

# PermaNET

## Permafrost Long-term Monitoring Network

### SYNTHESEBERICHT



## Impressum

### Autoren

Mair, Volkmar	Autonome Provinz Bozen-Südtirol (Italien)
Zischg, Andreas	Abenis Alpinexpert GmbH/srl, Bozen (Italien)
Lang, Kathrin	Autonome Provinz Bozen-Südtirol (Italien)
Tonidandel, David	Autonome Provinz Bozen-Südtirol (Italien)
Krainer, Karl	Universität Innsbruck (Österreich)
Kellerer-Pirklbauer, Andreas	Universität Graz (Österreich)
Deline, Philip	Forschungszentrum EDYTEM, Grenoble (Frankreich)
Schoeneich, Philippe	Universität Joseph Fourier, Grenoble (Frankreich)
Cremonese, Edoardo	ARPA Valle d'Aosta, Aosta (Italien)
Pogliotti, Paolo	ARPA Valle d'Aosta, Aosta (Italien)
Gruber, Stephan	Universität Zürich (Schweiz)
Böckli, Lorenz	Universität Zürich (Schweiz)

### Übersetzung aus dem Englischen

Stefani, Martina  
Obojes, Ulrich  
Larcher, Verena  
Pinter, Thomas  
Keim, Lorenz  
Lang, Kathrin  
Tonidandel, David  
Zischg, Andreas

### Gefördert von

PermaNET ist Synonym für „Permafrost Long-term Monitoring Network“. Das Projekt wird von der EU über das Interreg Alpenraum Programm 2007-2013 ( [www.alpine-space.eu](http://www.alpine-space.eu)) kofinanziert.

### Layout

Jörg Buchmann ([standfotografie.com](http://standfotografie.com)), INTERPRAEVENT

### Druck

Landesdruckerei der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol

### Zitat

Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremonese, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L., (2011): PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesebericht. INTERPRAEVENT Schriftenreihe 1, Report 3. Klagenfurt.

### Bestellung

Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT  
Flatschacher Straße 70  
A-9020 Klagenfurt (Austria)  
ISBN 978-3-901164-15-6

### Download

[www.interpraevent.at](http://www.interpraevent.at) → Service → Publikationen

# PermaNET

Permafrost Long-term Monitoring Network

## SYNTHESEBERICHT

### Vorwort Lead Partner

In der Diskussion über mögliche Auswirkungen des Klimawandels in den Alpen werden neben dem Abschmelzen der Gletscher und dem Anstieg der Niederschlagsintensität oft die Folgen des Auftauens von Permafrost erwähnt. Im Vergleich zum Rückgang der Gletscher ist das Auftauen von Permafrost im Landschaftsbild nicht direkt sichtbar. Darum sind die Untersuchung der Permafrostverbreitung und die Beurteilung der Folgen des Klimawandels auf den Permafrost sowie auf die damit zusammenhängenden Prozesse mit großen Unsicherheiten verbunden. Die Wissenslücke in diesem Themenbereich führt oftmals zu Spekulationen. Vor allem die Medien tendieren entweder zum Übertreiben oder zum Vernachlässigen der Folgen von abschmelzendem Permafrost und den damit verbundenen Naturgefahren. Die Hauptziele des PermaNET Projektes waren die Erhebung von Daten und Fakten über die Permafrostverbreitung im Alpenraum sowie über die thermische Entwicklung von Permafrost in einem sich erwärmenden Klima. Damit sollten eine Wissensgrundlage und die Voraussetzung für objektive Diskussionen geschaffen werden. Dies erforderte eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Praxis und Verwaltung. Deshalb hat das Amt für Geologie und Baustoffprüfung der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol (Italien) das Projekt PermaNET initiiert, eine Partnerschaft von 13 Projektpartnern und 23 Projektbeobachtern aus dem gesamten Alpenraum aufgebaut und das Projekt geleitet. Die wichtigsten Ergebnisse dieser interdisziplinären und grenzüberschreitenden Zusammenarbeit werden nun in diesem Bericht vorgestellt. Erstmals konnte ein konsistenter Datensatz über die Permafrostverbreitung in den Alpen erarbeitet werden. Die zukünftige Entwicklung des Permafrosts kann nun, dank des im Rahmen des Projektes realisierten alpenweiten Netzwerkes für Permafrostmonitoring, beobachtet werden. Das Zusammenbringen der wichtigsten Daten und Erfahrungen aus Permafrostuntersuchungen im gesamten Alpenraum in eine gemeinsame Wissensbasis hat sowohl für die Forschung als auch für die Praxis des Naturgefahrenmanagements einen wesentlichen Erkenntnisgewinn gebracht. Die erarbeitete Entscheidungsgrundlage liefert wertvolle Informationen für alle im Hochgebirge tätigen Akteure. Diese Broschüre ist ein zusammenfassender Bericht der wichtigsten Projektergebnisse und dient als Einleitung zu den erarbeiteten Karten, Handbüchern, Datengrundlagen und Richtlinien.

Volkmar Mair  
Andreas Zischg

Lead Partner PermaNET

AUTONOME PROVINZ  
BOZEN - SÜDTIROL



PROVINCIA AUTONOMA  
DI BOLZANO - ALTO ADIGE

PROVINCIA AUTONOMA DE BULSAN - SÜDTIROL

### Vorwort INTERPRAEVENT

Permafrost im Hochgebirge ist eines von vielen Themen, das im Naturgefahren- und Risikomanagement in den Alpen betrachtet werden muss. Die Naturgefahrenbeurteilung und die Erarbeitung von Gefahrenzonenkarten in von Permafrost betroffenen Gebieten sind sehr komplexe Aufgaben; die durch den Klimawandel bedingte Permafrostdegradation erschwert die Beurteilung von Naturgefahren wie Felsstürze, Rutschungen und Murgänge in diesen Gebieten zusätzlich. Der Anstieg der Temperaturen hat einen direkten Einfluss auf die thermischen Eigenschaften und das geotechnische Verhalten von gefrorenem Gestein und Lockermaterial. Permafrostdegradation kann deshalb direkte Folgen für die Stabilität von Infrastrukturen in den Permafrostgebieten selbst haben und sich indirekt auf Naturgefahrenprozesse in tieferen Lagen auswirken. Auch in dieser Hinsicht muss der Klimawandel berücksichtigt werden.

Alles in allem ist Permafrost im Hochgebirge ein bedeutender Faktor im komplexen System alpiner Einzugsgebiete. Folglich ist die Untersuchung von Permafrost und der damit zusammenhängenden Naturgefahren Teil des integralen Einzugsgebietsmanagements und spielt in einigen Fällen eine relevante Rolle im integralen Risikomanagement.

INTERPRAEVENT unterstützt den Austausch von Wissen und Erfahrungen zwischen Wissenschaftlern und Technikern, welche sich mit Naturgefahren und Risikomanagement beschäftigen. Diese Broschüre ist deshalb eine wertvolle Fortsetzung von früheren Ausgaben wie z.B. die Dokumentation von alpinen Naturgefahren (DOMODIS – erhältlich in deutscher, englischer und französischer Sprache) oder der Leitfaden Wildholz. Das PermaNET Team hat mit diesem Bericht, aus der Sicht der Praxis, den aktuellen Stand der Permafrosterkundung, des Monitorings und der Beurteilung von mit Permafrost zusammenhängenden Naturgefahren zusammengefasst. Somit wird diese Broschüre den wichtigsten Zielen von INTERPRAEVENT gerecht, indem sie Entscheidungshilfen für Akteure im Naturgefahren- und Risikomanagement bereitstellt und neue wissenschaftliche Erkenntnisse den Praktikern vermittelt.

Kurt Rohner, Vorsitzender  
Gernot Koboltschnig, Geschäftsführer



**INTERPRAEVENT**

Internationale  
Forschungsgesellschaft

# Inhalt

Einleitung	4
Das Projekt	5
Die Partnerschaft	6
Netzwerk für das Permafrostmonitoring	8
Permafrostverbreitung in den Alpen	10
Permafrost und Naturgefahren	16
Permafrost und Klimawandel	18
Permafrost und Wasserressourcen	20
Empfehlungen	22

## Einleitung

Als Permafrost wird Lithospärenmaterial (Festgestein oder Lockermaterial) bezeichnet, das für einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren eine Temperatur von 0°C oder weniger aufweist. Permafrost kann – muss aber nicht – Wasser oder Eis enthalten. Gletscher zählen definitionsgemäß nicht zum Permafrost. Die Oberflächenbedeckung oberhalb von Permafrost wird als „aktive Schicht“ bezeichnet, da hier die Temperatur saisonal über 0°C steigen kann. In den Alpen variiert die Mächtigkeit der aktiven Schicht zwischen 0.5 und 8 m. Im Unterschied zu Permafrost in den hohen Breiten wird Permafrost im Hochgebirge viel stärker von den topographischen Verhältnissen beeinflusst. Daher ist die Verbreitung von Permafrost räumlich sehr heterogen.

Permafrost in Bergregionen reagiert sehr sensibel auf klimatische Veränderungen. Während der letzten Sommer beobachtete man nicht nur eine weitaus höhere Intensität und Häufigkeit von Felssturzereignissen sondern auch zahlreiche Murgänge in Permafrostgebieten im gesamten Alpenraum. Beispiele solcher Ereignisse sind der Einsturz der Moräne bei Mulinet, die Felsstürze am Matterhorn und Thurwieser, das Murgangereignis in Guttannen sowie zahlreiche kleinere Ereignisse. Mit Permafrost und Permafrostdegradation zusammenhängende Naturgefahren betreffen Personen, die im Hochgebirge unterwegs sind, Verkehrs- und Tourismusinfrastrukturen, öffentliche Infrastrukturen sowie Siedlungen. Die verantwortlichen Akteure und Institutionen sind daher aufgefordert, diese Gefahren in ihren Tätigkeiten entsprechend zu berücksichtigen. In einigen Gebieten müssen konkrete Maßnahmen zum Umgang mit diesen Gefahren getroffen werden. Ein weiterer Aspekt von Permafrost ist der Beitrag des Ausschmelzens von Permafrosteis auf den Wasserhaushalt von einzelnen hochalpinen Einzugsgebieten.



Hangbewegung. Foto: A. Zischg



Abbruchfläche eines Felssturzes. Foto: V. Mair



Erosion in fossilem Blockgletscherschutt. Foto: A. Zischg



Blockgletscher. Foto: A. Zischg



Bodensenkung und darauf folgende Anpassung des Fundaments. Foto: A. Zischg

### Das Projekt

Das wichtigste Ziel dieses Projektes bestand darin, einen wesentlichen Beitrag zum Schutz des Lebensraumes vor Naturgefahren, die direkt oder indirekt mit Permafrost und Permafrostdegradation zusammenhängen, zu leisten. Zu diesem Zwecke wurde eine gemeinsame Strategie entwickelt, wie mit Permafrost, Permafrostdegradation und den damit zusammenhängenden Naturgefahren in einem sich erwärmenden Klima umgegangen werden kann. Um die zukünftige Entwicklung des Permafrosts beobachten und messen zu können, wurde ein alpenweites Netzwerk für das Permafrostmonitoring eingerichtet. Ein weiteres Ziel des PermaNET Projektes war die Unterstützung der Entwicklung von regionalen und lokalen Anpassungsstrategien durch die Bereitstellung von Daten und Fakten über den klimasensitiven Landschaftsfaktor Permafrost sowie von Empfehlungen und Entscheidungshilfen zum Umgang mit Permafrost. Dafür war es notwendig, die räumlichen Lücken in den Datensätzen zur Permafrostverbreitung und im bestehenden Permafrost-Messnetz zu schließen. Es wurden ein Inventar der Permafrost-Nachweise und eine Permafrostkarte für den gesamten Alpenraum ausgearbeitet. Das Projekt setzte sich weiters das Ziel, den Alpenraum zu einer Modellregion in Hinblick auf Forschung und Überwachung von Permafrost zu machen, indem neue und viel versprechende Technologien zur Permafrostdetektion und zum Permafrostmonitoring getestet und gemeinsame Lösungen für die Anpassung der Praxis des Risikomanagements an diese spezifischen Auswirkungen des Klimawandels gefunden wurden.

Die Projektaktivitäten wurden auf zwei administrative Arbeitspakete (WP), ein Arbeitspaket für Öffentlichkeitsarbeit und vier wissenschaftlich-technische Arbeitspakete aufgeteilt. Die technischen Arbeitspakete wurden von WP1 „Projektvorbereitung“, WP2 „Projektmanagement“ und WP3 „Information & Öffentlichkeitsarbeit“ unterstützt. Letzteres unterstützte zudem die Verbreitung der Produkte und Empfehlungen.

