

permAT – Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich



Institut für Geographie und Raumfor-
schung

Universität Graz



Zentralanstalt für Meteorologie
und Geodynamik



ProjektmitarbeiterInnen und AutorInnen des Berichts

MMag. Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer, Christoph Gitschthaler MSc., Mag. Dr. Michael Avian
Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz

Priv.Do. Dr. Annett Bartsch, Mag. Stefan Reisenhofer, Mag. Gernot Weyss, Mag. Claudia Riedl,
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Neben den genannten Autoren haben dankenswerter Weise folgende nationale und internationale Kolleginnen und Kollegen an der Verfassung dieses Strategiepapiers mitgewirkt (in alphabetischer Reihenfolge): Ludwig Fegerl, Lea Hartl, Ingo Hartmeyer, Helmut Hausmann, Martin Hoelzle, Peter Kapelari, Viktor Kaufmann, Daniel Koch, Arben Kociu, Martin König, Hermann Michael Konrad, Karl Krainer, Gerhard Karl Lieb, Michael Mölk, Stefan Pfeiler, Ulrike Pistotnik, Julian Pistotnik, Lorenzo Rieg, Matthias Rode, Stefan Ropac, Wolfgang Schöner, Reinhold Schönggrundner, Rainer Stowasser, Matthias Themessl, Filippo Vecchiotti, Thomas Wagner, Matthias Wecht, Hans Wiesenegger

Diese Publikation soll folgendermaßen zitiert werden:

Kellerer-Pirklbauer, A., Bartsch, A., Gitschthaler, C., Reisenhofer S., Weyss, G., Riedl, C., Avian, M. (2015): permAT - Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich. Endbericht von StartClim2014.F in StartClim2014: Beiträge zur Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie, Auftraggeber: BML-FUW, BMWWF, ÖBF, Land Oberösterreich

Graz und Wien, im Juli 2015

StartClim2014.F: permAT - Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich; Teilprojekt von StartClim2014

Projektleitung von StartClim2014.F:

Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Heinrichstraße 36, 8010 Graz &
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte, Wien

Projektleitung von StartClim2014:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt
Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: www.startclim.at

StartClim2014 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWWF, der ÖBF und des Landes Oberösterreich gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung:	5
Abstract	5
F-1 Problemstellung und Projektziele	6
F-2 Methodik	8
F-2.1 Literatur- und Datenrecherche	8
F-2.2 Nationaler permAT Workshop Februar 2015	8
F-2.3 Involvierung nationaler und internationaler KollegInnen	9
F-2.4 GIS Analysen	10
F-3 Interessensgruppen, Produkte und Anforderungen: Bestandsaufnahme	11
F-3.1 Überregionale und globale Netzwerke	11
F-3.2 Nationale Interessensgruppen	11
F-3.3 Produkte mit internationaler Relevanz	14
F-3.4 Produkte mit nationaler Relevanz	15
F-4 Langzeitaufzeichnungen in Österreich: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten	17
F-4.1 Verbreitung von Permafrost und aktiven Periglazialformen	17
F-4.2 Permafrost und Naturgefahren	20
F-4.3 Verbreitung von aktuellen Monitoringstandorten und Forschungsintensität	23
F-4.4 Räumliche Repräsentativität	25
F-4.5 Methoden, Parameter und Forschungsintensität	26
F-4.5.1 Indirekte Methoden der Permafrostbestimmung: Beispiele	28
F-4.5.2 Halbdirekte Methoden der Permafrostbestimmung: Beispiele	29
F-4.5.3 Direkte Methoden der Permafrostbestimmung: Beispiele	31
F-4.6 Synergien mit internationalen Netzwerken und internationale Strategien	32
F-4.7 Nationale Synergien und mögliche Erweiterung des Monitoringnetzwerkes	33
F-4.8 Kosten und Einsetzbarkeit von Messmethoden	36
F-5 Umsetzungsstrategien	39

F-5.1	Methodik	39
F-5.2	Finanzierung	41
F-5.3	Produkte	44
	<i>F-5.3.1 Science-to-Science</i>	<i>44</i>
	<i>F-5.3.2 Science-to-Stakeholder</i>	<i>44</i>
	<i>F-5.3.3 Science-to-Public</i>	<i>44</i>
	Literaturverzeichnis	45
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	48

Kurzfassung:

