolta attivi da diverse migliaia di anni. Questi scivolamenti lenti nel permafrost, analogamente ai terreni soggetti a movimenti permanenti, si possono spiegare con modelli reologici. A seconda della profondità del piano di scivolamento, intere costruzioni vengono spostate o sottoposte a movimenti differenziali. Le forze attive sono diverse volte superiori alla normale spinta del terreno.

I processi da b) a d) sono causati da modifiche del permafrost. Quando è intatto, l'effetto della temperatura dell'aria si fa sentire in profondità all'interno della roccia. L'effetto in profondità dipende dalla conduttività termica della roccia e si situa a circa 25 m per lo gneiss e il calcare. Misure effettuate sullo Cervino lo confermano (fig. 19).

Le fluttuazioni della temperatura all'interno del permafrost producono un gelo-disgelo continuo di una parte dell'acqua che contiene. Il vapore acqueo migra allora dal caldo verso il freddo, lungo un gradiente di temperatura negativo, e il ghiaccio si forma in modo anticoiclico rispetto alle fluttuazioni della temperatura (segregazione). Misure realizzate nell'arco di dieci anni nella regione dello Sphinx sullo Jungfraujoch confermano questo fenomeno. La roccia subisce ogni anno una deformazione opposta alle variazioni della sua temperatura e questa deformazione non è completamente reversibile. Il raffreddamento genera una cristallizzazione del ghiaccio, che porta a un'espansione della roccia. Sullo Sphinx, questa deformazione ha raggiunto i 3 mm in dieci anni (fig. 20). L'allargamento delle fessure piene di ghiaccio indebolisce la roccia, che tende a destabilizzarsi.

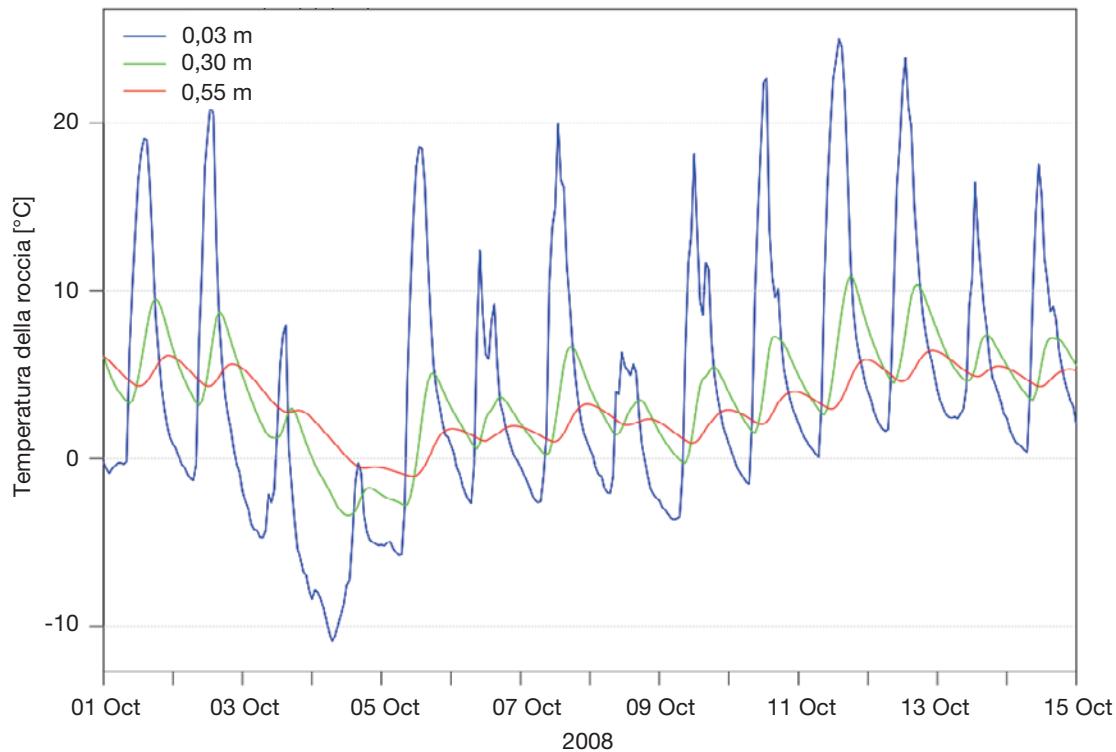


Fig. 19: Andamento della temperatura superficiale delle pareti rocciose del Cervino in funzione della profondità (gneiss subverticale, esposizione sud, quota 3750 m). Con l'aumentare della profondità, si rilevano escursioni termiche inferiori e lo sfasamento temporale dei picchi di massima e minima giornaliera.

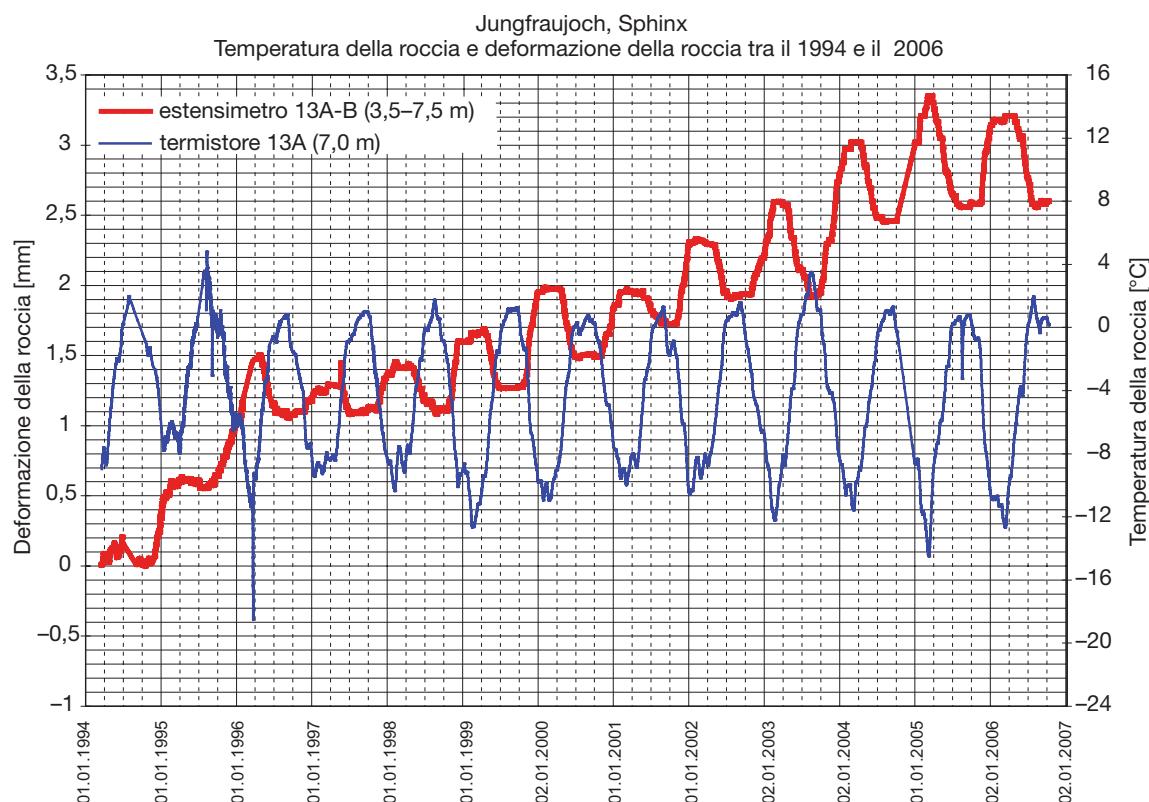


Fig. 20: Deformazione anticiclica e parzialmente irreversibile (in rosso) della roccia dello Jungfraujoch (roccia: gneiss con fessure piene di ghiaccio). La roccia si allarga per effetto della segregazione del ghiaccio (Dati Geotest, Zollikofen).

I processi da b) a d) sono causati dalla perdita di stabilità del permafrost in corso di disgelo. In un permafrost intatto, il ghiaccio impedisce le infiltrazioni di acqua e impermeabilizza il sottosuolo. Quando il ghiaccio interstiziale o fessurale si scioglie, dell'acqua può penetrare nella roccia. Non è importante sapere se proviene dall'esterno (pioggia, scioglimento delle nevi) o dal ghiaccio che disgela nel permafrost: se quest'acqua non può essere evacuata, sottopone la roccia a pressioni che possono condurre a una perdita improvvisa di stabilità. La frana che si è prodotta il 18 gennaio 1997 sul versante della Brenva ne è un tipico esempio (fig. 21).

Durante l'estate torrida del 2003, numerosi crolli di roccia si sono prodotti nelle Alpi. Hanno principalmente interessato i versanti esposti a nord, sopra i 3000 m di altitudine, includendo quindi anche il permafrost ancora intatto. In quel periodo, la temperatura dell'aria era rimasta elevata per settimane e non era ridiscesa al punto di congelamento durante la notte. Queste condizioni hanno comportato il disgelo del permafrost e la perdita di stabilità di cui sopra. Frane simili si sono prodotte ad esempio sull'Eiger (il 6, 8 e 17 agosto 2003), sul Cervino (luglio 2003; fig. 22) e sui Drus (l'8 agosto 2003).

I sedimenti dovuti al disgelo del permafrost dipendono dal contenuto di ghiaccio. In un permafrost ricco di ghiaccio con una massa volumica di  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ( $1,2 \text{ t/m}^3$ ) si raggiungono assottigliamenti fino al 60% (WATSON 1973). La perdita di ghiaccio dovuta al disgelo nel permafrost rende più fragile la struttura del terreno e quindi particolarmente sensibile all'erosione e alle colate di detriti.



Fig. 21: Nicchia di distacco della frana del 18 gennaio 1997 sul versante della Brenva (Monte Bianco, a circa 3600 m di altitudine). Ben visibile l'acqua di scioglimento presente nella zona di distacco (foto: Maurizio Fonte).



Fig. 22: Crollo del diedro della Cheminée lungo la via normale italiana di salita al Cervino, agosto 2003. E' evidente il ghiaccio che occupava la fessura subparallela alla parete rocciosa. A valle del ghiaccio, si riconoscono alcuni blocchi (accumulo di frana) e l'acqua di fusione che cola in superficie.

Il surriscaldamento climatico, sempre più evidente dal 1980, mette il permafrost a dura prova e innesca processi di disgelo. Bisogna quindi aspettarsi un aumento del numero di crolli di roccia e di smottamenti di terreno nelle regioni con presenza di permafrost. Secondo un sondaggio realizzato presso i gestori dei rifugi CAS nel 2007, gli eventi naturali che hanno interessato le vie d'accesso sono parzialmente dovuti al disgelo del permafrost. Questo fenomeno può indubbiamente generare seri rischi a livello locale per le strutture turistiche di montagna.

## 1.8 Rilevamento del permafrost

Per rilevare la presenza di permafrost occorrono metodi progressivi che forniscano informazioni sempre più affidabili e che necessitano di un investimento sempre maggiore. Se si suppone la presenza di permafrost, la prima fase consiste nel reperire informazioni sul sito, valutare il terreno in questione ed effettuare una prima campagna di misure. Queste prime valutazioni forniscono indicazioni sulla probabilità della presenza di permafrost, e permettono di registrare eventuali movimenti di superficie.

Per ottenere una prova concreta della presenza di permafrost e informazioni significative sulla temperatura del terreno e il contenuto di ghiaccio, occorre, come seconda fase, eseguire trincee di sondaggio o perforazioni. Tali operazioni dovrebbero essere realizzate da specialisti e sono ricapitolati in un diagramma di svolgimento per il rilevamento del permafrost (fig. 23).

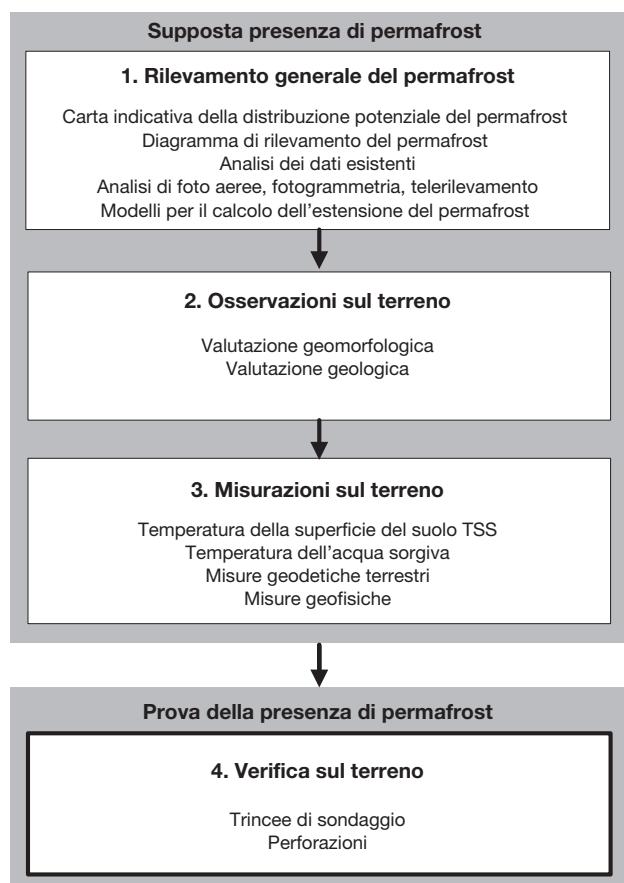


Fig. 23: Diagramma di svolgimento del rilevamento di siti con presenza di permafrost, con esempi di approfondimenti realizzati a ogni fase (adattato da HARRIS *et al.* 2001).

### 1.8.1 Supposta presenza di permafrost

#### Primi accertamenti della presenza di permafrost

##### *Carta indicativa della distribuzione potenziale del permafrost in Svizzera*

La «Carta indicativa del permafrost in Svizzera» (UFAM 2006) mostra le regioni delle Alpi svizzere dove la presenza di permafrost è possibile a livello locale, o addirittura probabile a livello areale. Questa carta fornisce una prima indicazione di eventuali siti con presenza di permafrost, ma poiché si basa su modellizzazioni molto semplificate, è indispensabile approfondire l'esame in loco. La presenza eccezionale di permafrost azonali o di permafrost prodotti artificialmente non figura su questa carta (fig. 24a e allegato A). La carta su scala 1: 50 000 può essere richiesta presso l'UFAM. In figura 24b è rappresentata la carta di potenziale distribuzione di permafrost in Valle d'Aosta (Italia).

##### *Carte indicative di permafrost regionali*

Oltre alla carta indicativa dell'UFAM, altre carte sono state realizzate separatamente per diverse regioni. Per l'Alta Engadina, ad esempio, esiste una carta glaciologica della regione dello Julier e del Bernina (1998, carta di sintesi PNR 31) su scala 1: 60 000. Su tale carta, edita da vdf (sito web: [www.vdf.ethz.ch](http://www.vdf.ethz.ch)), sono rappresentati i ghiacciai, nonché l'estensione del permafrost e i lobi di soliflusso presenti in questa regione.

*Valutazione della presenza di permafrost sui versanti in funzione dell'altitudine e dell'esposizione*  
Tramite un semplice diagramma (fig. 25), è possibile stimare sommariamente la probabilità della presenza di permafrost. Utilizzando questo diagramma, va considerato il fatto che il permafrost può anche trovarsi a un'altitudine inferiore e che è indispensabile approfondire l'esame del terreno, poiché la topografia, la copertura e il manto nevoso hanno un'influenza molto forte sull'estensione locale del permafrost.

Questo diagramma indica che il limite inferiore della presenza di permafrost si colloca leggermente sotto i 3000 m di altitudine per le esposizioni da E a SO passando per il sud – è quindi nettamente più elevata che nel settore da O a NE passando per il nord dove questo limite si colloca a 2500 metri. La presenza di permafrost ad altitudini più basse è dovuta, tra gli altri fattori, alla presenza di depositi di valanghe. Ai piedi dei versanti, si può trovare permafrost 200 o 300 m più in basso se vi si è accumulata neve di valanghe e se non si è sciolta in estate. Un diagramma simile a quello di figura 25 è stato allestito per valutare la presenza di permafrost ai piedi dei versanti (HAEBERLI 1975).

##### *Dati esistenti rilevati nelle regioni con presenza di permafrost*

Sulle Alpi svizzere, da diversi anni si effettuano varie misurazioni nel permafrost e in alcuni siti si realizzano anche misurazioni meteorologiche. Questi dati forniscono informazioni importanti sull'estensione del permafrost, sul suo stato, sul suo sviluppo e sulle condizioni meteorologiche.

Su mandato dell'Accademia svizzera di scienze naturali (ASSN), di MeteoSvizzera e dell'UFAM, lo stato e le modifiche del permafrost delle Alpi svizzere sono osservati tramite la rete di misurazioni PERMOS (Permafrost Monitoring Suisse) (sito web: [www.permos.ch](http://www.permos.ch)). PERMOS coordina le misurazioni automatiche della temperatura effettuate nei fori di sondaggio e sulla superficie del terreno su siti selezionati in diversi tipi di terreno (fig. 26a). Inoltre PERMOS organizza regolarmente analisi fotogrammetriche dei movimenti di ghiacciai rocciosi. Nella figura 26b sono rappresentati i siti di monitoraggio delle temperature del permafrost in Valle d'Aosta gestiti dall'ARPA.

## Carta indicativa del permafrost in Svizzera

Estensione del permafrost – modellizzazioni realizzate grazie all'MNT25 (UFAM, luglio 2006)

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

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

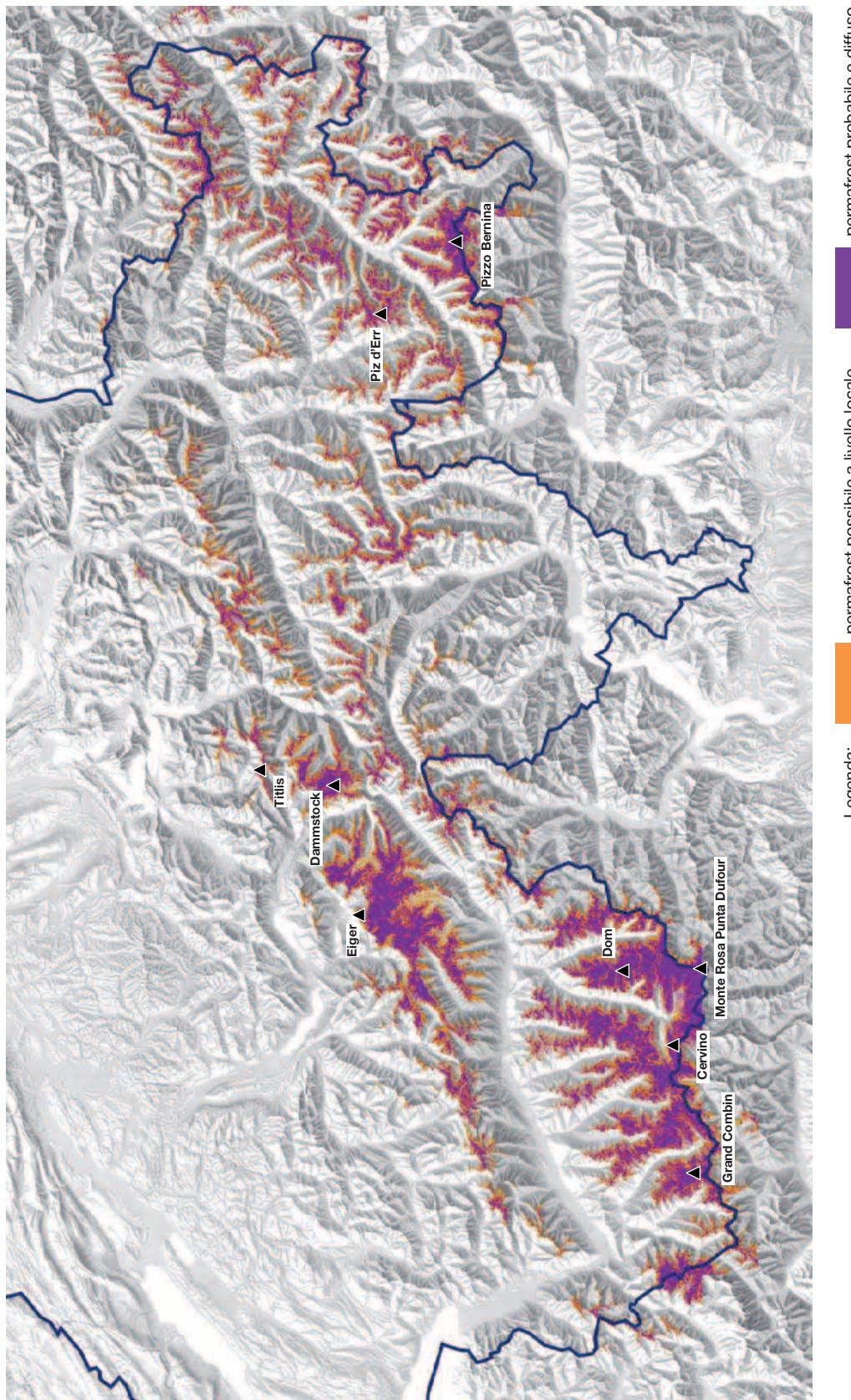
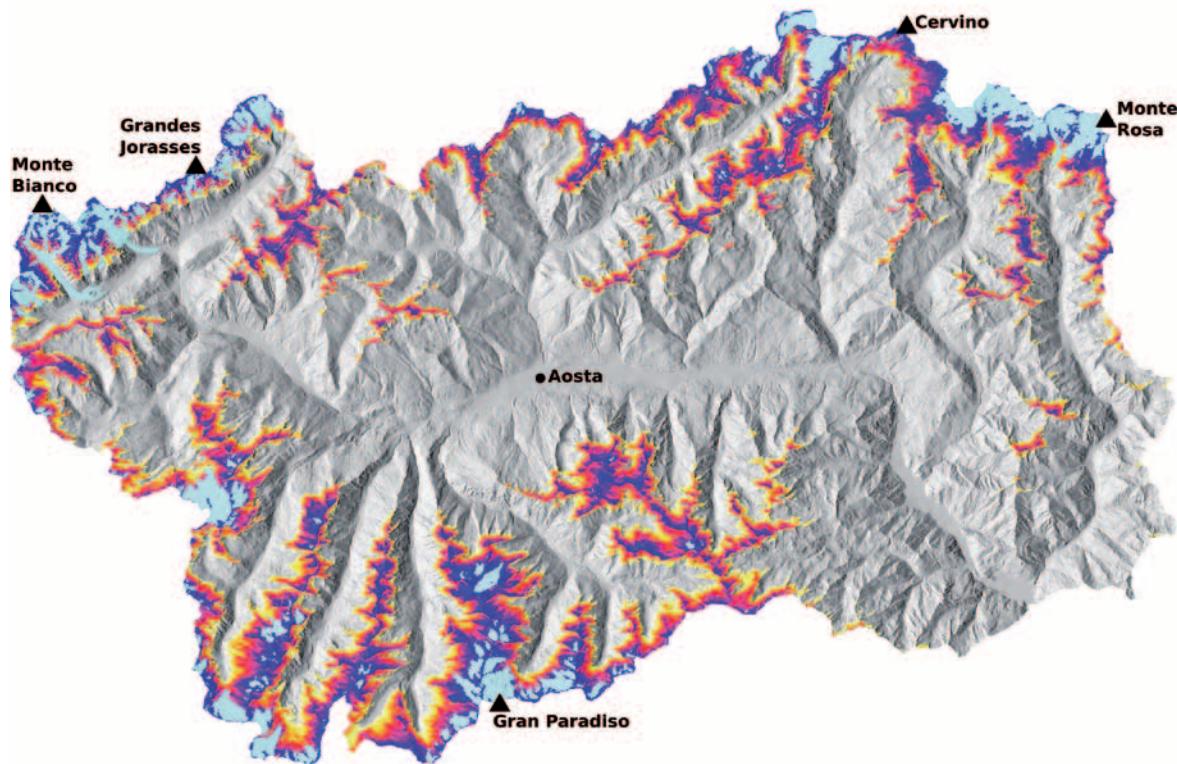
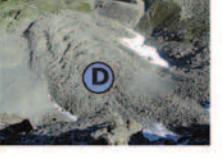
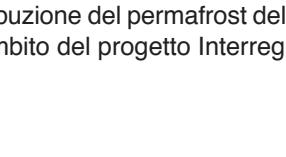



Fig. 24a: Carta indicativa della distribuzione potenziale del permafrost in Svizzera (fonte: UFAM 2006).



**Mappa del Permafrost Alpino: legenda e chiave interpretativa**

Legenda	Chiave Interpretativa
<p>Blu: Permafrost in qualsiasi condizione</p> <p>Porpora: Permafrost principalmente in condizioni fredde</p> <p>Giallo: Permafrost solo in condizioni molto fredde</p> <p>Ghiacciai</p>	<p><b>Dimensione dei blocchi, proprietà del suolo e vegetazione</b></p> <p>Una copertura detritica a grossi blocchi con spazi vuoti ed assenza di riempimenti interstiziali (A) indica condizioni fredde. Substrato roccioso, suoli fini o substrati grossolani con riempimento di materiali fini (B) indicano condizioni calde. Una copertura vegetale ben sviluppata (C) indica in genere assenza di permafrost.</p>   
<p>Alcuni importanti fattori locali quali il tipo di copertura o l'effetto della neve non sono considerati o lo sono solo in parte nella costruzione della mappa. Tuttavia, a parità di condizioni topografiche questi fattori possono determinare regimi termici molto diversi. Per questo motivo alla legenda della mappa si accosta una chiave interpretativa, a destra, che deve essere applicata sul terreno per rinforni nel dettaglio le informazioni contenute nella mappa. Ad esempio non ci si aspetta permafrost in materiali fini (B) o in rocce compatte (H) dove la mappa indica un colore giallo. In condizioni particolari il permafrost può anche esistere al di fuori dei limiti definiti dai colori. La mappa mostra una stima delle condizioni: un maggiore grado di certezza può essere ottenuto localmente attraverso indagini supplementari.</p> <p>Questa mappa è stata prodotta dall'Università di Zurigo, Svizzera nell'ambito del Progetto PermaNET. Riferimenti: Böckli, L., Breining, A., Gruber, S. &amp; Nötzli J. 2011: A statistical permafrost distribution model for the European Alps, <i>The Cryosphere Discussions</i>, 5, 1419-1459. www.the-cryosphere-discuss.net/5/1419 Paul, F., Frey, H. and Le Bris, R. (subm.): A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results. <i>Annals of Glaciology</i>, 52(59)</p>	<p><b>Rock Glaciers</b></p> <p>I rock glaciers attivi (o intatti) (D) sono caratterizzati da evidenze di movimento e fronti ripide. Essi indicano presenza di permafrost all'interno ma non permettono stime o ipotesi per le aree ad essi adiacenti</p> 
	<p><b>Posizione del pendio e nevati</b></p> <p>La posizione lungo un pendio detritico condiziona il regime termico a causa della gradazione dei clasti, la circolazione di aria e la redistribuzione della neve. Spesso la base del pendio (E) mostra temperature interne più fredde perché vi si depositano i materiali più grossolani e la copertura nevosa derivante dalle valanghe dura più a lungo. In generale le chiazze di neve a fusione tardiva o i nevati (F) mostrano sovente regimi termici locali più caldi poiché costituito dai materiali più fini e da riempimenti interstiziali.</p>  
	<p><b>Pareti rocciose</b></p> <p>Le pareti rocciose mostrano diversi gradi di eterogeneità causati dalle micro-topografie e dalla fratturazione. Una maggiore eterogeneità (G) spesso permette la formazione di una modesta copertura nevosa superficiale o circolazione di aria e deposizione di neve nelle fratture più ampie, indicando condizioni locali generalmente fredde. Le pareti rocciose più lisce, ripide e compatte sono indice di condizioni locali calde. Questo effetto è più intenso sui versanti esposti al sole rispetto a quelli in ombra.</p>  

v3, Gruber, S., Böckli, L., Nötzli, J. (2011)

I dati forniti non sono validati e l'Università di Zurigo non rilascia alcuna dichiarazione o espressione di garanzia implicita. A titolo di esempio, ma senza limiti, l'Università di Zurigo non rilascia alcuna dichiarazione o garanzia di commercializzazione o idoneità per scopi particolari o che i dati soddisfino particolari requisiti o che l'utilizzo dei dati o della documentazione non infranga brevetti di terzi, diritti d'autore, marchi registrati o altri diritti. Inoltre, l'Università di Zurigo non garantisce né rilascia alcuna dichiarazione riguardo all'uso dei dati in termini di correttezza, precisione, affidabilità o altro o che i difetti nei dati saranno corretti. L'Università di Zurigo non sarà responsabile per eventuali danni indiretti, accidentali o speciali, o di ogni altra natura, o per eventuali reclami da parte di terzi, derivanti dall'utilizzo dei dati.

Fig. 24b: Carta di potenziale distribuzione del permafrost della Valle d'Aosta e relativa chiave interpretativa. La mappa è stata prodotta nell'ambito del progetto Interreg Alpine Space PermaNET.

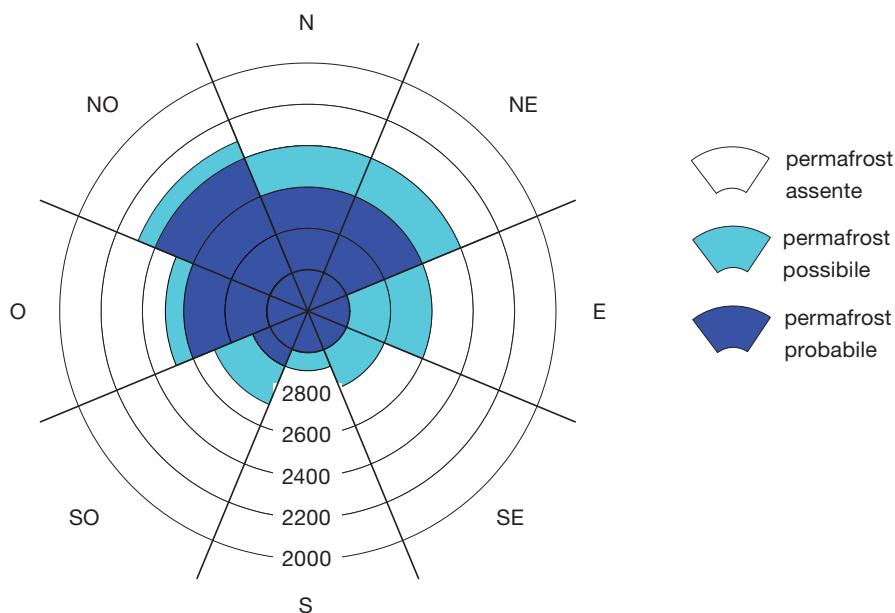


Fig. 25: Diagramma per la stima della presenza di permafrost sui versanti in funzione dell'altitudine e dell'esposizione (semplificato secondo le regole generali di HAEBERLI 1975).