Das Arbeitspaket WP4 „Netzwerk für das Permafrostmonitoring“ hatte zum Ziel, Metadaten über bereits laufende Monitoringaktivitäten im Alpenraum zu sammeln, das Messnetz auszuweiten und Richtlinien für die Errichtung von weiteren Messstationen für das Permafrostmonitoring zu erarbeiten. Es wurde ein Metadatensatz über Messstationen für das Permafrostmonitoring im Alpenraum erstellt. Dieser schließt Informationslücken und unterstützt die Errichtung eines gemeinsamen Netzwerkes für Permafrostmonitoring im Alpenraum. Außerdem wurden im WP4 zusätzliche Messstationen errichtet, die das bereits bestehende Messnetz erweitern. Die neuen Stationen liefern zusätzliche Daten über den aktuellen thermischen Zustand des Permafrosts und dessen zeitliche Entwicklung an ausgewählten Standorten.



PermaNET Eröffnungskonferenz. Foto: Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol

Das Arbeitspaket WP5 „Permafrost und Klimawandel“ hatte zum Ziel, Daten über die Verbreitung des Permafrosts im Alpenraum zu sammeln und zu erarbeiten. Im WP5 wurden ein alpenweites Inventar von Nachweisen über das Vorhandensein von Permafrost sowie eine alpenweite Karte zur potenziellen Verbreitung des Permafrosts erstellt. Diese Karten der Permafrostverbreitung stellen die Basis für eine Beurteilung der Folgen des Klimawandels auf Permafrost und den damit zusammenhängenden Prozessen dar. Außerdem bilden sie die Voraussetzung für die Formulierung von Strategien zur Anpassung der verschiedenen wirtschaftlichen Tätigkeiten des Menschen im Hochgebirge an diesen spezifischen Aspekt des Klimawandels. Es wurde ein Bericht erarbeitet, der die thermischen und geomorphologischen Entwicklungen von Permafrost aufgrund des vergangenen und zukünftigen Klimawandels in den Alpen aufzeigt. Die jüngsten Veränderungen im Permafrost wurden dabei anhand von ausgewählten Fallstudien analysiert und mögliche zukünftige Veränderungen aufgezeigt. Außerdem wurde ein Handbuch über die Methoden und Techniken zur Kartierung und Erkennung von Permafrost ausgearbeitet, um die Auswahl der verschiedenen Techniken in der Praxis zu erleichtern.

Das Arbeitspaket WP6 „Permafrost und Naturgefahren“ stellte die Basis für die Entwicklung einer gemeinsamen Strategie zum Umgang mit Permafrost und den damit verbundenen Naturgefahren im Zusammenhang mit dem Klimawandel dar. Anhand von Fallstudien aus dem ganzen Alpenbogen wurden Empfehlungen für Entscheidungsträger erarbeitet.

Das Arbeitspaket WP7 „Permafrost und Wasserressourcen“ analysierte die Bedeutung von Permafrosteis für den Wasserhaushalt von alpinen Einzugsgebieten. Außerdem wurden Empfehlungen für lokale Umweltagenturen zur Untersuchung der Wasserqualität ausgearbeitet, um die Belastung des Quellwassers mit Schwermetallen zielgerichtet zu erfassen.

### Die Partnerschaft

Viele der für das Naturgefahren- und Risikomanagement zuständigen Behörden beschäftigen sich mit Permafrost und den damit verbundenen Naturgefahren. Dennoch variieren die Kenntnisse über das Thema sektoral und regional sehr stark. Permafrost ist auch ein aktuelles Thema von Forschungsaktivitäten. Deshalb hat das Amt für Geologie und Baustoffprüfung der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol (Italien) das Projekt PermaNET initiiert und ein interdisziplinäres und grenzüberschreitendes Projektteam gegründet. Alle Alpenländer mit wesentlichen Flächenanteilen in Permafrostbereichen wurden in das Projekt miteinbezogen. Die Projektpartner sind entweder nationale oder regionale Behörden aus dem Bereich Naturgefahrenmanagement, Umweltschutz, Forstplanung, Wildbachverbauung, Meteorologie, Zivilschutz und Wassernutzung. Durch den Einbezug von wissenschaftlichen Instituten wurde der Wissenstransfer von den Forschern zu den Entscheidungsträgern unterstützt. Zu bestimmten Themen wurden externe Projektbeobachter (Observer), Interessensvertreter, Nichtregierungsorganisationen, Betreiber von Seilbahnanlagen oder externe Experten eingeladen. Nationale und länderübergreifende Akteure wurden bei der Erstellung des gemeinsamen Strategiepapiers konsultiert. Die am stärksten von der Thematik betroffenen Projektbeobachter ha-

ben die Projektaktivitäten aktiv verfolgt und maßgebliche Beiträge geliefert.

Die meisten Alpenregionen sind vom Klimawandel und dessen Auswirkungen auf Permafrost und die damit verbundenen Naturgefahren mehr oder weniger betroffen. Daher war eine Zusammenarbeit zwischen zuständigen Verwaltungen und Wissenschaftlern im gesamten Alpenraum unumgänglich für die Umsetzung dieses Projektes. Der Einbezug von verschiedenen Interessensvertretern und Fachgebieten gekoppelt mit engen Kontakten zu anderen wichtigen Institutionen (z.B. Tourismus, Trinkwasserversorgung, Skigebieten, externe Experten) erlaubte den Zugang zu einem breiten Erfahrungsspektrum. Diese Zusammenarbeit machte es möglich, ganzheitliche Lösungsansätze zu finden, förderte den Austausch von Wissen, Daten und Methoden und erlaubte damit die Ausnützung von Synergien sowie die Reduktion von Kosten.



Exkursion des PermaNET-Teams. Foto: Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol

## Die Partnerschaft

Die Partnerschaft besteht aus folgenden Institutionen:

### Projektpartner

Autonome Provinz Bozen – Südtirol, Amt für Geologie und Baustoffprüfung / Provincia Autonoma di Bolzano, Ufficio Geologia e Prove Materiali

Bayerisches Landesamt für Umwelt, Abteilung 10: Geologischer Dienst, Wirtschaftsgeologie, Bodenschutz

ARPA Piemonte - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, Centro regionale per le ricerche territoriali e geologiche

Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato territorio e ambiente, Dipartimento territorio e ambiente, Direzione Ambiente

Regione del Veneto, Direzione Geologia e Georisorse, Servizio Geologico

Provincia Autonoma di Trento, Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture, Servizio Geologico

Österreichisches Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Universität Innsbruck, Institut für Geographie

Universität Graz, Institut für Geographie und Regionalforschung

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)

Université Joseph Fourier – Grenoble, Institut de Géographie Alpine, Laboratoire PACTE-Territoires

Centre National de la Recherche Scientifique – Laboratoire EDYTEM

Grenoble INP, GIPSA-lab

Schweizerisches Bundesamt für Umwelt BAFU

### Transnationales Projektmanagement

Abenis Alpinexpert GmbH/srl

### Aktive Observer

Universität Zürich  
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

### Observer

International Research Society INTERPRAEVENT

Ministero per la tutela dell'ambiente, del Territorio e del Mare, Direzione generale per la ricerca ambientale e lo sviluppo

Slovenian Torrent Erosion Control Service



Partner Meeting. Foto: Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol

Regione Piemonte, Direzione Ambiente, Settore Pianificazione Aree Protette

Seilbahnen Sulden

Dolomiti Superski

Skigebiet Ratschings-Jaufen

Confindustria Trento, Associazione Nazionale Esercenti Funiviaristi (A.N.E.F.), Sezione impianti a fune

Società degli Alpinisti Tridentini

Bayerische Zugspitzbahn Bergbahn AG

Alpenverein Südtirol

Parco Naturale Adamello Brenta

Direction Régionale de l'Environnement Rhône Alpes

Pôle Grenoblois Risques Naturels

Office National des Forêts – Délégation Nationale Risques Naturels – RTM, Direction Technique Restauration des Terrains en Montagne

Parc National des Ecrins

Compagne des Guides de Chamonix

Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Geoinformation

Land Salzburg, Landesgeologischer Dienst

Land Steiermark, Landes-Umwelt-Information Steiermark (LUIS)

Land Kärnten, Hydrographischer Dienst

Land Vorarlberg, Landesvermessungsamt

### Netzwerk für das Permafrostmonitoring

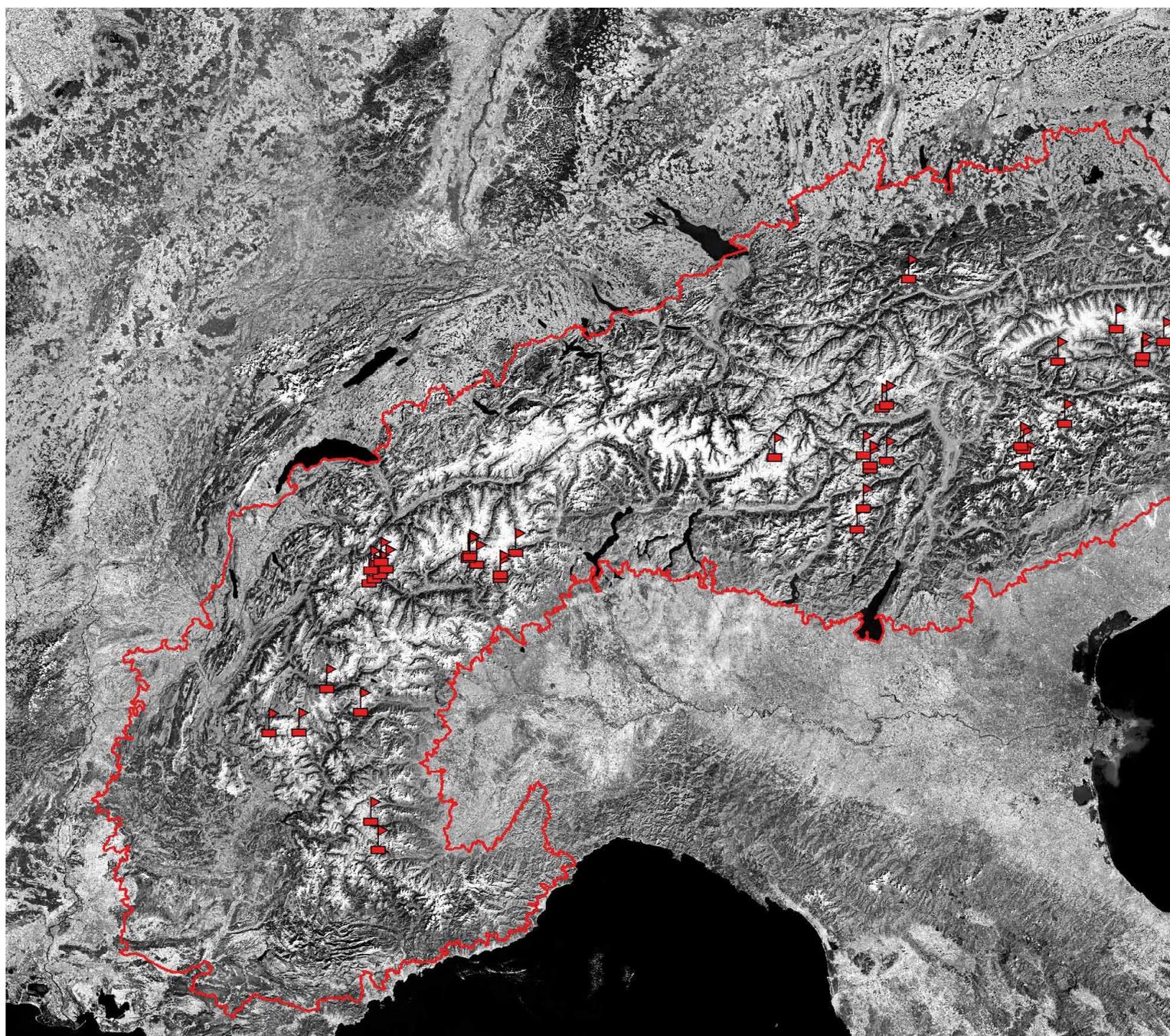
Im Rahmen des PermaNET Projektes wurde eine detaillierte Erhebung von bereits bestehenden Monitoringstationen durchgeführt. Die gesammelten Daten wurden dazu verwendet, einen alpenweiten Überblick der bereits laufenden Monitoringaktivitäten zu erhalten, Gebiete ohne Monitoringaktivitäten aufzuzeigen und Richtlinien für die Installation von weiteren Monitoringstationen zu formulieren. An ausgewählten Standorten wurden neue Monitoringstationen eingerichtet und instrumentiert.

Das alpenweite Monitoring Netzwerk wurde um mehr als 40 Monitoringstationen erweitert, die verschiedene Parameter

und Eigenschaften des Permafrosts in Fels und schuttbedeckten Böden messen.

Die Installation der neuen Monitoringstationen wurde teilweise durch das PermaNET Projekt finanziert, wohingegen die langfristige Instandhaltung durch die Institution oder Behörde garantiert wird, welche die Messinstrumente installiert hat.