Rund 2,5% der Fläche Österreichs weist ganzjährig gefrorenen Untergrund mit einer oberflächlichen saisonalen Auftauschicht auf. Weitere zumindest 1,5% der Landesfläche sind tiefgründigem saisonalem Bodenfrost mit vergleichbarer Verwitterungswirkung ausgesetzt (Periglazialgebiete). 23 Schigebiete, 31 Speicherseen und 42 alpine Schutzhütten sind direkt oder indirekt von Permafrost und Permafrost bedingten Prozessen beeinflusst, d.h. die Stabilität und die Sicherheit von Infrastruktur – Dämme, Seilbahnstützen, Häuser – kann bei klimawandelbedingter Erwärmung und dadurch bewirkten Veränderungen im Untergrund gefährdet sein. Auch wirken sich Veränderungen im Permafrost wesentlich auf die Hydrologie aus. Die ökologische sowie wirtschaftliche Bedeutung der Entwicklung der Permafrost-beeinflussten Flächen liegt somit auf der Hand. Dementsprechend befassen sich auch verschiedene Interessensgruppen mit diesen Themen, und führen auch systematische Messungen oder Beobachtungen durch, wie beispielsweise verschiedene österreichische Universitäten. Es fehlt jedoch ein österreichweites, koordiniertes und institutionalisiertes Messnetz zur Überwachung dieser Phänomene sowie ein langfristig ausgelegtes Monitoringkonzept. Auf Basis der Analyse der derzeitigen Situation wird in Absprache mit den Interessentengruppen empfohlen, neben dem praktisch flächendeckend möglichen kinematischem Monitoring von Permafrostgebieten mittels Fernerkundung, die Anzahl von Standorten mit direkter und halbdirekter Messung zu erhöhen. Zu erfassen wären insbesondere Bohrlochtemperaturen, oberflächennahe Bodentemperaturen, Geoelektrik sowie Kinematik (Blockgletscher). Tirol, der Bezirk Zell am See, sowie das südöstliche Vorarlberg haben diesbezüglich den höchsten Bedarf. Um eine ähnliche Repräsentativität wie in der Schweiz zu erreichen, ist eine Mindestinvestition von ca.1,5 Mio. € erforderlich (ohne jährliche Folgekosten), wobei Synergien mit bestehenden Standorten anderer Messnetze sowie Schutzhütten und Schilifte genutzt werden sollten. Potentielle Geldgeber für ein institutionalisiertes Permafrost-Periglazialmessnetz könnten – gleich der Schweiz – eine Kombination von Partnern aus der Wirtschaft und Forschung (öffentliche Hand) sein.

Abstract

Approximately 2.5% of Austria is characterized by permanently frozen ground, which is overlain by a seasonally unfrozen layer (i.e. active layer). Such regions are addressed as permafrost areas. Further 1.5% of Austria are affected by deep seasonal frost, which has similar impacts on weathering processes. 23 skiing resorts, 31 reservoirs and 42 mountain huts are directly or indirectly influenced by permafrost and associated processes. Ground stability and thus infrastructure (dams, supports, buildings) can be affected by temperature increase due to climate change. There are also substantial impacts on hydrology. The modification of permafrost affected regions is therefore of economic and ecological importance. A range of institutions are interested in systematic permafrost monitoring. To date, no coordinated monitoring network has been established on national level. A strategy for long-term observations does not exist. This impedes the evaluation of the existing sparsely distributed measurements as well as the development of an understanding of underlying processes. It is recommended to increase the number of monitoring sites based on the analyses of the current situation and exchange with stakeholders. This should include temperature measurements in deep boreholes and shallow boreholes close to the surface, geophysical surveys and ground movement measurements (rock glaciers, instable rock faces). In addition a spatially continuous observation of surface movements with remote sensing methods is required. Demand is highest for entire Tyrol, the district of Zell am See and south-eastern Vorarlberg. A minimum investment of 1.5 Mio € (without maintenance costs) is required in order to achieve a similar representativity as in Switzerland taking synergies with existing meteorological stations, alpine huts and skiing infrastructure into account. Financial support could originate from – similar to Switzerland – a combination of partners from economy and research (public institutions).

F-1 Problemstellung und Projektziele

Permafrost – oder ganzjährig gefrorener Untergrund mit einer oberflächlichen saisonalen Auftauschicht (engl. *active layer*) – ist in den Hochgebirgen der Welt und in den hohen nördlichen und südlichen Breiten ein weit verbreitetes Phänomen (Gruber 2012). Permafrost wird dabei als Bodenmaterial (Gesteinsmaterial und Eis) definiert, das ganzjährig Temperaturen von 0°C oder weniger aufweist. Permafrost hat wesentliche morphologische, ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen und reagiert empfindlich auf Klimaänderung, wobei die Reaktion darauf stark von den Untergrundeigenschaften (Fels, Lockergestein, Vegetation, Schnee) bestimmt ist.