Le temperature rilevate nei fori di sondaggio forniscono le seguenti informazioni:

- Temperature massime e minime del terreno a diverse profondità
- Spessore dello strato attivo in estate
- Profondità del terreno a partire dalla quale le variazioni stagionali di temperatura sono nulle (profondità dell'escursione annua nulla)
- Spessore del corpo del permafrost (a seconda della profondità di sondaggio)
- Posizione, estensione verticale e temperatura dei talik nel permafrost
- Meccanismi di trasferimento di calore (ad es. conduzione termica / convezione)

Le stazioni di misurazione ENET (rete complementare MeteoSvizzera) e le stazioni IMIS (sistema di misurazione e d'informazione intercantonale) rilevano dati meteorologici e nivo-climatologici su diversi siti in alta montagna. Questi dati possono essere ottenuti presso MeteoSvizzera (sito web: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)) e presso il WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF (sito web: [www.slf.ch](http://www.slf.ch)) (fig. 27a). Anche diverse altre istituzioni possiedono stazioni meteorologiche in alta montagna e una parte dei dati è direttamente accessibile via Internet. Nella figura 27b è rappresentata la distribuzione delle stazioni meteorologiche della Valle d'Aosta (Italia).

Le stazioni di misurazione automatiche rilevano i seguenti parametri:

- temperatura dell'aria
- altezza della neve
- forza del vento, direzione del vento
- irradiazione di lunghezza d'onda corta
- umidità dell'aria
- temperatura della superficie della neve e della superficie del terreno
- temperatura all'interno del manto nevoso

La temperatura media annua dell'aria, gli indici di gelo e di disgelo, la temperatura della superficie del suolo così come gli spessori medi ed estremi della neve sono informazioni particolarmente importanti per progetti di costruzione nel permafrost.

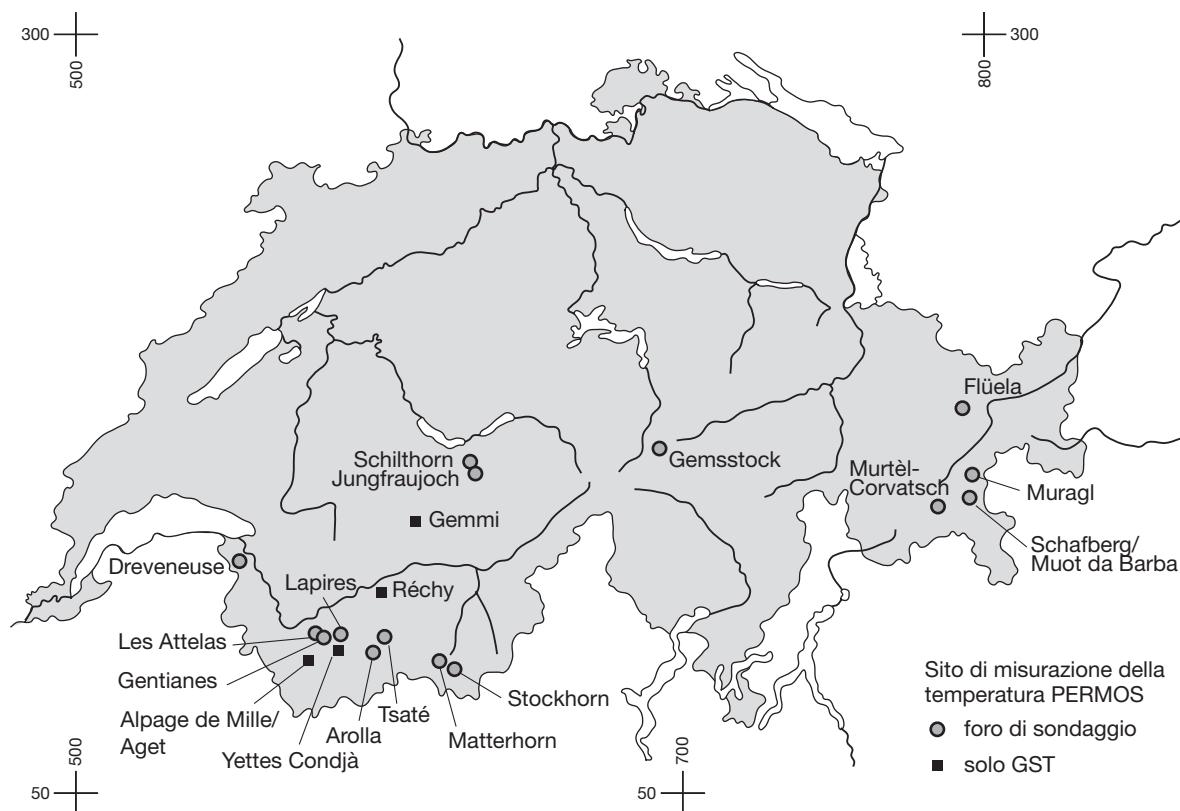


Fig. 26a: Siti di misurazione PERMOS (misurazioni della temperatura nei fori di sondaggio e sulla superficie del terreno [GST: ground surface temperature, temperatura della superficie del suolo]) sulle Alpi svizzere (situazione nel 2009); (fonte: PERMOS, sito web [www.permos.ch](http://www.permos.ch)).

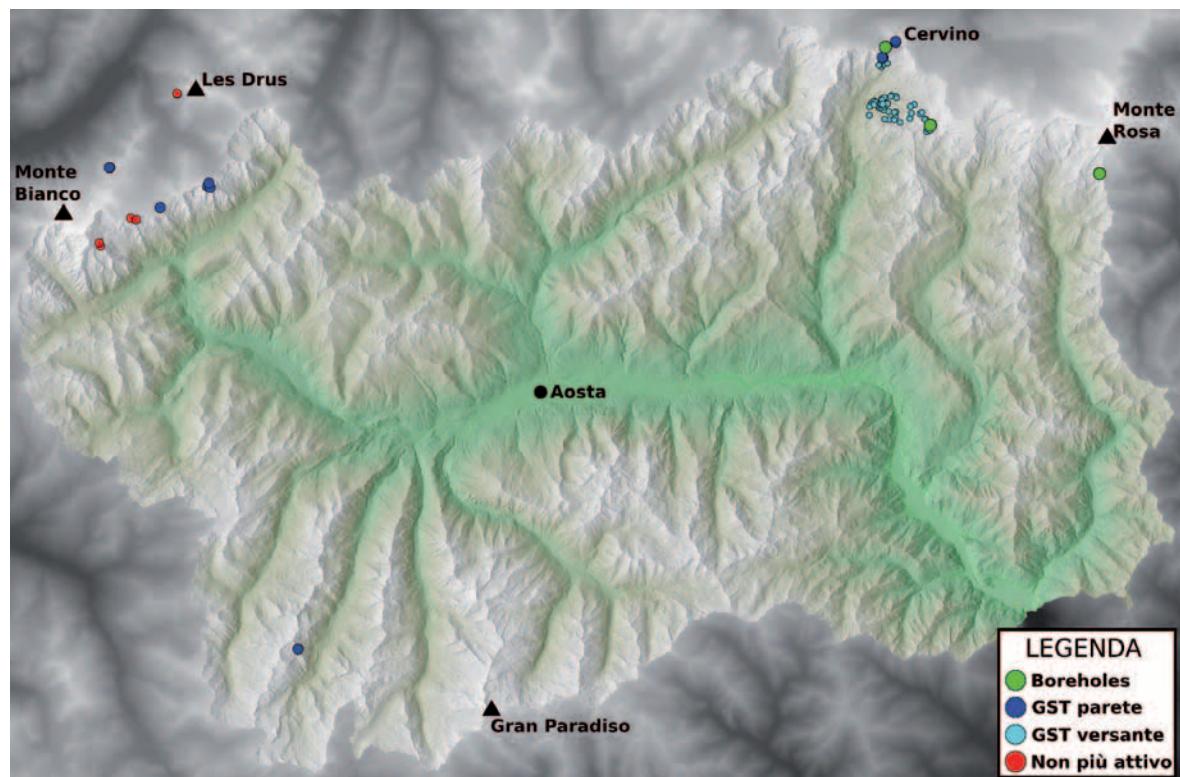


Fig. 26b: Distribuzione dei siti di monitoraggio del permafrost gestiti dall'ARPA della Valle d'Aosta. In verde i fori profondi per il monitoraggio a lungo termine, nelle tonalità di blu i punti di misurazione della temperatura superficiale del suolo (GST) e in rosso i siti non più attivi ma di cui si hanno dati in archivio (stato dicembre 2011).

## Stazioni ENET e IMIS sulle Alpi svizzere: inverno 2008–2009



WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos

Fig. 27a: Stazioni ENET e IMIS sulle Alpi svizzere: inverno 2008–2009 (fonte: SLF).

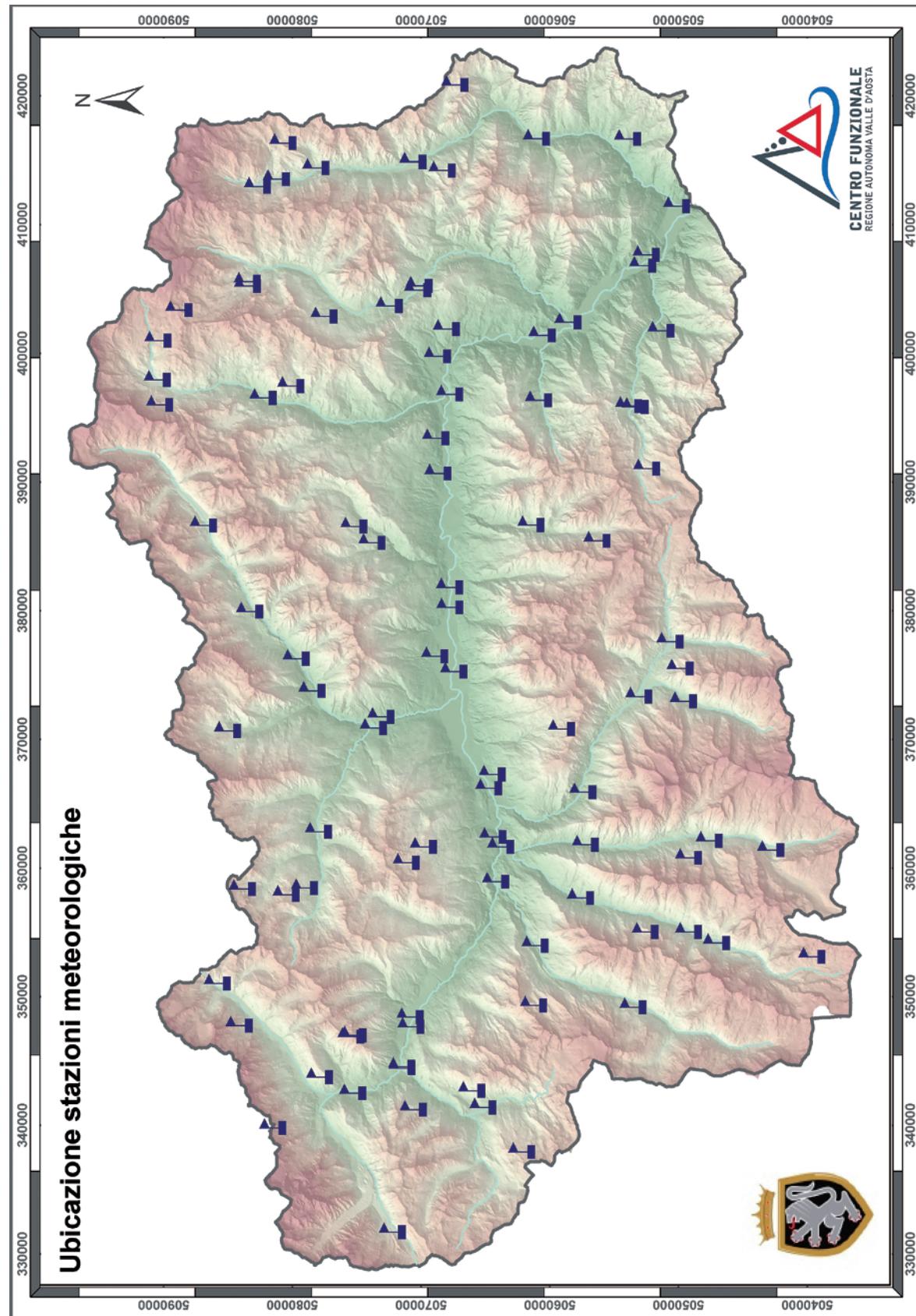


Fig. 27b: Distribuzione delle stazioni meteorologiche della Regione Valle d'Aosta (stato dicembre 2011).



Fig. 28: Immagine di un ghiacciaio roccioso in Alta Engadina (Foura da l'amd' Ursina, sopra Pontresina, GR; al centro della foto). (© Google Earth 2009).



Fig. 29: Ripresa aerea dello stesso ghiacciaio roccioso (al centro della foto) della figura 28. Le forme di movimento del ghiacciaio roccioso si distinguono meglio su questa foto. Data della foto sconosciuta. (fonte: Swisstopo).

Le temperature della superficie del terreno sono rilevate da PERMOS e le altezze della neve registrate nelle vicinanze di una stazione meteorologica permettono di determinare la temperatura alla base del manto nevoso e di verificare così la probabilità della presenza di permafrost (vedi la sezione Misurazioni sul terreno).

Per alcune regioni e per costruzioni esistenti, si dispone già di dati e di informazioni utili risultanti da analisi precedenti. Si raccomanda di informarsi sulla realizzazione di studi preliminari per il sito in questione presso il cantone o il comune di riferimento.

#### *Analisi di foto aeree*

Le immagini a bassa risoluzione catturate da telerilevatori ottici nello spazio forniscono una prima visione sommaria del terreno (ad es. le rilevazioni di Google Earth, fig. 28). Le foto aeree ad alta risoluzione scattate nel corso di diversi anni su varie scale possono essere ottenute presso l’Ufficio federale di topografia e ordinate on line (sito Internet: [www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch) [fig. 29]). Queste foto offrono una visione generale che è difficile ottenere direttamente sul campo. Forniscono importanti indicazioni sulla probabilità della presenza di permafrost permettendo di distinguere i parametri seguenti:

- le forme particolari del terreno, quali i ghiacciai rocciosi, le pareti rocciose situate all’ombra o le forme di soliflusso
- le chiazze di neve perenne
- la pendenza (ad es. il fronte di un ghiacciaio roccioso)
- la rugosità superficiale
- le regioni prive di vegetazione
- le zone di distacco e di deposito di movimenti di masse
- gli spostamenti e i movimenti verticali

#### *Fotogrammetria*

La fotogrammetria aerea digitale permette, confrontando foto scattate in periodi diversi, di identificare i processi di reptazione e di frana nonché i sedimenti e i sollevamenti nelle regioni con presenza di permafrost. Questo confronto permette anche di conoscere la stabilità del pendio e le potenziali zone di pericolo. Una tale serie di foto permette anche di

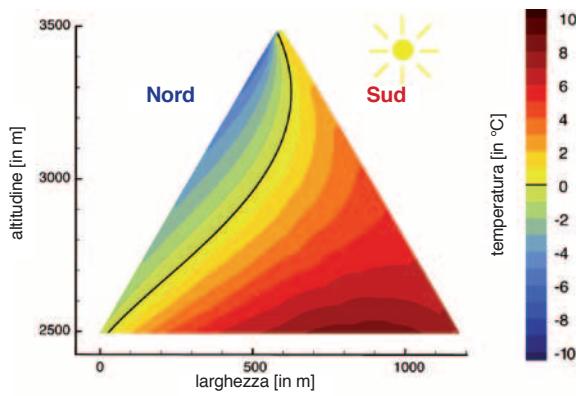


Fig. 30: Temperature modellizzate in sezione in una cresta che va da ovest a est. Nel sottosuolo, sono dettate dai flussi termici laterali che evolvono dal versante sud, caldo, al versante nord, più freddo (tratto da NOETZLI e GRUBER 2005).

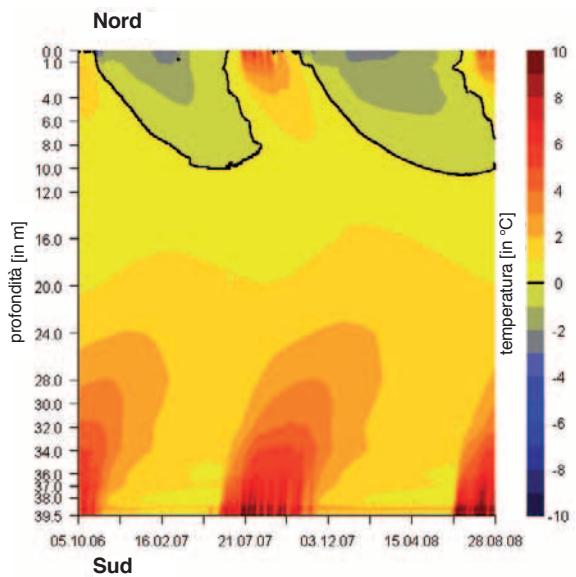


Figura 31: Temperature misurate in un foro di sondaggio orizzontale di 40 m di lunghezza sulla cresta del Gemsstock (Andermatt UR) tra ottobre 2006 e agosto 2008. L'asse X indica lo spazio temporale. L'asse Y mostra le distanze nel foro di sondaggio dal versante nord al versante sud. Le superfici a colori illustrano le temperature della roccia (legenda). La roccia è molto più calda sul versante sud che sul versante nord della cresta (dati SLF, Davos).

seguire l'evoluzione del terreno a lungo termine, di quantificare le velocità e le masse in movimento. In pratica, questo metodo è adatto a completare e ad estrapolare misure puntuali di deformazione nonché a stimare i pericoli su ampia scala (KÄÄB 2001). L'applicazione e l'interpretazione di questo metodo richiedono strumenti speciali e conoscenze specifiche. Infine, è importante sottolineare che la fotogrammetria aerea non permette necessariamente di rilevare con sicurezza la presenza di permafrost.

### Telerilevamento

L'interferometria con radar ad apertura sintetica (SAR) è un metodo di telerilevamento sempre più utilizzato nelle regioni dell'arco alpino con presenza di permafrost. Si tratta di un metodo di analisi di foto radar scattate via satellite (DELAJOYE *et al.* 2007). Questo metodo permette di rilevare movimenti della superficie terrestre su grande scala e di quantificarne le velocità. La superficie terrestre è quindi fotografata a diversi intervalli di giorni, mesi o anni. Uno spostamento è rappresentato da sfasamenti sulle immagini radar corrispondenti. Partendo da queste interferenze e tenendo conto del rilievo e delle condizioni meteorologiche, è possibile calcolare i movimenti orizzontali per intervalli di tempo dati.

L'interferometria SAR presenta alcuni problemi. Le ombre radar (lacune dovute al rilievo sulle immagini satellitari), la copertura della neve e la vegetazione complicano l'interpretazione delle immagini. D'altronde questo metodo non permette di distinguere chiaramente il permafrost. Ha tuttavia il grande vantaggio di semplificare il calcolo delle velocità approssimative dei movimenti dei pendii in alta montagna.

### *Modelli per il calcolo dell'estensione del permafrost*

I modelli numerici permettono di stimare l'estensione del permafrost in montagna e di prevedere scenari che simulano, ad esempio, le influenze del cambiamento climatico o quelle di una costruzione.

I modelli numerici sono costituiti da diverse ipotesi e da calcoli. Il bilancio energetico alla superficie del terreno è calcolato tramite dati meteorologici. Essendo il flusso geotermico dall'interno della terra generalmente debole in alta montagna, si suppone sia costante nel modello. Se si conoscono le proprietà del terreno (ad es. la conduttività della roccia, il contenuto di ghiaccio, ecc.), le temperature nel sottosuolo possono essere calcolate con grande precisione. Di fronte a una topografia complessa bisogna anche tener conto degli effetti tridimensionali, poiché le temperature del terreno possono variare considerevolmente, ad esempio tra il versante sud e il versante nord di una cresta (NOETZLI e GRUBER 2005, fig. 30). Le misurazioni della temperatura nei fori di sondaggio confermano questo fenomeno (fig. 31). Una delle sfide della modellazione risiede nella simulazione di processi quali i flussi d'aria e di acqua nel terreno. Le misurazioni effettuate nei fori di sondaggio e sulla superficie del terreno sono utili per calibrare e testare i modelli numerici.

## **Osservazioni sul terreno**

### *Analisi geomorfologica*

L'analisi geomorfologica fornisce le prime indicazioni sulla presenza o meno di permafrost nel sottosuolo, ed è realizzata con l'ausilio di mappe o di foto aeree e con ispezioni sul campo. Questa valutazione necessita conoscenze in materia. I principali fenomeni geomorfologici nelle regioni con presenza di permafrost, sono descritti al capitolo 1.5.

### *Analisi geologica*

L'analisi geologica fornisce importanti indicazioni sulla composizione, la struttura, la stabilità del sottosuolo e sul suo potenziale contenuto di acqua e di ghiaccio. Questa analisi si basa sull'esame di carte geologiche (carta geologica della Svizzera, a diverse scale) e su indagini sul campo, con la campionatura del terreno e dei carotaggi che saranno analizzati in laboratorio.

Oltre ai consueti esami geologici, le perizie geologiche realizzate nelle regioni con presenza di permafrost, dovranno tener conto dei seguenti aspetti:

- Durata e tipo dell'ultima glaciazione (influenzano la temperatura del terreno e il suo contenuto di ghiaccio)
- Spessore stimato dello strato che ricopre la roccia, origine dei materiali (ad es. detriti, detriti di crolli di roccia, morene)
- Contenuto di ghiaccio, distribuzione del ghiaccio e tipo di ghiaccio (ad es. lenti di ghiaccio, strati di ghiaccio, ghiaccio fessurale, ghiaccio sepolto, ghiaccio interstiziale), segregazione del ghiaccio (provoca un allargamento delle fessure e una espansione della roccia)
- Erosione, grado di alterazione, sensibilità al gelo (gelifrazione di origine chimica o meccanica, disgregazione da gelo)
- Masse in reptazione
- Instabilità nelle zone circostanti
- Strati acquiferi, apporto di acqua (naturale o artificiale), impermeabilizzazione prodotta dal ghiaccio

- Rischio di terremoti (i terremoti possono far liquefare un terreno ricco di ghiaccio e generare crolli dalle pareti rocciose contenenti ghiaccio)
- Direzione da dare agli ancoraggi (che dipende dall'andamento delle discontinuità)

## Misurazioni sul terreno

Le prime misurazioni possono essere realizzate con mezzi relativamente modesti, ma richiedono strumenti di misura speciali e l'interpretazione dei dati richiede conoscenze specifiche.

*Temperatura della superficie del suolo (TSS) e temperatura basale del manto nevoso (TBN)*  
La misurazione delle temperature della superficie del suolo in inverno (la temperatura alla base del manto nevoso) è un metodo semplice ed efficace per reperire informazioni sulla distribuzione spaziale del permafrost. In primavera, quando l'altezza della neve misura un metro o più e lo scioglimento delle nevi non è ancora iniziato, la temperatura della superficie del suolo resta più o meno costante sotto la neve, in quanto il manto nevoso isola il terreno. La TSS è influenzata dalle temperature del terreno e dallo spessore del manto nevoso, o dal suo effetto isolante contro le basse temperature dell'aria.

Tab. 7: Probabilità della presenza di permafrost a seconda della temperatura alla base del manto nevoso e sulla superficie del suolo in inverno (TSS inverno) per un'altezza della neve > 80 cm.

TSS BOT inverno	Probabilità della presenza di permafrost
< -3 °C	Permafrost probabile
-2 °C a -3 °C	Permafrost possibile
> -2 °C	Permafrost improbabile

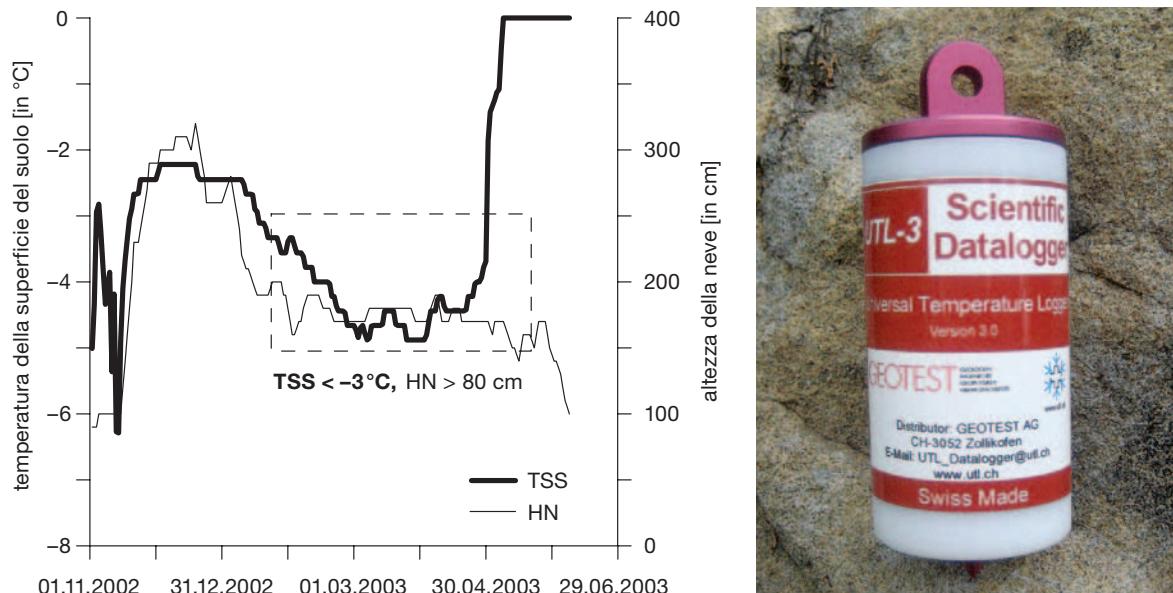


Fig. 32: (a sinistra) Misura delle temperature sulla superficie del suolo (TSS) e dello spessore della neve (HN) sullo Schafberg, Pontresina, a 2900 m di altitudine, durante l'inverno 2002-2003. Le altezze della neve sono state rilevate con una telecamera automatica e un'asta graduata. Le basse temperature della superficie del suolo in primavera indicano la presenza di permafrost se lo spessore del manto nevoso supera gli 80 cm (riquadro tratteggiato); (a destra) Registratore di dati (datalogger), robusto e stagno, destinato a misurare le TSS in alta montagna.

Per ottenere dati il più possibile significativi, devono essere utilizzati registratori di temperatura automatici per rilevare la temperatura sulla superficie del suolo per almeno un inverno intero. In parallelo (automaticamente o manualmente con l'ausilio di aste graduate), devono essere misurate anche le altezze della neve. Per evitare perdite, gli strumenti di misura della temperatura saranno fissati al suolo e la loro posizione sarà registrata con un GPS. Questi strumenti devono essere stagni e robusti per poter funzionare per un lungo periodo in alta montagna (fig. 32, a destra) (sito web: [www.utl.ch](http://www.utl.ch)).

Se lo spessore della neve supera gli 80 cm per gran parte dell'inverno, le temperature del suolo misurate alla base del manto nevoso (fig. 32, a destra) alla fine dell'inverno (tra la fine di febbraio e l'inizio di aprile) possono essere interpretate come indicato in tabella 7.

#### *Temperature dell'acqua sorgiva*

Temperature dell'acqua sorgiva inferiori ai 3 °C in estate indicano che le temperature del suolo sono basse e che il suolo potrebbe contenere ghiaccio. La temperatura dell'acqua dovrebbe essere misurata il più vicino possibile alla sorgente. Le misurazioni saranno effettuate dopo lo scioglimento delle nevi, utilizzando un termometro calibrato.

#### *Rilevazioni con la bussola solare*

Grazie alla bussola solare, si può constatare la durata potenziale dell'irraggiamento solare per ogni mese su qualsiasi punto sul terreno. Lo strumento permette di determinare visivamente l'influenza dell'orizzonte (montagne, costruzioni e altri oggetti inclusi) sulla durata dell'irraggiamento solare. Utilizzando un semplice programma, si può allora stimare l'irraggiamento espresso in GJ m<sup>-2</sup> per diverse altitudini ed esposizioni. È così possibile determinare sommariamente la probabilità della presenza di permafrost (KRUMMENACHER e BUMANN 2004). La bussola solare è utilizzata soprattutto nella pratica forestale e in architettura per determinare le condizioni di luminosità nelle foreste e in un edificio.

#### *Misure geodetiche terrestri*

Le misure geodetiche terrestri, realizzate con un teodolite, tacheometro o laserscanner, permettono di rilevare eventuali movimenti e la loro velocità nonché i cedimenti, sollevamenti e le variazioni di volume che interessano la superficie della roccia o del terreno o le costruzioni. Queste misure non rivelano però in modo certo la presenza o meno di permafrost.

Punti sul terreno sono misurati a partire da punti fissi, completati da punti di riferimento situati in zone stabili. I punti fissi saranno scelti con prudenza e le loro posizioni saranno controllate regolarmente con un GPS, in quanto i movimenti di pendio estesi e i cedimenti sono frequenti nelle regioni con presenza di permafrost. Le misure geodetiche terrestri effettuate regolarmente permettono di determinare le eventuali variazioni della velocità delle deformazioni.

#### *Misure geofisiche*

I metodi di indagine geofisica, come il sondaggio elettrico, il sondaggio sismico e il georadar, forniscono un'immagine del sottosuolo a partire dalla superficie. In questo modo possono essere determinate la temperatura, il contenuto di acqua e di ghiaccio, nonché la stratigrafia. Si misura lungo sezioni lineari e si completa con misurazioni puntuali, effettuate ad esempio nelle perforazioni. Questi metodi richiedono meno tempo e hanno un costo minore rispetto a qualsiasi altra analisi che richieda un intervento meccanico sul terreno.

Serie successive di misure geofisiche permettono di constatare i cambiamenti nel permafrost (ad es. lo scioglimento della neve o l'avanzamento e il ritiro dei fronti di gelo nel terreno).