Dem Beispiel des Schweizerischen Permafrostmonitoring Netzwerkes PERMOS folgend, wurden nationale Permafrostmonitoring Netzwerke gegründet. In Frankreich wurde das PermaFRANCE Netzwerk gegründet. In Italien und Österreich ist die Gründung nationaler Netzwerke in Vorbereitung. Die nationalen Monitoring Netzwerke koordinieren

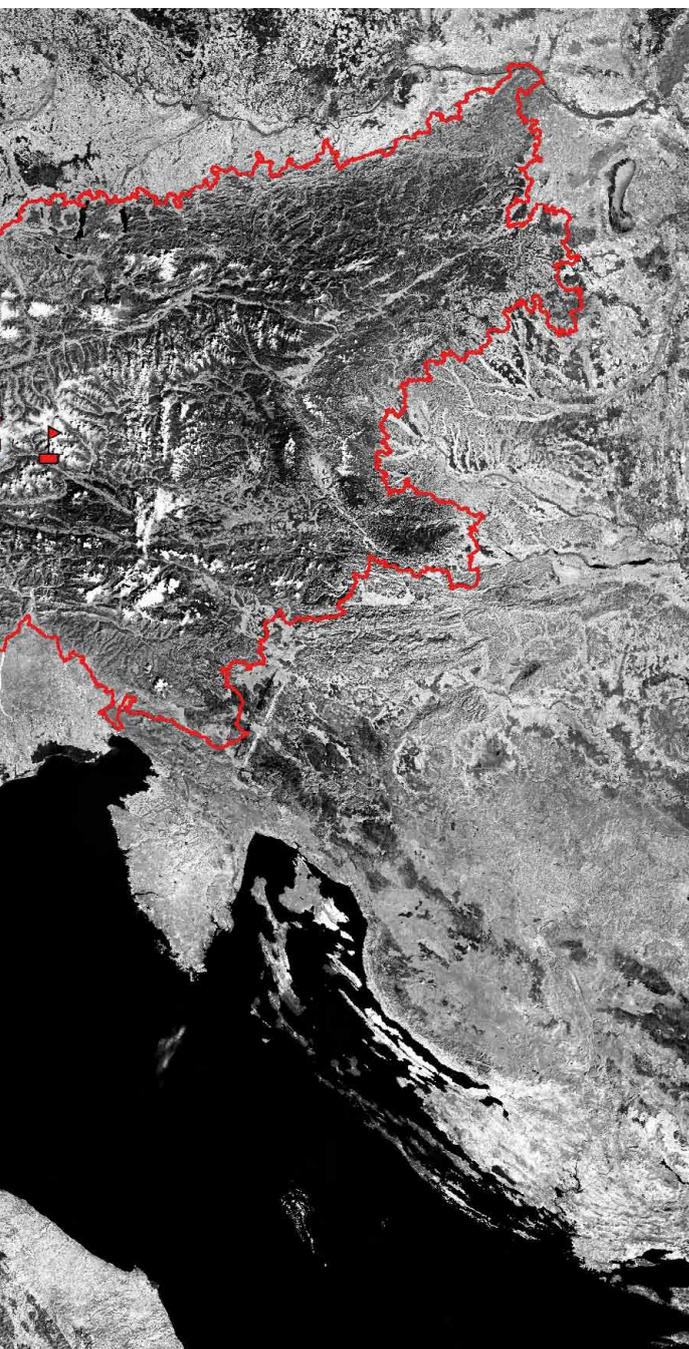


**Abb. 1:** Verteilung der Permafrostmonitoring Stationen in den Alpen, welche Teil des PermaNET Monitoring Netzwerkes sind. Die Metadaten der Stationen werden kontinuierlich zusammen mit dem Inventar der Permafrost-Nachweise aktualisiert.

## Netzwerk für das Permafrostmonitoring

die Monitoringaktivitäten auf nationaler Ebene. Alle Monitoringstationen, aus denen sich das Netzwerk zusammensetzt, sind im Inventar der Permafrost-Nachweise enthalten (siehe dazu das nächste Kapitel), in dem die Metadaten und Indikatoren der gesammelten Daten periodisch aktualisiert werden. Die Monitoringaktivitäten werden langfristig von den jeweiligen lokalen, regionalen oder nationalen Umweltbehörden finanziert.

Es wurden Richtlinien für die Installation und Instandhaltung der Monitoringstationen erarbeitet, um die Kompatibilität und Vergleichbarkeit der gemessenen Daten auch im Falle von zukünftigen Erweiterungen des Messnetzes zu gewährleisten.



Eine Auflistung der installierten Permafrostmonitoring Stationen und die **Richtlinien für die Installation und Instrumentierung von Messstationen** können unter folgendem Link eingesehen werden:

[www.permanet-alpinespace.eu/products/monitoringnetwork](http://www.permanet-alpinespace.eu/products/monitoringnetwork)

Im Rahmen des PermaNET Projektes errichtete oder ausgebaute Permafrostmonitoring Stationen.

- A-1 Hinteres Langtal
- A-2 Weissen Cirque
- A-3 Dösen Valley
- A-4 Hoher Sonnblick
- A-5 Goldbergspitze
- A-6 Hochreichart
- F-1 Orelle
- F-2 Laurichard
- F-3 Deux Alpes
- F-4 Aiguille de Midi
- F-5 Les Drus
- F-6 Bérard
- F-7 Casse des Clausins
- F-8 Foréant
- F-9 Dérochoir
- D-1 Zugspitze
- I-1 Schnals - Grawand
- I-2 Schnals - Lazaun
- I-3 Ulten - Rossbänk
- I-4 Rein in Taufers - Napfen
- I-5 Prags - Croda Rossa „Cadin del Ghiacciaio“
- I-6 Prags - Croda Rossa „Cadin di Croda Rossa“
- I-7 Grödnerjoch - Lech del Dragon
- I-8 Sulden - Madritsch
- I-9 Cavaion (GST)
- I-10 Cavaion (borehole)
- I-11 Lobbie
- I-12 Presena
- I-13 Cima Uomo
- I-14 Matterhorn Carrel South
- I-15 Matterhorn Carrel North
- I-16 Matterhorn Cheminee new
- I-17 Matterhorn Cheminee old
- I-18 Matterhorn Oriondè - frac
- I-19 Matterhorn Oriondè – not frac
- I-20 Col d'Entrevres South
- I-21 Col d'Entrevres North
- I-22 Grandes Jorasses South-right
- I-23 Grandes Jorasses South-left
- I-24 Col Peuterey North
- I-25 Aiguille Marbree
- I-26 Cime Bianche Pass - shallow
- I-27 Cime Bianche Pass - deep
- I-28 Piz Boè
- I-29 Mt. Moro Pass
- I-30 Salati Pass Mosso Inst.
- I-31 Salati Pass Corno dei Camosci
- I-32 Sommeiller Pass
- I-33 La Coletta Pass
- I-34 Gardetta Pass

Die Schweiz war das erste Alpenland, welches die Permafrost Überwachungsaktivitäten auf nationaler Ebene koordinierte. Alle Permafrost Monitoring Stationen der Schweiz werden von PERMOS (Swiss Permafrost Monitoring Network, [www.permos.ch](http://www.permos.ch)) koordiniert.

PERMOS und PermaFRANCE fassen die Monitoringdaten periodisch zusammen.

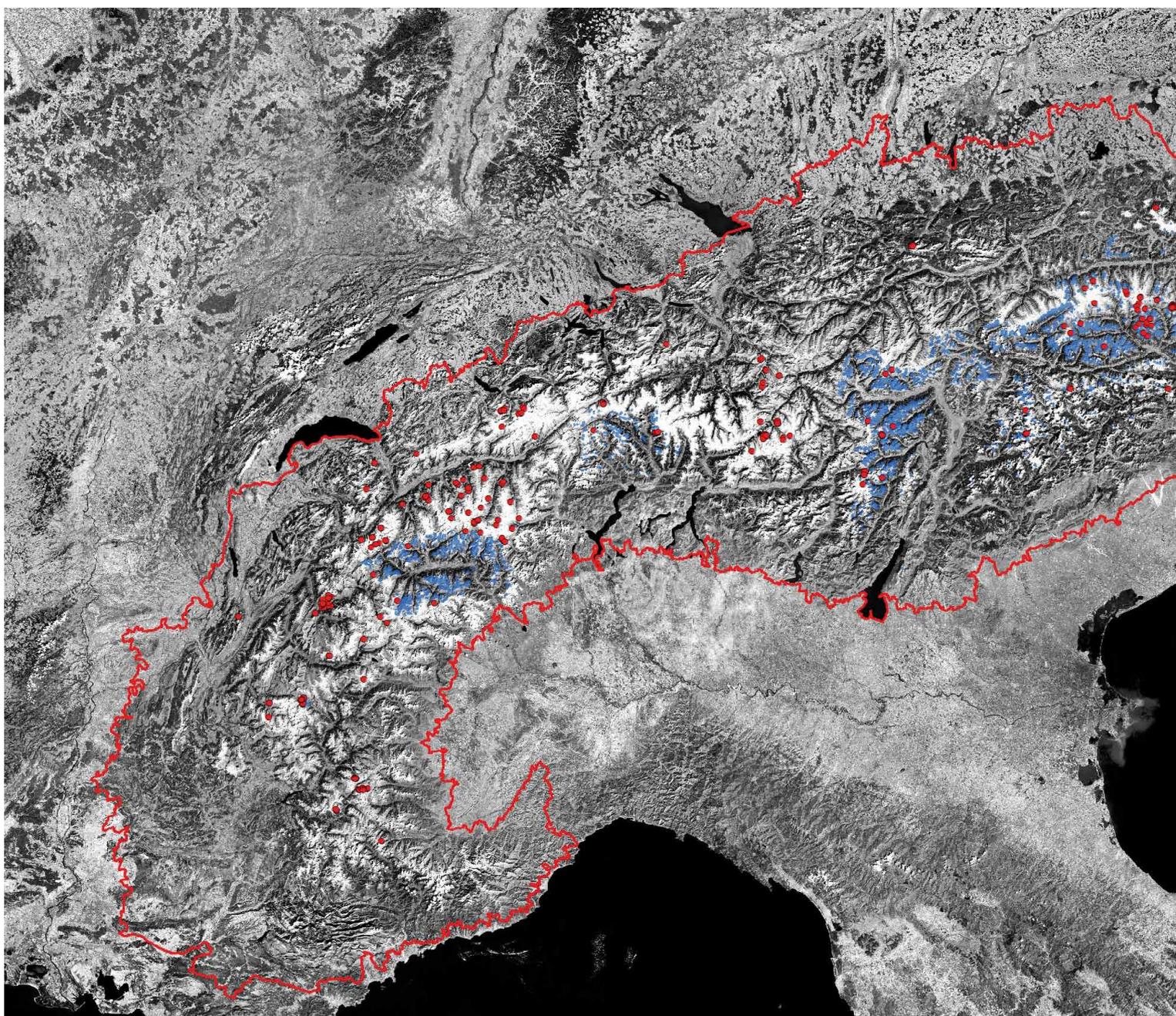
### Permafrostverbreitung in den Alpen

Ein wichtiges Vorhaben von PermaNET war die Erstellung einer Karte über die Verbreitung des Permafrosts in den Alpen. In einem Inventar wurden alle Informationen zusammengefasst, die das Vorkommen oder Nicht-Vorkommen von Permafrost an einem bestimmten Ort bestätigen. Dieses Inventar der Permafrost-Nachweise bildete die Grundlage für die Entwicklung eines statistischen Modells zur Erarbeitung einer Karte der potenziellen Permafrostverbreitung.

### Inventar der Permafrost-Nachweise

Als Grundlage für die Entwicklung des Verfahrens für die Modellierung der Permafrostverbreitung im gesamten Al-

penraum wurden die bestehenden Informationen über das Vorhandensein bzw. Nicht-Vorhandensein von Permafrost nach einem einfachen Standard zusammengestellt. Dieses Inventar hat nur wenige Variablen und ermöglicht damit Forschern und Praktikern eine einfache Dateneingabe in die Datenbank. Der Nachweis des Permafrostvorkommens kann entweder durch Bohrlochtemperatur, Untergrundtemperatur, Abbruchflächen von Fels/Bergstürzen, Grabungen oder Aufschlüsse, Bewegung der Geländeoberfläche, geophysikalische Untersuchungen und Blockgletscher erbracht werden. Jeder Nachweis wird mittels eines Punktes räumlich lokalisiert. Das Blockgletscherinventar wird getrennt von den punktuellen Informationen verwaltet; die einzelnen Blockgletscherinventare der Projektpartner wurden zu



**Abb. 2:** Karte der Permafrost-Nachweise. Das homogenisierte Inventar enthält derzeit über 400 Punkte mit Hinweisen für Permafrost (rote Punkte) und ca. 5.000 Blockgletscher (blaue Flächen).

## Permafrostverbreitung in den Alpen

einem einzigen Blockgletscherinventar für den Alpenraum zusammengeführt. Die Entwicklung des Inventars der Permafrost-Nachweise wurde von der Universität Zürich und vom Schweizerischen Institut für Schnee und Lawinenforschung WSL/SLF unterstützt.