Geologisch bedingte Massenbewegungen an der Erdoberfläche wie beispielsweise Steinsschlag, Felssturz oder Hangrutschung können durch die räumliche Überlagerung mit Infrastruktur oder menschlichem Aktionsraum zur Naturgefahr werden. Räumlich gegliedert sind dabei Entstehungsort, Transportbereich sowie Ablagerungsbereich als Gefährdungszonen von Bedeutung. Die Anfälligkeit zur Auslösung von Massenbewegungen wird von verschiedenen hydro-, morpho- und geologisch/mechanischen Eigenschaften und somit klimatischen Bedingungen gesteuert. Sowohl dauernd als auch saisonal gefrorenes Wasser kann dabei für die Verwitterung sowie für die Auslösung von Massenbewegungen eine wichtige Rolle spielen. Veränderungen im Permafrost, im saisonalen Frostgeschehen oder in alpinen Gletschersystemen sind somit wissenschaftliche Schlüsselindikatoren für globale und regionale Klimaveränderungen.

Global wirksame Veränderungen in der Kryosphäre wurden im letzten IPCC Bericht (Vaughan et al. 2013) zusammenfassend wie folgt dargestellt: (a) die meisten Gletscher der Erde sind aktuell im Rückzug, (b) viele Gletscher sind aktuell noch nicht im klimatischen Gleichgewicht und werden ohne weitere Temperaturerwärmung weiter zurück schmelzen, (c) Permafrosttemperaturen sind in den meisten Regionen der Erde seit den 1980er Jahren angestiegen, (d) Degradation von Permafrost (d.h. Reduktion von Permafrostfläche und -mächtigkeit) in Bodeneis-reichen Gebieten verursachte in den letzten 2-3 Jahrzehnten substantielle Oberflächeneinsenkungen und (e) die Mächtigkeit des saisonalen Frostes hat in den letzten Jahrzehnten deutlich abgenommen. Diese global beobachteten Entwicklungen in der ganzjährigen sowie saisonalen Kryosphäre sind wesentlich für das Verständnis des zukünftigen Gefahrenpotentials geologisch bedingter Naturgefahren in Österreich. Dies zeigt beispielsweise eine im Rahmen von StartClim geförderte Studie über die Entwicklung des Gefahrenpotentials auf Alpentouristen und Infrastruktur durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung in einer Hochgebirgsregion von Österreich (Kern et al. 2012). Laut Kern et al. ist zu erwarten, dass auf 5,5% der alpinen Wege im Bereich Großglockner-Pasterze zwischen 2010 und 2030 ein deutlicher Anstieg der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen zu erwarten ist.

Neben Veränderungen bei gravitativen Massenbewegungen ist auch eine Zunahme der Bewegung und des Einsinkens von Permafrost-beeinflussten Lockersedimentakkumulationen (z.B. Blockgletscher) mit Bildung von Thermokarstdepressionen anzunehmen (z.B. Delaloye et al. 2008, Kellerer-Pirklbauer & Kaufmann 2012), was sich zum einen auf die Stabilität von Hängen und zum anderen auch auf hydrologische Prozesse auswirken kann (z.B. Schoenreich et al. 2014). Im Gegensatz zu Gletschern kann die räumliche Verbreitung von Permafrost nur indirekt über Geländeindikatoren (z.B. Blockgletscher) und numerische Modelle abgeleitet werden. Solche Modelle zeigen, dass gegenwärtig rund 1600-2000 km² des österreichischen Hochgebirgsraumes von Permafrost beeinflusst sind (Lieb 1998, Ebohon & Schrott 2008, Boeckli et al. 2012; vgl. Abb. F-4). Im Mittel ist Permafrost oberhalb von etwa 2500 m Seehöhe zu erwarten, wobei expositions- (Strahlung) und substratbedingt (Lockermaterial, Fels) diese Grenze wesentlich nach unten verschoben sein kann.

Trotz steigender Naturgefahren durch veränderte Klimabedingungen in Permafrostgebieten und des hohen Schadpotenzials, fehlt aktuell in Österreich ein landesweites Messnetz zur Überwachung dieser Phänomene sowie ein langfristig ausgelegtes Monitoringkonzept. Das

Ziel des von StartClim2014 geförderten Projektes *permAT* ist es Strategien aufzuzeigen, die es ermöglichen in Österreich ein langfristig wirksames und repräsentatives Monitoringnetzwerk zur Beobachtung von Permafrost und periglazialen Prozessen (Massenbewegungen) einzurichten, wobei neben der naturwissenschaftlichen Komponente vor allem der Aspekt der Naturgefahrenprävention berücksichtigt werden soll. Periglazial bedeutet übersetzt „um das Eis herum“, wobei heute unter diesem Begriff nicht die räumliche Nähe zu einem Eiskörper bzw. Gletscher gemeint ist, sondern die klimatische Nähe. Periglaziale Gebiete sind durch die Wirkung des Frostes – saisonal wie permanent – geprägt. Die Prozesse in einem solchen Gebiet sind charakterisiert durch einen permanent oder jahreszeitlich gefrorenen Untergrund. Typische Formen in den Alpen sind z.B. Blockgletscher oder Solifluktuationsformen.