I sondaggi elettrici servono ad esempio a determinare la resistività elettrica dei materiali costituenti il terreno (VONDER MÜHLL 1993). Una corrente elettrica è indotta nel terreno per mezzo di due elettrodi e la differenza di potenziale è misurata su altri elettrodi situati tra i due. Le differenze di intensità e di potenziale misurate servono a calcolare la resistenza elettrica degli strati del terreno (fig. 33).

Poichè il punto di congelamento fa aumentare sensibilmente la resistenza elettrica, i sondaggi elettrici permettono di localizzare la presenza di materiali gelati nel terreno. La conduttività elettrica – e quindi la resistenza – sono note per diversi materiali (tab. 8, HAUCK e KNEISEL 2008). In un terreno gelato, le resistenze elettriche possono variare considerevolmente in quanto sono influenzate dal contenuto di ghiaccio, dalla temperatura del suolo e dalla presenza di impurità. Dato che la percentuale di acqua può variare nei diversi strati di terreno, i valori di resistenza possono anche sovrapporsi. (HAUCK e KNEISEL 2008). Perciò i risultati delle misurazioni saranno interpretati con prudenza. Si raccomanda di combinare, se possibile, due metodi geofisici.

Tab. 8: Resistenze elettriche di diversi materiali (tratto da HAUCK e KNEISEL 2008).

Materiale	Resistenza elettrica [ $\Omega\text{m}$ ]
Argilla	1 – 100
Sabbia	$100 – 5 \times 10^3$
Ghiaia	$100 – 4 \times 10^2$
Granito	$5 \times 10^3 – 10^6$
Scisto	$100 – 10^4$
Acqua sotterranea	$10 – 300$
Terreno gelato, ghiaccio del terreno, permafrost di montagna	$1 – 10^3 – 10^6$
Ghiaccio di ghiacciaio (temperato)	$10^6 – 10^8$
Aria	infinita

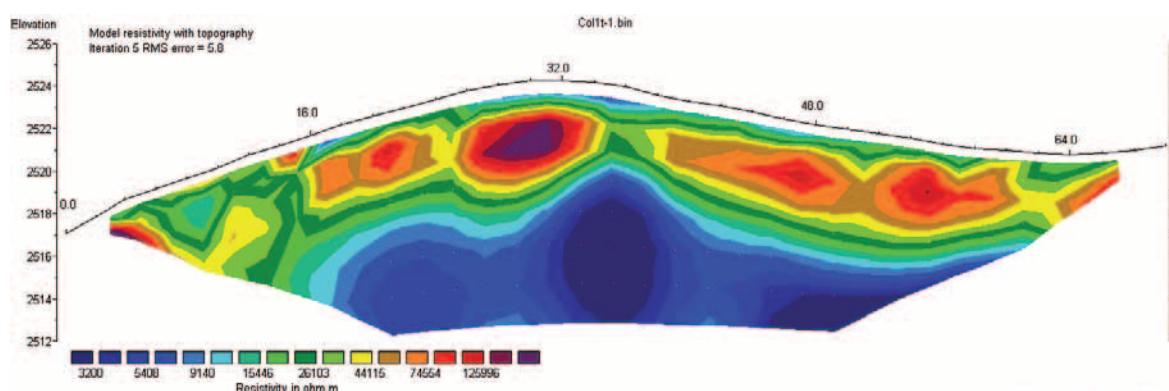


Fig. 33: Profilo geoelettrico (tomografia in 2D) in un sito di montagna a 2500 m di altitudine. La roccia compatta è indicata dal colore blu. Nella zona gialla e rossa della parte superiore si trova un detrito di falda grossolana che può contenere ghiaccio (resistenze > 50 000  $\Omega\text{m}$ ) (dati Geotest, Davos).

### 1.8.2 Verifica della presenza di permafrost

#### *Trincee di sondaggio o di assaggio*

Le trincee di sondaggio offrono la possibilità di ottenere direttamente informazioni sulle proprietà del terreno di fondazione nei primi metri. È preferibile scavare queste trincee con una macchina (ad es. con una pala meccanica o un escavatore ragno) e, se possibile, in diversi punti nella zona analizzata. Se il terreno contiene alte percentuali di ghiaccio (fig. 34) possono presentarsi problemi tecnici al momento dell'estrazione. In generale, la profondità di tali trincee si limita ai 5 metri.

Gli strumenti di misura, come i termometri (ad es. in un tubo di protezione), possono essere installati in una trincea di sondaggio se questa è nuovamente riempita con cura il più rapidamente possibile, al fine di ridurre al massimo ogni disturbo termico. Notiamo tuttavia che una perturbazione della stratigrafia e delle proprietà del terreno di fondazione è inevitabile durante simili lavori. I campioni di terreno destinati alle analisi di laboratorio dovrebbero contenere ghiaccio ed essere trasportati e conservati allo stato ghiacciato (cap. 2.1.3).

Durante lo scavo delle trincee di sondaggio, saranno registrati i seguenti aspetti:

- Luogo esatto (altitudine, esposizione, coordinate)
- Dimensioni della trincea (lunghezza, larghezza, profondità)
- Stratigrafia, spessore degli strati
- Granulometria
- Stabilità del materiale del terreno di fondazione
- Contenuto di acqua
- Contenuto di ghiaccio, distribuzione del ghiaccio, proprietà del ghiaccio
- Temperatura del terreno a diverse profondità
- Stima dei valori del terreno di fondazione



Fig. 34: Terreno ricco di ghiaccio in una trincea di assaggio.

### *Perforazioni*

Le perforazioni forniscono indicazioni dirette sulle proprietà del terreno di fondazione fino a una grande profondità, ma, purtroppo, sono puntuali. Le perforazioni fanno parte dei metodi di analisi più costosi in termini di tempo e di spesa, ma sono particolarmente utili, in quanto permettono di rilevare successivamente e a lungo termine, ad esempio, le temperature del suolo o le deformazioni a diverse profondità.

Un sistema di perforazione rapido e relativamente a basso costo è il sistema a distruzione (martello a fondo foro). I materiali sono estratti tramite soffiaggio ad aria compressa. Durante tali perforazioni, i sondatori esperti sono in grado di identificare i materiali del terreno di fondazione seguendo la progressione della perforatrice ed esaminando le proprietà dei materiali estratti; riescono a distinguere tra la roccia, i detriti, i detriti contenenti ghiaccio e il ghiaccio. Se è presente del ghiaccio, il materiale estratto contiene generalmente frammenti di ghiaccio e la perforazione è più problematica.

Le perforazioni con carotiere doppio sono più costose e complicate, ma permettono di estrarre i materiali nello stato più intatto possibile. Le carote così prelevate sono conservate al fresco e trasportate in laboratorio allo stato ghiacciato per essere analizzate.

A seconda del tipo di perforatrice, il carotaggio può raggiungere alcuni metri o diverse centinaia di metri. In ogni caso, bisognerebbe attraversare lo strato attivo e, se possibile, raggiungere la base del corpo del permafrost. Si eviterà in tutti i casi di perforare con acqua per disturbare il meno possibile il permafrost. Il foro di sondaggio sarà quindi ripulito tramite aria e non con acqua. È anche importante evitare che la testa di perforazione resti immobile nel foro per evitare che geli e si blocchi. La grande eterogeneità dei sottosuoli gelati complica generalmente il carotaggio. Nel protocollo di perforazione saranno inseriti i seguenti parametri:

- Luogo esatto (altitudine, esposizione, coordinate)
- Profondità del foro di sondaggio
- Stratigrafia, spessore degli strati
- Granulometria
- Stabilità del foro di sondaggio
- Contenuto di acqua
- Contenuto di ghiaccio, distribuzione del ghiaccio, forma del ghiaccio
- Temperatura del terreno a diverse profondità (termometro dotato di un lungo cavo)
- Progressione della perforatrice, problemi particolari (ad es. inceppamento della testa di perforazione)

Per permettere la realizzazione di successive misurazioni (tab. 9), i fori di sondaggio dovrebbero essere equipaggiati con un tubo impermeabile. I tratti di tubo dovrebbero essere uniti e impermeabilizzati con un nastro adesivo impermeabile. È anche importante che il coperchio inferiore del tubo sia impermeabile e solidamente agganciato.

Il foro di sondaggio intorno al tubo deve essere riempito di malta e protetto da un pozzo (con coperchio) sulla superficie (fig. 35). Durante la disposizione del tubo, il tubo di iniezione della malta deve essere infilato parallelamente al tubo per poter facilitare l'iniezione della malta e garantire che lo spazio tra il terreno e il tubo sia ben riempito di malta (fig. 36).

Se si prevede di misurare soltanto la temperatura del terreno nel tubo, si può sostituire la malta con la sabbia. Ciò attenua la perturbazione termica, in quanto non avviene alcun processo di presa. Se è prevista la misurazione di deformazioni (misure inclinometriche ed estensimetriche), i fori di sondaggio devono essere dotati di tubi inclinometrici e di tubi Inkrex; lo spazio tra i tubi e i fori di sondaggio dev'essere riempito di malta.



Fig. 35: Pozzo con coperchio per proteggere il foro di sondaggio, il tubo e gli strumenti di misura.



Fig. 36: La squadra di perforazione unisce e rende impermeabile un tubo Inkrex durante l'installazione nel foro di sondaggio. Un tubo destinato a iniettare la malta nel foro di sondaggio è installato parallelamente al tubo Inkrex.

### *Misure effettuate nei fori di sondaggio*

I fori di sondaggio permettono di rilevare diversi dati (tab. 9) al fine di esaminare lo stato del terreno di fondazione e di constatare gli eventuali cambiamenti. Se si procede a misurazioni in un foro di sondaggio privo di tubo, è necessaria una grande cautela, in quanto le pareti della perforazione possono crollare in ogni momento. Nei corpi di permafrost in movimento (ad es. ghiacciai rocciosi, falde di detrito ripide), è frequente che i fori di sondaggio si deformino molto rapidamente e che non sia possibile introdurvi o estrarre strumenti. Se le misurazioni della temperatura del suolo devono proseguire per un lungo periodo, conviene installare una catena di termistori il più rapidamente possibile e collegarla a un registratore di dati (datalogger) tenuto in un posto sicuro sulla superficie del terreno, ad esempio in un pozzo dotato di un coperchio. In generale, le misurazioni continuano a essere effettuate finché il foro di sondaggio non è completamente tagliato. Le misure inclinometriche o estensimetriche richiedono l'installazione di tubi speciali che siano dotati di guide di scorrimento interne o di anelli di ottone. Questi possono essere ordinati direttamente presso l'impresa di perforazione.

Tab. 9: Misure effettuate nei fori di sondaggio senza tubo e con tubo.

<b>Misure nei fori di sondaggio (senza tubo)</b>	<b>Grandezze misurate</b>
Temperatura del terreno (misure manuali o automatiche)	Distribuzione della temperatura del terreno nel foro di sondaggio Spessore dello strato attivo Spessore del corpo del permafrost Posizione di eventuali talik Variazioni a breve e a lungo termine
Rilevazioni con una telecamera da perforazione	Stratigrafia Contenuto di ghiaccio Distribuzione granulometrica Strati acquiferi
Geofisica nel foro di sondaggio	Contenuto di ghiaccio Contenuto di acqua Stratigrafia
Test pressiométrico (difficilmente realizzabile)	Caratteristiche della tensione-dilatazione Resistenza
Cavo TDR (Time-domain reflectometry) (relativamente nuovo)  NB: particolarmente adatto quando i tassi di deformazione sono elevati e per i fori di sondaggio profondi	Spostamenti orizzontali Piani di taglio
<b>Misure nei fori di sondaggio (con tubo)</b>	<b>Grandezze misurate</b>
Temperatura del terreno (misure manuali o automatiche)	Distribuzione della temperatura nel foro di sondaggio Spessore dello strato attivo Spessore del corpo del permafrost Posizione di eventuali talik Variazioni a breve e a lungo termine <b>ATTENZIONE:</b> Se il foro di sondaggio è riempito di malta, il calore di presa è prodotto per almeno un mese!
Misure inclinometriche – <i>con tubo inclinometrico</i> (misure manuali o automatiche)	Spostamenti orizzontali Piani di taglio
Misure estensimetriche – <i>con tubo Inkrex</i>	Cedimenti nel sottosuolo Sollevamenti nel sottosuolo

**L'essenziale in breve**

Si suppone che sulle Alpi svizzere il permafrost sia presente a partire dai 2200 m di altitudine, a seconda delle condizioni del pendio e della sua esposizione. L'estensione del permafrost è influenzata da diversi fattori come la temperatura dell'aria, l'irraggiamento solare, la costituzione del terreno, la topografia e la neve. Le proprietà termiche, strutturali e geotecniche del permafrost variano notevolmente da un sito all'altro. In estate, nelle regioni con presenza di permafrost, il surriscaldamento e le precipitazioni intense possono indurre pericoli naturali e generare movimenti dei pendii. La determinazione della presenza di permafrost avviene applicando metodi progressivi che forniscono informazioni sempre più affidabili ma che richiedono un investimento sempre maggiore. Per ottenere una prova concreta della presenza o dell'assenza di permafrost, devono essere realizzati esami diretti sul sito.



# Svolgimento del progetto

Lo studio preliminare (cap. 2) è la fase principale dello studio di un progetto di costruzione sul permafrost. Se si vuole garantire il successo della realizzazione di un tale progetto, è indispensabile riunire il know-how acquisito in tutte le discipline in questione. Gli specialisti determinano dapprima la distribuzione del permafrost (cap. 1.3), le sue proprietà (cap. 1.4), nonché i pericoli naturali che minacciano i potenziali siti di costruzione (cap. 1.7). La presenza di permafrost dovrebbe essere determinata provvisoriamente, poi verificata o esclusa, percorrendo quattro fasi (vedi cap. 1.8). Per le costruzioni già esistenti, lo studio preliminare (cap. 2.2) serve a studiare le cause dei danni subiti dalla costruzione e se sono da prevedere problemi o danni ulteriori.

Queste basi permettono agli specialisti in ingegneria civile di prevedere il comportamento di una costruzione su un terreno di fondazione che presenta caratteristiche particolari. È così possibile pianificare gli adattamenti e le misure necessarie già durante il progetto preliminare (cap. 3). Successivamente si può elaborare il progetto di costruzione (cap. 4) e pianificare la realizzazione in collaborazione con gli architetti e i pianificatori (cap. 5). Grazie a questo metodo progressivo e pragmatico, il sapere acquisito può essere trasmesso in forma chiara e appropriata. Lo stesso accade per l'uso e la manutenzione di una costruzione (cap. 6). Nel capitolo 7, viene presentata una lista di punti da considerare durante una demolizione o uno smontaggio. Lo svolgimento del progetto, raccomandato per costruzioni su permafrost, è presentato in figura 37 «Fasi di un progetto di costruzione sul permafrost» e in tabella 10 «Svolgimento delle fasi del progetto».

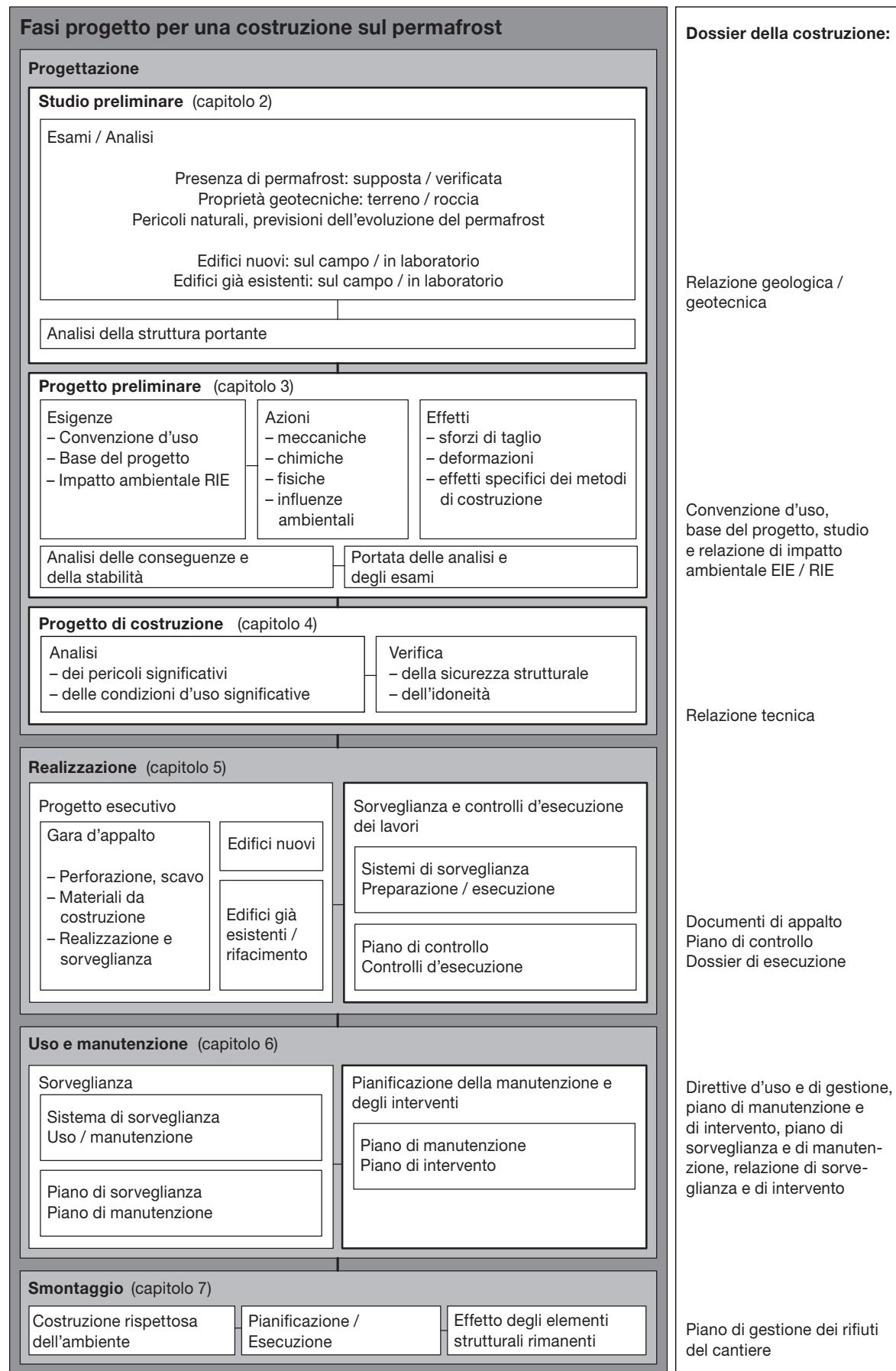


Fig. 37: Rapporto tra gli elementi di progettazione.

Tab. 10: Svolgimento delle fasi del progetto e responsabilità.

Fasi	Committente	Progettista	Specialista in permafrost	Ufficio tecnico
<b>Studio del progetto</b>	Studio preliminare (Capitolo 2)	Definisce il concetto di progetto e la situazione	Consulta le carte indicative del permafrost e raccoglie i dati esistenti	Fornisce informazioni sui documenti esistenti in materia di permafrost
		Se non possiede dati fondamentali sul permafrost, fa realizzare i primi esami per valutare l'adeguatezza del sito	Raggruppa i documenti esistenti ed elabora l'analisi della struttura portante	Se non possiede dati, realizza i primi esami sulla presenza di permafrost e l'eventuale ottimizzazione del sito (o l'abbandono), prevede l'evoluzione del permafrost
	Progetto preliminare (Capitolo 3)	Definisce le esigenze d'uso e la durata d'uso	Elabora la <i>convenzione d'uso e la base del progetto</i> con il committente	Aiuta a risolvere le questioni specifiche del permafrost
		Fa realizzare un EIE se necessario	Studia l'impatto ambientale EIE, redige il RIE se necessario	Fornisce il suo aiuto nello studio dell'impatto ambientale
		Definisce gli obiettivi di protezione e i rischi speciali nell'ambito della convenzione d'uso	Studia le azioni e gli effetti esercitati sulla struttura portante	Fornisce informazioni sui metodi accertati di costruzione sul permafrost
		Fa realizzare all'occorrenza un riconoscimento del terreno	Abbozza un concetto di fondazione possibile nel permafrost	Realizza il riconoscimento del terreno, redige la relazione geotecnica
	Progetto di costruzione (Capitolo 4)	Sceglie la variante definitiva del progetto	Definisce il concetto di fondazione sulla base del riconoscimento del terreno, determina le condizioni d'uso e analizza i pericoli	Dà consigli di ordine geotecnico sul concetto di fondazione
			Realizza il dimensionamento e la verifica della sicurezza strutturale e dell'idoneità, redige la <i>relazione tecnica</i>	Prevede le misurazioni e i controlli necessari
<b>Permesso</b>		A nome del committente, trasmette i dossier del progetto in vista della richiesta di permesso di costruire		Esamina il progetto, rilascia il permesso di costruire, eventualmente previa presentazione di altri documenti
<b>Realizzazione</b> (Capitolo 5)		Redige i <i>documenti d'appalto</i>		
		Redige il <i>piano di controllo</i> , accompagna e supervisiona la realizzazione della costruzione	Confronta le previsioni con la realtà (adattamenti), si assicura che la costruzione sia realizzata in conformità al <i>piano di controllo</i> , realizza le misure e la sorveglianza	Verifica se i lavori sono stati eseguiti in conformità al permesso di costruire
		Redige il <i>dossier d'esecuzione</i>		
<b>Uso e manutenzione</b> (Capitolo 6)	Definisce i concetti d'uso	Elabora con il committente le <i>direttive d'uso e di gestione</i>	Aiuta a risolvere le questioni specifiche del permafrost	
	Definisce i concetti di manutenzione	Elabora con il committente il <i>piano di manutenzione e di intervento</i>	Aiuta a risolvere le questioni specifiche del permafrost	
	Fa realizzare controlli regolari	Realizza la sorveglianza e la manutenzione in conformità al <i>piano di sorveglianza e di manutenzione</i>	Esamina la sorveglianza in relazione alle questioni specifiche del permafrost, redige la <i>relazione di sorveglianza</i>	
		Redige la <i>relazione degli interventi</i>		
<b>Smontaggio</b> (Capitolo 7)	Dà il mandato di smontaggio	Fa elaborare il <i>piano di gestione dei rifiuti del cantiere</i> , esamina gli effetti degli elementi strutturali rimanenti		Autorizza il piano di gestione dei rifiuti del cantiere

## 2 Studio preliminare

### 2.1 Analisi preliminari necessarie per nuove costruzioni su permafrost

#### 2.1.1 Analisi preliminari

Prima di costruire sul permafrost, occorre effettuare le prime procedure di rilevamento del permafrost e delle sue proprietà. Tali procedure sono descritte dettagliatamente ai capitoli 1.3, 1.4 e 1.8. L'analisi specifica realizzata in tempo, la prospettiva del sito potenziale e la posa di strumentazione, forniscono informazioni sulla temperatura e sul comportamento in deformazione del sottosuolo.

La scelta di un sito adatto a una nuova costruzione è di primaria importanza. Se il terreno di fondazione è ricco di ghiaccio, è generalmente opportuno cercare immediatamente un altro sito al fine di evitare l'insorgere di successivi problemi (cap. 2.3.1).

A seconda delle esigenze legate alla costruzione, altre analisi ed esami saranno realizzati sul sito scelto (cap. 3.6.1). Raramente si può evitare caratterizzazione della terreno. In questa circostanza, si analizzeranno e interpreteranno le proprietà geotecniche del permafrost (cap. 1.4.2); saranno definite le modalità di costruzione delle fondazioni relativamente al tipo di opera previsto e saranno poi formalizzate in un rapporto. L'estensione e il contenuto del caratterizzazione del terreno saranno conformi alla norma SIA 267. Altre indagini da effettuare sul terreno e in laboratorio sono descritti ai punti 2.1.2 e 2.1.3.

Lo studio preliminare per una costruzione su permafrost richiede più tempo rispetto alle costruzioni classiche. In particolare, le indagini sul terreno richiedono una preparazione più lunga che fa lievitare i costi dello studio preliminare. Ciononostante questi ulteriori investimenti iniziali generano un rapido rendimento. Diversi casi studiati nelle Alpi hanno dimostrato che, grazie a studi preliminari dettagliati, viene prolungata la durata di vita delle opere, risparmiando così sugli elevati costi di rifacimento o di ricostruzione.

#### 2.1.2 Esami sul terreno

Nel caso di costruzioni complesse, soggette a deformazione, e di condizioni geotecniche difficili, è importante esaminare attentamente la costituzione del terreno di fondazione del sito scelto. Gli esami sul terreno, per mezzo di sondaggi o di perforazioni, forniscono informazioni dirette sulle proprietà del terreno di fondazione. Questi due metodi d'indagine sono descritti più dettagliatamente al capitolo 1.8.2.

Molti metodi sviluppati per l'esame di un terreno di fondazione a granulometria fine e non gelato non sono applicabili su suoli di montagna grossolani e gelati. È il caso, ad esempio, del dilatometro piatto (DTM) o delle prove penetrometriche (Standard Penetration Test).

#### 2.1.3 Analisi in laboratorio

Oltre ai rilievi di superficie e alle indagini sul terreno, si può procedere a dei carotaggi e analizzare in seguito i campioni in laboratorio. La tabella 11 riporta varie prove di laboratorio con le relative informazioni e le norme da rispettare in ogni singolo caso.

Le analisi di laboratorio su campioni di permafrost richiedono alcuni preparativi logistici. Per garantire il prelievo di un campione indisturbato, occorre procedere a un sondaggio a rotazione raffreddato ad aria (carotiere doppio o triplo). I campioni gelati devono essere trasportati in laboratorio in un contenitore frigorifero, dove saranno poi preparati e testati in una cella frigorifera; è importante che i campioni non disgelino.

## 2.2 Indagini preliminari per costruzioni esistenti

### 2.2.1 Analisi preliminari

Per costruzioni già presenti su permafrost, un'analisi preliminare è necessaria se tali costruzioni devono essere ristrutturate, trasformate, ampliate o se sono destinate a durare nel tempo. L'obiettivo di una tale analisi è di rivelare le cause di danni e di determinare la necessità di un risanamento. I danni possono avere diverse cause e il riconoscerle valutandone la portata è generalmente difficoltoso. Le sollecitazioni e gli effetti sono strettamente connessi a causa dell'interazione tra la struttura portante della costruzione e il permafrost. Questi aspetti sono trattati al capitolo 3 e ricapitolati in tabelle che aiutano a comprendere meglio questo sistema di interazioni.

I danni sono principalmente dovuti a due possibili fenomeni: scioglimento del ghiaccio (caso I) o formazione di ghiaccio (caso II). La necessità di risanamento nel caso I è data dalla penetrazione del calore nel sottosuolo (deterioramento del permafrost). Ciò può generare un aumento di spessore dello strato attivo o un cambiamento del contenuto di ghiaccio nel permafrost e quindi anche un cambiamento delle proprietà geotecniche (resistenza al taglio, portanza del terreno). Possono derivarne anche deformazioni dovute a lento scivolamento, cedimenti o fessure nella struttura portante, che ne limitano l'uso. L'apporto di

Tab. 11: Presentazione delle analisi di campioni di permafrost.

Prove di laboratorio	Caratteristiche studiate	Norme
Parametri geotecnici	Contenuto di materiale solido, di ghiaccio, di acqua, di aria e di sale	SN EN 1097-5, SN 670 903-5, SN 670 335
Granulometria	Distribuzione granulometrica, classificazione USCS, resistenza al gelo	SN 670 004-1a, SN 670 140b
Prova di compressione semplice	Resistenza al taglio, comportamento resistente	SN 670 352
Prova di taglio diretto	Resistenza massima e resistenza residua al taglio (per lunghe distanze di taglio) comportamento in resistenza	ASTM D 3080 DIN 18137-3
Prova di taglio triassiale Tasso di deformazione costante	Resistenza massima e resistenza residua al taglio, comportamento in resistenza	ASTM D 2850, ASTM D 4767
Prova di taglio triassiale Sollecitazione a compressione costante	Comportamento in scorrimento e in deformazione	SN 670 340
Prova edometrica	Compressibilità, comportamento in deformazione nel tempo, permeabilità all'acqua	ASTM D 2435
Caratteristiche termiche	Conduttività termica, capacità termica specifica	ASTM D 5334-00

calore nel sottosuolo può avere diverse cause: può provenire dal calore emesso temporaneamente durante la presa del cemento, dai locali riscaldati, da condutture d'acqua, da apparecchi che producono calore o persino dal surriscaldamento climatico.

Nel caso II, il risanamento è reso necessario dalla formazione del permafrost (accrescimento del permafrost). Tale processo è dovuto a un raffreddamento provocato attivamente (pista di ghiaccio), alla formazione di ghiaccio di segregazione o alle basse temperature che caratterizzano il sottosuolo. L'aumento del volume di acqua per effetto del gelo può ripercuotersi sulla struttura portante e provocare una pressione di sollevamento, un aumento degli sforzi di taglio, cedimenti e fessure.

Un rifacimento delle costruzioni già esistenti può essere necessario in uno di questi casi o in una combinazione dei due. È soprattutto importante scoprire, durante l'analisi preliminare, l'estensione areale e l'evoluzione temporale del problema per ridurre al minimo le conseguenze attraverso un rifacimento mirato.

## 2.3 Analisi della struttura portante

### 2.3.1 Scelta del sito

L'analisi della struttura portante delle costruzioni su permafrost consiste innanzitutto nella scelta del sito. Il terreno di fondazione nel permafrost può presentare una forte tendenza allo scivolamento a seconda del tipo di carico, della direzione del movimento e del contenuto di ghiaccio. Tale fenomeno è dovuto al comportamento viscoplastico della deformazione del ghiaccio. Se il terreno di fondazione è ricco di ghiaccio possono prodursi importanti deformazioni e cedimenti. Sarà allora difficile, a volte impossibile, trovare una soluzione duratura per la struttura portante e la sua manutenzione rischia allora di essere molto costosa. Nel peggior dei casi queste influenze possono ridurre la durata di vita delle costruzioni. In casi simili bisognerebbe prevedere di scegliere un altro sito o di rinunciare alla costruzione. Il processo di scivolamento, sul lungo periodo, deve essere preso in considerazione prevedendo una struttura portante robusta e adeguata, fondazioni e ancoraggi appropriati (cap. 8.1.1. e 8.2.1) e sufficienti ridondanze. Ciò è decisivo se si vogliono evitare limitazioni d'uso durante il periodo di vita di un impianto.