Neben dem PermaNET-Team und den Projektbeobachtern stellten weitere 35 einzelne Forscher und Institutionen wertvolle Daten für die Erweiterung des Inventars zur Verfügung. Diese Daten wurden an das Format des Inventars angepasst und in dasselbe aufgenommen. Nach dem Importieren von bereits bestehenden Daten wurden in Gebieten mit lückenhafter Datenlage neue Kartierungen durchgeführt. Dies erfolgte im Rahmen des PermaNET-Projektes in Zusammenarbeit mit regionalen und/oder lokalen geologischen

Diensten, Forschungsinstituten, Skiliftbetreibern, Energiegesellschaften oder Bergführervereinigungen.

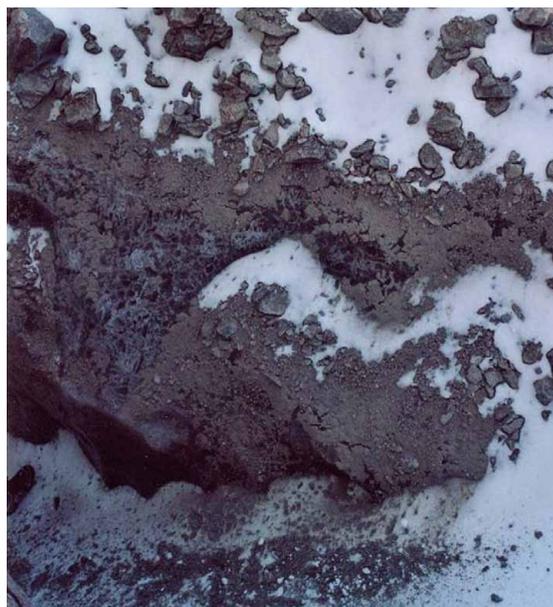
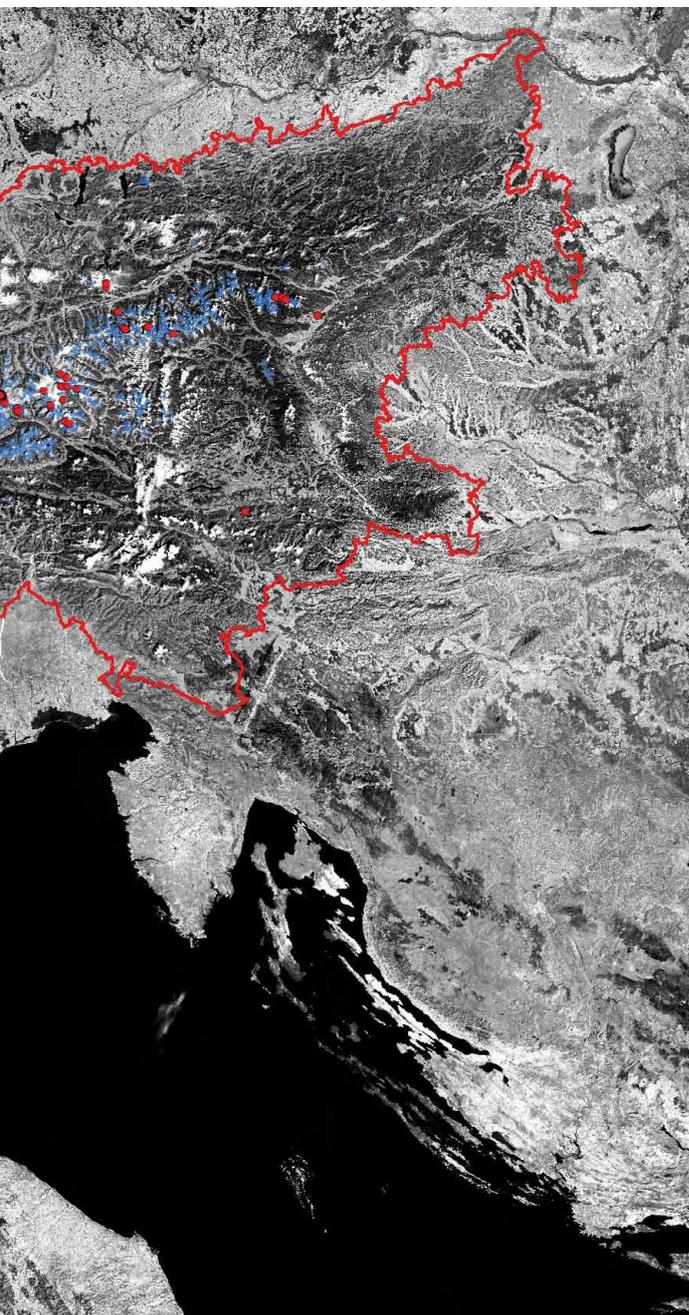
Die Gesamtzahl von punktuellen Permafrost-Nachweisen beläuft sich derzeit auf über 400 (April 2010) im Bereich von 44.29 bis 47.47° N und von 5.91 bis 14.88° E; es sind die gesamten Alpenländer mit Ausnahme von Monaco, Liechtenstein und Slowenien abgedeckt.

Das Blockgletscher-Inventar umfasst ca. 5000 Blockgletscher aus sieben Inventaren aus den Ländern Italien, Österreich, Schweiz und Frankreich. Im Moment enthält das Inventar sowohl punktuelle als auch regional flächendeckende Erhebungen und kann somit noch nicht als vollständig bezeichnet werden. Das Inventar der Permafrost-Nachweise wurde aber als Datenbank im Internet veröffentlicht und kann auch nach Projektabschluss laufend ergänzt werden.

Das **Inventar der Permafrost-Nachweise** kann unter folgender Adresse abgerufen werden:

[www.permanet-alpinespace.eu/products/PED](http://www.permanet-alpinespace.eu/products/PED)

Beispiele für Permafrost-Nachweise:



Aufschlüsse mit sichtbarem Untergrundeis. Foto: X. Bodin



Aktiver Blockgletscher. Foto: X. Bodin



Abbruchfläche eines Felssturzes mit freigelegtem Eis. Foto: L. Trucco.

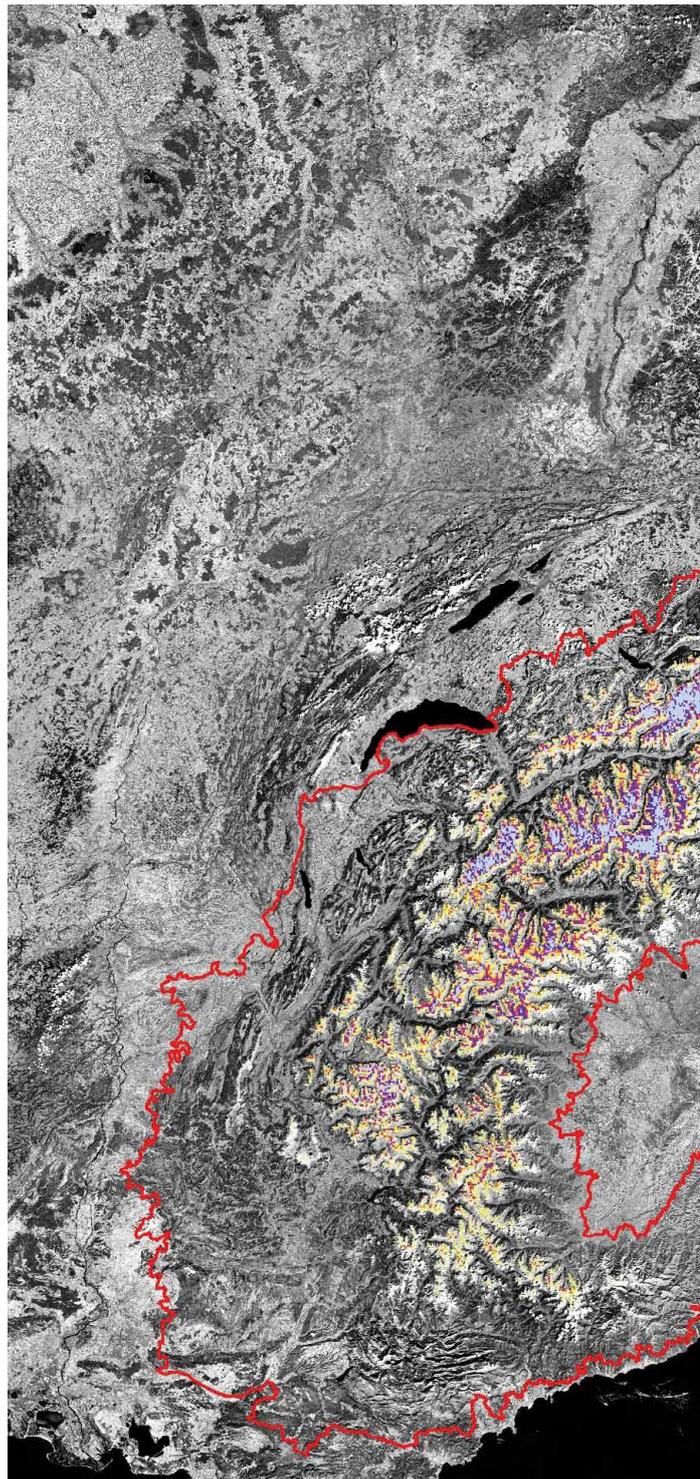


Bohrlochtemperaturen. Foto: P. Deline

### Modellierung der Permafrostverbreitung

Das statistische Modell zur Permafrostverbreitung enthält zwei Sub-Modelle, eines für Gebiete mit Schutt und ein zweites für steile Felsflanken. Die Modelle wurden auf Basis des Inventars der Permafrost-Nachweise kalibriert. Die erklärenden Variablen sind die Jahresmitteltemperatur, die potentielle Sonneneinstrahlung und der mittlere Jahresniederschlag. Diese Werte können für die gesamten Alpen berechnet werden und helfen bei der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, ob Blockgletscher intakt sind und ob die Temperatur der Gesteinsoberfläche unter 0 °C liegt. Um die Permafrostverbreitung außerhalb von Blockgletschern mo-

dellieren zu können, wurden offset-Therme zur Beschreibung der thermischen Charakteristika von spezifischen Geländeformen eingeführt. Diese Therme beschreiben, um wie viel wärmer oder kälter bestimmte Geländeformen im Vergleich zum Modell sind. Nachdem die Definition dieser offset-Therme in gewisser Hinsicht subjektiver Natur ist, sind die Modellergebnisse nicht als Wahrscheinlichkeiten zu interpretieren, sondern werden als ein Permafrost-Index bezeichnet.



## Permafrostverbreitung in den Alpen

### Karte der Permafrostverbreitung

Die Permafrostkarte zeigt den farblich abgestuften Permafrost-Index und wird normalerweise zur Orientierung über eine Grundkarte gelegt. Gletscher, die laut Definition nicht zum Permafrost zählen, werden durch eine eigene Signatur dargestellt. Die Legende umfasst auch immer einen Interpretationsschlüssel und erlaubt somit eine bessere Interpretation der Karte in Hinblick auf die lokalen Gegebenheiten des Untergrundes. Die Karte wurde von der Universität Zü-

rich in der Rolle als PermaNET Observer in Zusammenarbeit mit dem PermaNET-Team ausgearbeitet und ist online in Form eines GIS-Layers bzw. in Google Earth mit einer räumlichen Auflösung von ca. 30 m verfügbar.