Die oben genannten Strategien befassen sich mit den beiden Hauptfragen (1) wie ein solches Monitoringnetzwerk im Sinne der methodischen Herangehensweise aufgebaut werden kann (**Methodik**) und (2) wie sich eine längerfristige Finanzierung eines solchen Netzwerks realisieren ließe (**Finanzierung**). In einem weiteren Schritt ist es darüber hinaus erforderlich, eine (3) effiziente und zielgruppenorientierte Weitergabe der Daten und Erkenntnisse zu gewährleisten (**Weitergabe**). Ein wesentliches weiteres Anliegen von permAT ist es daher, eine Dialogplattform für WissenschaftlerInnen und InteressensvertreterInnen von betroffenen öffentlichen Einrichtungen, Organisationen und Vereinen zu schaffen.

Das vorliegende Dokument versucht den aktuellen Stand von Permafrost- und Periglazialmonitoring in Österreich sowie deren Verbindung zur potenziellen Naturgefahrenforschung aufzuzeigen, Möglichkeiten der Verbesserung und Erweiterung des Messnetzes in methodischer sowie räumlicher Hinsicht zu diskutieren, Finanzierungsmöglichkeiten aufzuzeigen und Vorschläge zu unterbreiten, wie in einem solchen Messnetz generierte Daten und Erkenntnisse an verschiedene Nutzergruppen weitergegeben werden können. Dieses Dokument soll als Leitfaden angesehen werden, wie in Zukunft in Österreich koordiniert und effizient Permafrost- und Periglazialmonitoring unter Berücksichtigung des Naturgefahrenaspektes durchgeführt werden könnte.

F-2 Methodik

F-2.1 Literatur- und Datenrecherche

Die Erfassung des aktuellen Standes der Permafrost- und Periglazialforschung in Österreich basierte primär auf der in Krainer et al. (2012a) aufgelisteten und beschriebenen nationalen Literatur sowie auf der ersten, groben Zusammenfassung von Kellerer-Pirklbauer (2014). Weitere wichtige, aktuelle Publikationen mit nationalem Bezug sind alle Beiträge in einem Sonderband der Zeitschrift *Austrian Journal of Earth Sciences* (Issue 105/2) mit dem Titel „Permafrost Research in Austria: History and recent advances“ (Krainer et al. 2012b). Informationen mit internationalem Bezug wurden aus verschiedensten Publikationen sowie Internetseiten zusammengetragen. Für räumliche Analysen inklusive Ausweisung von potentiellen zukünftigen Monitoringstandorten in aktuell noch unberücksichtigten Permafrostgebirgsregionen in Österreich wurden verschiedene Datenbanken wie die TAWES-Datenbank (Teilautomatisches Wettererfassungssystem) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, die HZB-Datenbank (Hydrographisches Zentralbüro, Hydrographischer Dienst in Österreich), Stationsstandorte der Lawinenwarndienste (LWD) oder verschiedene Listen von alpinen Schutzhütten und Schigebieten ausgewertet.

F-2.2 Nationaler permAT Workshop Februar 2015

Ein wesentlicher Meilenstein von permAT war ein durch das CCCA Servicezentrum mitorganisierter Workshop am 26. und 27. Februar 2015 am Institut für Geographie und Raumforschung der Universität Graz, an welchem rund 45 VertreterInnen von Universitäten, weiteren Forschungseinrichtungen, Ministerien, Bundesämtern, Landesdienststellen, alpinen Vereinen sowie internationale Experten teilgenommen haben. Am Tag 1 dieses Workshops gaben neun „Keynotes“ einen Überblick über die nationale und internationale Bedeutung von Permafrostmonitoring sowie dessen Nutzung für unterschiedliche Stakeholdergruppen (Tabelle F-1). Durch diese Vorträge sollten alle TeilnehmerInnen auf den aktuellen Wissensstand gebracht werden, der folglich als Grundlage für den zweiten Tag des Workshops diente.

Tab. F- 1: Keynote-Vorträge (chronologisch geordnet) am Tag 1 des permAT Workshops, 26-27. Februar 2015, Graz.