Le infrastrutture situate su terreni esposti possono anche essere minacciate da pericoli naturali, come le cadute di massi, le frane, le colate di detriti e le valanghe provenienti da zone con presenza di permafrost (cap. 1.7). Tutto questo va considerato in un quadro dei pericoli e il rischio residuo va ponderato nell'ottica dell'idoneità d'uso dell'opera. Queste influenze dovrebbero essere prese in considerazione nella scelta del sito; se si tratta di un'opera già esistente si esaminerà il pericolo potenziale. Se tale potenziale risulta inaccettabile, sarà necessario posare opere di protezione adatte alla situazione specifica, come ad esempio reti di protezione contro le cadute di massi, chiodature o ancoraggi nella roccia, nonché pareti e muri di protezione od opere antivalanghe (fig. 38).

### 2.3.2 Concetto di struttura portante

Il concetto di una struttura portante dovrebbe includere le considerazioni seguenti:

- Scegliere il sito adatto.
- Considerare tutti i pericoli più significativi (valutazione di scenari, condizioni di carico).
- Prevedere una struttura portante robusta e adeguata, dotata di margini di sicurezza chiari (nessun margine di sicurezza nascosto).
- Assicurarsi che le strutture portanti flessibili possano essere adattate alle condizioni reali.
- Fissare gli elementi portanti e gli elementi di costruzione il più possibile nel permafrost intatto (tenere conto delle forze di sollevamento provenienti dallo strato attivo).
- Fare in modo che le deformazioni non ostacolino l'uso della costruzione (idoneità) e prevedere eventualmente la possibilità di riaggiustamenti.
- Includere i pericoli naturali nell'analisi dei pericoli e valutare il rischio residuo che incide sull'idoneità della costruzione.



Fig. 38: Lavori di ancoraggio nella roccia per proteggere l'uscita di una galleria dalla caduta di massi (foto: Gasser, Lungern).

### L'essenziale in breve

Lo studio preliminare è la fase chiave nello studio di un progetto di costruzione su permafrost. Rispetto alle costruzioni su suolo non gelato, bisogna prevedere più tempo per la caratterizzazione del terreno, in quanto include i rilevamenti dell'evoluzione stagionale della temperatura del suolo e dell'aria. Di conseguenza lo studio preliminare è più costoso, ma genera rendimento a lungo termine poiché permette di prolungare la durata di vita delle opere e di ridurre i costi di rifacimento o di ricostruzione.

Per costruzioni complesse e soggette a deformazione e per condizioni geotecniche difficili, occorre caratterizzare il terreno di fondazione scelto procedendo a indagini sul terreno e ad prove di laboratorio.

Per risanare le costruzioni esistenti, è importante che durante l'analisi preliminare siano riconoscibile le cause che hanno provocato i danni. La definizione della causa e la comprensione degli effetti non è sempre evidente, in quanto esiste una stretta interazione tra la struttura portante e il permafrost. È pertanto raccomandato ricorrere a specialisti.

La scelta del sito è di fondamentale importanza per stabilire la tipologia di struttura portante. In questa fase è importante determinare se il sito previsto si trova su permafrost, studiare le condizioni del terreno di fondazione e considerare i pericoli naturali. Se il sito si trova su permafrost ricco di ghiaccio occorre prevedere di sceglierne un altro o di rinunciare alla costruzione. La struttura portante dovrebbe essere robusta, adatta alle condizioni del sito e progettata con margini di sicurezza sufficienti per evitare di dover limitare l'uso dell'opera nel corso della sua esistenza.

### 3 Progetto preliminare

#### 3.1 Convenzione d'uso

Durante l'uso di un edificio, devono essere rispettate molteplici esigenze, definite nella convenzione d'uso. Le basi di questo documento saranno stabilite durante lo studio preliminare in accordo tra il committente e il progettista.

La procedura di realizzazione della convenzione d'uso e il suo contenuto sono precisati nella norma SIA 260. Per le costruzioni su permafrost, occorre definire anche alcuni punti supplementari (tab. 12, colonna di sinistra).

I principali pericoli e scenari saranno studiati in questa fase di progetto preliminare (cap. 3.4.2, 3.5.2 e 3.6); i rischi residui non coperti risultanti da eventi straordinari, dai pericoli naturali e da altri rischi particolari devono essere definiti in accordo con il committente.

Tab. 12: Complementi di esame dei diversi fattori che devono confluire nella convenzione d'uso e nella base del progetto di costruzioni su permafrost.

Convenzione d'uso	Base del progetto
<i>Definire le esigenze</i>	<i>Applicare le esigenze</i>
Valutazione e scelta del sito (condizioni del terreno di fondazione, verifica della presenza di permafrost, contenuto di ghiaccio)	Nella fase dello studio preliminare, è utile esaminare nel dettaglio (in funzione dell'importanza dell'oggetto) il sito, il terreno di fondazione e le condizioni del permafrost (cap. 2)
Sistema di struttura portante adatto al sito e al terreno di fondazione (garantire la sicurezza strutturale)	Scelta di un sistema di struttura portante adeguato prevedendo eventualmente le misure correttive necessarie per le costruzioni soggette a deformazione (ad es. struttura portante adattabile)
Durata d'uso (conseguenze dei cambiamenti nel terreno di fondazione per tutta la durata dell'esistenza di una costruzione)	Scelta di un tipo di fondazione adeguato che eviterà che alcune deformazioni limitino l'uso di una costruzione
Deformazioni ammissibili (garantire l'idoneità)	Proprietà geotecniche del terreno di fondazione e conseguenze di una modifica del contenuto di ghiaccio: – Scivolamenti di un terreno di fondazione ricco di ghiaccio per effetto dell'introduzione di forze – Calcolo dei cedimenti (scioglimento del ghiaccio nel terreno di fondazione) – Calcolo dei sollevamenti (formazione di ghiaccio nel terreno di fondazione) – Calcolo della resistenza al taglio e della capacità portante del terreno (svalutazione delle caratteristiche del terreno di fondazione)
Apporto di calore atteso nel sottosuolo (ad es. durante la realizzazione o l'uso)	Protezione contro l'apporto di calore nel sottosuolo (capitolo 8) tramite: – metodi di costruzione adeguati (fase della costruzione) – misure di costruzione adeguate (fase dell'uso)
Incertezze sui costi (a causa dell'altitudine, della logistica, del clima)	Formulazione di un budget preciso, diminuzione delle incertezze sui costi tramite: – documenti d'appalto completi – pianificazione ed esecuzione dei lavori affidate a imprenditori esperti

## 3.2 Base del progetto

Le esigenze da rispettare e l'utilizzo di una costruzione definiti nella convenzione d'uso sono indicati nella base del progetto. Servono da guida al progettista e lo aiuteranno a rispettare le condizioni definite in conformità alle norme e a regola d'arte.

La procedura e i contenuti della base del progetto saranno conformi alla norma SIA 260. La portata e il contenuto della base del progetto dipendono dall'importanza della costruzione e dei pericoli. Per le costruzioni su permafrost occorre considerare alcuni punti supplementari (tab. 12, colonna di destra).

## 3.3 Impatto ambientale

Durante il progetto preliminare deve essere valutata la necessità di allestire uno studio o una relazione di impatto ambientale (EIE o RIE). Questo studio dovrebbe essere realizzato il più presto possibile. Dato che la maggioranza degli edifici su permafrost si trova fuori dalle zone edificabili, nella maggior parte dei casi è necessaria una perizia ambientale. La sua portata e il suo contenuto saranno definiti sulla base della legge federale sulla protezione dell'ambiente (LPAmb) e delle direttive dei Servizi cantonali che si occupano dell'ambiente.

## 3.4 Azioni

### 3.4.1 Azioni sulla struttura portante

Le azioni si riferiscono alla struttura portante e si distinguono in base alla loro origine e tipo, nonché in funzione della loro durata e variabilità spazio-temporale. La caratterizzazione precisa delle azioni sarà conforme alle norme SIA 260 e 261.

La tabella 13 sintetizza le possibili azioni non specifiche del permafrost e quelle connesse al permafrost subite da una struttura situata in alta montagna.

Le combinazioni di azioni determinanti saranno studiate e considerate nel dimensionamento (cap. 4.1).

### 3.4.2 Modifiche delle azioni sulla struttura portante dovute al permafrost

La tabella 14 presenta, per mezzo di tre scenari, quelle che possono essere le conseguenze di una modifica imputabile al permafrost delle azioni che si esercitano su una struttura portante: 1) nessuna modifica nel terreno di fondazione con permafrost; 2) modifica del terreno di fondazione dovuta al deterioramento del ghiaccio che contiene; 3) modifica nel terreno di fondazione dovuta all'accrescimento del ghiaccio.

Tab. 13: Azioni possibili sulla struttura portante.

Azioni (descrizione)	cos-tanti	varia-bili	ecce-zionali
Provenienti dall'ambiente (sito in alta montagna, azione non specifica del permafrost):			
- Temperatura dell'aria (variazioni giornaliere e stagionali della temperatura)	x	x	x
- Peso della neve (variazioni stagionali del peso della neve)	x	x	x
- Vento (variazioni giornaliere e stagionali del vento)		x	x
- Peso del ghiaccio (variazioni stagionali del peso del ghiaccio )	x	x	x
- Pericoli naturali (cadute di massi, valanghe, lave torrentizie, rottura glaciale)			x
Provenienti dal terreno di fondazione (azione specifica del permafrost):			
- Temperatura del terreno (negativa, variazioni stagionali)	x	x	
- Carico proprio del terreno (carico volumico, percentuale di ghiaccio)	x	x	
- Pressione del terreno (resistenza al taglio, carico volumico)	x	x	
- Pressione dello scivolamento (temperatura del terreno, percentuale di ghiaccio, comportamento in deformazione)	x	x	
- Pressione dell'acqua (variazioni stagionali, distribuzione, flusso)		x	x
- Pressione dell'acqua interstiziale (variazioni stagionali, resistenza al taglio)		x	
- Deformazioni (scivolamenti, perdita di volume, resistenza al taglio, ghiaccio di segregazione)	x	x	
- Contenuto di sale del terreno (punto di congelamento dell'acqua più basso)	x	x	

Tab. 14: Modifiche delle azioni che si esercitano sulla struttura portante imputabili al permafrost e relative conseguenze.

Modifica delle azioni	Conseguenze
Scenario 1: Nessuna modifica nel terreno di fondazione con permafrost	Vedi tabella 13 sopra
Scenario 2a: Modifica nel terreno di fondazione con permafrost dovuta alla degradazione, scioglimento del ghiaccio che contiene	Aumento della pressione del terreno dovuto alla diminuzione della resistenza al taglio Diminuzione della portanza dovuta alla riduzione della resistenza al taglio, instabilità Aumento della pressione di scorrimento dovuto all'aumento della temperatura del ghiaccio Aumento delle deformazioni del terreno di fondazione, perdita di volume (cedimento) Aumento dello spessore dello strato attivo Aumento della pressione dell'acqua interstiziale dovuto allo scioglimento del ghiaccio Aumento della pressione dell'acqua, della distribuzione idrostatica o della pressione idrodinamica
Scenario 2b: Permafrost non presente nel terreno di fondazione (fase finale dello scenario 2a)	Deformazioni del terreno di fondazione dovute a una perdita di volume, consolidamento (assestamento) Diminuzione della portanza del terreno, instabilità dovute a una diminuzione della resistenza al taglio Diminuzione della pressione dell'acqua interstiziale Diminuzione della pressione dell'acqua e della pressione idrodinamica
Scenario 3: Modifica nel terreno di fondazione con permafrost dovuta all'accrescimento del ghiaccio	Aumento degli sforzi di trazione sugli elementi strutturali (pali, ancoraggi) Aumento delle deformazioni del terreno di fondazione, aumento del volume (pressione di sollevamento) Diminuzione dello spessore dello strato attivo Diminuzione della pressione dell'acqua interstiziale per effetto del gelo dell'acqua interstiziale Diminuzione della pressione dell'acqua, della distribuzione idrostatica o della pressione idrodinamica

## 3.5 Effetti

### 3.5.1 Effetti sulla struttura portante

Per effetti sulla struttura portante si intende la risposta che questa dà alle azioni subite. La presente guida tratta unicamente gli effetti attribuibili a un terreno di fondazione con permafrost. Essi possono essere dedotti dalle possibili azioni presentate nella tabella 13 (tab. 15).

### 3.5.2 Modifiche degli effetti sulla struttura portante dovute al permafrost

La tabella 14 presenta tre scenari che descrivono una modifica delle azioni imputabile al permafrost: 1) nessuna modifica nel terreno di fondazione con permafrost; 2) modifica nel terreno di fondazione con permafrost (deterioramento); 3) modifica nel terreno di fondazione con permafrost (aumento). Gli effetti che ne risultano sono esposti nella tabella 16.

Tab. 15: Possibili effetti esercitati sulla struttura portante.

Azioni provenienti dal terreno di fondazione	Effetti
Temperatura del terreno	Danneggiamento dei materiali (processo di presa del cemento, scheggiature)
Carico proprio del terreno	Sforzi di taglio, flessioni, fessure
Pressione del terreno	Sforzi di taglio, flessioni, fessure
Pressione da scivolamento	Sforzi di taglio, flessioni, fessure
Pressione dell'acqua	Sforzi di taglio, flessioni, fessure, danni provocati dall'acqua
Pressione dell'acqua interstiziale	Sforzi di taglio, flessioni, fessure, danni provocati dall'acqua
Deformazioni	Sforzi di taglio, fessure, cedimenti della struttura portante
Contenuto di sale nel terreno	Danneggiamento dei materiali (corrosione, scheggiature)

Tab. 16: Effetti esercitati sulla struttura portante a causa di una modifica nel permafrost.

Azioni provenienti dal terreno di fondazione	Effetti
Scenario 1 (Nessuna modifica nel terreno di fondazione con permafrost)	Vedi gli effetti enunciati nella tabella 15 sopra
Scenario 2a (Modifica nel terreno di fondazione con permafrost, deterioramento)	Sforzi di taglio, flessioni, deformazioni differenziali del terreno di fondazione (cedimenti), fessure, cedimenti della struttura portante, danni provocati dall'acqua
Scenario 2b (Scomparsa del permafrost presente nel terreno di fondazione)	Sforzi di taglio, flessioni, fessure, deformazioni differenziali del terreno di fondazione
Scenario 3 (Modifica nel terreno di fondazione con permafrost, accrescione)	Sforzi di taglio, flessioni, deformazioni differenziali del terreno di fondazione (pressione di sollevamento), fessure, cedimenti della struttura portante

### 3.5.3 Effetti sul terreno di fondazione

Per effetti sul terreno di fondazione si intende la risposta che questo dà alle azioni che subisce. Gli effetti attribuibili al permafrost sono significativi solo se interessano la struttura portante. Essi sono presentati nelle tabelle 15 e 16. Quelli che non interessano la struttura portante non sono presentati in questa guida.

Le azioni e gli effetti sono considerati nel dimensionamento. Le azioni sono combinate in diverse configurazioni di pericolo per verificare la portanza del terreno. Gli effetti, limitati dalle esigenze formulate nella convenzione d'uso e nella base del progetto, sono studiati verificando l'idoneità della costruzione.

## 3.6 Analisi delle conseguenze e della sensibilità

L'analisi delle conseguenze e della sensibilità studia la risposta del terreno di fondazione soggetto a diverse azioni. Le informazioni di base provengono da una descrizione del progetto, da una semplice valutazione del terreno e da una descrizione delle azioni. Gli elementi esaminati nella descrizione del progetto riguardano l'obiettivo, la situazione e le esigenze legate all'uso (convenzione d'uso e base del progetto). Un riconoscimento del terreno deve caratterizzare lo stato iniziale (stato reale) del terreno, che si tratti di un nuovo edificio o di un edificio già esistente. Le azioni sulla struttura portante sono presentate nella tabella 13. Inoltre, la tabella 14 include tre scenari che illustrano le modifiche delle azioni attribuibili al permafrost e le loro conseguenze sulla struttura portante. Da queste condizioni scaturisce la sensibilità del terreno di fondazione (analisi della sensibilità, «Y», fig. 39). Questa sensibilità è definita sulla base della temperatura del terreno, del contenuto di ghiaccio e della struttura del terreno o della roccia (cap. 1.4.2).

Gli effetti possono avere conseguenze diverse a seconda del tipo di costruzione e del sito. L'importanza delle conseguenze permette di qualificare l'importanza degli effetti. Per un rifugio alpino, i cedimenti dovuti allo scioglimento del permafrost possono creare problemi e fare aumentare i costi di manutenzione. D'altronde le instabilità causate dai cedimenti differenziali degli impianti a fune o delle fondazioni dei piloni possono provocare un deragliamento, se non un distacco dei cavi, o far persino cedere la struttura portante. Tali avvenimenti possono generare molteplici problemi che vanno dal guasto al sistema di gestione, al pericolo per le vite umane e per importanti beni materiali. I rischi devono quindi essere ridotti a una misura accettabile appoggiandosi sulle disposizioni e sui dimensionamenti definiti nella convenzione d'uso e nella base del progetto. Di fronte a questi rischi, si rende necessaria un'analisi delle conseguenze. La figura 39 presenta un'analisi delle conseguenze «X» e della sensibilità «Y» e fornisce le conoscenze necessarie a comprendere le interazioni tra il terreno di fondazione e la struttura portante.

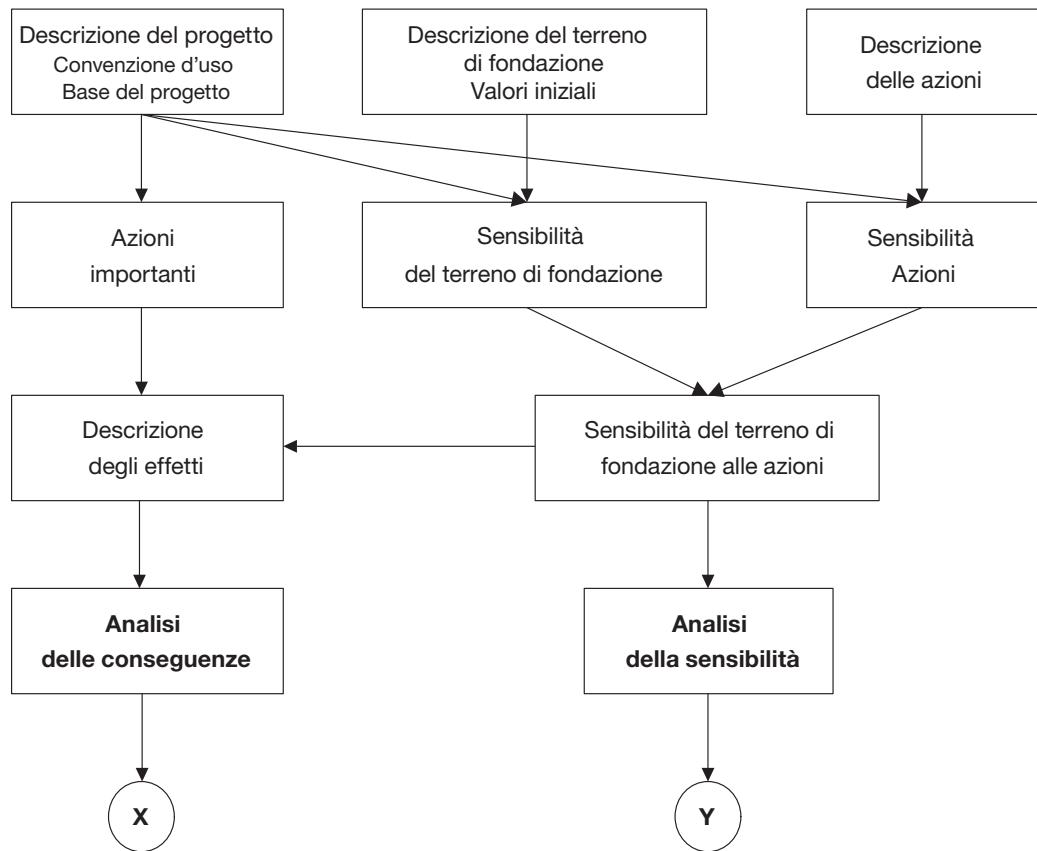


Fig. 39: Schema operativo dell'analisi delle conseguenze e della sensibilità per le costruzioni sul permafrost (adattato da PERD, 1998).

### 3.6.1 Portata delle indagini

La valutazione dei rischi si basa sulla probabilità di occorrenza di un evento e sulle sue conseguenze (danni). Nella valutazione dei rischi in relazione con la costruzione su permafrost, queste probabilità corrispondono alla sensibilità della costruzione soggetta ad azioni. Un'azione (ad es. dovuta al riscaldamento) che si esercita nel permafrost rappresenta un pericolo per una struttura portante, in quanto può rafforzare le influenze già esistenti e agraviarne gli effetti (ad es. cedimento della struttura portante). Le conseguenze permettono di definire l'importanza degli effetti.

Diversi tipi di infrastrutture realizzate nel permafrost sono classificate in un diagramma delle conseguenze e della sensibilità (fig. 40). Questo diagramma presenta l'importanza qualitativa delle conseguenze «X» che può avere il cedimento di una struttura portante e il grado di sensibilità di una struttura portante soggetta a diverse azioni «Y». Questa classificazione funge anche da base per determinare la portata delle analisi e delle indagini «Z», che variano a seconda del quadrante in cui si classifica la costruzione su permafrost (tab. 17). Le classificazioni dei diversi tipi di costruzione presentate in figura 40 sono da considerarsi come esempi e devono essere ridefinite per ogni costruzione.

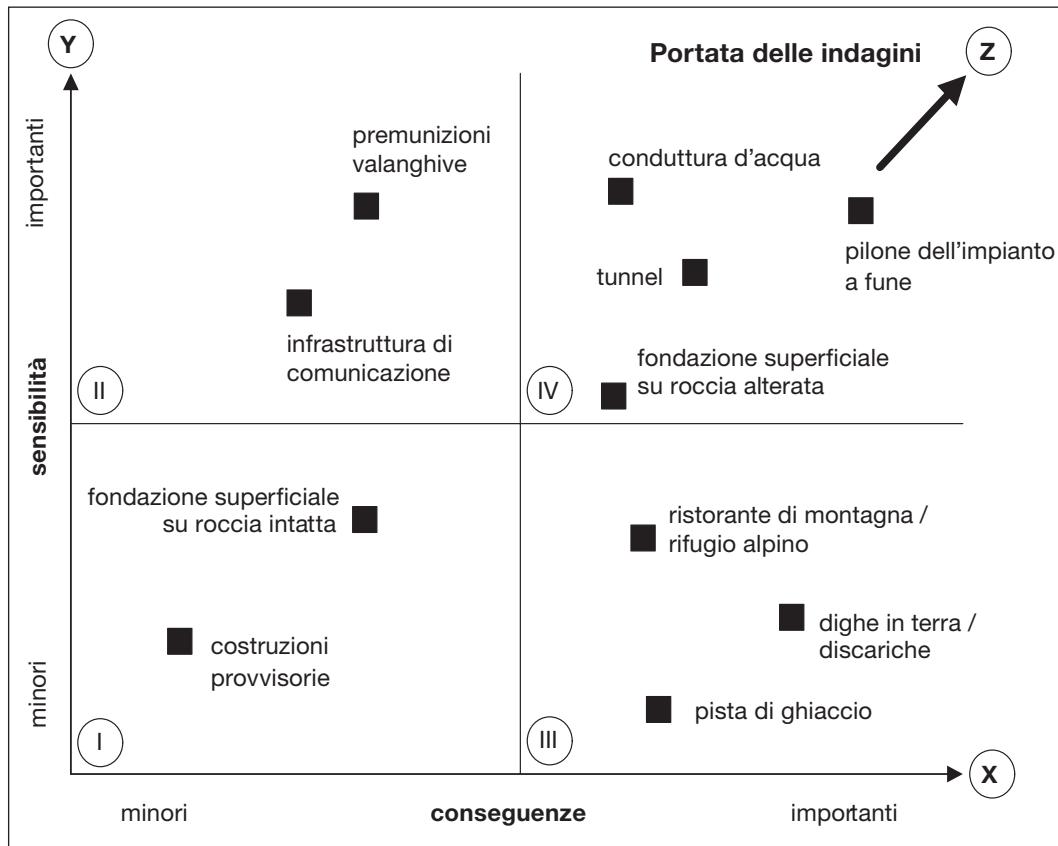


Fig. 40: Esempio di una classificazione nel diagramma delle conseguenze e della sensibilità per infrastrutture realizzate nel permafrost (adattato da PERD, 1998). I quadranti da I a IV sono spiegati in tabella 17.

Tab. 17: Portata dell'analisi e delle indagini secondo i quadranti dell'analisi delle conseguenze e della sensibilità.

\* Analisi qualitativa: modellizzazione analitica delle azioni variabili / Effetti sulla struttura portante.

+ Analisi quantitativa: modellizzazione digitale dettagliata (su base informatica) delle azioni variabili / Effetti sulla struttura portante

Quadrante	Portata raccomandata delle analisi e degli esami
I	Nessuna analisi o esame dettagliato necessari
II	Effettuare un'analisi qualitativa*: valutazione da parte di esperti, riconoscimento del terreno, analisi quantitativa se non esiste un progetto paragonabile
III	Effettuare un'analisi quantitativa+ limitata: valutazione da parte di un ingegnere dei parametri utilizzati, controllo del terreno di fondazione, analisi quantitativa completa se non esiste un progetto paragonabile
IV	Effettuare un'analisi quantitativa+ dettagliata: analisi dettagliata del terreno di fondazione sul campo e in laboratorio, valutazione indipendente da parte di esperti (ingegnere di controllo), controllo della costruzione nel suo insieme

Un controllo e una manutenzione adeguata delle costruzioni su permafrost durante tutte le fasi del progetto permettono generalmente di scoprire le conseguenze per tempo e di prendere le opportune misure di sicurezza (cap. 5 e 6).

### 3.7 Esempi di applicazione

I due esempi che seguono indicano gli elementi da considerare per ogni azione e come tenerne conto nello studio delle conseguenze e della sensibilità per determinare la portata delle analisi e delle indagini.

#### 3.7.1 Situazione iniziale – primo esempio

Un impianto a fune non riscaldato è appoggiato su una soletta di fondazione continua. Poggia sullo strato attivo di una roccia fessurata a valle e, a monte, su una roccia fessurata contenente ghiaccio. In questo caso specifico, viene esaminata l'influenza prodotta dal terreno di fondazione (fig. 41).

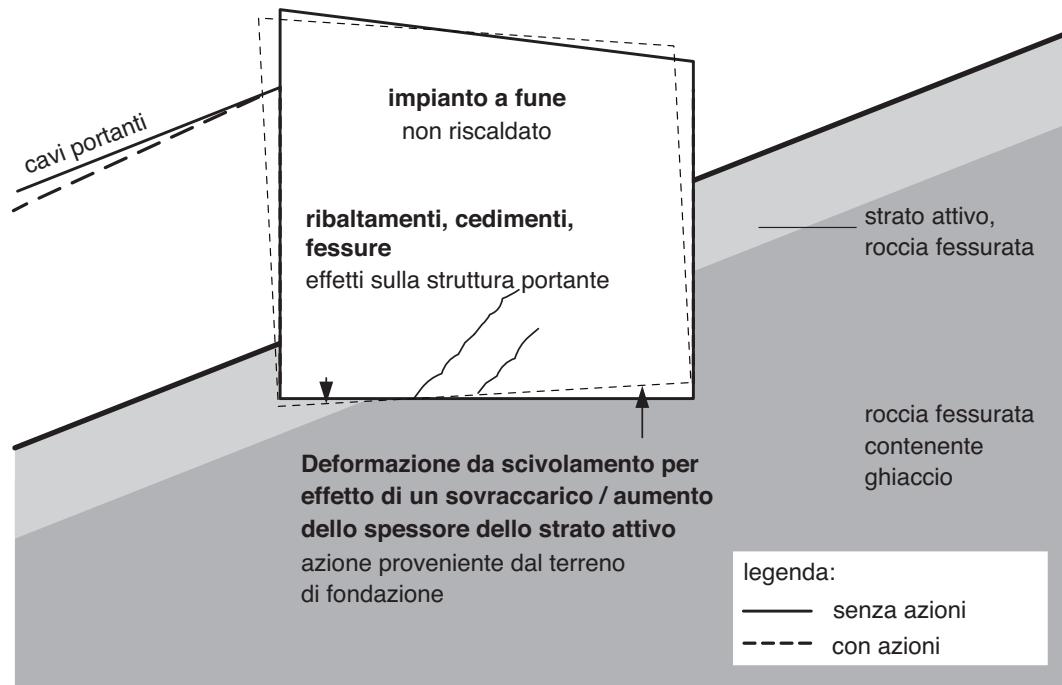


Fig. 41: Rappresentazione schematica di un impianto a fune fondato su una roccia fessurata contenente ghiaccio e soggetto a una sollecitazione o a un effetto proveniente dal terreno di fondazione.

### 3.7.2 Azioni sulla struttura portante

Tra le azioni provenienti dal terreno di fondazione, quella scelta in questo caso si riferisce alle deformazioni (cedimenti) da scivolamento per effetto di un sovraccarico o di un aumento dello spessore dello strato attivo, il che può rappresentare un'azione variabile ed eccezionale secondo la tabella 13. Questa condizione di dimensionamento sarà considerata durante la verifica della sicurezza strutturale e dell'idoneità della costruzione (norma SIA 260).

### 3.7.3 Effetti sulla struttura portante

Gli effetti esercitati dal terreno di fondazione sulla struttura portante sono schematizzati in figura 41. Gli effetti dell'azione variabile ed eccezionale (cedimento differenziale del terreno di fondazione) possono provocare un ribaltamento; possono anche generare sforzi di taglio e fessure nella struttura portante, come si nota in tabella 15 e 16 (scenario 2a). Queste condizioni di dimensionamento saranno considerate durante la verifica della sicurezza strutturale e dell'idoneità della costruzione (norma SIA 260). Di fronte alle modifiche prevedibili che subirà la costruzione, è importante progettare una struttura portante adeguata e adottare metodi di controllo capaci di garantire un rilevamento precoce delle problematiche.