Die **Permafrostkarte** kann unter folgender Adresse abgerufen werden:  
[www.permanet-alpinespace.eu/products/pfmap](http://www.permanet-alpinespace.eu/products/pfmap)

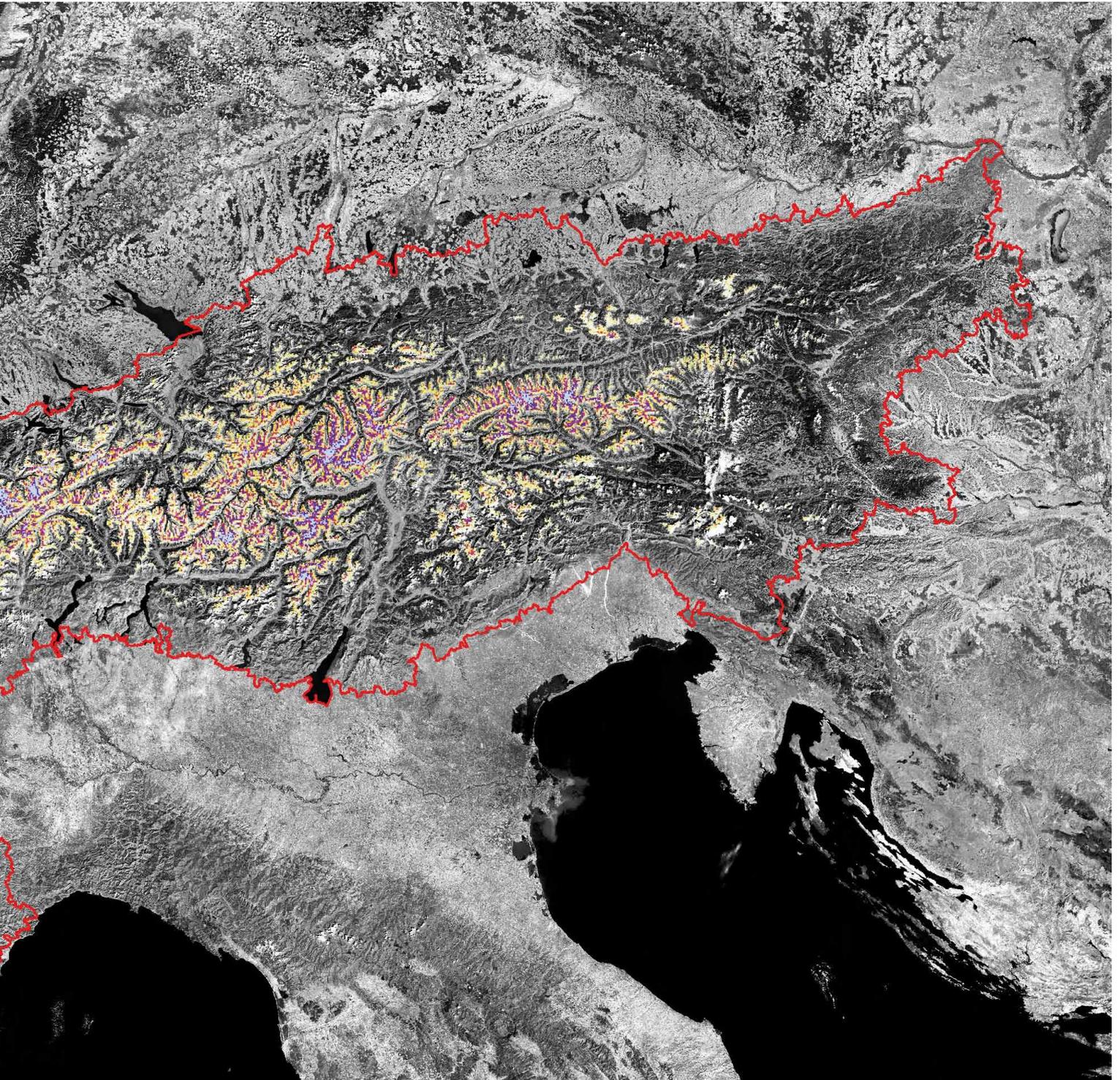
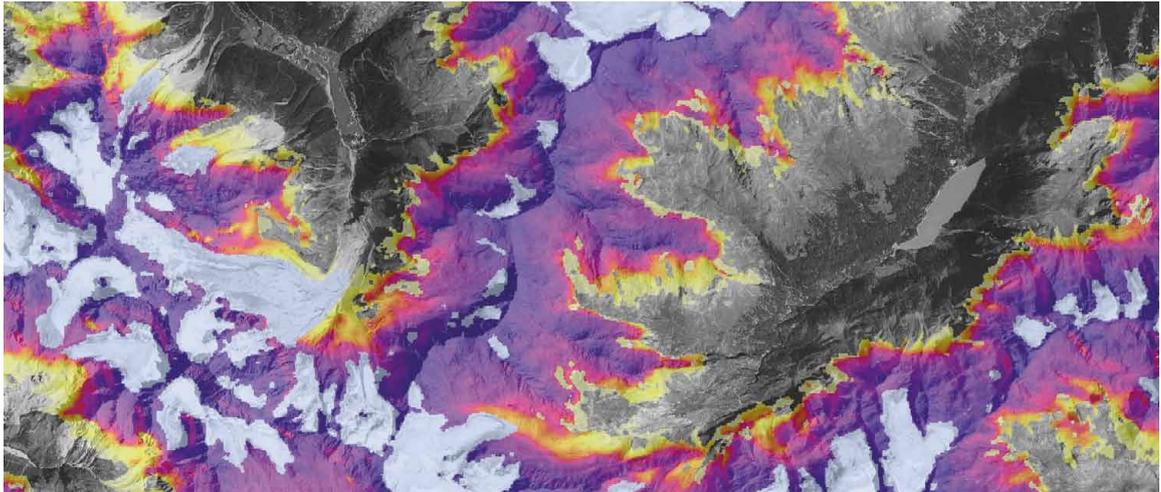


Abb. 3: Karte der modellierten Permafrostverbreitung in den Alpen.



**Abb. 4:** Lokaler Ausschnitt der alpenweiten Permafrostkarte. Der farblich gekennzeichnete Permafrost-Index wird über eine Grundkarte gelegt.

### Kartenlegende

Diese Karte zeigt einen qualitativen Index, der die Möglichkeit des Vorhandenseins von Permafrost beschreibt. Er ist für den gesamten Alpenraum einheitlich und dient vor allem der praktischen Anwendung bei planerischen Arbeiten oder bei der Instandhaltung der Infrastruktur im Hochgebirge.

	<b>Blau:</b> Permafrost unter nahezu allen Bedingungen
	<b>Violett:</b> Permafrost meist unter kalten Bedingungen
	<b>Gelb:</b> Permafrost nur unter sehr kalten Bedingungen
	<b>Gletscher</b>

Einige wichtige lokale Parameter wie beispielsweise Untergrundmaterial oder Schneeverhältnisse wurden bei der Erstellung der Karte nicht oder nur teilweise berücksichtigt. Dennoch können diese Faktoren starke Schwankungen in der Bodentemperatur hervorrufen, und zwar auch bei ansonsten identischen topographischen Verhältnissen. Aus diesem Grund liegt der Legende ein **Interpretationsschlüssel** bei (siehe rechts), um lokalspezifisch die Karte besser interpretieren zu können. So würde man beispielsweise Permafrost nicht in feinem Material oder kompaktem Gestein erwarten, obwohl man auf der Karte eine gelbe Signatur vorfindet. Unter speziellen Umständen kann Permafrost auch außerhalb des farblich markierten Bereichs auftreten. Die Karte zeigt also nur modellierte Bedingungen, eine höhere Gewissheit über das Vorhandensein von Permafrost an einem bestimmten Ort kann nur mittels Geophysik oder Bohrungen erreicht werden.

Diese Karte wurde von der Universität Zürich im Rahmen des Projekts PermaNET ausgearbeitet.

Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. & Noetzi J. 2011: A statistical permafrost distribution model for the European Alps, *The Cryosphere Discussions*, 5, 1419-1459, [www.the-cryosphere-discuss.net/5/1419](http://www.the-cryosphere-discuss.net/5/1419)

Paul, F., Frey, H. & Le Bris, R. (subm.): A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results. *Annals of Glaciology*, 52(59).

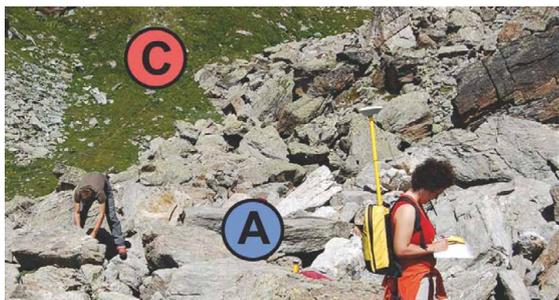


Foto: J. Fiddes



Foto: J. Fiddes



Foto: S. Gruber

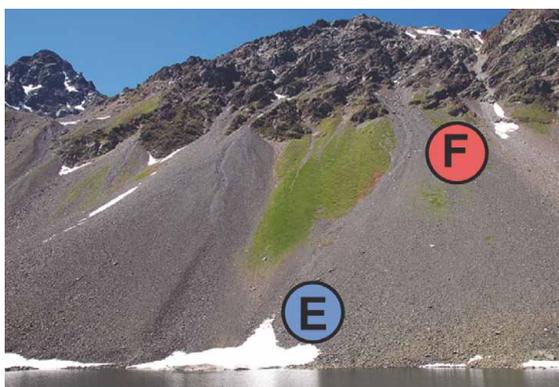


Foto: M. Phillips

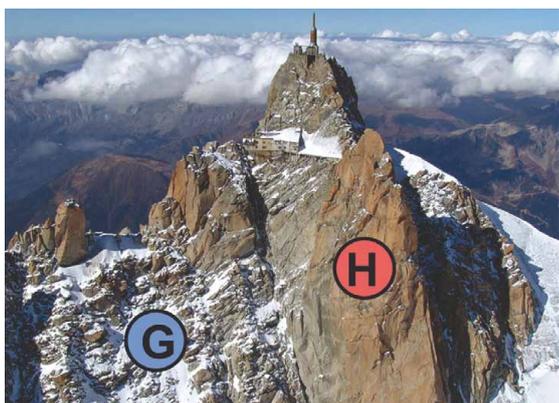


Foto: S. Gruber

## Interpretationsschlüssel

### Blockgröße, Bodeneigenschaften und Vegetation

Groblockwerk mit offenen bzw. nicht mit feinem Material verfüllten Hohlräumen (A) weist auf kalte Verhältnisse hin. Anstehender Fels, feinkörnige oder groblockige Böden mit feinkörnigen Hohlraumfüllungen (B) deuten auf warme Bedingungen hin. Eine dichte Vegetationsbedeckung (C) impliziert normalerweise das Fehlen von Permafrost.

### Blockgletscher

Aktive (intakte) Blockgletscher (D) lassen sich durch Bewegungsindikatoren wie eine steile Stirn erkennen. Es sind meist zuverlässige visuelle Indikatoren von Permafrostvorkommen innerhalb des kriechenden Schuttkörpers, sie erlauben jedoch keine einfachen Rückschlüsse auf die angrenzenden Gebiete.

### Hanglage und perennierende Schneefelder

Die genaue Position im Hang kann die Bodentemperatur beeinflussen, da es an bestimmten Stellen zur Sortierung von Blockgrößen, zu Luftzirkulation im Schutthang und zu Schneeumlagerungen kommen kann. Es ist nicht selten, dass der Hangfuß (E) kühlere Temperaturen aufweist. Er enthält nämlich meist größere Mengen grobes Material und wird durch Lawinenschneeablagerungen gekühlt. Der obere Hangbereich (F) weist häufig relativ warme Temperaturbedingungen auf. Im Normalfall wird hier der Untergrund von geringeren Korndurchmessern mit höherem Feinanteil in den Hohlräumen geprägt.

### Steile Felswände

Steile Felswände weisen unterschiedliche Heterogenitätsgrade auf, die von den kleinräumigen topographischen Gegebenheiten sowie vom Trennflächengefüge hervorgerufen werden. Heterogene Topographiebedingungen (G) führen häufig zu geringen Schneebedeckungen, guter Durchlüftung sowie zur Ablagerung von Schnee in großen Klüften/Störungen. Sie zeigen lokal kalte Bedingungen an. Steile, glatte Felsen mit geringem Zerklüftungsgrad (H) deuten auf wärmere Verhältnisse hin. Dieser Effekt zeigt sich an sonnenexponierten Felswänden deutlicher als in schattigen Bereichen.

### Permafrost und Naturgefahren

Das WP6 behandelte die Beziehung zwischen Permafrost, Permafrostdegradation und damit zusammenhängenden Naturgefahren unter sich verändernden klimatischen Bedingungen. Die Arbeitsgruppe hat viele Methoden für die Erkennung und für das Monitoring von Massenbewegungen in Permafrostgebieten getestet und evaluiert sowie Empfehlungen für die Berücksichtigung von Permafrost und Permafrostdegradation im Naturgefahrenmanagement formuliert.

#### Welche Naturgefahren treten in Verbindung mit Permafrost auf?

Im Rahmen des Projekts wurde ein state-of-the-art Bericht verfasst, der den Ablauf von geomorphologischen Prozessen beschreibt, die mit Permafrost und Permafrostdegradation zusammenhängen. Die vier Kapitel beschäftigen sich mit der Bewegung von Blockgletschern, mit Murgängen, mit Steinschlag und mit Massenbewegungen sowie deren Auswirkungen auf Infrastrukturen. Jedes Kapitel fasst den aktuellen Wissensstand zusammen und beschreibt Fallbeispiele in den Alpen.