Titel	Vortragende(r)
Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen in Österreich: Ein Statusbericht	Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer
Internationale Strategien im Bereich Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen	Priv.-Doz. Dr. Annett Bartsch
Das Global Climate Observing System (GCOS) und die Rolle von Permafrost darin	Mag. Rainer Stowasser
The Global Cryosphere Watch (GCW) - Surface Observations Programme CryoNet	Prof. Dr. Wolfgang Schöner
Das Langzeitpermafrostmonitoring Programm PERMOS in der Schweiz: Past, Present and Future	Prof. Dr. Martin Hoelzle
Permafrost und Periglazial bedingte Naturgefahren: Bedeutung für die Geologische Bundesanstalt	Mag. Stefan Pfeiler

Bedeutung von Permafrost und Periglazial bedingte Naturgefahren bei geologischen Landesdienststellen: Das Beispiel Salzburg	Mag. Ludwig Fegerl
Bedeutung und Einfluss von Permafrost und periglazialen Prozessen auf den Schutz vor Naturgefahren im Tätigkeitsbereich der Wildbach- und Lawinenverbauung	Mag. Michael Mölk
Bedeutung von Langzeitmonitoring von Permafrost und Periglazialen Prozessen für die Prävention von Naturgefahren: Die Sicht des Österreichischen Alpenvereins	DI Peter Kapelari

Am zweiten Tag des Workshops arbeiteten alle TeilnehmerInnen aktiv am Strategieentwicklungsprozess mit (Abb. F-1). Mit dieser Herangehensweise war beabsichtigt, das Monitoringkonzept auf eine möglichst breite Basis zu stellen. Dabei wurde auf die folgenden vier Fragestellungen fokussiert, welche im Rahmen des Workshops sowie danach (vorwiegend via Emails) diskutiert wurden.

- Welche Interessensgruppen (national und international) können von einem nationalen Monitoringprogramm profitieren und welche „Produkte“, die von WissenschaftlerInnen generiert werden können, sind für diese wichtig?
- Welche Gebiete wären interessant für ein Monitoring im Hinblick auf die räumliche Repräsentanz innerhalb von Österreich? Wie könnte die räumliche Prioritätensetzung gestaltet sein?
- Welche Parameter, aufgenommen mit welchen Methoden, können für ein Permafrost-Periglazial- und damit verbundenes Naturgefahrenmonitoring relevant sein und welche Synergien können mit vorhandenen Monitoringnetzwerken genutzt werden?
- Aus welchen Töpfen kann ein solches Monitoring finanziert werden? Gibt es andere Optionen neben der klassischen Forschungsförderung?

Mit diesen vier Fragen wurden somit die in Kapitel F-1 angesprochenen Themenbereiche Methodik, Finanzierung sowie Weitergabe behandelt.



Abb. F- 1: Diskussionsrunden am Tag 2 des permAT Workshops, 26-27. Februar 2015, Graz

F-2.3 Involvierung nationaler und internationaler KollegInnen

Unterschiedliche Möglichkeiten wurden genutzt, um nationale und internationale KollegInnen in den Strategieentwicklungsprozess einzubinden. Für den unter F-2.2 beschriebenen Work-

shop wurden drei Zirkulare erstellt (Zirkular 1: Aussendung Anfang Dezember 2014; Zirkular 2: Aussendung Mitte Jänner 2015; Zirkular 3: Anfang Februar 2015) und über verschiedene Mailinglisten (bestehende und eigens dafür erstellte) ausgesendet. Diese Listen umfassten u.a. die IPA-Austria-Maillingliste (International Permafrost Association Austria), Liste der „bekannten“ Permafrostforscher und Forscherinnen, die CCCA-Mailingliste, sowie Listen von alpinen Vereinen (inklusive Deutscher Alpenverein), Bergführern, Bergrettungen, Nationalparks, Naturparks, Tourismusregionen, Schigebietsbetreibern, geologischen Landesämtern und Feuerwehren. Weitere KollegInnen, die nicht am Workshop teilnehmen konnten, wurden auch via Email oder Telefonate informiert. Weitere Möglichkeiten des Austausches – national wie international – boten verschiedene Tagungen wie beispielsweise die General Assembly der European Geosciences Union (EGU) 2015 in Wien oder der 16. Österreichische Klimatag 2015 – ebenso in Wien.

F-2.4 GIS Analysen

Die bisher einzige für ganz Österreich (mehr oder weniger) frei verfügbare Kartengrundlage für die Permafrostverbreitung ist eine numerische Modellierung von Böckli et al. (2012). Dieser Datensatz ist in einem mit GIS kompatiblen Format verfügbar. Informationen zur alpinen Infrastruktur (Schutzhütten, Schigebiete, Stauseen), zu anderen Messnetzen mit Synergiepotential (TAWES/ZAMG, HZB/Hydrographischer Dienst, LWD/Lawinenwarndienst, GLORIA Messnetz) aus vorhandenen und neu generierten Datenbanken (siehe Kapitel F-2.1) wurden in GIS kompatible Datensätze überführt.