### 3.7.4 Analisi delle conseguenze e della sensibilità

Le prime caratterizzazioni del terreno hanno mostrato che sotto la roccia fessurata dello strato attivo si trova una roccia fessurata contenente ghiaccio. Per effetto di un sovraccarico e del riscaldamento climatico, bisogna aspettarsi che vi siano influenze provenienti dal terreno di fondazione. L'introduzione di forze in un terreno di fondazione contenente ghiaccio può generare deformazioni da scivolamento. Per effetto del riscaldamento, lo spessore dello strato attivo tenderà ad aumentare, il che condurrebbe a un deterioramento della roccia e a cedimenti differenziali sotto l'edificio. I cedimenti del terreno di fondazione nella zona molto sollecitata dello spigolo a valle dell'impianto fanno diminuire la sicurezza al ribaltamento, o provocano persino il ribaltamento se tale pericolo non viene rilevato. A seconda della sensibilità del terreno di fondazione, si esercita un'azione sulla costruzione; questa influenza può essere considerata da debole a forte a seconda del tipo di struttura portante e dei sistemi di sorveglianza installati nel terreno e nella struttura stessa (asse Y, fig. 40).

Le esigenze d'uso di una funivia, definite nella convenzione e nella base del progetto, mostrano che le azioni che provocano una riduzione della stabilità dell'edificio o degli spostamenti dell'asse del cavo (effetto) possono avere pesanti conseguenze. Le azioni provenienti dal terreno di fondazione (deformazioni da scivolamento per effetto di un sovraccarico, aumento dello spessore dello strato attivo) possono essere la causa di simili spostamenti o destabilizzazioni. Se esiste una forte probabilità di spostamento spontaneo o di cedimento della struttura portante, occorre ammettere che le conseguenze per la costruzione saranno elevate (asse X, fig. 40).

### 3.7.5 Portata delle indagini

La classificazione della stazione di una funivia o delle fondazioni di un pilone di funivia nel permafrost dipende dalle presunte modifiche del terreno di fondazione, dal concetto di struttura portante, dal tipo di fondazione e dai metodi di sorveglianza utilizzati. In alcuni casi, bisogna anche determinare la sensibilità del terreno di fondazione e le conseguenze per la costruzione. A causa della forte sollecitazione data dalla forza esercitata dai cavi e della grande importanza della sicurezza, il risultato sarà inserito nel terzo o quarto quadrante (fig. 40). Le analisi, le indagini e i controlli da realizzare dovrebbero allora essere definiti sulla base della tabella 17.

## 3.8 Secondo esempio di applicazione

### 3.8.1 Situazione iniziale

Un ristorante riscaldato poggia su una fondazione superficiale nello strato attivo di un terreno. Al di sotto il terreno contiene ghiaccio. In questo caso specifico, sono esaminate l'influenza proveniente da un fattore esterno e quella proveniente dal terreno di fondazione (fig. 42).

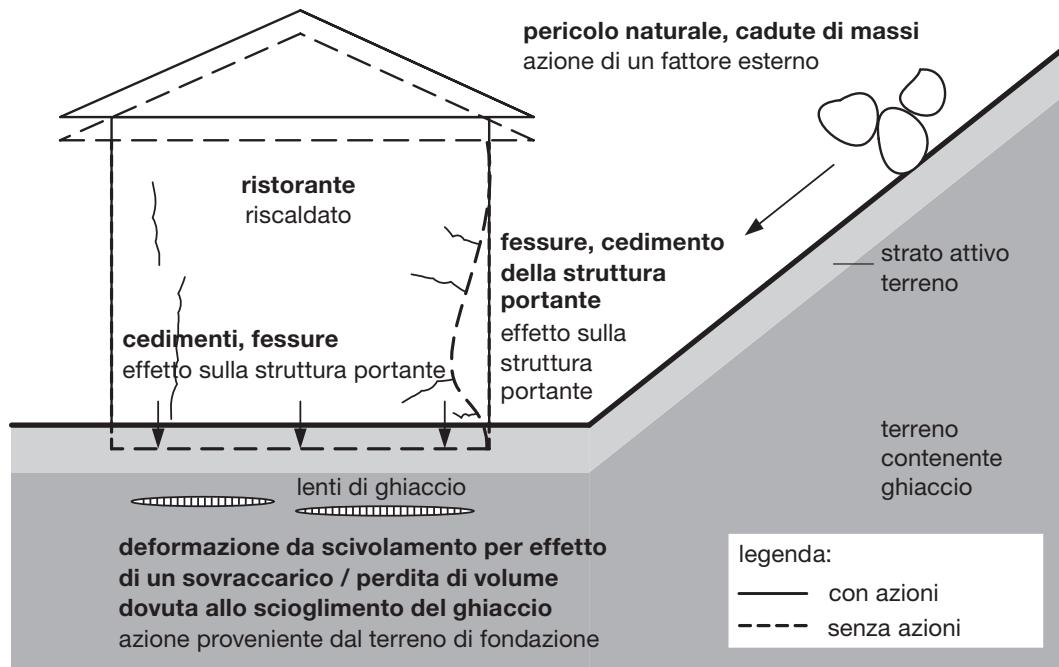


Fig. 42: Rappresentazione schematica di un ristorante riscaldato situato su permafrost e soggetto all'azione o all'effetto proveniente da un fattore esterno o dal terreno di fondazione.

### 3.8.2 Azioni sulla struttura portante

Tra le azioni provenienti dall'ambiente, quella scelta in questo caso riguarda il pericolo di cadute di massi, il che rappresenta un'azione eccezionale secondo la tabella 13. Per azioni provenienti dal terreno di fondazione, la scelta è stata basata sulle deformazioni da scivolamento per effetto di un sovraccarico o di una perdita di volume provocata dallo scioglimento del ghiaccio, il che rappresenta un'azione variabile ed eccezionale, secondo la tabella 13. Queste condizioni di dimensionamento saranno considerate durante la verifica della sicurezza strutturale e dell'idoneità della costruzione (norma SIA 260).

### 3.8.3 Effetti sulla struttura portante

Gli effetti provenienti dall'esterno e dal terreno di fondazione sulla struttura portante sono schematizzati nella figura 42. Gli effetti delle azioni eccezionali determinati dalle cadute di massi o dalle deformazioni possono provocare fessure nella struttura portante e causarne il cedimento. Gli effetti di un'azione variabile di deformazione possono portare alla comparsa di sforzi di taglio, a cedimenti e a rotture nella struttura portante (tab. 15 e 16, scenario 2a). Queste condizioni di dimensionamento saranno considerate durante la verifica della sicurezza strutturale e dell'idoneità della costruzione (norma SIA 260).

### 3.8.4 Analisi delle conseguenze e della sensibilità

Le prime caratterizzazione del terreno hanno mostrato che sotto lo strato attivo si trova un terreno contenente ghiaccio. Per effetto di un sovraccarico e a causa del riscaldamento del ristorante, bisogna aspettarsi che vi siano delle sollecitazioni che partono dal terreno di fondazione. L'introduzione di carichi in un terreno di fondazione contenente ghiaccio può generare deformazioni da scivolamento. Per effetto del riscaldamento il ghiaccio si scioglie, il che porta a una perdita di volume del terreno di fondazione e quindi a cedimenti sotto la costruzione. La sensibilità del terreno di fondazione a queste azioni deve dunque essere supposta da media a forte (asse Y, fig. 40).

Le esigenze definite nella convenzione d'uso di un ristorante e nella base del progetto mostrano che le azioni che producono deformazioni e fessure (effetti) hanno la conseguenza di limitarne l'uso. Anche quelle provenienti dal terreno di fondazione (deformazioni da scivolamento per effetto di un sovraccarico, scioglimento del ghiaccio) possono produrre deformazioni e fessure simili, ma le conseguenze possono essere ritenute minori (asse X, fig. 40).

Per evitare l'interruzione del servizio a causa di un cedimento della struttura portante dovuto a una caduta di massi saranno prese misure appropriate (reti paramassi, rinforzi della parete rocciosa). Bisogna anche stimare il rischio residuo e discuterne con il committente. I rischi residui non sono considerati nell'analisi delle conseguenze e della sensibilità.

### 3.8.5 Portate delle indagini

A causa della forte sensibilità del terreno di fondazione e delle conseguenze poco significative, il ristorante è classificato nel secondo quadrante (fig. 40). È quindi possibile determinare la portata delle analisi e delle indagini (asse Z, fig. 40). Le analisi, le indagini e i controlli da realizzare dovrebbero allora essere definiti sulla base della tabella 17.

#### L'essenziale in breve

Questo capitolo espone gli studi complementari necessari per redigere la convenzione d'uso e la base del progetto relative alle costruzioni realizzate su permafrost. Vi si trova anche una descrizione delle azioni e degli effetti prodotti sulla struttura portante di una costruzione su permafrost.

Per mezzo di un'analisi delle conseguenze e della sensibilità viene esaminata la sensibilità del terreno di fondazione della costruzione. La portata delle analisi e delle indagini è determinata in funzione della sensibilità di questo terreno rispetto alle influenze subite e alle conseguenze derivanti dagli effetti osservati.

## 4 Progetto di costruzione

### 4.1 Dimensionamento

Il dimensionamento consiste nel definire le dimensioni, i materiali e i dettagli di costruzione di una struttura portante sulla base delle situazioni di pericolo e degli stati di utilizzo determinanti secondo le norme sulle strutture portanti SIA da 262 a 267. Quando i rischi sono difficilmente stimabili e le condizioni del terreno di fondazione complesse – cosa frequente nel permafrost – i valori caratteristici del terreno di fondazione saranno scelti riferendosi alla base del progetto. Dovrebbero essere considerati anche il surriscaldamento climatico e le influenze che i lavori di costruzione e l'uso dell'infrastruttura esercitano sul contenuto di ghiaccio del terreno di fondazione. Prevedendo la durata di vita di una costruzione, i valori caratteristici del terreno di fondazione dovrebbero essere stimati tenendo conto di un eventuale cambio di stato.

I valori di dimensionamento di un terreno di fondazione nel permafrost sono da determinare, secondo la norma SIA 267, a partire dai valori caratteristici dei terreni di fondazione con i necessari fattori parziali e di conversione. I valori corrispondenti sono considerati nella verifica della sicurezza strutturale e dell'idoneità della costruzione.

### 4.2 Verifiche

La sicurezza strutturale e l'idoneità devono essere verificate in conformità alla norma SIA 260. Per le costruzioni su permafrost, è necessario verificare, nella misura in cui siano determinanti, i quattro tipi di stati limite applicabili alla sicurezza strutturale secondo la norma SIA 267. Essi riguardano la perdita di equilibrio, il raggiungimento della capacità portante, la perdita di stabilità e il raggiungimento della resistenza alla fatica.

Gli stati limite dell'idoneità devono essere esaminati in conformità alla convenzione d'uso. Secondo le esigenze della norma SIA 267, la verifica dell'idoneità riguardante le costruzioni su permafrost consiste essenzialmente nel calcolare i cedimenti, i ribaltamenti, gli spostamenti e le deformazioni.

- Per verificare la resistenza e l'idoneità di strutture portanti in cemento armato acciaio, legno e muratura, si applicheranno le disposizioni delle norme sulle strutture portanti SIA da 262 a 267.



## 5 Realizzazione

### 5.1 Progetto esecutivo

#### 5.1.1 Gara d'appalto

Per ottenere offerte adeguate per la realizzazione del progetto sono essenziali documenti d'appalto completi. Quando si bandisce una gara d'appalto per lavori di costruzione sul permafrost, è importante considerare i seguenti aspetti:

##### Perforazioni e lavori di scavo

- Il congelamento o il blocco degli strumenti in un foro di sondaggio contenente ghiaccio può generare ritardi, danni o perdite di materiale.
- Le perforazioni dovrebbero essere eseguite soltanto con aria compressa, per ridurre al minimo l'apporto di calore nel terreno.
- La pala meccanica è poco efficace nei terreni contenenti ghiaccio. Secondo il «Catalogo degli articoli normalizzati (CAN)», sono difficilmente scavabili con la pala meccanica e soggetti a complicazioni (i blocchi devono essere frantumati con il martello pneumatico). Il terreno di fondazione deve essere descritto chiaramente nelle condizioni generali. Per i lavori di scavo bisogna quindi prevedere di utilizzare un martello pneumatico o di scavare con l'esplosivo. Le prove penetrometriche (SPT) non possono essere realizzate nel permafrost. Da qui la necessità di descrivere bene la composizione e la compattezza supposta del terreno di fondazione.
- Essendo le rocce e i terreni contenenti ghiaccio più difficili da minare, è necessario utilizzare più esplosivo e diminuire gli spazi tra i fori.

##### Materiali da costruzione

- Le temperature negative del terreno rallentano la presa della malta e del calcastruzzo. È quindi necessario utilizzare degli additivi o un legante che permettano di raggiungere la resistenza desiderata. Inoltre, è possibile riscaldare l'acqua di impasto per la malta o il cemento, nonché i conglomerati cementizi. Gli effetti dell'acqua calda, dei additivi e del calore di presa su un terreno contenente ghiaccio devono essere considerati per il dimensionamento.
- La malta e il calcastruzzo dovrebbero essere resi resistenti al gelo con l'ausilio di additivi aeranti o resi impermeabili diminuendo il rapporto acqua/cemento durante l'impasto.
- I materiali di riempimento o di casseratura dovrebbero essere non gelivi, come la sabbia, il pietrisco, la ghiaia o i sedimenti ghiaiosi (cap. 8.4.4).
- Per ridurre al minimo lo scambio di calore tra la costruzione e il terreno di fondazione, dovrebbero essere utilizzati materiali isolanti (cap. 8.6.1).

##### Realizzazione e sorveglianza

- In generale, i lavori di costruzione possono essere effettuati soltanto in brevi periodi.
- Si dovrebbero considerare le condizioni climatiche del sito, dato che, in alta montagna, può nevicare in qualsiasi momento, il che riduce ulteriormente il già breve periodo favorevole per costruire.
- Gli ancoraggi e i chiodi devono essere infilati e iniettati immediatamente dopo lo scavo di ogni foro, in quanto tali fori gelano rapidamente se non possono essere riscaldati.
- È importante tener conto del fatto che le prestazioni umane e della macchina diminuiscono con l'altitudine.

- I lavori di costruzione sul permafrost impongono esigenze particolari. Conviene quindi affidare questi lavori a ditte specializzate.
- Fin dal progetto preliminare dovrebbe essere pianificato un sistema di sorveglianza installato prima dell'inizio dei lavori di costruzione (tab. 18.)

### 5.1.2 Nuove costruzioni su permafrost

Il progetto esecutivo di un nuovo edificio su permafrost dovrebbe garantire una disposizione della costruzione il più possibile adatta al sito (cap. 2.3). Nella scelta della struttura portante, si dovrebbe tener conto delle conoscenze acquisite durante l'analisi preliminare, il che richiede a volte un adattamento della convenzione d'uso. Se il sito si rivela sfavorevole o se la struttura portante non può rispettare le esigenze imposte (cap. 3), si dovrebbe prevedere un cambio di sito o una rinuncia alla costruzione.

### 5.1.3 Risanamento di costruzioni su permafrost

Prima di avviare un progetto di risanamento su permafrost, occorrerebbe analizzare ciò che lo ha reso necessario. Lo svolgimento di una tale procedura è presentato al capitolo 6.2 che descrive un piano di manutenzione e di intervento e indica le possibili misure di risanamento. Queste misure permettono di stabilizzare le costruzioni esistenti e, se necessario, di agire contro il deterioramento del permafrost. Se il sottosuolo contiene solo una piccola percentuale di permafrost, si può adottare un metodo di costruzione che implica il suo scioglimento (cap. 8.7.4).

Per stabilizzare il sottosuolo si possono prevedere iniezioni di malta o l'installazione di ulteriori ancoraggi. Per combattere il deterioramento del permafrost, si possono installare dei sistemi di raffreddamento o migliorare l'isolamento tra la costruzione e il terreno di fondazione. L'uso di sistemi di costruzione e di correzione mobili (cap. 8.5) rappresenta la tecnica più duratura in certi casi, ma è difficilmente applicabile alle costruzioni già esistenti.

Se neanche metodi scelti accuratamente permettono di rimediare ai danni, occorrerà rinunciare a un risanamento a breve o medio termine e prevedere uno smontaggio (cap. 7), ed eventualmente una nuova costruzione.

## 5.2 Sorveglianza e controlli durante la costruzione

### 5.2.1 Preparazione del sistema di sorveglianza

Per garantire una sorveglianza ottimale del terreno di fondazione e della costruzione, occorre innanzitutto installare un sistema di misurazione. Le misure dovrebbero iniziare prima di avviare i lavori di costruzione, al fine di rilevare in tempo le variazioni nel terreno di fondazione e dintorni, come deformazioni o cambiamenti della temperatura. Un sistema di misurazione studiato con attenzione permette di rilevare meglio eventuali cambiamenti e pericoli, aumentando così la sicurezza.

La sensibilità alla deformazione della costruzione determina la scelta del sistema di misurazione. Se si usano strumenti di misura poco precisi, gli spostamenti o i cambiamenti di temperatura rilevati rischiano di cadere nel margine di imprecisione degli strumenti impe-

dendo di trarre conclusioni attendibili sul terreno di fondazione. Bisognerebbe quindi dotarsi di sistemi molto precisi, anche se più costosi.

La durata prevista della sorveglianza può anche influenzare la scelta di un sistema di misurazione. Se la sorveglianza copre la durata di vita di una costruzione, il sistema da scegliere deve essere durevole o intercambiabile. Poiché la sorveglianza funge spesso anche da sistema di allerta precoce, in caso di guasto si possono perdere importanti informazioni sulla sicurezza. Ecco perché i principali sistemi di misurazione dovrebbero essere ridondanti e il sistema di sorveglianza sostituibile.

Il sistema di sorveglianza di una costruzione dovrebbe integrare reti di misurazione esistenti o altre fonti di dati. Questa soluzione permette di creare sinergie e di risparmiare sui costi. Le diverse reti di misurazione esistenti sono descritte al capitolo 1.8.

### 5.2.2 Sistema di sorveglianza durante l'esecuzione dei lavori

La tabella 18 seguente presenta diversi sistemi adatti alla sorveglianza di costruzioni su permafrost durante e immediatamente dopo l'esecuzione dei lavori.

Un esempio di piano di controllo è esposto in allegato B.

Tab. 18: Sistemi di sorveglianza durante e immediatamente dopo l'esecuzione dei lavori.

Sistema di sorveglianza	Oggetto della sorveglianza	Esigenze speciali	Frequenza delle misurazioni
Sorveglianza visiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fessure, cavità</li> <li>– Ghiaccio</li> <li>– Cambiamenti in generale</li> </ul>	Controllo visivo	quotidiano settimanale
Misurazioni automatiche della temperatura del terreno e dell'aria	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Evoluzione della temperatura in superficie, nei fori di sondaggio e della struttura portante</li> </ul>	Accessibilità	da oraria a quotidiana
Misurazioni geodetiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti sulla superficie del terreno</li> </ul>	Punti fissi stabili sul terreno	da settimanale a mensile
Laserscanner 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti sul terreno</li> <li>– Grandi cambiamenti di volume nel terreno (generati da movimenti di roccia, dalla sparizione o dalla formazione di ghiaccio, ecc.)</li> <li>– Spostamenti delle infrastrutture</li> </ul>	Punti di riferimento misurati sul terreno	annuale
Misurazioni Inkrex degli assestamenti nel foro di sondaggio	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sollevamenti nel terreno di fondazione</li> <li>– Cedimenti nel terreno di fondazione</li> </ul>	Tubo Inkrex nel foro di sondaggio	mensile
Misurazioni inclinometriche nel foro di sondaggio	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti orizzontali nel terreno</li> </ul>	Tubo inclinometrico nel foro di sondaggio	mensile
Misurazioni estensimetriche	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Movimenti delle fessure nella roccia</li> <li>– Spostamenti delle costruzioni</li> </ul>	Accessibilità	da quotidiana a settimanale
Misuratori di forze	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Compressione del terreno sotto le fondazioni</li> <li>– Forze di ancoraggio</li> </ul>	Accessibilità	da mensile a annuale
Prova di trazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Forze di ancoraggio</li> </ul>	Accessibilità alla testa dell'ancoraggio	unica

### 5.2.3 Piano di controllo

Un piano di controllo permette di fissare anticipatamente la frequenza delle misurazioni e le soglie di allerta, di descrivere le misure d'intervento urgenti e di definire chiaramente le responsabilità. Le misurazioni effettuate regolarmente sono inserite in un protocollo e consegnate immediatamente ai responsabili. Questi interpretano i dati ed emettono raccomandazioni sul prosieguo o ordinano eventuali misure d'urgenza. Un esempio di piano di controllo è esposto nell'allegato B.

### 5.2.4 Controlli durante l'esecuzione

L'esecuzione dei lavori, lo scavo di fondazione e il suo ambiente vanno controllati regolarmente tramite un piano di controllo e i risultati delle misurazioni vanno inseriti in un protocollo. Una tale sorveglianza sistematica oltre a proteggere il personale del cantiere, permette anche di migliorare la qualità dei lavori prolungando la durata di vita di una costruzione. Inoltre, una sorveglianza sistematica funge da sistema d'allerta precoce e permette di valutare meglio i pericoli. Un esempio di piano di controllo è esposto nell'allegato B.

La frequenza delle misurazioni del sistema scelto dovrebbe essere adattata alla complessità di una costruzione e alla sua sensibilità alla deformazione. In ogni caso, si raccomanda di installare abbastanza presto un sistema di misurazione adeguato che sorvegli la costruzione e i suoi dintorni prima, durante e dopo l'esecuzione dei lavori.

I controlli devono essere effettuati attentamente. Nel caso di tiranti pretesi si effettueranno ad esempio prove di trazione e di messa in tensione nell'ambito dell'assicurazione qualità secondo le norme SIA 267 e 267/1. Altri lavori o elementi di costruzione devono essere controllati e verificati secondo le norme SIA previste.

I controlli e le misurazioni saranno registrati e valutati regolarmente e i dati saranno interpretati. Soltanto questo metodo permetterà la protezione del personale del cantiere e il funzionamento del sistema di sorveglianza e di allerta precoce.

#### L'essenziale in breve

Documenti d'appalto completi riducono il rischio di incremento dei costi. Quando si bandisce una gara d'appalto per costruzioni su permafrost, è particolarmente importante prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- i lavori di perforazione e di scavo
- i materiali da costruzione
- la realizzazione e la sorveglianza.

In questo capitolo sono presentati sistemi di sorveglianza e di controllo utilizzabili durante l'esecuzione dei lavori su permafrost. Le misurazioni iniziali dovrebbero essere effettuate prima dell'inizio dei lavori. Le misurazioni regolari permettono di rilevare in anticipo eventuali problemi o pericoli e di aumentare così la sicurezza. Le rilevazioni e le valutazioni sistematiche delle misurazioni possono fungere da sistema di allerta precoce.

Un esempio di piano di controllo è esposto nell'allegato B.

## 6 Uso e manutenzione

### 6.1 Sorveglianza

#### 6.1.1 Adattamento del sistema di sorveglianza

Il sistema di sorveglianza installato durante l'esecuzione dei lavori viene generalmente ripreso e adattato per l'uso e la manutenzione della costruzione. Tali osservazioni servono a garantire il rispetto delle esigenze di costruzione definite nella convenzione d'uso e nella base del progetto (cap. 3).

#### 6.1.2 Piano di sorveglianza e di manutenzione

Durante la fase d'uso e di manutenzione, il piano di sorveglianza o di manutenzione viene redatto a partire dal piano di controllo. Questo piano deve essere adattato a sua volta. Esso definisce la frequenza delle misurazioni e le soglie d'allerta, descrive le misure d'intervento urgenti e definisce le responsabilità. Le misurazioni regolari sono inserite in un protocollo di misurazioni e consegnate ai responsabili. Questi ultimi interpretano i dati ed emettono all'occorrenza raccomandazioni per il prosieguo della procedura o ordinano misure d'urgenza.

#### 6.1.3 Sistema di sorveglianza durante l'uso e la manutenzione

I processi dinamici, che variano nel corso del tempo e agiscono su una struttura portante collocata su permafrost, dovrebbero essere verificati regolarmente attraverso un sistema di sorveglianza semplice. È così possibile seguire, per ogni oggetto, l'evoluzione nel tempo (scheda di controllo). Alcuni sistemi di sorveglianza utilizzabili per le costruzioni su permafrost sono presentati in tabella 19. Sono simili ai sistemi di sorveglianza utilizzati durante l'esecuzione dei lavori, ma la frequenza delle misurazioni è diversa.

Un esempio di piano di sorveglianza e manutenzione è esposto nell'allegato B.

## 6.2 Pianificazione della manutenzione e degli interventi

### 6.2.1 Piano di manutenzione e d'intervento

L'analisi dei risultati della sorveglianza e delle osservazioni (metodo osservativo, norma SIA 267) di una struttura portante nel permafrost è molto importante. Se quest'analisi rivela che le esigenze di costruzione definite nella convenzione d'uso e nella base del progetto non possono essere rispettate ai fini dell'uso e della manutenzione, è indispensabile elaborare un piano d'intervento. Grazie a una sorveglianza ottimale e a interventi appropriati, la manutenzione e l'uso di una costruzione saranno assicurati per tutto il periodo di vita previsto e la sua durata di vita sarà prolungata.

Tab. 19: Sistemi di sorveglianza durante l'utilizzo e il mantenimento.

Sistema di sorveglianza	Oggetto della sorveglianza	Esigenze speciali	Frequenza delle misurazioni
Sorveglianza visiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fessure, cavità</li> <li>– Ghiaccio</li> <li>– Cambiamenti in generale</li> </ul>	Visibilità	da quotidiana a settimanale
Misurazioni automatiche della temperatura del terreno e dell'aria	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Evoluzione della temperatura della superficie, nei fori di sondaggio e della struttura portante</li> </ul>	Accessibilità	da oraria a quotidiana
Misurazioni geodetiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti sulla superficie del terreno</li> </ul>	Punti fissi stabili sul terreno	da settimanale a mensile
Laserscanner 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti sul terreno</li> <li>– Grandi cambiamenti di volume nel terreno (generati da movimenti di roccia, dalla sparizione o dalla formazione di ghiaccio, ecc.)</li> <li>– Spostamenti delle infrastrutture</li> </ul>	Punti di riferimento misurati sul terreno	annuale
Misurazioni Inkrex degli assestamenti nel foro di sondaggio	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sollevamenti nel terreno di fondazione</li> <li>– Cedimenti nel terreno di fondazione</li> </ul>	Tubo Inkrex nel foro di sondaggio	mensile
Misurazioni inclinometriche nel foro di sondaggio	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti orizzontali nel terreno di fondazione</li> </ul>	Tubo inclinometrico nel foro di sondaggio	mensile
Misurazioni estensimetriche	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spostamenti orizzontali nel terreno di fondazione</li> </ul>	Accessibilità	da quotidiana a settimanale
Misurazione delle forze	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Compressione del terreno sotto le fondazioni</li> <li>– Forze di ancoraggio</li> </ul>	Accessibilità	da mensile a annuale
Prova di trazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Forze di ancoraggio</li> </ul>	Accessibilità alla testa dell'ancoraggio	unica

### 6.2.2 Interventi possibili

I pochi interventi menzionati di seguito permettono di migliorare la resistenza e l'idoneità durante l'uso e la manutenzione:

- Iniezione di malta nelle fessure e fratture
- Installazione di ulteriori micropali
- Chiodatura con armatura e rivestimento di cemento spruzzato (terreno e roccia)
- Chiodatura o ancoraggi (su roccia)
- Ripresa nella sottofondazione o rinforzo della fondazione
- Installazione di un sistema di raffreddamento attivo o passivo
- Installazione di un isolamento termico

È anche possibile combinare i diversi interventi.

#### L'essenziale in breve

Il piano di sorveglianza e di manutenzione indica la frequenza delle misurazioni e le soglie d'allerta durante l'uso e la manutenzione delle opere, descrive le misure d'intervento urgenti in materia di sicurezza e definisce le responsabilità.

Questo capitolo presenta i sistemi di sorveglianza applicabili durante la durata di servizio delle costruzioni su permafrost.

Il piano d'intervento e di manutenzione definisce gli interventi che permettono di migliorare la resistenza delle costruzioni e la loro idoneità. Sono citati alcuni interventi possibili.

Un esempio di piano di sorveglianza e manutenzione è esposto nell'allegato B.



## 7 Smontaggio

### 7.1 Costruire gestendo l'ambiente

La scelta dei materiali, il tipo d'infrastruttura e la tecnica di costruzione determinano la qualità dei rifiuti di cantiere durante lo smontaggio. Il volume di questi rifiuti, la possibilità di valorizzarli o di eliminarli, e quindi i costi di smontaggio, dipendono dal volume dei materiali che creano il meno possibile problemi. Si eviterà pertanto di utilizzare materiali compositi e tecniche di assemblaggio indissociabili, sostanze e coadiuvanti problematici (ad es. fluidificanti di cemento) nonché i materiali contenenti metalli pesanti. Se si tiene conto di questo ciclo delle materie nello studio del progetto, la gestione dei rifiuti di cantiere durante una trasformazione o uno smontaggio sarà più facile ed economica.

### 7.2 Pianificazione e realizzazione

Le tecniche di smontaggio e di demolizione devono permettere di smaltire i rifiuti a regola d'arte e se possibile di valorizzarli (principio dello smaltimento multibenna). Secondo la raccomandazione SIA 430, lo smaltimento differenziato corrisponde al livello tecnico attuale. Questo capitolo tratta il contenuto di un piano di smaltimento che regoli lo svolgimento dello smontaggio, nonché lo smaltimento e la valorizzazione dei rifiuti di cantiere.

Durante lo smontaggio di una costruzione in alta montagna, i magazzini sono piccoli, per mancanza di spazio, il che rende una rapida evacuazione ancora più importante. I trasporti saranno pianificati accuratamente, in quanto possono essere molto costosi se i siti sono difficilmente accessibili. D'altronde, le prestazioni dei macchinari di demolizione possono essere limitate ad alta quota. Senza contare che in estate i lavori possono essere ritardati da condizioni meteo avverse.

Durante lo smontaggio, una costruzione può perdere la sua stabilità rendendo instabili anche i materiali adiacenti. Per garantire la sicurezza del lavoro, si procederà per tappe e si prenderanno misure di sicurezza provvisorie.

### 7.3 Costruzioni ed elementi rimanenti

Per le costruzioni o gli elementi che non vengono smontati dopo l'uso, conviene esaminare le possibili conseguenze a lungo termine. Gli elementi portanti che restano nel sottosuolo, come i tiranti, devono essere allentati. Per le opere di stabilizzazione di pendii, come i muri di sostegno, si analizzeranno le conseguenze di un loro cedimento.