#### Was kann bei einer Veränderung des Permafrosts in Folge der Klimaänderung passieren?

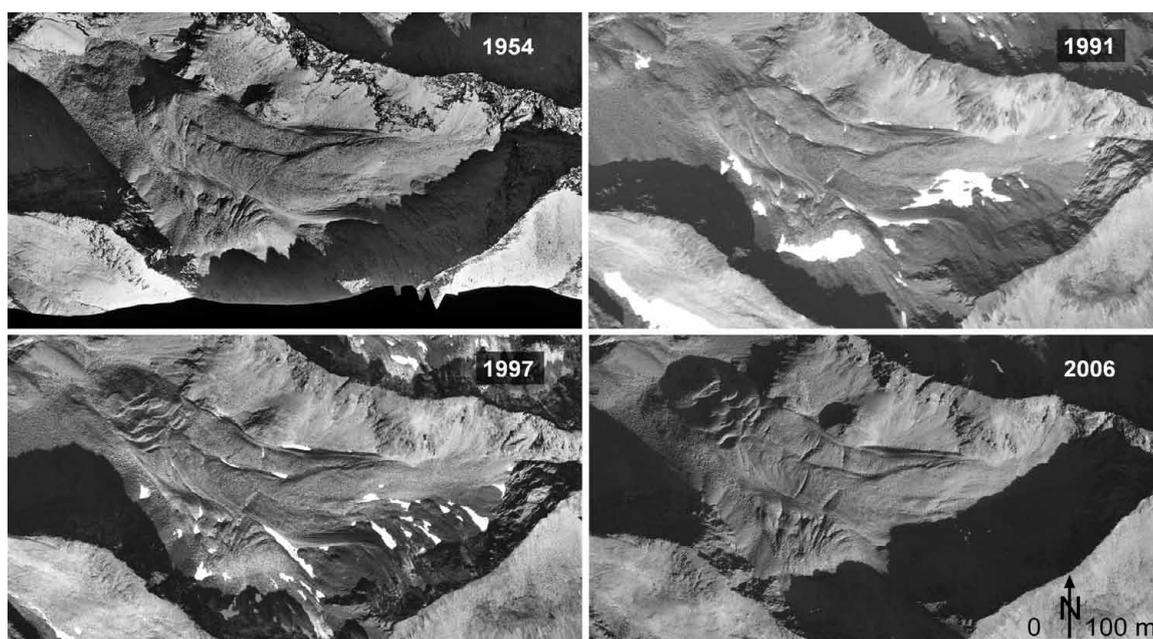
Das Ausschmelzen von Permafrosteis kann verschiedene Folgen haben. Das Ausschmelzen von Untergrundeis im Lockermaterial hat eine Zunahme der Mächtigkeit der aktiven Schicht im Permafrost bzw. im eisreichen Hangschutt zur Folge, der Verlust des Eises als stabilisierendes Bindematerial führt zu einem internen Stabilitätsverlust. Das kann zu Subsidenzerscheinungen in flachen Bereichen oder zu Rutschungen in steileren Hangbereichen und unter Umständen

zu einer Erhöhung des mobilisierbaren Materialvolumens in Wildbächen führen.

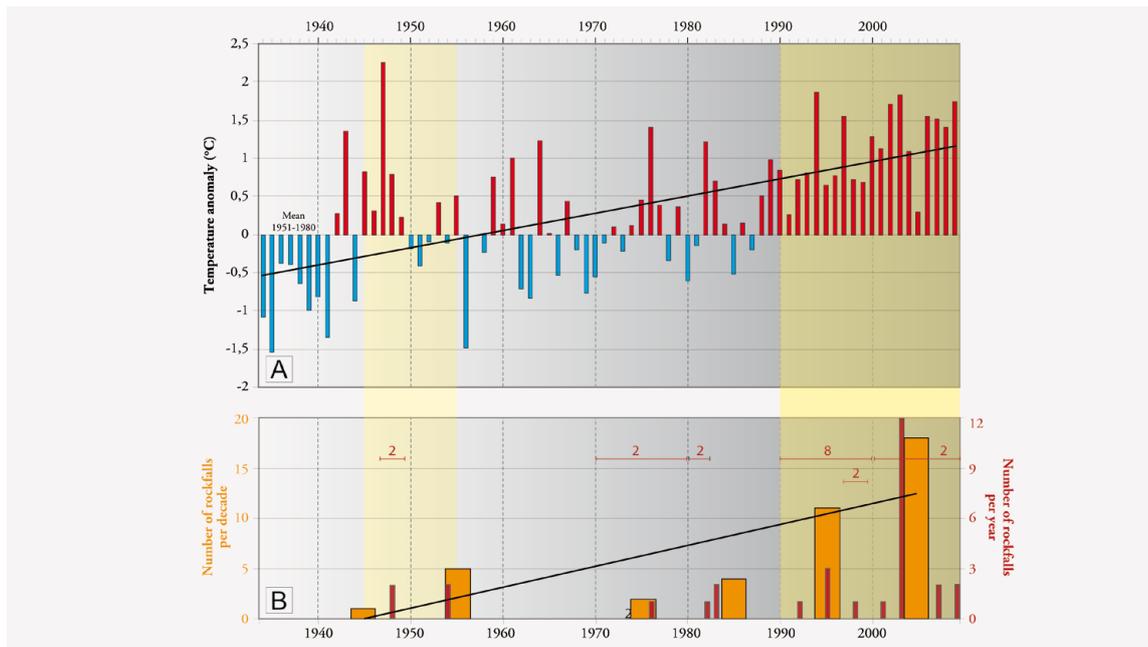
Alle **Geländebewegungen** können Schäden an den betroffenen Infrastrukturen hervorrufen. Langsame Bewegungen können durch Anpassungseingriffe ausgeglichen werden, eine potenzielle Beschleunigung ausgelöst durch die Klimaerwärmung kann solche aber wesentlich erschweren. Auf jeden Fall verursacht das Bauen in Permafrostgebieten zusätzliche Bau- und Instandhaltungskosten und verringert zeitgleich die Lebensdauer der Infrastrukturen.

Unter Beobachtung stehende Blockgletscher weisen klimatisch bedingte **Änderungen der Fließgeschwindigkeit** auf. In den meisten Fällen treten zwischen den einzelnen Jahren nur geringfügige Änderungen der Bewegungsgeschwindigkeit auf, die im Verhältnis zur jährlichen mittleren Bodentemperatur stehen. Eine Erhöhung der Untergrundtemperatur induziert eine Beschleunigung der Bewegung und umgekehrt. In einigen Fällen konnte eine starke und nicht reversible Beschleunigung der Bewegung von einigen Zehnermetern pro Jahr beobachtet werden. Dies kann je nach topographischen Verhältnissen Steinschlag an der Blockgletscherstirn auslösen oder ein Vorrücken bzw. sogar das Zusammenbrechen der Blockgletscherstirn verursachen (Abb. 5 und 6).

**Steinschlag** und Felsstürze stellen Risiken für Bergsportaktivitäten in den Alpen und für Infrastrukturen wie Seilbahnen, Bergbahnen, Straßen oder Skigebieten dar. Große Felsstürze können Siedlungen im Talboden noch in einer großen Entfernung von der Gefahrenquelle bedrohen. Wie die Beobachtung von massivem Eis in vielen Abbruchgebieten nahe legt, sind die Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur während des 20. Jh. (beschleunigt seit den 80iger



**Abb. 5:** Luftbilder des Blockgletschers "Hinteres Langtalkar" (Österreich) zwischen 1954 und 2006. Entstehung von Spalten und Zerfall im Stirnbereich durch aktive Rutschungsprozesse seit 1994. Luftbilder vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), freundlicherweise zur Verfügung gestellt von V. Kaufmann und R. Ladstädter.



**Abb. 6:** Vergleich zwischen der Klimaentwicklung in Chamonix (1040 m ü.M.) und der Aktivität von Sturzprozessen im nördlichen Bereich der Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc Massiv, Frankreich). A: Durchschnittliche Jahrestemperaturanomalie im Vergleich mit dem Durchschnitt zwischen 1951 – 1980; B: Steinschlagereignisse pro Dekade und pro Jahr. Schwarze Linie: Trend (lineare Regression, dekadisch für B); breite Balken in B: nicht genau datierte Steinschlagereignisse. Meteorologischer Datensatz: Meteo-France.

Jahren) in den Alpen um  $> 1^{\circ}\text{C}$  und der damit verbundene Rückgang des Permafrosts in den Felswänden wahrscheinlich einer der Hauptfaktoren von rezenten, aktuellen und zukünftigen Sturzprozessen im Hochgebirge (Abb. 6).

Auf Grund der Funktion des eisreichen Permafrosts als Wasserstauer in den tieferen Schichten ist in den Sommermonaten die aktive Bodenschicht zumeist gesättigt. Dadurch ist die Infiltrationskapazität gering und der Oberflächenabfluss hoch. Weiters kann der Permafrostspiegel im Boden als Gleithorizont für die aktive Schicht dienen. Auch dies kann Rutschungen und Setzungen der Lockermaterialbedeckung zur Folge haben.

Das Abschmelzen des Grundeises kann zudem zur Entstehung von Thermokarstphänomenen und thermokarstbedingten Seen mit darauf folgenden Ausbrüchen derselben führen.

### Was kann bei lokal zunehmender Gefahrensituation unternommen werden?

Die bisher beschriebenen Prozesse in Verbindung mit Permafrost und Permafrostdegradation haben keinen großflächigen Einfluss auf die Naturgefahrensituation. Allerdings können sie in einzelnen Fällen lokal die Gefahren- und Risikosituation markant beeinflussen. Der erste Schritt in jeglicher Planungsaktivität im Hochgebirge ist deshalb der Blick auf die Permafrostverbreitungskarte. Sollte die Karte auf das mögliche Vorhandensein von Permafrost im Projektgebiet hinweisen, wird empfohlen, die im PermaNET Handbuch beschriebenen Methoden zur Permafrosterkundung für eine detaillierte Untersuchung der Situation zu benutzen. Wenn Permafrost zu berücksichtigen ist, sind spezifische Anforderungen an die Untersuchungsmethode zu erfüllen. Das

erarbeitete Handbuch enthält kurz zusammengefasste Informationsblätter zu den verschiedenen Methoden für die Permafrosterkundung und das Monitoring von Hangbewegungen wie dGPS, GPR, DInSAR, ERT, TLS und terrestrische Luftbildvermessung. Jedes Blatt enthält die wissenschaftlichen Grundlagen, die möglichen Anwendungsbereiche und Einschränkungen der jeweiligen Untersuchungsmethode sowie Empfehlungen und Illustrationen für die Anwendung. Es wurden Vergleiche zwischen den verschiedenen Untersuchungsmethoden und eine SWOT Analyse durchgeführt. Weiters wurden Empfehlungen zur Vorbeugung vor Gefahren in Permafrostgebieten ausgearbeitet.

Der **State-of-the-art Report über Naturgefahren in Permafrostgebieten** und das **Handbuch für die Erkundung und Kartierung von Permafrost** sind unter dem folgenden Link einsehbar:

[www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrost hazards](http://www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrost hazards)



**Abb. 7:** DGPS Referenzstation auf einem Fixpunkt vor dem Reichenkar Blockgletscher (Österreich). Foto: K. Krainer

## Permafrost und Klimawandel

Regionen in höheren Breitengraden und größeren Höhen werden generell als sehr sensibel in Bezug auf Klimaschwankungen eingestuft. Ein Großteil des Permafrosts in den europäischen Alpen liegt an oder nahe der Nullgradgrenze und reagiert daher sehr sensibel auf atmosphärische Erwärmung.

### Thermische und geomorphologische Reaktionen von Permafrost auf aktuelle und zukünftige Klimaschwankungen

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Permafrost sind sehr vielfältig, mögliche thermische Reaktionen auf die Klimaerwärmung können folgende sein:

- a) Anstieg der Untergrundtemperatur und Erwärmung des Permafrosts;
- b) Abschmelzen des Permafrosts mit drei Folgen: Abnahme der räumlichen Ausdehnung von Permafrostbereichen,

Zunahme der Mächtigkeit der saisonal auftauenden Schicht, vermehrte Grundwasserzirkulation und höherer Wasserdruck;

- c) Änderungen in der Anzahl und der Charakteristiken von Frost-Tau-Zyklen.

Mögliche geomorphologische Reaktionen des Permafrosts beinhalten:

- a) Änderungen in der Bewegungsrate von Blockgletschern (vertikal und horizontal);
- b) Änderungen im Bewegungsverhalten von Blockgletschern (von Kriechen über basales Gleiten bis hin zum Zusammenbruch);
- c) Änderungen in den kryogenen Verwitterungsprozessen;
- d) Veränderung im Volumen und in der Ausdehnung von instabilen Hängen;
- e) Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Massenbewegungen wie Steinschläge, Felsstürze, Rutschungen oder Murgänge.