Auf der Grundlage der potentiellen Permafrostverbreitungskarte und digitalen Höhenmodellen wurden vorhandene Infrastrukturen auf Seiten der Datenerhebung außerhalb der traditionellen Permafrostforschung (d.h. die oben genannten „anderen“ Messnetze) als auch auf Seiten der potentiellen Stakeholder (d.h. Bezirk, Land, alpine Vereine, Schigebietsbetreiber, Wasserwirtschaft) identifiziert. In einem zweiten Schritt wurden GIS-Analysen für die Identifikation von räumlichen Lücken unter Berücksichtigung der bereits bestehenden Infrastruktur sowohl als zukünftige Monitoringstandorte als auch als gefährdete Objekte durchgeführt. Dies inkludierte beispielsweise die Bewertung der Repräsentativität existierender Monitoringstandorte (räumliche Lage, aber auch Exposition, Höhe) mit den dort verwendeten Methoden oder die Identifikation von aktiven Blockgletschern – als klassischen Permafrostzeigern im Hochgebirge – welche räumlich gesehen gut verteilt in Österreich untersucht werden sollten, um regionale Bewegungsveränderungen (vgl. Delaloye et al. 2008) detektieren zu können.

F-3 Interessensgruppen, Produkte und Anforderungen: Bestandsaufnahme

F-3.1 Überregionale und globale Netzwerke

Die *International Permafrost Association* (IPA) koordiniert Forschung und Anwendungen auf globaler Ebene (<http://ipa.arcticportal.org/>). Die IPA entwickelt Strategien und bietet finanzielle Unterstützung von Kleinprojekten und Workshops. Im Jahr 2014 wurden beispielsweise zwei internationale Workshops, an welchen österreichische WissenschaftlerInnen in den Organisationskomitees beteiligt waren, von der IPA kofinanziert (Anwendung von Fernerkundung für Permafrostmonitoring und ein NachwuchswissenschaftlerInnentraining).

Mitglieder der IPA sind Länder und Einzelpersonen, zumeist WissenschaftlerInnen. Österreich hat aktuell die Basismitgliedschaft und ist durch Andreas Kellerer-Pirklbauer (Universität Graz) im Council vertreten. Mitglieder der IPA und insbesondere des *Executive Committee* gestalten federführend die aktuellen Entwicklungen im Rahmen des *Global Terrestrial Network – Permafrost* (GTN-P) mit. GTN-P ist das wichtigste internationale Organ im Bereich Permafrostmonitoring und wird vom *Global Climate Observing System* (GCOS) und dem *Global Terrestrial Observing System* (GTOS) gesponsert. GCOS selbst führt in seiner Liste der *Essential Climate Variables* (ECV) zwei Permafrost-bezogene Messgrößen auf. Diese sind die Permafrosttemperatur in Bohrlöchern (*permafrost borehole temperature*) sowie die Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht (*active-layer thickness*). Beide Messgrößen können beim alpinen Permafrost (im Gegensatz zum polaren Permafrost) lediglich an Bohrlochstandorten erfasst werden, deren Einrichtung jedoch sehr kostenintensiv ist. Kontinuierliche Bodentemperaturmessungen an der Oberfläche sowie in der oberflächlichen saisonalen Auftauschicht sind jedoch von nicht minderer Bedeutung, da sich dadurch auch flächenhaftere Aussagen über Veränderungen im Permafrost sowie deren regionale Differenzierung tätigen lassen können (Kellerer-Pirklbauer 2013).

Über GTN-P werden Temperaturmessungen aus Bohrlöchern (> 1000 weltweit) und die saisonale Auftautiefe (mehr als 75 weitere Standorte) gesammelt. LänderrepräsentantInnen sind für die Übermittlung der Daten und die Aufbereitung nach den Vorgaben von GTN-P verantwortlich. In Österreich sind dies gegenwärtig Ingo Hartmeyer (alpS - Center for Climate Change Adaptation Austria) und Claudia Riedl (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). Zurzeit sind drei Standorte mit insgesamt neun Bohrlöchern in Österreich im GTN-P erfasst: Kitzsteinhorn: fünf Bohrlöcher, Sonnblick: drei Bohrlöcher sowie Dachstein: ein Bohrloch (vgl. Kapitel F-4.3). Diese Standorte werden im Kapitel F-4 näher beschrieben. Im Jahr 2014 wurde – kofinanziert vom FP7-Projekt PAGE21 – ein Datenportal für die Visualisierung und Weitergabe der GTN-P Messreihen einschließlich der Metadaten eingerichtet. Die jeweiligen nationalen RepräsentantInnen übermitteln die in den Bohrlöchern erfassten Daten unter Einhaltung fest vorgegebener Formate über dieses Datenportal. Diese weltweite Datenbank steht dann in einem für alle GTN-P-Daten einheitlichen Datenformat zur Verfügung.