Se gli elementi di costruzione rimanenti non sono stati inquinati chimicamente durante l'uso (ad es. con olio, carburanti), non si può parlare di sito inquinato ai sensi dell'Ordinanza sui siti contaminati (OSiti). Tuttavia, lo scopo di uno smontaggio dovrebbe essere di ricostituire lo stato naturale iniziale e di smontare la maggior parte di una costruzione esistente. In generale, bisognerebbe astenersi dall'impermeabilizzare una larga parte di superficie. Se bisogna comunque procedere a questo intervento e non sarà possibile la demolizione, si effettueranno allora delle perforazioni perché l'acqua possa circolare in modo un po' più naturale.

## 7.4 Finanziamento

Il finanziamento di uno smontaggio dovrebbe già essere regolamentato durante la procedura di permesso di costruzione e di gestione. Creando un fondo che copra i costi di smontaggio sarà possibile garantire che nessuna costruzione resterà sul sito e che lo stato originale sarà ristabilito.

### L'essenziale in breve

Il ciclo dei materiali dovrebbe essere considerato già durante lo studio del progetto. Così facendo, la gestione dei rifiuti durante una trasformazione o uno smontaggio sarà facilitata e sarà meno costosa. Conviene evitare di utilizzare materiali compositi e assemblaggi indissociabili, nonché materiali contenenti metalli pesanti.

La differenziazione e la valorizzazione dei rifiuti di cantiere, sempre tenendo conto della gestione dell'ambiente, sono regolamentati nel piano di smaltimento dei rifiuti. Conviene esaminare gli effetti degli elementi di costruzione che restano sul sito e analizzare le conseguenze, per gli elementi portanti, di un cedimento della struttura portante.

Il finanziamento di uno smontaggio dovrebbe essere regolamentato durante la procedura del permesso di costruzione e di gestione.

# Soluzioni tecniche

Questo capitolo presenta le principali soluzioni tecniche utilizzabili durante la realizzazione o il rifacimento di costruzioni sul permafrost. Le soluzioni descritte si riferiscono alle seguenti tematiche:

- Fondazione su terreni instabili
- Ancoraggi in un terreno di fondazione dalle condizioni mutevoli
- Scavi complessi in matrice di blocchi, di roccia o di ghiaccio
- Presa ritardata di materiali da costruzione cementati nel freddo
- Realizzazione di costruzioni in un terreno di fondazione ricco di ghiaccio e in scivolamento
- Apporto indesiderato di calore nel sottosuolo
- Diminuzione della capacità portante del terreno
- Scavo e sostegno di gallerie e tunnel

L'analisi della struttura portante comprende il dimensionamento, i dettagli di costruzione, i controlli di esecuzione e la sorveglianza inerenti a tutte le tecniche di costruzione descritte in questo capitolo. Queste tecniche devono essere applicate in conformità alle relative norme SIA.

## 8 Soluzioni tecniche

### 8.1 Fondazioni

#### 8.1.1 Concetto di fondazione

La scelta di un sistema di fondazione è determinata, da un lato dalla capacità portante del terreno e dal tipo di azione esercitata, come il tipo di carico e la sua direzione e, dall'altro, dalle esigenze connesse all'utilizzo di una costruzione. Le esigenze d'uso, come i cedimenti ammissibili e gli spostamenti orizzontali di una costruzione, sono fissate nella convenzione d'uso, al capitolo 3. Tali esigenze servono da base non soltanto al concetto di fondazione, ma anche alla redazione della base del progetto, al riconoscimento del terreno e alla determinazione del valore degli sforzi di taglio da introdurre. Il concetto di fondazione dovrebbe tener conto dei seguenti elementi (basati sul cap. 2.3):

- Una fondazione robusta ed affidabile, dotata di margini di sicurezza reperibili (non di margini di sicurezza nascosti) che dovrebbero essere dedotti da scenari e analisi dei pericoli.
- Una fondazione adeguata, rigida o flessibile, deve poter essere adattata alle condizioni reali.
- La fondazione deve essere incastrata in un terreno «non rimaneggiato» (considerare le forze di sollevamento provenienti dallo strato attivo).
- Ribaltamenti, flessioni e fessurazioni che possono verificarsi durante l'esistenza di una costruzione non devono condurre a doverne limitare l'uso (idoneità).

#### 8.1.2 Fondazioni superficiali

Le fondazioni superficiali hanno la funzione di trasmettere i carichi al sottosuolo vicino alla superficie. Possono assumere la forma di plinti isolati, di travi continue (a nastro) o di piastre. La scelta dipende dalla capacità portante del terreno. Quando le forze sono concentrate in alcuni punti, si realizzano plinti isolati. Quando i carichi sono esercitati principalmente sulle pareti esterne e interne (carichi lineari), la fondazione più adatta è una trave continua collocata sotto queste pareti. Ma poiché questa è sensibile ai cedimenti differenziali, è allora preferibile optare per una struttura portante rigida. Quando sono esercitati carichi importanti su una superficie o se il terreno di fondazione è di scarsa qualità, il sovraccarico viene ripreso e suddiviso meglio con una piastra che permette di impartire i carichi di taglio. Anche la profondità di incastro e la geometria della fondazione influenzano il dimensionamento. La figura 43 presenta una trave continua posta su un terreno roccioso come fondazione di un rifugio alpino.

Nel permafrost, anche la facilità di esecuzione di una fondazione è di considerevole importanza. Se bisogna scavare in profondità per trovare una roccia sana, lo scavo per una soletta continua richiede meno lavoro e tempo rispetto a una platea, e anche i costi di costruzione sono ridotti.

La fondazione dovrebbe impedire la penetrazione di calore nel sottosuolo (cap. 8.6), dove lo scioglimento del ghiaccio comporta perdite di volume che possono provocare cedimenti differenziali e, di conseguenza, limitazioni d'uso della costruzione.

→ Le fondazioni superficiali saranno eseguite in conformità al capitolo 8 della norma SIA 267.



Fig. 43: Soletta continua posta su un basamento roccioso come fondazione di un rifugio alpino (foto: Architetti Ruch, Meiringen).

### 8.1.3 Fondazioni profonde

È raro dover realizzare una fondazione profonda nel permafrost di montagna. Se si tratta di un terreno con una buona portanza vicino alla superficie, grossi carichi possono già essere ripresi da una fondazione superficiale di facile realizzazione. Le fondazioni profonde sono generalmente realizzate con micropali costituiti da tubi in acciaio valvolati o da aste filettate in acciaio. Questi micropali sono sollecitati principalmente in compressione, in compressione e taglio, e anche in trazione (carico del vento, terremoto).

La figura 44 rappresenta schematicamente l'azione delle fondazioni su pali. L'introduzione di carichi nel sottosuolo sfrutta l'attrito laterale e la resistenza di punta dei pali, che determinano congiuntamente la loro resistenza ultima. Nello strato attivo, i pali possono subire forze di sollevamento (sforzi di trazione) dovute ai processi di gelo e disgelo. Queste forze possono essere attenuate rivestendo i pali con un geotessile su tutto lo spessore dello strato attivo (fig. 44).

Per dimensionare un palo, si considera l'attrito laterale su tutta l'altezza di incastro nel permafrost. Il congelamento aderente del palo nel sottosuolo aumenta l'attrito laterale.

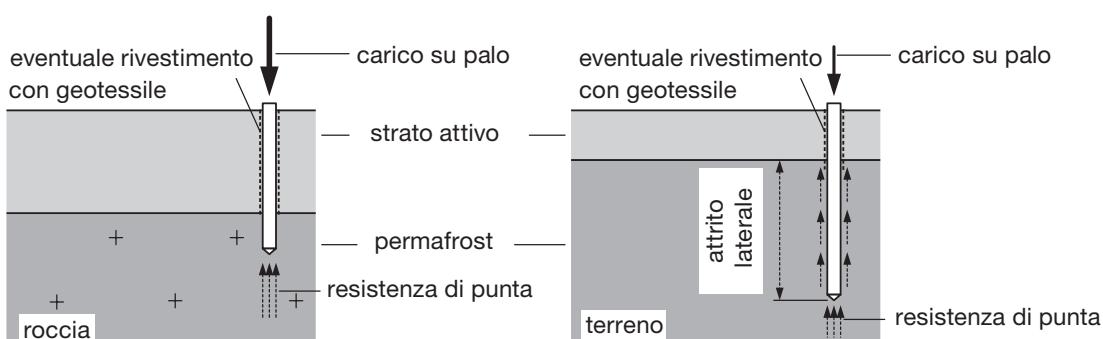


Fig. 44: Rappresentazione schematica dell'azione delle fondazioni su pali; (a sinistra) nella roccia, solo resistenza di punta; (a destra) in un terreno, resistenza di punta e attrito laterale.

Questa aderenza (resistenza di congelamento) dipende dalla temperatura, il che dev'essere tenuto in considerazione nel dimensionamento in funzione della durata di servizio prevista. Un sistema di raffreddamento attivo o passivo può mantenere questa aderenza (cap. 8.6.4). Ma un tale sistema non può essere installato successivamente nei pali. È importante tenerne conto durante il dimensionamento o l'installazione dei pali. Se non è previsto nessun rivestimento con geotessile, anche le forze di sollevamento saranno incluse nel dimensionamento della fondazione su pali.

Il tempo necessario affinché un palo geli nel sottosuolo dipende dalla temperatura del terreno, dal contenuto di ghiaccio e dalla composizione granulometrica. Esperienze in terreni a granulometria fine in Alaska e in Russia hanno mostrato che un palo gela dopo circa una settimana. Nel permafrost alpino, questo periodo è generalmente più lungo, in quanto le temperature del terreno sono più alte.

→ Le fondazioni profonde saranno realizzate in conformità al capitolo 9 della norma SIA 267.

#### 8.1.4 Prove di carico su pali

Le prove di carico dinamico su pali permettono di determinare il valore caratteristico della resistenza ultima esterna nonché il comportamento in deformazione di un palo. Per ottenerne risultati rappresentativi, queste prove dovrebbero essere realizzate con pali il più possibile simili e in condizioni di posizionamento paragonabili (costituzione del terreno di fondazione, contenuto di ghiaccio, temperatura del ghiaccio, tipo di perforatrice). Dato che i pali sono generalmente testati poco dopo essere stati posizionati, essi non sono che parzialmente gelati. Ecco perché raggiungono la resistenza ultima esterna a breve termine e indicano le deformazioni a lungo termine. A seconda della sollecitazione a cui sono sottoposti, i micropali dovrebbero subire anche una prova di trazione.

→ Le eventuali prove di carico su pali saranno eseguite in conformità al capitolo 5 della norma SIA 267/1.

#### 8.1.5 Piano di sorveglianza e di manutenzione delle fondazioni

Il piano di manutenzione indica le misurazioni da effettuare, il calendario da rispettare e i responsabili di queste attività. Determina anche le soglie d'allarme (ad es. lo spostamento massimo per unità di tempo) e descrive le misure d'intervento urgenti. I sistemi di sorveglianza forniscono le indicazioni sui movimenti nel sottosuolo. A seconda della necessità, questa sorveglianza può essere esercitata tramite misurazioni geodetiche periodiche sulla superficie dell'infrastruttura, misurazioni d'inclinazione sulla facciata dell'edificio o alla lettura del protocollo di fessurazione (vedi cap. 6). Per rilevare eventuali accelerazioni del movimento, è importante effettuare misurazioni di controllo periodiche (ad es. una volta al mese o all'anno).

Poichè la fondazione non è generalmente accessibile, i lavori di manutenzione sono difficili. Concependo una fondazione particolarmente adatta alle esigenze locali (cap. 8.1.1), è possibile ridurre questi lavori di manutenzione al minimo per tutta la durata della costruzione. È anche possibile optare per un sistema flessibile che può adattarsi ai movimenti nel sottosuolo (cap. 8.5).

## 8.2 Ancoraggi

### 8.2.1 Concetto di ancoraggio

La scelta di un sistema di ancoraggio nel permafrost è determinata dalla resistenza del permafrost, dalla grandezza delle forze da introdurre e dal rischio potenziale dato dal cedimento degli ancoraggi. L'idoneità di una costruzione è un fattore importante in questa scelta. Le esigenze d'uso di una costruzione sono definite nella convenzione d'uso presentata al capitolo 3. Queste esigenze servono da base non solo all'elaborazione di un concetto di ancoraggio, ma anche alla redazione della base del progetto e al riconoscimento del terreno. Il concetto di ancoraggio necessita di considerazioni simili a quelle effettuate per il concetto di fondazione (espresso nel cap. 2.3):

- Ancoraggi robusti e affidabili, con ridondanze e posizionamenti di riserva secondo la norma SIA 267
- Ancoraggi flessibili e verificabili, che possono essere adattati alle condizioni effettivamente riscontrate
- Bulbo di ancoraggio (lunghezza degli ancoraggi) posizionato in un permafrost intatto.
- Ancoraggi che conservano una resistenza ultima caratteristica data per tutta la durata d'uso della costruzione (nessuna limitazione d'uso, idoneità).

L'introduzione nella roccia di forze importanti a elevato potenziale di danneggiamento in caso di cedimento, dovrebbe essere realizzata tramite cunicolo o un pozzo che permettano di sorvegliare gli ancoraggi (fig. 45). Garantendo l'accessibilità alle due estremità del tirante (teste di ancoraggio), sarà possibile realizzare controlli ed eventualmente effettuare sostituzioni, aumentando così la sicurezza.

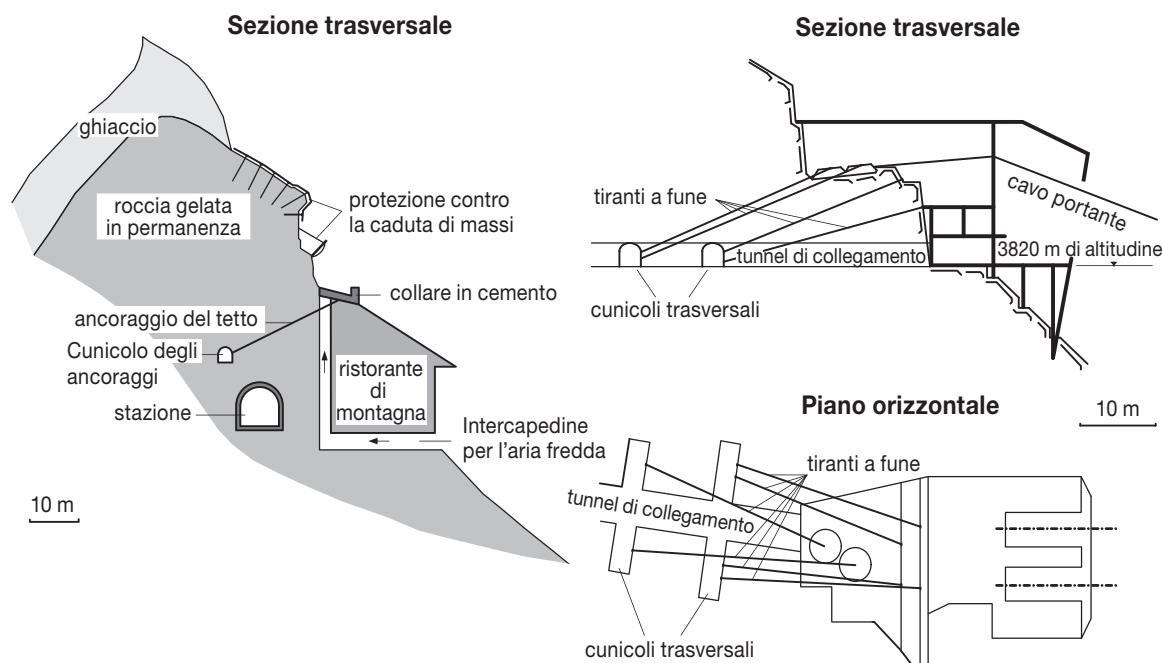


Fig. 45: Rappresentazione schematica di due impianti di ancoraggio da un cunicolo; (a sinistra) ristorante di montagna sullo Jungfraujoch (adattato da KEUSEN e AMIGUET 1987); (a destra) Piccolo Cervino, impianto a fune (adattato da KEUSEN e HAEBERLI 1983).

Nel permafrost, si eviterà se possibile di ancorare grossi carichi per semplice attrito. I carichi meno importanti con un debole potenziale di danneggiamento possono invece essere trasmessi in modo convenzionale.

### **8.2.2 Tiranti in roccia e chiodi**

Gli ancoraggi sono elementi portanti forati che sono principalmente sollecitati a trazione. Nel permafrost, come in un sottosuolo non gelato, si distingue tra i tiranti pretesi (funi o barre in acciaio) e i chiodi generalmente non tesati (aste profilate in acciaio). L'introduzione di forze nel sottosuolo è basata sull'attrito che reagisce in modo sensibile alle modifiche nel sottosuolo. Un riscaldamento del sottosuolo può ridurre la resistenza al taglio, il che diminuisce la resistenza di un ancoraggio e permette l'insorgere di forze di taglio negli ancoraggi. Può quindi derivarne una perdita di resistenza generale, seguita da deformazioni o da un cedimento della struttura portante. Quando si dimensiona l'ancoraggio di una costruzione, bisogna quindi conferirgli una resistenza ultima esterna caratteristica che durerà per tutta la durata di servizio fissata nella convenzione d'uso.

Per essere effettuata correttamente, l'installazione di ancoraggi richiede esperienza e attrezzature adeguate. Gli ancoraggi a iniezione dovrebbero essere forati o riforati, posizionati e iniettati lo stesso giorno. Sarà così possibile assicurare un collegamento perfetto con il sottosuolo ed evitare che il ghiaccio si formi tra il corpo di ancoraggio e la parete del foro effettuato. Si possono anche scaldare i fori di sondaggio (serpentine di riscaldamento), il che permette di posizionare e iniettare più ancoraggi lo stesso giorno. La malta di ancoraggio deve essere preriscaldata e iniettata adeguandola alle temperature del foro di sondaggio. È tecnicamente difficile procedere a un'iniezione complementare in un secondo sistema. Se ne terrà conto nella scelta del sistema di ancoraggio.

→ Gli ancoraggi saranno realizzati in conformità ai capitoli 10 e 11 della norma SIA 267.

### **8.2.3 Tecnica di perforazione**

Nel permafrost, i lavori di perforazione sono difficili, specialmente in un terreno ricco di ghiaccio. Se si usa un martello fondo foro e si pulisce con aria compressa, i materiali di perforazione e il ghiaccio che si scioglie si mescolano e formano una massa viscosa. Ciò può rallentare la progressione della perforatrice o bloccare la testa di perforazione. È quindi necessario ritirare spesso l'affusto e pulire il foro di sondaggio con aria compressa. I materiali del sottosuolo molto ricchi di ghiaccio mal si prestano alla perforazione con un martello fondo foro. In queste condizioni, occorre sostituire la testa di perforazione con un carotiere.

Per migliorare la stabilità del foro di sondaggio in un terreno povero di ghiaccio o nello strato attivo, conviene consolidare il foro di sondaggio o rivestirlo. Se si procede a un rivestimento, i costi di installazione e di perforazione aumentano notevolmente.

### 8.2.4 Prove di trazione

Prima di bandire la gara d'appalto e di scegliere i tiranti, occorrerebbe procedere inizialmente a delle prove di trazione su ancoraggi di prova che saranno realizzati in condizioni paragonabili a quelle dell'ancoraggio previsto. Esse permettono di determinare la resistenza caratteristica di un ancoraggio, la sua lunghezza, il metodo di perforazione adatto, il tipo di iniezione e la malta.

- Le prove di trazione o di messa in tensione saranno effettuate in conformità ai capitoli 6 e 7 della norma 267/1.

### 8.2.5 Piano di sorveglianza e di manutenzione degli ancoraggi

Durante l'installazione degli ancoraggi, occorre assolutamente redigere un piano di sorveglianza e di manutenzione, e verificare regolarmente questi ancoraggi (cap. 6). Per i relativi carichi, si raccomanda di procedere a una sorveglianza permanente attraverso rilevatori di forze e prevedere ridondanze. Tali misure permetteranno di realizzare lavori di manutenzione senza ridurre la sicurezza e senza interrompere l'utilizzo dell'installazione.

## 8.3 Scavo

### 8.3.1 Lavori di scavo

Un terreno di fondazione ricco di ghiaccio complica l'esecuzione dei lavori di scavo in quanto bisogna aspettarsi di trovare materiali difficilmente sfaldabili, come i grossi blocchi racchiusi in una matrice di ghiaccio. A volte è quindi necessario utilizzare una pala meccanica più potente (eventualmente con una pala più stretta) o un martello pneumatico. Se bisogna scavare nella roccia, si può prevedere di usare un martello pneumatico o l'esplosivo, a seconda del grado di fessurazione della roccia. La presa in considerazione di questi problemi nella gara d'appalto è descritta al capitolo 5.1.1.

Se i lavori di scavo si svolgono in estate è utile ricoprire le scarpate di sterro con un geotessile. Questa protezione attenuerà il riscaldamento del permafrost per effetto dell'irradiazione solare e delle alte temperature; impedirà anche la caduta di blocchi dovuta al disgelo e le instabilità causate dalle precipitazioni. Inoltre il geotessile serve a proteggere le maestranze da eventuali sassi che si staccano dalla scarpata. Se lo scavo è realizzabile in inverno, le basse temperature dell'aria raffredderanno il permafrost.

### 8.3.2 Scarpate

L'angolo di pendenza dello scavo in un terreno è determinato, in particolare, dalla composizione granulometrica, dalla compattezza nonché dal contenuto di ghiaccio e di acqua del terreno di fondazione. I terreni a granulometria grossolana e poveri di ghiaccio possono essere scavati con scarpate a pendenza 1:1 (verticale: orizzontale) come i terreni non gelati mentre i terreni ricchi di ghiaccio con una pendenza maggiore, da 3:2 a 2:1. A seconda della pendenza e dell'altezza della scarpata, dovrebbero essere previsti dei cordoli di con-

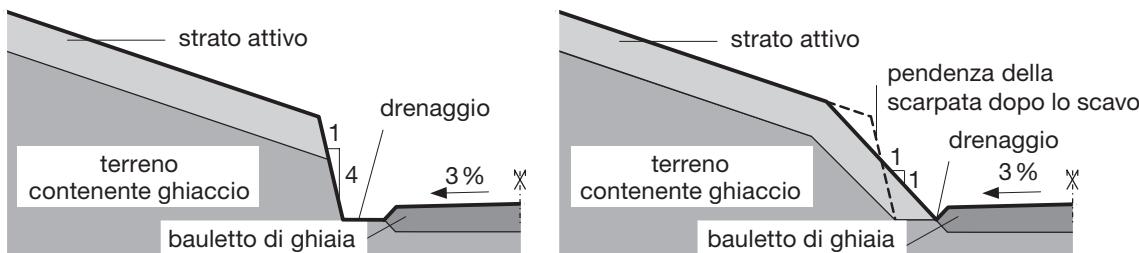


Fig. 46: Evoluzione naturale, su alcuni anni, della pendenza della scarpata di uno scavo in un terreno contenente ghiaccio e in uno strato attivo; (a sinistra) sezione trasversale direttamente dopo lo scavo; (a destra) sezione trasversale alcuni anni più tardi (adattato da BERG e SMITH 1976).

solidamento alla base della scava. In inverno e per brevi periodi (< 6 mesi, a seconda dell'altitudine e dell'esposizione), si possono generalmente avere delle scarpate più ripide (a breve termine, anche verticali) che in estate o per lavori di lunga durata (> 1 anno). In inverno, le basse temperature dell'aria impediscono i processi di disgelo, tanto che le scarpate restano più stabili.

La figura 46 presenta schematicamente l'evoluzione naturale della geometria di una scarpata in un terreno contenente ghiaccio. La pendenza, ripida all'inizio, si riduce per effetto dello scioglimento del ghiaccio. È importante prevedere sufficiente spazio al piede della scarpata per evitare che instabilità del terreno limitino, ad esempio, l'uso di una strada.

L'angolo di pendenza come il consolidamento dello scavo nel permafrost roccioso dipendono dalla densità e dalla direzione delle fessure nonché dal contenuto di ghiaccio. Le rocce in buono stato, che presentano poche fessure e tutte orientate favorevolmente, possono costituire una scarpata ripida e non necessitano generalmente né di consolidamento né di cordoli di consolidamento alle basi. Le rocce molto fratturate con orientamento svantaggioso delle fratture richiedono invece, a seconda della pendenza e dell'altezza della scarpata, la disposizione di cordoli di consolidamento alle basi oltre a un consolidamento provvisorio eseguito tramite cemento spruzzato o chiodatura.

→ Le verifiche geotecniche e geomecaniche saranno realizzate da un ingegnere in conformità alla norma SIA 267.

## 8.4 Materiali da costruzione

### 8.4.1 Malte cementizie

#### *Malte da ancoraggio o da iniezione*

Nel permafrost le malte da ancoraggio o da iniezione tradizionali non possono raggiungere la resistenza richiesta. Il processo di presa è rallentato, se non impedito, dalle temperature negative del terreno. E il gelo dell'acqua può produrre fessure nel corpo degli ancoraggi, tanto che la loro risposta alle sollecitazioni sarà insufficiente. Per ottenere le resistenze richieste, bisognerà dunque utilizzare tecniche di posa e malte da ancoraggio speciali.

L’Ufficio federale dell’ambiente UFAM dispone di una lista di tipi di malte speciali per la costruzione di opere antivalanghe nel permafrost (sito web: [www.umweltschweiz.ch/typenpruefung](http://www.umweltschweiz.ch/typenpruefung)). Queste malte omologate devono essere utilizzate per tutti i progetti antavalanghe e di opere paramassì che la Confederazione sussidia. A seconda del prodotto, queste malte possono essere utilizzate fino a una temperatura del terreno di –4 °C. Nel permafrost è raro che le temperature siano inferiori nella zona degli ancoraggi.

La malta di ancoraggio nel permafrost dovrebbe essere scelta in funzione delle temperature del terreno nel foro di sondaggio. La temperatura del terreno di costruzione dev’essere controllata e registrata prima di realizzare gli ancoraggi e le iniezioni. Le malte da ancoraggio per temperature inferiori a 0 °C hanno una granulometria un pò più grossolana. Pertanto, il diametro dei tubi di iniezione dovrebbe essere superiore ai 15 mm per evitare che si otturino. Si raccomanda di seguire le indicazioni del produttore del legante.

Per attivare la presa della malta nel sottosuolo con permafrost, l’acqua di impasto dev’essere preriscaldata affinché la malta mescolata raggiunga una temperatura di circa 20 °C. La temperatura dell’acqua dipende da quella della malta asciutta (ipotizzando un rapporto acqua/malta = 0,18). Alcuni esempi sono presentati di seguito nella tabella 20.

Tab. 20: Temperature necessarie all’acqua in funzione della temperatura della malta asciutta.

Temperatura della malta prima di procedere al mescolamento	Temperatura di preriscaldamento necessaria dell’acqua
0 °C	44 °C
4 °C	39 °C
8 °C	34 °C
12 °C	29 °C
16 °C	24 °C
20 °C	20 °C

Questi dati sono tratti dalla Direttiva tecnica sulla «Costruzione di opere antivalanghe nella zona di distacco» (MARGRETH 2007) (sito web: [www.umweltschweiz.ch/uv-0704-f](http://www.umweltschweiz.ch/uv-0704-f)). Questo manuale contiene una descrizione dettagliata dell’uso delle malte nel permafrost.

Si può anche attivare la presa della malta preriscaldando il foro di sondaggio con acqua o serpentine di riscaldamento elettrico. Quest’acqua sarà evacuata o le serpentine saranno ritirate prima di realizzare l’ancoraggio o la sua iniezione.

#### 8.4.2 Calcestruzzo

##### *Processo di presa*

Le temperature negative dell’aria e del terreno rallentano o impediscono la presa del cemento nel calcestruzzo che, a queste condizioni, rischia di non raggiungere la resistenza alla compressione desiderata. Il pretrattamento e la rifinitura del calcestruzzo rivestono quindi una grande importanza, perciò si prevederanno le misure complementari necessarie, ovvero le operazioni seguenti:

- Installazione nel sottosuolo di un isolamento termico resistente alla compressione che va collocata tra il sottosuolo e il corpo cementizio. Esso favorisce la presa completa e riduce al minimo l’apporto di calore della presa nel sottosuolo.

- Preriscaldamento degli aggregati e dell'acqua di impasto. Gli aggregati e l'acqua di impasto devono essere preriscaldati prima di impastare il calcestruzzo. Questo impedisce al calcestruzzo fresco di gelare e accelera allo stesso tempo il processo di presa. Si farà in modo che la temperatura del calcestruzzo fresco non scenda al di sotto dei +5 °C durante la sua implementazione (in conformità alla norme SIA 262).
  - Protezione contro le temperature negative dell'aria. Si possono combattere gli effetti delle temperature negative dell'aria ricoprendo la superficie del calcestruzzo con tappeti termici o riscaldando il casseruolo. Tuttavia, per fare in modo che non si formino fessure da ritiro, conviene evitare che questa superficie si secchi.
  - Il tempo di trasporto del calcestruzzo sul cantiere (ad es. con il camion o l'elicottero) dev'essere calcolato di modo che il calcestruzzo sia ancora malleabile al suo arrivo. Si raccomanda di non cominciare a utilizzare il calcestruzzo di buon'ora al mattino, in quanto le basse temperature dell'aria sono sfavorevoli alla qualità del calcestruzzo.
- Il trasporto, la messa in opera e l'addensamento del calcestruzzo fresco saranno eseguiti in conformità alle indicazioni della norma SIA 262 (numero 6.4.5).

#### *Calore di presa*

Il calore di presa aumenta con la quantità di cemento, l'uso del cemento fine e di diversi coadiuvanti. Si terrà conto di questo problema, tra un apporto maggiore di calore nel sottosuolo e una migliore resistenza precoce del calcestruzzo, nella scelta del prodotto e per il dimensionamento.

Il cemento Portland di tipo CEM I sviluppa 375-525 kJ di calore di presa per chilogrammo di cemento, che corrisponde al calore di idratazione (Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke). Un metro cubo di calcestruzzo contiene circa 325 kg di cemento, il che significa un apporto di calore da 120 000 a 170 000 kJ durante la presa. Per evitare che il ghiaccio si scioglia nel terreno di fondazione, è importante separare termicamente le fondazioni in calcestruzzo dal sottosuolo (cap. 8.6). Sarà così possibile ridurre al minimo l'apporto di calore e quindi il volume del ghiaccio sciolto. Per far sciogliere un chilogrammo di ghiaccio, è necessaria un'energia di 333 kJ.