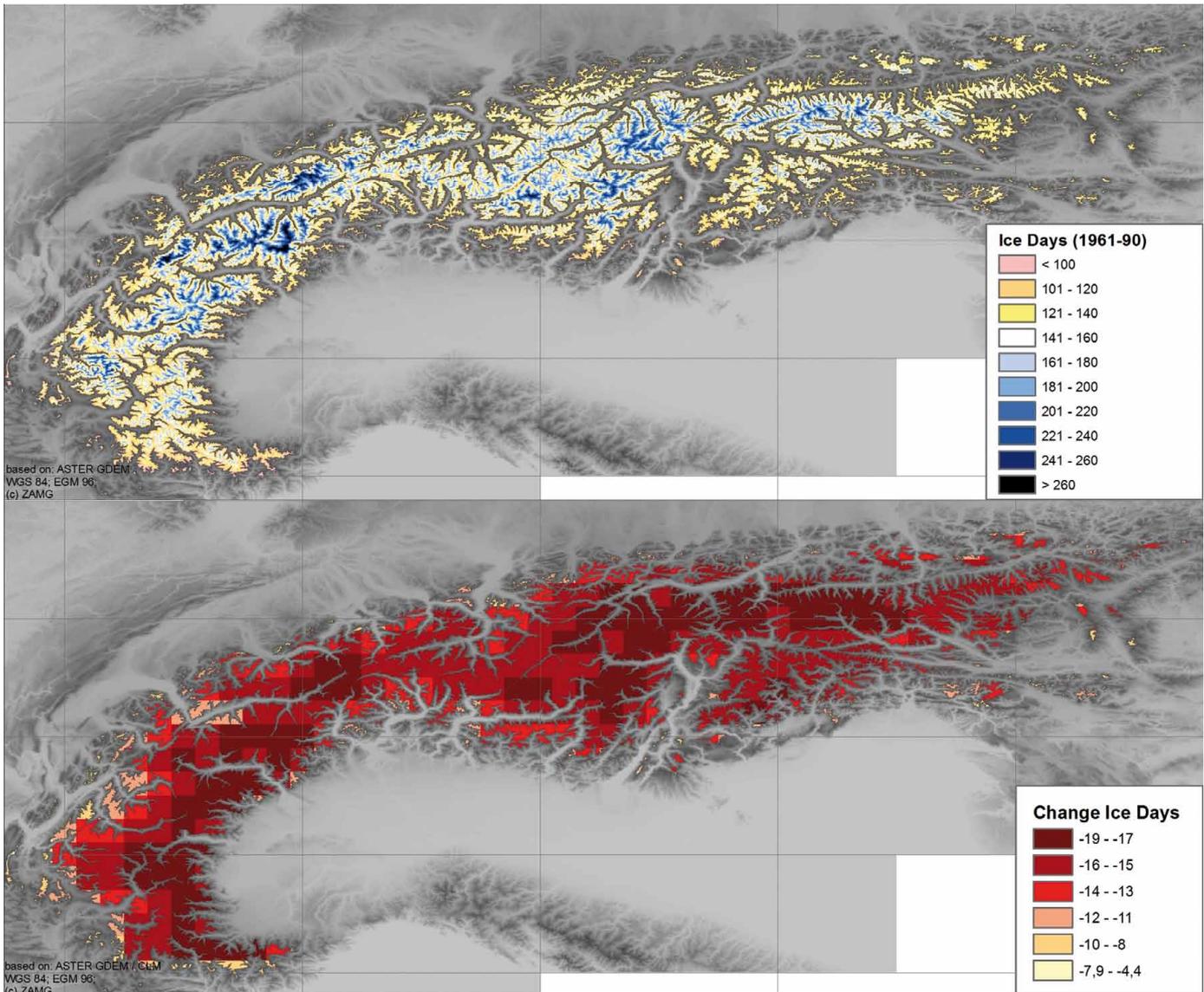


Abb. 8: Anzahl der Eistage (1961-90) und geschätzte Änderungen in der Anzahl der Eistage zwischen 1961-90 und 2021-2050 oberhalb von 1800 m ü.M. Quelle: ZAMG.

## Fallbeispiele aus den europäischen Alpen

Um das Verständnis über das Reaktionsverhalten von Permafrost vertiefen zu können, wurden in mehr als 10 verschiedenen und über den gesamten Alpenraum verteilten Untersuchungsgebieten Fallbeispiele mit charakteristischen Permafrostphänomenen gesammelt und beschrieben. In einem ersten Schritt wurden aktuelle Klimaschwankungen analysiert und zukünftige abgeschätzt. Das Hauptaugenmerk lag hier bei den Frost-, Eis- und Frost-Tau-Tagen in den beiden Klimaperioden von 1961-90 und 2021-2050 im Alpenraum (Abb. 8). In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der Klimaanalyse mit den Daten der Untersuchungsgebiete kombiniert. Die aktuelle thermische und oder geomorphologische Entwicklung einer markanten Geländeform im Permafrost oder eines spezifischen Permafrostphänomens wurden analysiert und deren mögliche zukünftige Veränderung aufgrund der Klimaszenarien abgeschätzt. Die Studie zeigt die vielen verschiedenen Möglichkeiten auf, wie Permafrost sich in einem sich erwärmenden Klima verhalten kann. Zwei Beispiele sollen hier kurz beschrieben werden.

### Beispiel 1: Felsstürze im Mont Blanc Massiv

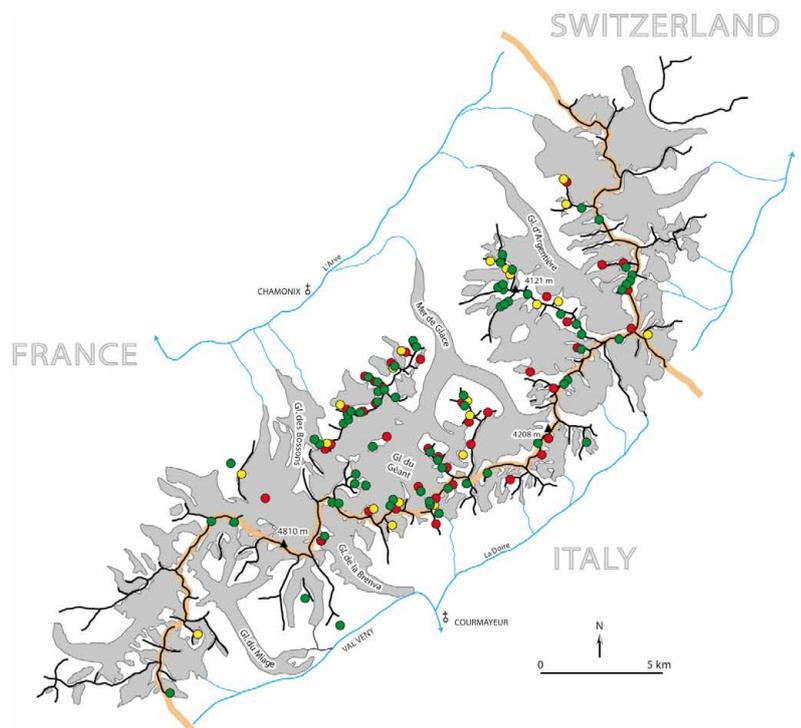
Insgesamt wurden 139 Felsstürze im zentralen Bereich des Mont Blanc Massiv im Zeitraum von 2007 bis 2009 registriert, 53 konnten genau datiert werden. Von diesen ereigneten sich 51 Felsstürze in den heißesten Monaten des Jahres und 38 nach einem Anstieg der mittleren Tagestemperatur während einer Periode von mindestens 2 Tagen (Abb. 9). Eine wichtige Beobachtung dabei ist, dass je heißer der Sommer, desto höher liegen die Abbruchgebiete der Felsstürze. Für die Zukunft bedeutet dies, dass Felsstürze zunehmend in größeren, vorher nicht betroffenen Höhen auftreten werden, neue Gebiete dadurch betroffen sein werden und dies lokalspezifisch Folgen für die Bevölkerung und die Infrastruktur haben wird.

### Beispiel 2: Fließgeschwindigkeit von Blockgletschern in Zentral-Österreich

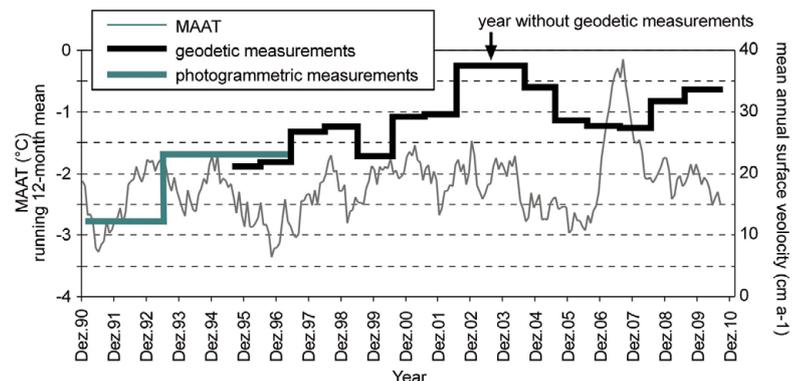
Die Fließgeschwindigkeit von Blockgletschern hängt stark von den klimatischen Bedingungen und der Untergrundtemperatur ab. Wie verschiedene Untersuchungen zeigten, korrelieren die Bewegungsraten von beobachteten Blockgletschern in den europäischen Alpen während der vergangenen Jahre und Jahrzehnte miteinander. Der Dösen Blockgletscher in Zentralösterreich weist zwei Spitzen von hohen Oberflächengeschwindigkeiten in den Jahren 2003-2004 und 2008-2010 auf (Abb. 10). Die Geschwindigkeitsmessungen weisen darauf hin, dass dieser Blockgletscher nach einer kühlen Periode sehr rasch wieder mit einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit reagiert. Demgegenüber benötigt der Blockgletscher längere Zeit, um auf Wärmeperioden mit einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit zu reagieren. Dies bedeutet, dass die vorhergesagte Klimaerwärmung zuerst zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit von Blockgletschern führen wird. In einer späteren Phase wird es durch das Ausschmelzen von Eis zum Stillstand von bisher aktiven Blockgletschern führen.

Je nach topographischer Situation können Blockgletscher sogar zusammenbrechen und somit eine immanente Gefahr für eine darunter liegende Infrastruktur darstellen.

Der **Bericht über die thermischen und geomorphologischen Reaktionen von Permafrost auf aktuelle und zukünftige Klimaschwankungen** ist unter folgender Internetadresse zugänglich: [www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrostresponse](http://www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrostresponse)



**Abb.9:** Dokumentierte Felsstürze im Mont Blanc Massiv in den Jahren 2007 (rote Punkte), 2008, (gelbe Punkte) und 2009 (grüne Punkte).



**Abb. 10:** Mittlere Jahreslufttemperatur (Mittel über 12 Monate) und horizontale Fließgeschwindigkeit an der Oberfläche am Dösen Blockgletscher zwischen 1990 und 2010.

### Permafrost und Wasserressourcen

Zurzeit gibt es noch wenige Kenntnisse über den Einfluss des Klimawandels auf den alpinen Permafrost und wie sich das verstärkte Schmelzen des Permafrosteises auf die Schüttungen und Wasserqualitäten von alpinen Quellgebieten auswirkt. Die höhere Lufttemperatur führte bereits in den letzten Jahren zu einem Ansteigen des sehr konzentrierten Schmelzwassers aus aktiven Blockgletschern. Aufgrund der verstärkten Abgabe von Ionen und Schwermetallen aus dem Permafrosteis können hochalpine Seen, in die Schmelzwasser aus Blockgletschern fließt, eine starke chemische Veränderung erfahren. Vor allem die hohe Konzentration an Nickel (Ni) übertrifft die Grenzwerte für das Trinkwasser wesentlich, wie das Beispiel von Schmelzwasser aus Blockgletschern und Gletschern im Schnalstal (Öztaler Alpen) zeigt. Der Eisgehalt von alpinem Permafrost so wie von Blockgletschern ist immer noch unbekannt. Auf jeden Fall ist das hydrologische Verhalten von aktiven Blockgletschern stark vom Wasser, das als Eis im Boden gelagert wird, abhängig. Um das hydrologische Verhalten von aktiven Blockgletschern und ihre Entwicklung im Bezug zum Klimawandel zu untersuchen, wurden Schüttung, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und Chemismus (Anionen, Kationen, Schwermetalle) von Blockgletscherquellen in Lazaun (Schnalstal) gemessen und mit Gletscherbächen und Quellen verglichen, die nicht von Permafrost beeinflusst sind. An zwei aktiven Blockgletschern (Lazaun – Schnalstal und Rossbänk – Ulten) wurden zwei Bohrungen abgeteuft, die Bohrkern wurden im Detail dokumentiert und in Bezug auf Eisgehalt, Chemismus des Eises, stabile Isotope und Palynologie untersucht. Die Bohrlöcher wurden mit Temperatursonden und Inklinometern ausgestattet, um Informationen zum Temperaturverhalten und zur Dynamik der Blockgletscher zu erhalten. Die Bohrungen, hydrologischen Messungen und chemischen Analysen wurden mit sedimentologischen Analysen des Lockermaterials aus den Blockgletschern vervollständigt: Gesteinstypen, Korngrößen, Korngrößenverteilung, Rundungsgrad und Verteilung der Blockgrößen auf der Oberfläche, Gehalt an Feinanteilen, Mächtigkeit und Struktur

des Lockergesteinsmantels, mineralogische und chemische Komposition und Eisgehalt in der obersten Schicht wurden erhoben. Zusätzliche Informationen zur Mächtigkeit, inneren Struktur und Eisgehalt von aktiven Blockgletschern und Permafrost-Böden wurden durch geophysikalische Methoden wie zum Beispiel mit Georadar gewonnen.