F-3.2 Nationale Interessensgruppen

Veränderungen im Permafrost in Österreich sind sowohl auf Bundes- als auch auf Länderebene für EntscheidungsträgerInnen von Interesse – räumlich gesehen sowohl Areale mit Permafrost als auch Areale, welche durch Permafrost-bedingte Prozesse beeinflusst werden könnten (z.B. Ablagerungsgebiet eines Felssturzereignisses oder einer Mure aus einem

Permafrostareal). Betroffen ist vor allem die Tourismuswirtschaft einschließlich der Seilbahnbetreiber, Betreiber von alpinen Schutzhütten als auch Straßenerhalter. Hinzu kommen verschiedenste Nutzungen der Ressource Wasser für Trinkwasser (Wasserqualität, Menge) und zur Energiegewinnung. Neben der Verfügbarkeit und Qualität von Wasser an sich spielt insbesondere die Auswirkung von Destabilisierungen auf Mensch und Infrastruktur eine wesentliche Rolle. Zu nennen sind hier auch die geologischen Landesdienste, die Wasserbau- und Schutzwasserwirtschaft auf Länderebene und die Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) sowie die Geologische Bundesanstalt (GBA) auf Bundesebene.

Ein besonderes Interesse an der Erfassung von Veränderungen und damit verbunden Gefahren haben die verschiedenen alpinen Vereine, Bergführervereinigungen, National- und Naturparks und die lokale Bevölkerung. Sowohl Wege als auch alpine Infrastruktur sind potentiell gefährdet. So stehen ca. 40 alpine Schutzhütten in wahrscheinlichen Permafrostgebieten (siehe Kapitel F-4.2). Auswirkungen des Klimawandels auf diese Schutzhütten umfassen Schäden an den Bauwerken selbst, aber auch an der dazugehörigen Infrastruktur wie Wasserleitungen oder Zustiegswegen bzw. -straßen. Beispiele hierzu wären die Hofmannshütte oberhalb der Pasterze in der Glocknergruppe, die Kürsinger Hütte in der Venedigergruppe sowie das Zittelhaus/Sonnblick-Observatorium am Hohen Sonnblick, Goldberggruppe. Bei den ersten beiden Beispielen wurde zeitweise der Zustieg wesentlich erschwert (Hofmannshütte → Steinschlag aus Felswänden oberhalb des Gamsgrubenweges; Kürsinger Hütte → Steinschlag aus auftauenden und labilen Permafrostsedimenten), beim letzten Beispiel war der gesamte Gebäudekomplex von Instabilitäten beeinflusst. Es stellt sich die Frage, inwieweit Schäden (Personen und materiell) versichert werden können. Die Auswirkungen auf den Tourismus wurden beispielsweise im StartClim2009-Projekt AlpinRiskGP detailliert für das Großglockner-Pasterzengebiet präsentiert (Lieb et al. 2010). Grundlage für die damalige Studie bildete die Modellierung von Massenbewegungen auf der Basis von Höhenmodelldaten und geologischen Karten sowie eine Permafrostkarte aus dem Projekt ALPCHANGE (basierend auf Permakart). Weitere wichtige Komponenten waren Kartierungen vor Ort und die Einbeziehung regionaler Fachleute. Diese Studie inkludierte auch ein Szenario für 2030. Eine thematisch ähnliche StartClim-Studie wurde für das Tuxer Tal in den Zillertaler Alpen durch Pröbstl & Damm (2009) durchgeführt.

Maßnahmen für die Erhaltung der alpinen Wegenetze aufgrund von Massenbewegungen inkludieren eine erhöhte Sicherung von Wegen, Verschärfung von Haftungen, Verlegung von Wegen, Erneuerung von Markierungen und häufigere Kontrollgänge. Im Extremfall werden Wege aufgegeben oder verlegt. Ein Beispiel für eine Wegverlegung bedingt durch eine Zunahme der Steinschlaghäufigkeit, ist der alpine Steig zwischen dem Arthur-von-Schmid Haus und der Seescharte (2638 m) in der Ankogelgruppe. Unweit dieser Stelle führt ein weiterer markierter Weg (Weg vom Arthur-von-Schmid Haus zur Mallnitzer Scharte) über eine Blockgletscherlandschaft, die durch große labile Blöcke gekennzeichnet ist. Hier wirken Veränderungen im Permafrost sowie der Rückzug von perennierenden Schneeflecken gemeinsam; auch stabil wirkende Blöcke können Gefahren für BergsteigerInnen bergen (Abb. F-2). Weitere Beispiele für erhöhten Aufwand in der Wegeerhaltung sind laut Österreichischem Alpenverein (Kapelari 2015) der Gletscherweg Innergschlöss, die Galtenscharte am Venediger Höhenweg, die Hohe Gradenscharte in der Schobergruppe, die Käferleiten am Mainzer Höhenweg oder die Route zum Pfaffennieder in den Stubai Alpen. Lieb (2007) hat noch ein paar weitere gefährdete Bereiche in den Hohen Tauern ausgewiesen.