La durata del processo di presa dipende dalla temperatura ambiente. Le basse temperature lo rallentano, le alte temperature l'accelerano. A una temperatura ambiente di 20 °C, dal 50% al 75% del calore di presa viene liberato dopo 7 giorni. Se la temperatura ambiente negativa interrompe la presa prima dell'idratazione completa, il calore di presa non può essere liberato completamente (Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke), il che nuoce alla resistenza del calcestruzzo.

#### *Proprietà*

Come regola generale, si utilizzerà il «calcestruzzo dalle proprietà specifiche» (SN EN 206-1). È diviso in classi di esposizione (SN EN 206-1:2000) a seconda dell'ambiente e del tipo di intervento ai quali è soggetto. Per gli elementi in calcestruzzo che sono a contatto diretto con il terreno di fondazione o per quelli che si trovano all'esterno, si sceglie generalmente la classe di esposizione XF (danneggiamento della struttura del calcestruzzo per effetto del gelo), con o senza prodotto di disgelo. Questa classe di esposizione tiene conto della penetrazione d'acqua nel calcestruzzo e degli effetti del gelo e del disgelo.

Le proprietà del calcestruzzo adottate influenzano la resistenza e ricadono quindi sul dimensionamento della struttura portante. Queste considerazioni rientrano nel concetto di struttura portante.

→ Come regola generale, i controlli di qualità del calcestruzzo saranno eseguiti in conformità alla norma SIA 262/1. Per garantire la qualità, per grandi progetti sono obbligatori controlli del cemento fresco, che sono difficilmente realizzabili per progetti di minore importanza.

#### 8.4.3 Additivi e prodotti di iniezione per la malta e il calcestruzzo

##### *Acceleranti*

Per influenzare la presa e la resistenza della malta o del calcestruzzo cementizio, sono utilizzati vari additivi e prodotti di iniezione. Generalmente si applica una grande proporzione (400 kg) di cemento fine di alta qualità, che sviluppa rapidamente una forte resistenza. A questo si aggiunge spesso un accelerante che aumenta ulteriormente il calore prodotto. Questo apporto di calore nel sottosuolo può condurre a un deterioramento locale del permafrost.

##### *Riduzione del ritiro*

Gli agenti riduttori del ritiro hanno l'effetto di far aumentare il volume della malta dall'1 al 2 %. Questo permette di frenare la riduzione per asciugatura della malta. Come regola generale l'armatura minima posta nelle fessure è conforme alla norma SIA 262.

##### *Fluidità*

La fluidità della malta indica la distanza che essa può percorrere nella fessura o nello spacco di una roccia. Tale distanza si misura con la capacità di distribuzione della malta ed è influenzata dagli additivi, come un fluidificante o un prodotto tixotropico. Una malta di iniezione tixotropica riduce la quantità di malta necessaria in quanto impedisce al prodotto di riempimento di scolare negli spacchi o nelle fessure.

##### *Resistenza al gelo*

La resistenza al gelo del calcestruzzo può essere raggiunta attraverso due approcci differenti. Il primo prevede di produrre il calcestruzzo abbassando il valore A/C (proporzione d'acqua rispetto al cemento). In questo caso, la proporzione d'acqua può essere ulteriormente abbassata mescolandovi un fluidificante. Il secondo approccio consiste nell'aumentare la percentuale di aria interstiziale. Per far ciò, bisogna aggiungere un agente di occlusione in proporzione  $\geq 3\%$  del peso del legante. Se si vuole mantenere una resistenza al gelo elevata, la percentuale di acqua interstiziale dovrebbe collocarsi tra il 6 e il 10 % nel calcestruzzo fresco. L'esperienza dimostra che per resistere senza danno al gelo, il calcestruzzo deve raggiungere una resistenza dell'ordine di  $10 \text{ N mm}^{-2}$ . Conviene raggiungere una tale resistenza al gelo il più rapidamente possibile.

→ La resistenza al gelo sarà verificata in conformità alla norma SIA 262/1, allegato C: Resistenza al gelo in presenza di sali antigelo

L'uso di un prodotto antigelo accelera il processo di presa di circa un'ora. Per ottenere la resistenza al gelo desiderata, si applicheranno gli approcci di cui sopra. Un antigelo non può garantire la resistenza al gelo, ma contribuisce comunque ad accelerare il processo di presa e a ridurre i danni del gelo.

→ Per gli additivi della malta e del calcestruzzo, si applicano generalmente le norme da SN EN 934-1 a SN EN 934-6.

#### 8.4.4 Materiali resistenti al gelo

Per attenuare al meglio le azioni esercitate sulla struttura portante dai sollevamenti e dai cedimenti provenienti dal terreno di fondazione, occorre utilizzare materiali di riempimento resistenti al gelo. Questa resistenza al gelo è particolarmente importante per i materiali di riporto di uno scavo, di uno strato livellante o di sostituzione di materiali sotto la fondazione. Un terreno di fondazione è considerato resistente al gelo se è costituito da ghiaia o da sabbia pulita e di granulometria adeguata (GW o SW secondo il sistema USCS, Unified Soil Classification System), con una parte di particelle fini ( $< 0,02 \text{ mm}$ )  $\leq 3\%$  del peso. Se il tasso di particelle fini supera il peso del 3 %, sarà condotto un test di resistenza al gelo. Questo esame include prove CBR (California Bearing Ratio), descritte nelle norme SN 670 320 e SN 670 321. Un semplice crivello disponibile in loco può aiutare a ridurre la parte eccedente di materiale fine.

→ La classificazione di un terreno di fondazione in funzione della sua resistenza al gelo è definita nella norma SN 670 140b. Questa norma indica la profondità massima di penetrazione del gelo da rispettare.

#### 8.4.5 Materiali da costruzione adeguati

La struttura portante di costruzioni sul permafrost è generalmente costituita da una fondazione in cemento armato e da una sovrastruttura in acciaio, legno, cemento armato o muratura. Grazie a una tecnica di costruzione flessibile del cemento armato, le fondazioni possono localmente essere collegate in maniera solida al sottosuolo. Se si utilizzano materiali resistenti al gelo e se si applica un rivestimento minimo sull'armatura in conformità alla norma SIA 262, si può anche raggiungere una buona resistenza alle intemperie. È la ragione per cui il cemento armato è un materiale adatto per realizzare le fondazioni di costruzioni sul permafrost. Per la sovrastruttura, le travi in acciaio zincato, il legno, il cemento armato o la muratura in pietra e sabbia calcarea si sono dimostrati materiali adeguati.

Le fondazioni di piloni soggette a deboli sovraccarichi (sciovia, stazioni meteo) sono spesso realizzate con piastre d'acciaio. Sono particolarmente appropriate in un sottosuolo scorrevole e ricco di ghiaccio, come i ghiacciai rocciosi o i ghiacciai, in quanto è facile rimetterli nella corretta posizione.

I costi di trasporto di materiali da costruzione dipendono dalle vie d'accesso. Una struttura portante ottimizzata riduce il peso proprio delle fondazioni in cemento armato, delle opere in muratura o delle costruzioni in acciaio, il che diminuisce i costi di trasporto e di costruzione.

### 8.5 Sistemi flessibili

I sistemi di costruzione e di correzione mobili stanno assumendo maggiore importanza, in particolare nel permafrost ricco di ghiaccio e in scivolamento. I sistemi flessibili, che si adattano ai movimenti del sottosuolo, o i sistemi riadattabili, prolungano la durata di una costruzione; sono già stati utilizzati con successo per diverse infrastrutture. Ma se il movimento del sottosuolo è considerevole, sarebbe meglio prevedere di cambiare sito, da cui l'importanza della prospettiva.

### 8.5.1 Piloni traslabili di impianti a fune

Alcune infrastrutture, come i piloni di impianti a fune, tollerano soltanto deboli spostamenti rispetto al loro asse, altrimenti la guida dei cavi non è più assicurata correttamente. Un piccolo cedimento della fondazione di un pilone può far deviare considerevolmente la sua cima, con il rischio che il cavo deragli o si stacchi. Ecco perché questi cedimenti richiedono spesso un rifacimento delle fondazioni (ripresa nella sottofondazione, posa di lastre d'acciaio). Invece i piloni traslabili possono essere riadattati in caso di deformazione per scorrimento o di spostamento della fondazione. Alcune località sciistiche austriache sono già dotate sistematicamente di tali piloni. Sono utilizzati, sulla base di perizie geologiche nel caso di pendii in reptazione o in frana. Il piede del pilone può scorrere in una, due o tre direzioni, a seconda dei meccanismi di spostamento attesi.

La figura 47 presenta due configurazioni di piloni scorrevoli lateralmente. Nella foto di sinistra, si vedono dei binari di acciaio zincato 1) incastriati in uno zoccolo di calcestruzzo e collegati alla sua armatura. Il margine di riadattamento, che va da alcuni centimetri a qualche decimetro, è dato dalla lunghezza dei binari. Lo svantaggio di questa configurazione risiede nel fatto che è difficile controllare la protezione anticorrosione (acqua stagnante nei binari) sulla giuntura dei binari e dell'armatura. Poiché il collegamento si trova all'interno dello zoccolo in calcestruzzo, il controllo è molto laborioso.

La configurazione di destra sulla figura 47 è più elaborata: per riadattare il pilone, si sposta la trave di acciaio zincato 2) sulla lastra in acciaio 4) all'interno del quadro in acciaio 3). I vantaggi rispetto alla variante di sinistra sono che la protezione anticorrosione è più facile da controllare su tutti gli elementi e che il margine di riadattamento è nettamente superiore (scala del metro). Sulla foto di destra, si vede bene in quale direzione sono attesi gli spostamenti: il piede del pilone è collocato tutto a sinistra, il che permette di sfruttare tutta la larghezza dello zoccolo verso destra per riposizionarlo.



Fig. 47: Due varianti di costruzioni di piloni traslabili, (a sinistra) binari in acciaio, (a destra) lastre di acciaio (foto: Ufficio federale dei trasporti, UFT, Berna).

Per scegliere con giudizio la collocazione di un pilone di un impianto a fune, bisogna, all'occorrenza, misurare le deformazioni del pendio o stimare la direzione principale di deformazione sulla base della geologia e della pendenza. Una fondazione con un pilone nuovo dovrebbe essere spostata rispetto all'asse dell'installazione, dal lato opposto alla direzione principale di deformazione. La durata dell'opera sarà prolungata e i costi di manutenzione saranno ridotti.

### 8.5.2 Sistema d'appoggio tripode

Un appoggio tripode è un sistema statico. Non riportando gli sforzi di taglio, non genera alcuna sollecitazione ulteriore suscettibile di provocare deformazioni, fessure, o una distruzione della struttura portante nel peggiore dei casi. Il peso proprio dell'infrastruttura e i carichi che sostiene sono trasmessi sotto forma di carichi puntuali a tre fondazioni singole. Questi carichi puntuali (fig. 48, a sinistra) possono essere ripresi soltanto da un terreno di fondazione resistente, e quindi le fondazioni devono essere dimensionate di modo da poter riprendere questi carichi elevati. Saranno eventualmente necessari una platea, una fondazione profonda o un rinforzo del terreno di fondazione (cap. 8.1 o 8.7). I cedimenti possono essere compensati sollevando la struttura portante con presse idrauliche e spessorando con lastre in acciaio (fig. 48, a destra).

La figura 49 presenta un altro sistema di appoggio tripode. La struttura portante della stazione intermedia di una seggiovia è costituita da una trave di calcestruzzo a «T». I due appoggi a monte e l'appoggio a valle sono basati su due platee distinte e indipendenti. Questi tre appoggi sono disposti orizzontalmente per permettere di spostare l'insieme della stazione. Quando l'installazione è in funzione, soltanto i due appoggi a monte sono mantenuti in posizione orizzontale. L'appoggio a valle è così libero sul piano orizzontale, il che permette alla lastra di fondazione a valle di muoversi indipendentemente dal resto della struttura. La trave è spostata o sollevata mediante presse idrauliche. Quando sono alleggeriti, gli appoggi possono essere corretti in funzione degli spostamenti che si sono generati (PHILLIPS *et al.* 2007).



Fig. 48: (a sinistra) Sistema di appoggio tripode di una costruzione in acciaio su un plinto isolato di calcestruzzo; (a destra) correzione di un cedimento per mezzo di una pressa idraulica e posa di lastre in acciaio (foto: Markus Walser, Ischgl).

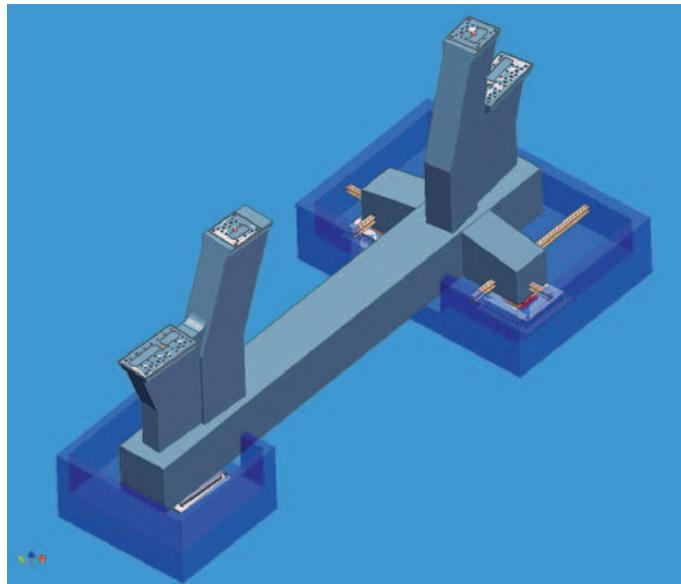


Fig. 49: Sistema di appoggio tripode della stazione intermedia di un impianto a fune con sostegni, travi a T e bauletti di fondazione (© Leitner AG, PHILLIPS *et al.* 2007).

### 8.5.3 Opere antivalanghe

Per considerare i movimenti di reptazione di opere antivalanghe ancorate nel permafrost, queste non devono essere collegate rigidamente al sottosuolo. Le reti da neve munite di pilastri articolati posti su una piastra di base in acciaio soddisfano queste condizioni e fanno parte delle opere antivalanghe omologate dall' UFAM (sito web: [www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung](http://www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung)). Queste opere si spostano in funzione delle deformazioni per scorrimento del sottosuolo e possono essere riadattate se la loro geometria si modifica (fig. 50).

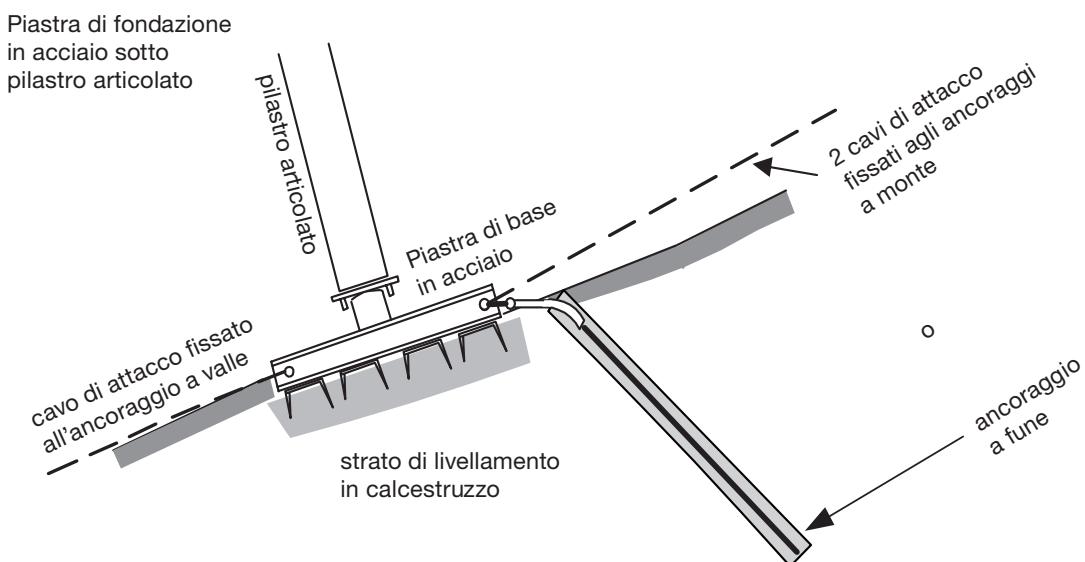


Fig. 50: Opera antivalanga, fondazione sotto i pilastri articolati in condizioni di permafrost in movimento (tratto dalla Direttiva tecnica sulla «Costruzione di opere antivalanghe nella zona di distacco» MARGRETH 2007).

In un permafrost stabile, quindi non in movimento (principalmente la roccia), possono essere realizzate tutte le opere incluse nella lista dei tipi di costruzioni antavalanghe dell'UFAM (sito web: [www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung](http://www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung)). I diversi tassi di reptazione e le opere realizzabili in questo contesto sono presentati al capitolo 7 della Direttiva tecnica sulla «Costruzione di opere antavalanghe nella zona di distacco» (distribuzione: UFAM, Ufficio federale dell'ambiente, Documentazione, Berna). L'analisi della struttura portante, il dimensionamento, la costruzione, i controlli di esecuzione e la sorveglianza delle opere antavalanghe saranno realizzati in conformità a tale direttiva.

#### 8.5.4 Condutture d'acqua

Per prevenire i danni causati dal gelo, le condutture d'acqua nel permafrost o nello strato attivo dovrebbero essere rivestite di materiali resistenti al gelo e poste su una fondazione (cap. 8.4.4, Materiali resistenti al gelo). Si terrà generalmente conto della profondità massima di penetrazione del gelo indicata nella norme SN 670 140b. Le giunture delle condutture dovrebbero potersi dilatare in lunghezza su più centimetri per compensare i movimenti. I controlli saranno facilitati se si installano pozzi dotati di coperchio con isolamento termico a distanze regolari lungo la conduttura.

Per evitare i danni derivanti dal gelo nelle condutture d'acqua, l'acqua reflua riscaldata dovrebbe essere spurgata a ondate e le condutture adduttrici di acqua potabile o di acqua per i cannoni sparaneve dovrebbero essere svuotate e ventilate con aria secca dopo l'uso. In figura 51 sono presentate condutture di acqua flessibili.

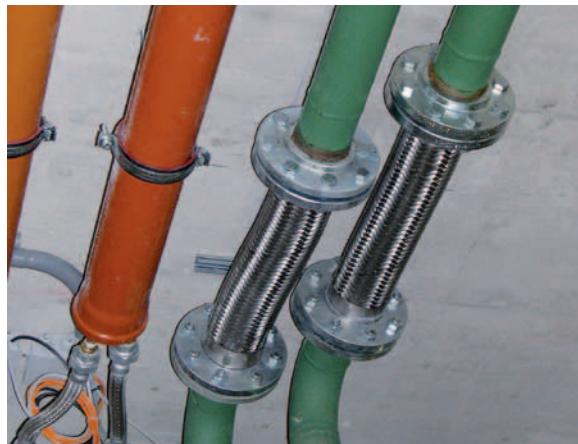


Fig. 51: Due esempi di condutture di acqua flessibili; (a sinistra) raccordo flessibile utilizzabile all'interno di un edificio; (a destra) conduttura d'acqua flessibile sospesa.

## 8.6 Misure per attenuare l'apporto di calore nel sottosuolo

### 8.6.1 Isolamento dal calore

Per ridurre al minimo l'apporto di calore proveniente dal calore di presa, da locali riscaldati, da condutture d'acqua, o da apparecchi e macchine che producono calore, conviene installare uno strato isolante tra gli elementi strutturali in questione e il sottosuolo con permafrost (fig. 52e). Le caratteristiche di resistenza di un isolante dipendono dallo sforzo, ovvero dall'azione esercitata sul terreno. Si utilizza quindi spesso il polistirolo estruso o il vetro multicellulare (a lastre o frantumato), in quanto questi isolanti presentano una forte resistenza alla compressione. Il polistirolo espanso, il poliuretano, la lana di roccia o la lana di vetro non dovrebbero invece essere utilizzati nel sottosuolo in quanto non dispongono delle resistenze alla compressione richieste o perdono le loro proprietà termiche se sono a contatto con l'umidità.

Le caratteristiche dei materiali in tabella 21 rappresentano delle medie. I valori esatti sono forniti dai produttori di questi materiali isolanti.

Tab. 21: Conduttività termica e resistenza alla compressione dei materiali isolanti. \* Carico permanente sotto  $\leq 2\%$  di compressione dopo 50 anni.

Materiali isolanti	Conduttività termica [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Resistenza alla compressione [kPa] (1 kPa = 1 kNm <sup>-2</sup> )
Polistirolo espanso, schiuma rigida	0,032–0,040	10–60*
Polistirolo estruso	0,032–0,040	60–250*
Vetro multicellulare (a lastre o frantumato)	0,045–0,090	200–680, a seconda della marca
Ghiaia	0,520	300–700, a seconda del grado di compattazione
Aria	0,025	–

Un isolamento termico può solo ridurre il flusso di calore, ma non impedirlo. I flussi di calore, per quanto minimi, possono generare danni a lungo termine. L'isolamento duraturo dal calore è realizzabile soltanto tramite raffreddamento attivo o passivo.

### 8.6.2 Isolamento dal freddo

Alcune opere, come le piste di ghiaccio, possono raffreddare il sottosuolo a tal punto che il permafrost si forma a bassa quota. In una pista di ghiaccio l'apporto di freddo nel sottosuolo dovrebbe essere ridotto al minimo. Per produrre ghiaccio la piastra refrigerante di una pista dovrebbe essere raffreddata a meno 10 °C. Per effetto del freddo introdotto nel sottosuolo per diversi anni, può formarsi del permafrost. Seguono sollevamenti a causa dell'aumento del volume di acqua gelata sotto la piastra, compromettendo così l'uso della pista di ghiaccio. È per questo che bisognerebbe introdurre, sotto la piastra refrigerante di una pista di ghiaccio, un isolamento resistente alla compressione, anch'esso posto su uno strato di ghiaia resistente al gelo. L'isolamento permette sia di risparmiare energia spesa per il raffreddamento, che di ridurre al minimo l'apporto di freddo nel sottosuolo. Lo strato di ghiaia resistente al gelo rende omogeneo il terreno di fondazione e interrompe la formazione di permafrost così come i sollevamenti che ne risultano.

### 8.6.3 Misure costruttive

#### *Spazio d'aria / spazio vuoto*

Per proteggere il permafrost dal riscaldamento provocato in particolare dai locali riscaldati, dagli apparecchi o dalle macchine che producono calore, sono possibili diverse misure costruttive. Uno spazio vuoto tra l'infrastruttura riscaldata e il sottosuolo o la parete rocciosa contribuisce a ridurre l'apporto di calore nel permafrost (fig. 56a, b). Questo effetto è rinforzato dalla libera circolazione dell'aria. Anche l'ombra dell'edificio proiettata sulla superficie del terreno favorisce la conservazione del permafrost.

#### *Cantine*

Le cantine non dovrebbero possibilmente essere riscaldate né contenere nessun apparecchio che produce calore (fig. 56d). Soltanto se si procede ai lavori di costruzione necessari (installazione di un isolamento termico) tali locali possono essere destinati a un altro uso (riscaldamento, apparecchi che producono calore).

#### *Acque reflue*

Le acque reflue provenienti dalle cucine e dai WC producono calore nelle fosse settiche. L'apporto di calore può essere considerevolmente ridotto nel sottosuolo attraverso alcune installazioni, come un isolamento termico della fossa settica o l'uso di compost toilet (toilette con separazione di gravità, toilette sottovuoto).

### 8.6.4 Sistemi di raffreddamento attivi o passivi

La temperatura del sottosuolo può essere influenzata da sistemi di raffreddamento. Il loro scopo è quello di stabilizzare o ridurre lo spessore dello strato attivo affinché il terreno di fondazione non perda resistenza e non si produca nessun sollevamento. I sistemi di raffreddamento attivo necessitano di un supplemento di energia, cosa che non accade con i sistemi passivi, che non necessitano di elementi azionati meccanicamente. I sistemi più frequenti, il loro modo di funzionamento e il loro ambito di applicazione sono presentati in tabella 22 e in figura 52. I sistemi quali i pali raffreddati o i termosifoni (fig. 53) sono ancora poco utilizzati nel permafrost di montagna.

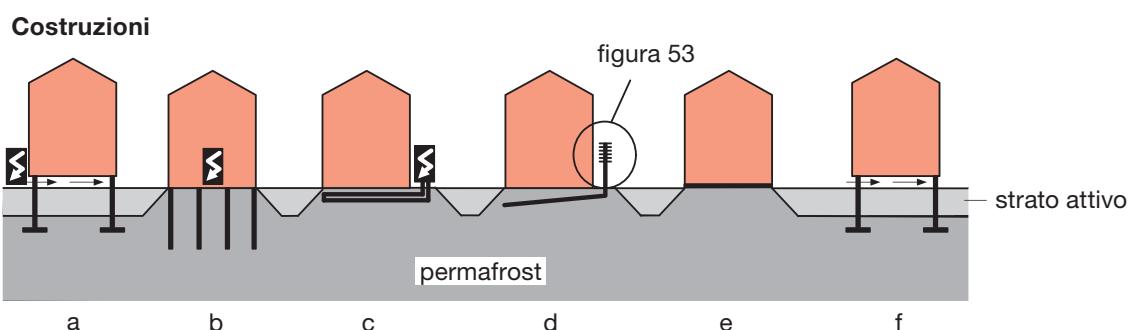


Fig. 52: Rappresentazione schematica di sistemi di raffreddamento attivo e di raffreddamento passivo. Raffreddamento attivo: a) ventilazione forzata, b) pali raffreddati, c) raffreddamento artificiale, congelamento tramite liquidi. Raffreddamento passivo: d) termosifone, e) isolamento termico, f) spazio d'aria (adattato da ARENSEN *et al.* 2009).

Tab. 22: Sistemi di raffreddamento, modi di funzionamento e ambito d'uso.

Sistemi di raffreddamento attivo	Modo di funzionamento	Ambito d'uso
Ventilazione forzata, figura 52 (a)	Tubi o fessure di aerazione sono collocati in un bauletto di ghiaia posto sotto la fondazione e l'aria calda dall'interno viene scambiata con l'aria fredda dall'esterno tramite una ventilazione attiva.	Sottofondazioni superficiali isolanti, strade, condutture d'acqua. Variante: secondo strato di isolamento termico sotto il bauletto di ghiaia.
Pali raffreddati, figura 52 (b)	Una conduttura fissata al palo e contenente un liquido che raffredda il sottosuolo o conserva il permafrost. Variante: ventilazione forzata all'interno del palo.	Pali prefabbricati in acciaio o in cemento che servono da fondazioni profonde. Variante: palo costituito da un tubo con rivestimento in acciaio che serve da fondazione profonda.
Raffreddamento artificiale, congelamento, figura 52 (c)	Sistema di conduttura orizzontale o verticale con liquido che raffredda il sottosuolo o conserva il permafrost.	Sottofondazioni, piattabande, strade, condutture d'acqua che presentano esigenze importanti riguardanti l'idoneità.
<b>Sistemi di raffreddamento passivo</b>		
Termosifone, Palo raffreddato, figure 52 (d) e 53	Sistema di pompaggio di gas o di liquido a una o due fasi, nei tubi o nei pali, e che estrae il calore del sottosuolo con un procedimento di circolazione e di convezione.	Sottofondazioni superficiali isolate dal calore, strade, condutture d'acqua.
Isolamento termico, figura 52 (e)	L'apporto di calore nel sottosuolo e la risalita di umidità sono ridotti da un materiale contenente pori pieni gas.	Sottofondazioni, piattabande, condutture d'acqua. La fessura d'aria è anche realizzabile tra le pareti esterne e la roccia.
Spazio d'aria, figura 52 (f)	L'infrastruttura è costruita ad almeno 1 m sopra il sottosuolo. Lo spazio d'aria impedisce l'apporto di calore nel sottosuolo e contribuisce alla conservazione del permafrost.	Sottofondazioni, piattabande, condutture d'acqua. La fessura d'aria è anche realizzabile tra le pareti esterne e la roccia.

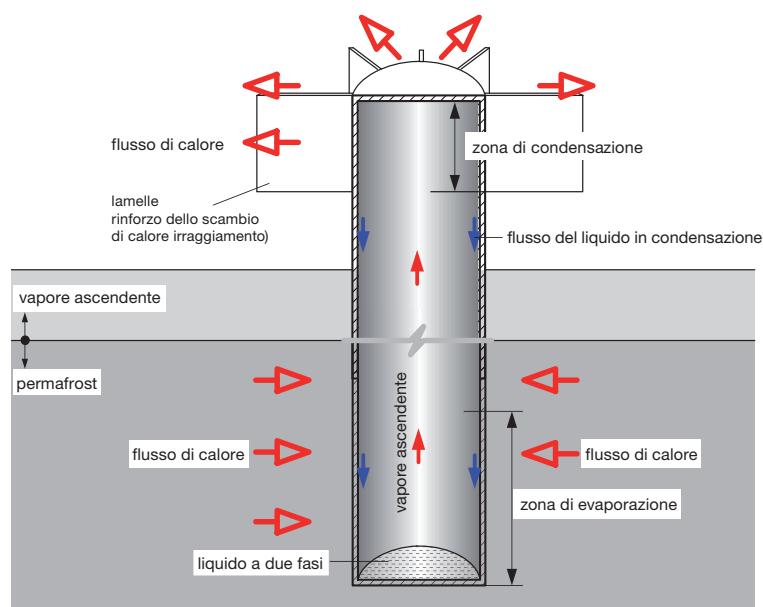


Fig. 53: Rappresentazione schematica (sezione trasversale) di un termosifone a due fasi (diametro del tubo tra i 2 e i 20 cm).

Si raccomanda di valutare la modalità di azione di questi sistemi prima della realizzazione. Nella maggior parte dei casi, si utilizza a questo scopo un modello termodinamico basato su un programma di calcolo (modello digitale) a elementi finiti (EF). Questo programma permette la modellazione del ciclo termico e la modalità di azione del sistema di raffreddamento nel sottosuolo, il che contribuisce a ottimizzare il dimensionamento.