Die Studien zeigten, dass das Schmelzen des Permafrosteises aufgrund des Klimawandels lokal Auswirkungen auf Ökosysteme, Landschaft, Menschen und deren Lebensunterhalt mit sich bringen kann.

Es wird empfohlen, dass Quellen aus Gletschern oder alpinem Permafrost für einen Zeitraum von mindestens einem hydrologischen Jahr detailliert untersucht werden sollten bevor sie als Trinkwasser genutzt werden und zwar im Hinblick auf die Wasserqualität (Anionen, Kationen, Schwermetalle, Bakterien), Trübe, Temperatur und Schüttung.

Den **Bericht über „Permafrost und Wasserressourcen“** kann man unter folgender Adresse finden: <http://www.permanet-alpinespace.eu/products/pfwaterresources>



Abflussmessungen. Foto: K. Krainer



Eisprobe aus einem Blockgletscher. Foto: D. Tonidandel

## Permafrost und Wasserressourcen



Bohrarbeiten auf einem Blockgletscher. Foto: D. Tonidandel

### Empfehlungen für Entscheidungsträger

Der interdisziplinäre und integrale Ansatz, das über den gesamten Alpenraum und über mehrere Disziplinen verteilte Wissen über Permafrost in den Alpen zusammenzutragen und auszuwerten, erlaubte die Ausarbeitung zahlreicher wertvoller Produkte, die im Naturgefahrenmanagement und in der Raumplanung genutzt werden können.

Die wichtigsten Produkte des Projektes PermaNET sind:

- das alpenweite Netzwerk für das Permafrostmonitoring und die dazugehörigen Handbücher
- das Inventar der Permafrost-Nachweise
- die Karte der Permafrostverbreitung in den Alpen
- Richtlinien zur Berücksichtigung des Permafrosts im Naturgefahrenmanagement

Das Netzwerk für das Permafrostmonitoring erlaubt die Messung des aktuellen thermischen Zustands von Permafrost in den Alpen und die Beobachtung und Messung der thermischen Reaktion des Permafrosts auf den Klimawandel. Dieses auf einen langen Zeitraum ausgelegte Monitoring-Netzwerk hilft, die bestehenden Signale der Klimaerwärmung aufzuzeichnen und sammelt zugleich grundlegende Daten, die die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Permafrost und auf die damit zusammenhängenden Naturgefahren erst ermöglichen.

Die erarbeiteten Inventare und Karten über die räumliche Verbreitung des Permafrosts stellen eine Entscheidungshilfe für die Interpretation von Landschaftsveränderungen dar. Für den raumplanerischen Bereich bieten das Inventar und die Permafrostkarte eine Entscheidungshilfe für die Erkennung von Gebieten mit möglicherweise vorhandenem Permafrost.

Wenn die Karte das mögliche Vorhandensein von Permafrost in einem Gebiet aufzeigt, das einen instabilen Untergrund aufweist oder, wo Infrastrukturen geplant sind, so können die ausgearbeiteten Handbücher zu den Permafrosterkundungs- und Überwachungsmethoden die Wahl der geeignetsten Untersuchungsmethode erleichtern.

Mit diesen Produkten hat PermaNET dazu beigetragen, die Entscheidungsbasis in der Raumplanung, im Naturgefahrenmanagement und in der Gewässernutzung zu verbessern.

Fasst man die wichtigsten Ergebnisse von PermaNET zusammen, so kann man folgende Empfehlungen formulieren:

1. Die Kenntnisse über Permafrost und über die Auswirkungen des Klimawandels auf Permafrost und damit zusammenhängende Naturgefahren sind im Alpenraum sehr unterschiedlich ausgeprägt. Das Zusammenbringen aller Erfahrungen und Daten aus dem Alpenraum auf eine einheitliche Wissensbasis ermöglichte eine ganzheitlichere und differenziertere Betrachtung des Themas und erlaubte erst-

mals die Entwicklung einer Karte der Permafrostverbreitung für den gesamten Alpenraum. Um diese Wissensbasis zu verfeinern ist es notwendig, die interdisziplinäre und transnationale Zusammenarbeit fortzusetzen.

2. Permafrostphänomene und Permafrostdegradation zeigen eine große räumliche Variabilität innerhalb des Alpenraums. Die Berichte von PermaNET über den aktuellen Wissensstand sind eine repräsentative Sammlung von verschiedenen Aspekten zu diesem Thema. Permafrost und damit zusammenhängende Naturgefahren (einschließlich der Auswirkungen des Klimawandels) sollten auf eine koordinierte Weise im Naturgefahren- und Risikomanagement im Alpenraum berücksichtigt werden. Naturgefahren, die direkt oder indirekt mit Permafrost oder mit Permafrostdegradation zusammenhängen, sind meist lokal auf spezifische Fälle begrenzt und sollten weder überbewertet noch ignoriert werden. Das Phänomen muss lokal im Detail untersucht werden, bevor Schlussfolgerungen und Entscheidungen im Risikomanagement getroffen werden. Einige Schlussfolgerungen gelten für viele Standorte: (i) Infrastrukturen auf aktiven Blockgletschern und v.a. auf den Stirnbereichen sollten vermieden werden; (ii) unterhalb eines aktiven Blockgletschers an einer Geländekante sollte ein Sicherheitsabstand eingehalten werden; (iii) Wanderwege, die über einen Blockgletscher oder unterhalb davon verlaufen, sollten regelmäßig überprüft werden.

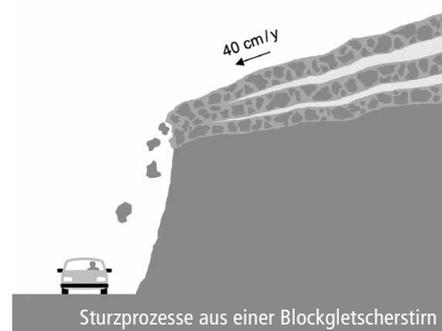
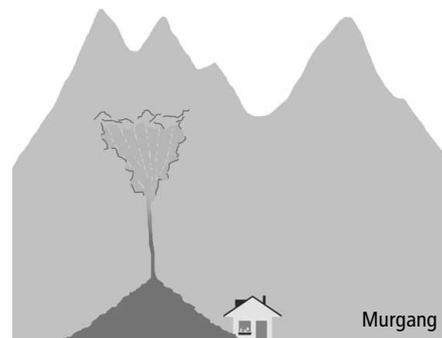
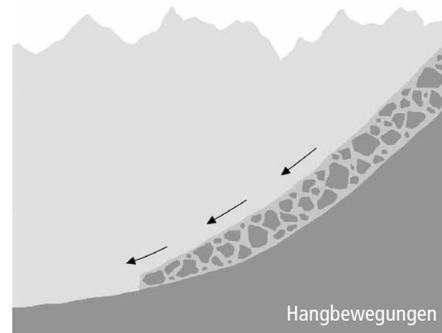
3. Für alle Planungsmaßnahmen im hochalpinen Gebirge ist es wichtig zu wissen, ob Permafrost vorhanden ist und welche Auswirkungen dies auf die geplanten Aktivitäten hat. Ein erhöhtes Bewusstsein über die Existenz des alpinen Permafrosts und dessen möglichen negativen Auswirkungen auf wirtschaftliche Aktivitäten ist nützlich, um die Effizienz und Nachhaltigkeit von Investitionen zu verbessern. Alle Akteure im Hochgebirge sind eingeladen, die ausgearbeitete Permafrostkarte zu verwenden und ihre eigenen Beobachtungen in das Inventar der Permafrost-Nachweise einzutragen. Mit dieser Unterstützung können sowohl das Inventar als auch die Permafrostkarte und damit der Wissensstand über die räumliche Verbreitung von Permafrost laufend erweitert werden.

4. Im Falle von Hangbewegungen in Permafrostgebieten sind die verschiedenen Techniken zu deren Überwachung äußerst wichtig für die Naturgefahrenbeurteilung und für das Risikomanagement. Die Anwendung dieser Instrumente und Techniken muss gefördert werden. Für eine profunde und detaillierte Analyse und Beurteilung von Hangbewegungen muss ausreichend Zeit vorgesehen werden. Die Überwachung von Hangbewegungen in Permafrostgebieten benötigt spezifische Methoden und muss auf spezifische Bedürfnisse eingehen. Alle Akteure im Hochgebirge sind eingeladen, die ausgearbeiteten Handbücher für die Erkennung und Überwachung von Permafrost zu verwenden und gegebenenfalls zu erweitern. Diese geben Hinweise für die Auswahl von geeigneten Techniken und Verfahren.

5. Um auch nach PermaNET Erfahrungen und Wissen auszutauschen, die erarbeiteten Datensätze zu vervollständigen und laufend zu pflegen, ist es notwendig, das geschaffene Netzwerk von Wissenschaftlern und Praktikern sowie von Monitoringstationen weiter aufrecht zu erhalten und zu vertiefen. Nationalen Umweltagenturen wird empfohlen, die weitere Entwicklung dieses Netzwerkes und die Erhaltung der Monitoringstationen finanziell zu unterstützen. Nur durch ein langfristig ausgelegtes Monitoringprogramm können die Auswirkungen des Klimawandels auf den Permafrost analysiert werden.

### Ausblick

Das Projekt PermaNET hat die Basis für die Errichtung eines grenzüberschreitenden Netzwerkes für das Permafrostmonitoring im Alpenraum geschaffen. Nun sind die Interessensgruppen und Entscheidungsträger gefragt, auf dieser Basis aufzubauen und die Kontinuität in der Überwachung des Permafrosts zu gewährleisten. Die Projektpartner und Partnerinstitutionen von PermaNET werden das Netzwerk erhalten und weiter ausbauen. In einem weiteren Schritt wird definiert, wie das grenzüberschreitende Netzwerk für das Permafrostmonitoring im Alpenraum auf lange Frist koordiniert werden kann, wie die Datensammlung und die Datenauswertung erfolgen wird und wie die Öffentlichkeit laufend über den Zustand des Permafrosts in den Alpen informiert werden kann.



---

**Folgende Personen haben am PermaNET Projekt mitgearbeitet:**

Lorenz Böckli,  
Xavier Bodin,  
Lucia Borasi,  
Laurence Bourjot,  
Fulvio Bovet,  
Heike Buchmann,  
Jörg Buchmann,  
Anselmo Cagnati,  
Alberto Carton,  
Edoardo Cremonese,  
Andrea Crepaz,  
Michèle Curtaz,  
Matteo Dall'Amico,  
Valentina Defendi,  
Philip Deline,  
Thomas Echelard,  
Simone Frigerio,  
Jacopo Gabrieli,  
Anna Galuppo,  
Michel Gay,  
Stephan Gruber,  
Mauro Guglielmin,  
Viktor Kaufmann,  
Lorenz Keim,  
Andreas Kellerer-Pirklbauer,  
Alexander Klee,  
Gernot Koboltschnig,  
Karl Krainer,  
Christine Kroisleitner,  
Jean-Michel Krysiecki,  
Kathrin Lang,  
Verena Larcher,  
Stéphanie Letey,  
Gerhard Lieb,  
Laura Magnabosco,

Volkmar Mair,  
Matteo Mantovani,  
Markus Maukisch,  
Matthias Monreal,  
Umberto Morra di Cella,  
Stefania Muti,  
Caterina Naldi,  
Jeannette Noetzli,  
Ulrich Obojes,  
Luca Paro,  
Christine Pasquettaz,  
Alessandro Pasuto,  
Marcia Phillips,  
Thomas Pinter,  
Paolo Pogliotti,  
Andreas von Poschinger,  
Hugo Raetzo,  
Ludovic Ravanel,  
Claudia Riedl,  
Riccardo Rigon,  
Simonetta Riva,  
Philippe Schoeneich,  
Wolfgang Schöner,  
Hubert Siegel,  
Roberto Seppi,  
Martina Stefani,  
Johann Stötter,  
Christoph Suter,  
David Tonidandel,  
Marco Vagliasindi,  
Jean-Marc Vengeon,  
Iris Voyat,  
Giorgio Zampedri,  
Andreas Zischg,  
Matteo Zumiani

**Weitere Informationen:**

Auf der Website des PermaNET Projektes sind die ausführlichen Berichte über die in dieser Zusammenfassung beschriebenen Themen verfügbar. Die Berichte, Handbücher und Richtlinien, welche auf der Website zu finden sind, weisen ein Literaturverzeichnis für weitere Informationen auf. Die PermaNET Website bietet einen Webservice an, wo das ausgefüllte Inventar der Permafrost-Nachweise und die Permafrostverbreitungskarte angesehen werden können. Für weitere Informationen:

[www.permanet-alpinespace.eu](http://www.permanet-alpinespace.eu)