### 8.6.5 Raccolta di acqua piovana e di scioglimento delle nevi

In generale, conviene evitare che l'acqua si accumuli intorno a un edificio, poiché induce calore nel sottosuolo. L'acqua piovana e di scioglimento delle nevi che scola dal tetto di una costruzione dovrebbe essere raccolta, controllata e reinfiltrata a una distanza adeguata dall'oggetto per evitare instabilità risultanti da un deperimento del permafrost. In alta montagna, quest'acqua è spesso raccolta e trattata per farne acqua potabile.

### 8.6.6 Modifica della superficie del terreno di fondazione

#### *Rivestimento del terreno con un geotessile*

Il rivestimento temporaneo del terreno con un tessuto bianco (feltro) e isolante diminuisce l'apporto di calore nel sottosuolo e frena il processo di scioglimento della neve e del ghiaccio. Questo tessile protegge il sottosuolo dall'irraggiamento diretto del sole e dalle alte temperature, il che attenua il riscaldamento conservando il permafrost. Questo strato protettivo dovrebbe presentare una certa resistenza alla rottura e alle intemperie (come quello usato per il rivestimento dei ghiacciai >25 kN m<sup>-2</sup>) per far fronte alle diverse influenze climatiche e alla caduta di piccoli sassi.

#### *Copertura con materiale grossolano*

Una copertura della superficie del terreno con materiale a blocchi conserva il permafrost. L'aria fredda si infiltra tra i blocchi, raggiunge il sottosuolo e raffredda il permafrost.

Se i materiali utilizzati contengono ghiaccio, possono perdere volume se il ghiaccio si scioglie e generare cedimenti differenziali della copertura.

#### *Modifica del manto nevoso*

Una modifica artificiale del manto nevoso può favorire la conservazione del permafrost. Nei comprensori sciistici in primavera, dove sono a disposizione delle macchine, è possibile proteggere dal riscaldamento una costruzione comprimendo la neve attorno, ritardando così il suo scioglimento. Questo intervento mirato permette di raffreddare il sottosuolo a lungo termine, in quanto la neve compressa si conserva più a lungo. È anche possibile spazzare la neve intorno a un edificio in inverno affinché le basse temperature dell'aria raffreddino il sottosuolo. Questi effetti favoriscono la conservazione del permafrost.

## 8.7 Miglioramento della capacità portante del terreno

### 8.7.1 Sostituzione del materiale

Per migliorare le condizioni della fondazione, si asporta il materiale strutturato male, nonché le rocce fratturate, fino a trovare un buon terreno per la fondazione. Si sostituisce il materiale asportato con ghiaia sabbiosa ben strutturata e resistente al gelo (cap. 8.3, fig. 54). Il sottosuolo così modificato aiuta a suddividere regolarmente i carichi su un sottosuolo non omogeneo. I materiali dovrebbero essere compattati con strati contenenti una percentuale di acqua naturale (la percentuale di acqua ottimale wopt sarà determinata con prove Proctor (SN 670 3302)). Lo spessore degli strati dipende dalle dimensioni massime dei grani e non dovrebbe superare 0,50 m. La posa di armature o di georeti produce l'effetto di aumentare la capacità portante del terreno. Questa può ulteriormente essere rinforzata con uno spandimento di cemento che porterà alla formazione di una struttura secondaria.

Sul posto, l'esame della resistenza del riempimento e dei materiali di sostituzione si effettua procedendo a una prova di carico su piastra o una sonda  $\gamma$  (densità).

### 8.7.2 Iniezione e chiodatura

Le tecniche di iniezione e di chiodatura, utilizzate specialmente nelle rocce fessurate, hanno l'obiettivo di migliorare la stabilità globale e la capacità portante del terreno. Dopo aver effettuato un foro verticale, vi si introduce un'asta (asta filettata) o un tubo di rivestimento in acciaio (micropalo, fig. 55). Attraverso tubi di iniezione, la malta è iniettata nel foro, di modo che le fessure e le cavità vicine si riempiano. Si possono limitare le perdite di malta che scola nelle fessure adattandone le proprietà di scolo (cap. 8.4) o utilizzando georeti. La riduzione della quantità di malta riduce al minimo anche il calore trasmesso al sottosuolo durante la presa della malta. Il riempimento delle fessure con malta di iniezione ridà alla fondazione condizioni omogenee. Le aste in acciaio o i tubi con guaina assicurano una certa «coesione» del terreno; sono quindi da considerare durante la verifica geotecnica.

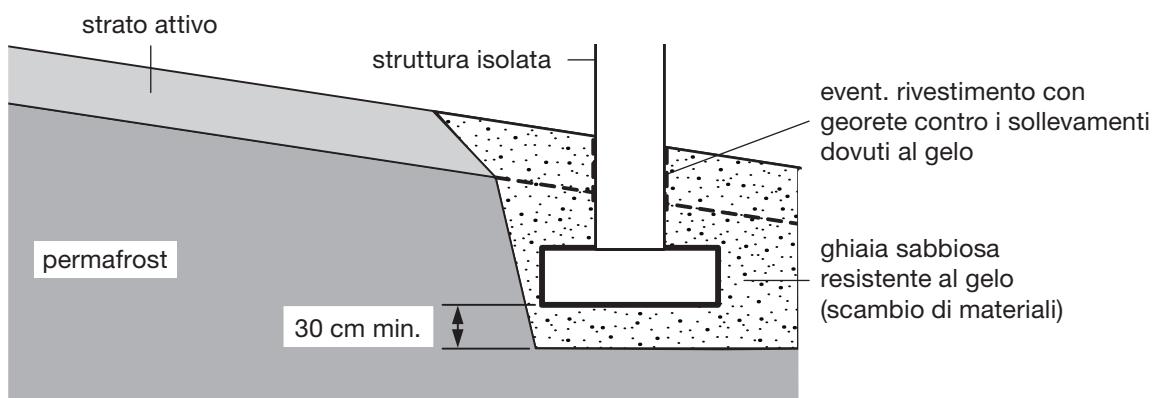


Fig. 54: Sezione trasversale schematica di un terreno di fondazione gelato in permanenza con sostituzione di materiali sotto la struttura isolata per migliorare le condizioni della fondazione.

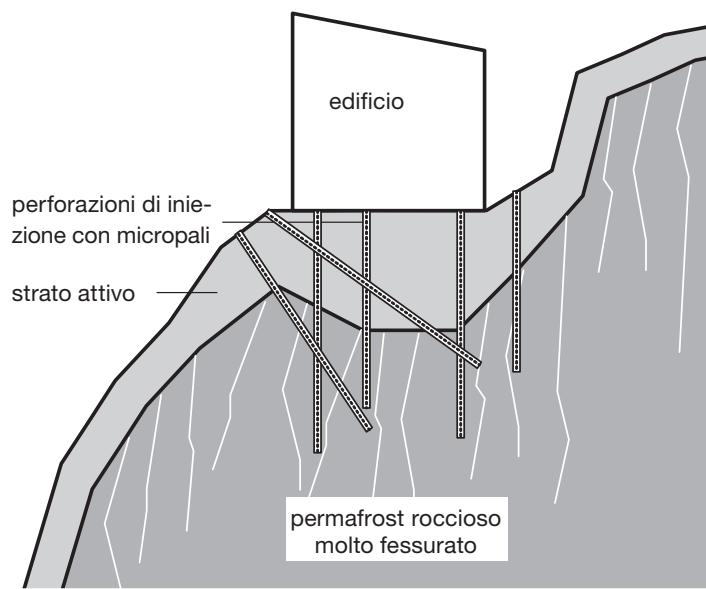


Fig. 55: Sezione trasversale schematica di un permafrost roccioso fessurato, con perforazione di iniezione e micropali per migliorare la stabilità globale e la capacità portante del terreno.

La stessa tecnica è utilizzata durante perforazioni orizzontali o inclinate. Le aste filettate o i tubi in acciaio sono detti in questo contesto chiodi. Le modalità di azione e l'obiettivo di applicazione di questa tecnica restano i medesimi (fig. 55).

### 8.7.3 Drenaggio

È difficile effettuare un drenaggio efficace nel permafrost, in quanto le condutture gelano rapidamente. Per poterle controllare, le si doteranno di pozzetti di risciacquo. Una perforazione di drenaggio permette di ridurre localmente, a breve e a medio termine, la pressione statica e dinamica, il che migliora la resistenza e la stabilità del terreno di fondazione.

### 8.7.4 Procedimenti di disgelo del permafrost

Per migliorare o rendere omogenea la capacità portante del terreno, si può anche disegelare il permafrost. Questo procedimento si applicherà soltanto se il permafrost è presente in modo discontinuo e contiene poco ghiaccio. Vi si prestano diversi metodi, a seconda del tempo di cui si dispone. Il più semplice consiste nell'utilizzare l'irraggiamento solare e le alte temperature dell'aria in uno scavo aperto. Questo metodo richiede molto tempo. Esperienze in Alaska e in Russia hanno mostrato che dopo aver eliminato lo strato vegetale, il ghiaccio si era sciolto a una profondità compresa tra 1 e 4 m nell'arco di un'estate (ESCH 2004, TSYTOVICH 1975). Queste profondità, che dipendono dal sito, devono essere confermate da studi nel permafrost alpino. Di principio, bisogna aspettarsi che la profondità del disgelo sia inferiore, in quanto la temperatura estiva dell'aria è più bassa.

Un metodo più rapido per disgelare il permafrost consiste nel praticare fori di sondaggio per introdurre calore nel sottosuolo. I fori sono eseguiti secondo una griglia, in funzione delle caratteristiche del sottosuolo (ad es. temperatura del terreno, contenuto di ghiaccio). Il calore può essere trasmesso nel sottosuolo tramite acqua calda, vapore, aria calda, serpentine di riscaldamento elettrico o aghi in acciaio dotati di spirali di riscaldamento. A seconda dei mezzi disponibili in loco, l'una o l'altra variante può essere più efficace per assolvere questa funzione.

### 8.7.5 Procedimenti di conservazione del permafrost

Uno dei procedimenti di conservazione del permafrost mira a impedire allo spessore dello strato attivo di modificarsi nel corso della realizzazione del progetto di costruzione. È quindi possibile limitare alcuni problemi, come le deformazioni o le instabilità dovute al cambiamento delle condizioni del sottosuolo. Si possono anche ridurre gli spostamenti di costruzioni incastrando gli elementi portanti e i componenti nel permafrost («indisturbato»). Un altro intervento possibile consiste nell'impedire l'apporto di calore nel sottosuolo o nel raffreddarlo attivamente. Questi interventi sono descritti al capitolo 8.6 e in tabella 22. Questi procedimenti sono rappresentati in figura 56 e sono combinabili tra di loro.

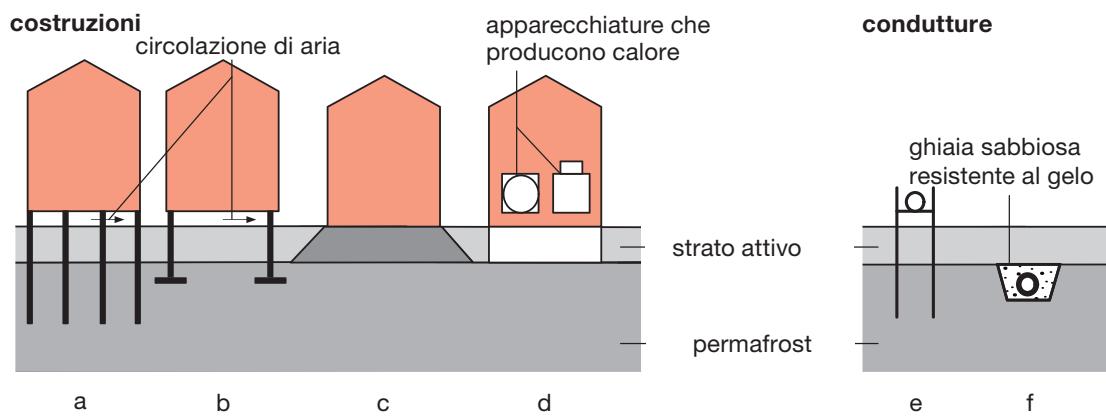


Fig. 56: Rappresentazione schematica di diversi procedimenti di conservazione del permafrost. L'edificio a) è rialzato da pali, b) rialzato da solette isolate, c) basato su un riporto (sostituzione di materiali), d) costruito su una cantina (cantina fredda inutilizzata). La conduttura e) è rialzata da pali, f) interrata e isolata (adattata da ARENSEN *et al.* 2009).

## 8.8 Cunicoli e tunnel

### 8.8.1 Roccia stabile povera di ghiaccio

In una roccia in buono stato, povera di ghiaccio e contenente poche fessure piene di ghiaccio, lo scavo e il sostegno di gallerie e di tunnel possono essere effettuati come in una roccia non gelata. Ma gli effetti delle temperature negative dell'aria e della roccia sono tuttavia da considerare durante tutte le fasi del progetto. Per conservare il permafrost, la temperatura media annua dell'aria nella galleria o nel tunnel dovrebbe essere mantenuta al di sotto degli 0 °C. Un sistema di raffreddamento attivo, come un'aerazione forzata, può permettere di mantenere questa temperatura (cap. 8.6). Il sistema consistente nel minare rocce contenenti ghiaccio e terreni dovrebbe essere menzionato nella gara d'appalto, in quanto il volume di esplosivo e quindi i costi sono più elevati.

### 8.8.2 Rocce e terreni instabili e ricchi di ghiaccio

Lo scavo e il sostegno di gallerie e di tunnel è difficoltoso quando la roccia e i terreni sono molto fessurati e ricchi di ghiaccio o quando contengono ghiaccio temperato o disgelato ( $> -2^{\circ}\text{C}$ ). A seconda della stabilità dei materiali, lo scavo, il consolidamento e il sostegno sono eseguiti come in un terreno non gelato. A seconda della stabilità della volta, della stabilità del fronte di attacco e della pressione dell'acqua, si scaverà la galleria con uno scudo di avanzamento o con un altro mezzo assicurandone l'impermeabilità. I cunicoli e le gallerie difficilmente accessibili possono essere scavati con l'esplosivo e consolidati con un dispositivo «Marciavanti». Questo metodo molto flessibile non necessita grosse attrezzature di cantiere.

## L'essenziale in breve

Il capitolo 8 presenta soluzioni tecniche applicabili durante la realizzazione o il rifacimento di costruzioni su permafrost. I principali problemi e le relative soluzioni sono schematizzate di seguito:

### Fondazioni:

- Problema: resistenza di un terreno di fondazione instabile
- Soluzioni: plinti isolati o travi continue o continue per un terreno di portanza buona (roccia), platea o fondazione profonda per uno strato attivo non resistente e per carichi molto pesanti, modo di costruzione rigido

### Ancoraggi:

- Problema: realizzazione e sicurezza degli ancoraggi in un terreno di fondazione soggetto a condizioni mutevoli
- Soluzioni: realizzazione che richiede esperienza; gallerie di ancoraggio o pozzi di ancoraggio per carichi pesanti con potenziale di danno elevato; ancoraggio per attrito per carichi meno pesanti e con un potenziale di danno minore

### Scavo:

- Problema: scavo difficile di matrici di blocchi, di rocce e di ghiaccio in un terreno
- Soluzioni: uso di pale meccaniche di dimensioni più grandi, di un martello pneumatico o dell'esplosivo
- Problema: scavo difficile nelle rocce fessurate, minare terreni contenenti ghiaccio
- Soluzioni: scavo con il martello pneumatico o con l'esplosivo (maggiore quantità di materia esplosiva)

### Materiali da costruzione:

- Problema: presa di materiali cementizi ritardata dal freddo; calore di idratazione
- Soluzioni: attivare tramite additivi il processo di presa della malta e del cemento; preriscaldare l'acqua di impasto, utilizzare malta speciale; considerare il calore di presa nel dimensionamento e nella scelta del prodotto
- Problemi: azioni esercitate sulla struttura portante da sollevamenti o cedimenti
- Soluzioni: utilizzare materiale resistente al gelo per i lavori di riporto e la sostituzione di materiali

### Sistemi flessibili:

- Problema: costruire in un permafrost ricco di ghiaccio e molto scorrevole
- Soluzioni: impianto a fune dotato di piloni scorrevoli lateralmente; sistema d'appoggio tripode, nessun esercizio di sforzi di taglio, correzione delle possibili deformazioni; opere antivalanghe, reti da neve con fondazione galleggiante e pilastri articolati sul permafrost scorrevole

### Interventi destinati a diminuire l'apporto di calore nel sottosuolo:

- Problema: apporto di calore non desiderato nel sottosuolo
- Soluzioni: isolamento termico resistente alla compressione tra l'infrastruttura riscaldata e il terreno di fondazione; interventi strutturali come gli spazi vuoti o le cantine non riscaldate; sistemi di raffreddamento attivo o passivo; modifica della superficie del terreno, come il suo rivestimento con un geotessile, modifica del manto nevoso per conservare il permafrost

### Miglioramento della capacità portante del terreno:

- Problema: resistenza diminuita del terreno e della roccia
- Soluzioni: omogeneizzazione del terreno di fondazione attraverso una sostituzione di materiali; iniezione di malta nella roccia fessurata

### Gallerie e tunnel

- Problema: realizzazione di tunnel e gallerie in un permafrost contenente ghiaccio
- Soluzioni: nella roccia e nei terreni instabili e ricchi di ghiaccio, scavo con lo scudo di avanzamento o con un altro mezzo assicurando l'impermeabilità della costruzione; per le gallerie e i tunnel difficilmente accessibili, avanzamento con l'esplosivo con consolidamento attraverso un dispositivo Marciavanti



## **Allegati**

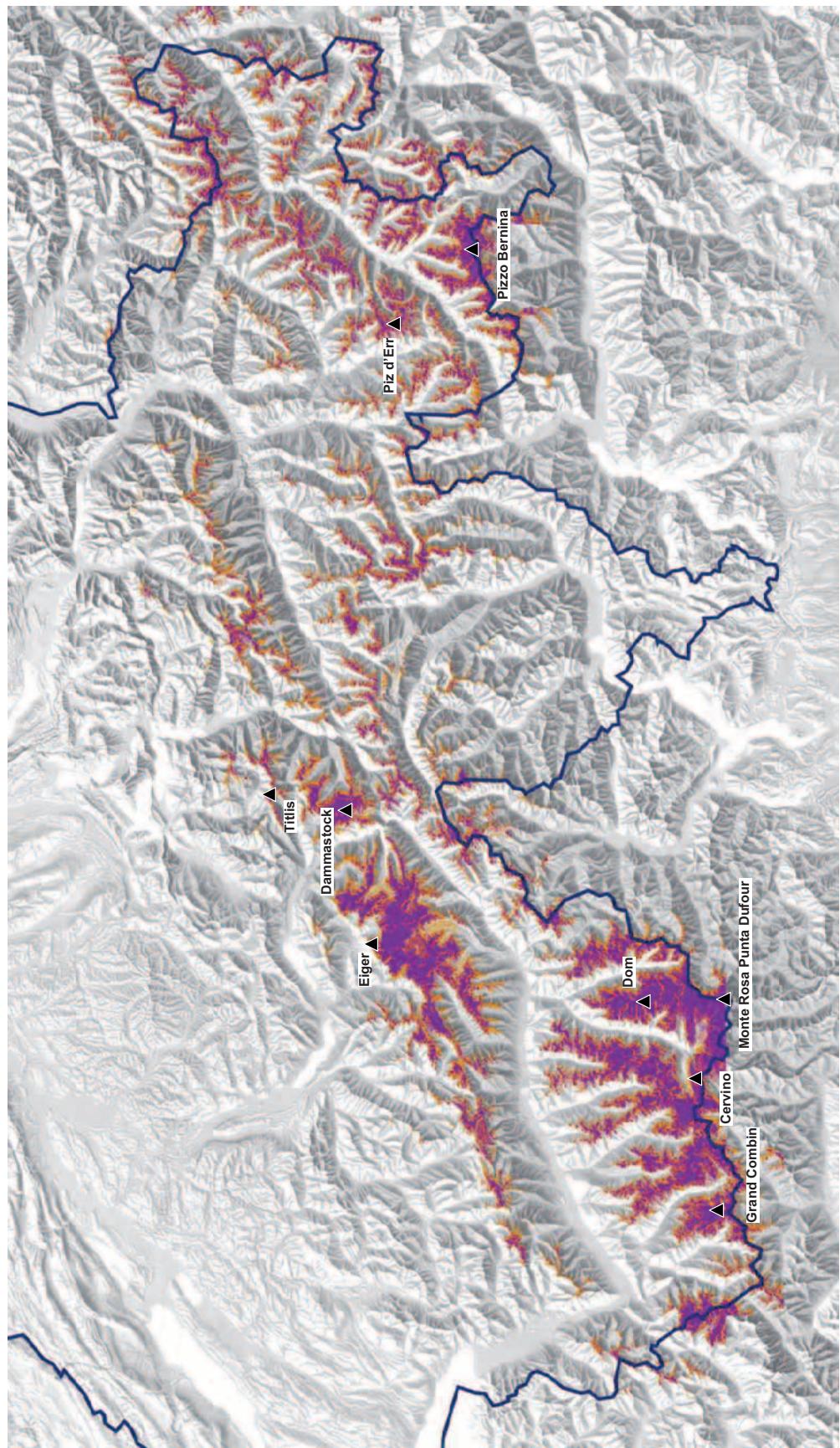
- A Carta indicativa del permafrost, UFAM Ufficio federale dell'ambiente, 2006
- B Esempio di un piano di controllo o di un piano di sorveglianza e di manutenzione
- C Definizione grafica dell'indice di gelo e di disgelo
- D Bibliografia
- E Elenco delle fonti

## Allegato A

### Carta indicativa del permafrost in Svizzera

#### Carta indicativa del permafrost in Svizzera

Evoluzione del permafrost – modellizzazioni realizzate grazie all' MNT25 (UFAM, luglio 2006)



**Allegato B****Esempio di un piano di controllo o di un piano di sorveglianza e di manutenzione (estratto)****Designazione dell'oggetto .....** **Luogo.....** **Descrizione.....**

Oggetto di controllo/ Componente	Caratteristica da esaminare	Sistema di sorveglianza	Frequenza delle misurazioni	Valore limite / tolleranza	Data misurato / raggiunto	Responsabile dei controlli e dei dati	Competenze flusso informativo, dati	Registrazione
-------------------------------------	-----------------------------	-------------------------	-----------------------------	----------------------------	---------------------------	---------------------------------------	-------------------------------------	---------------

**5. Realizzazione (scavo)**

Scarpata	valutazione dello stato, resistenza, lenti di ghiaccio visibili, angolo della scarpata, rigetti d'acqua, rivestimento, ecc.	sorveglianza visiva	giornaliera / settimanale				direzione dei lavori	protocollo delle misurazioni
Consolidamento dello scavo	posizione della testa di ancoraggio e dei chiodi spostamenti del terreno di fondazione	misurazioni geodetiche inclinometro, di perforazione, Inkrex, estensimetro	Settimanale / mensile	10 mm / settimana			direzione dei lavori	protocollo delle misurazioni
Fondo dello scavo	rilevamento geologico, omogeneità, fessure, ghiaccio visibile, compressione del terreno, temperatura del terreno	sorveglianza visiva, captazione delle forze, (lastra di carico), termometro	unica				direzione dei lavori	protocollo delle misurazioni

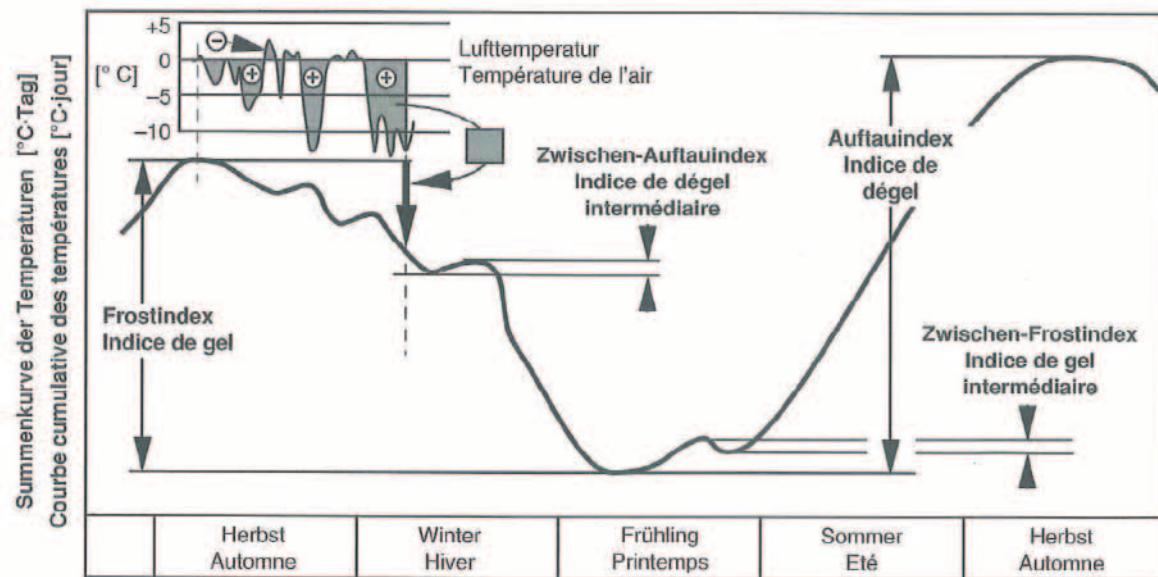
**6. Uso e manutenzione**

Fondazione di piloni o di pilastri, edifici	spostamenti di altezza e posizione (superficie) spostamento del terreno di fondazione	misurazioni geodetiche inclinometro, di perforazione, Inkrex, estensimetro, temperatura del terreno	annua	10 mm / anno	ingegnere / geologo	protocollo delle misurazioni
Ancoraggio	forze di ancoraggio	captazione delle forze	da mensile a annua	diminuzione della forza di ancoraggio > 10 % / un	ingegnere / geologo	protocollo delle misurazioni

## Allegato C

### Definizione grafica dell'indice di gelo e di disgelo

Secondo la norma SN 670 140b.



## Allegato D

### Bibliografia

- ANDERSLAND OB, LADANYI B. 2004. Frozen Ground Engineering. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- ARENSON L. 2002. Unstable Alpine Permafrost: A potentially important natural hazard – Variation of geo-technical behavior with time and temperature. PhD Thesis, ETH, Zurich.
- ARENSON 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.
- ARENSON 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.
- GIORGIO 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 Grialetsch (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 Jungfraujoch. 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.

## Allegato E

### Elenco delle fonti

#### Norme svizzere

- SN EN 206-1. Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazioni, produzione e conformità.  
SN EN 934-1 a 6. Additivi per malta, calcestruzzo e malta liquida.  
SN EN 1097-5. Determinazione della percentuale di acqua di materiali inerti con essiccamiento tramite forno ventilato.
- SN 670 004-1a. Ricerche e prove geotecniche – Identificazione e classificazione dei terreni – Parte 1: Identificazione e descrizione.  
SN 670 004-2a. Riconoscimento e prove geotecniche – Denominazione, descrizione e classificazione dei terreni – Parte 2: Principi per una classificazione.  
SN 670 140b. Gelo.  
SN 670 320. Prova CBR.  
SN 670 321. Prova sui terreni – Prova di gonfiamento al gelo e prova CBR dopo disgelo  
SN 670 330-2. Metodo di prova di determinazione in laboratorio della massa volumica di referenza del contenuto d'acqua (miscugli trattati e miscugli non trattatai dai leganti idraulici) – compattazione-proctor.  
SN 670 335. Determinazione della massa volumica del terreno (picnometro, peso sotto immersione).  
SN 670 340. Determinazione della percentuale di acqua dei terreni.  
SN 670 352. Determinazione della resistenza alla compressione semplice (terreni).  
SN 670 903-5. Determinazione della percentuale di acqua di materiali inerti con essiccamiento tramite forno ventilato.
- SIA 260, 2003. Basi per l'elaborazione dei progetti di strutture portanti  
SIA 261, 2003. Azioni sulle strutture portanti.  
SIA 261/1, 2003. Azioni sulle strutture portanti.– Specificazioni complementari.  
SIA 262, 2003. Costruzione in calcestruzzo.  
SIA 262/1, 2003. Costruzione in calcestruzzo – Specificazioni complementari.  
SIA 263, 2003. Costruzione in acciaio.  
SIA 264, 2003. Costruzione mista acciaio-calcestruzzo.  
SIA 265, 2003. Costruzione in legno.  
SIA 266, 2003. Costruzione in muratura.  
SIA 267, 2003. Geotecnica.  
SIA 267/1, 2003. Geotecnica – Specificazioni complementari  
SIA 430 Raccomandazione, 1993. Eliminazione dei rifiuti del cantiere di costruzione, di trasformazione e di demolizione

#### Norme internazionali

- 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. Terreno di fondazione, analisi di campioni di terreno – Determinazione della resistenza al taglio – Parte 3: Prova di taglio diretto

#### Libro specializzato

Zement Taschenbuch 2002, Verein Deutscher Zementwerke.

**Siti web**

Ufficio federale di topografia swisstopo: [www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch)

Ufficio federale dell'ambiente UFAM, Costruzione di opere antivalanghe nella zona di distacco:  
[www.umwelt-schweiz.ch/uv-0704-f](http://www.umwelt-schweiz.ch/uv-0704-f)

Ufficio federale dell'ambiente UFAM, Lista dei tipi di malta speciale: [www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung](http://www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung)

Hochschulverlag AG dell'EPF Zurich vdf: [www.vdf.ethz.ch](http://www.vdf.ethz.ch)

International Permafrost Association IPA (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms: <http://nsidc.org/fgdc/glossary/>

Ufficio federale di meteorologia e di climatologia MeteoSvizzera: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch)

Permafrost Monitoring Switzerland Permos: [www.permos.ch](http://www.permos.ch)

Società svizzera degli ingegneri ed architetti SIA: [www.sia.ch](http://www.sia.ch)

Universal Temperature Datenlogger: [www.utl.ch](http://www.utl.ch)

WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos: [www.slf.ch](http://www.slf.ch)

Per quanto attiene alla normativa italiana si rimanda a:

- CIRCOLARE 2 febbraio 2009, n. 617 – Istruzioni per l'applicazione delle ,Nuove norme tecniche per le costruzioni' di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. (GU n. 47 del 26-2-2009 – Suppl. Ordinario n.27);
- D.M. 14.01.2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni;
- EN 1997-1:2004 – Eurocode 7. Geotechnical design. General rule.





Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**armasuisse**



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Verkehr BAV**

ISBN 978-3-905621-50-1