Abb. F- 2: Ein großer instabiler Block (ca. 4m x 1.2 m x 1 m) aus Orthogneis im Nahbereich des alpinen Steiges 533 zwischen dem Arthur-von-Schmid Haus und der Mallnitzer Scharte in der Ankogelgruppe. Veränderungen im Permafrost (Standpunkt befindet sich auf einem aktiven Blockgletscher) sowie der Rückzug von perennierenden Schneefeldern sind verantwortlich für die Labilisierung des mehrere Tonnen schweren Blocks. Fotos A. Podesser.

Veränderungen im Permafrost reflektieren nicht nur langfristige Temperaturänderungen sondern auch Änderungen der Vegetation und insbesondere der Schneebedeckung. Permafrost ist ein Indikator für die Variabilität einer Summe von geophysikalischen Parametern. Das Monitoring des thermischen Regimes eignet sich daher für die Quantifizierung von Klimafolgen. Die wissenschaftlich orientierte Interessensgruppe umfasst eine Reihe von Fachrichtungen auf nationaler und internationaler Ebene wie etwa Klimaforschung, Geographie, Biologie, Ökologie, Geophysik und Hydrologie.

Blockgletscher – als wichtigste Indikatoren von alpinem Permafrost – sind mittlerweile ein fixer Bestandteil von offiziellen geologischen Karten in Österreich (Pfeiler 2015). Im Zuge der kartographischen Darstellung durch die Geologische Bundesanstalt werden intakte Blockgletscher ausgewiesen. Hinzu kommen reliktsche Blockgletscher des Spätglazials und Holozäns, die in den Karten als „Blockgletscherablagerung“ aufscheinen. Sie können sich aus Massenbewegungen unterschiedlichster Art entwickeln und geben Hinweise auf die relative Chronologie gravitativer und periglazialer Prozesse. Das Ausschmelzen von Bodeneis und die damit einhergehende Aktivierung von Geschiebe aus aktiven Blockgletschern im Übergangsbereich der Permafrostverbreitung bzw. in Rückzugsbereichen von Gletschern ist – was zumindest von Menschen beeinflusste Flächen angeht – durch die geologischen Landesdienste oder durch die WLV gut dokumentiert (Fegerl 2015, Mölk 2015). Dies ist von Relevanz für das Geschiebepotential von Wildbächen und das Naturgefahrenpotential davon beeinflusster und genutzter Flächen. Ähnlich gut dokumentiert sind Bauwerkschäden an Lawinendämmen und –stützverbauungen der WLV (Mölk 2015), welche mit Permafrostdegradation erklärt werden können. Hier zeigt sich, dass solche Schäden nur im geringen Umfang auftreten und sich monetär in Grenzen halten.

Die geologisch-geotechnisch-geomorphologische Bearbeitung des Permafrostes einschließlich der Erfassung von Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Fels und Lockergestein sind für die Landesämter aber auch für die Wildbach- und Lawinerverbauung von Interesse. Der Fokus bei zukünftigen Untersuchungen sollte auf detaillierter lokaler Erfassung liegen und für Szenarienbildung, Risikoabschätzung und Spezifikation konkreter Maßnahmen anwendbar sein. Neben einem Monitoringprogramm in Permafrostarealen selbst, sind für die in diesem Absatz genannten Institutionen auch Veränderungen im saisonalen Frost mit einhergehenden Veränderungen in der Frostverwitterungsart und –intensität von Interesse, da Veränderungen im Frostcharakter allgemein Veränderungen in der Steinschlagaktivität bewirken können. Dies ist dadurch zu erklären, dass sowohl das volumetrische Expansionsmodell (d.h. Volumenzunahme durch Eisbildung) als auch das Eissegregationsmodell (Hallet et al. 1991 and Matsuoka 2008) für saisonalen wie permanenten Frost

gelten. Allgemein betrachtet sind für verschiedene Landesämter als auch für die WLV, neben der Gefährdung von Objekten und Personen an sich, die Betriebssicherheit von Seilbahnen und Gletscherbahnen und die Erreichbarkeit von Talschlüssen von besonderem Interesse.

F-3.3 Produkte mit internationaler Relevanz

Sämtliche wissenschaftlichen Erkenntnisse auf dem Bereich der Grundlagen- und angewandten Forschungen sind auf internationaler Ebene nutzbar. Österreichische WissenschaftlerInnen leisten hier seit vielen Jahren wertvolle Beiträge. Im Jahr 2012 wurde beispielsweise in der international anerkannten Zeitschrift *Austrian Journal of Earth Sciences* (AJES) ein Sonderband zum aktuellen Stand der Permafrostforschung veröffentlicht, welcher neben einem umfassenden Vorwort zu Geschichte und gegenwärtigen Stand der Permafrostforschung in Österreich (mit umfassender Literaturliste) elf weitere Fachbeiträge umfasste (Kraimer et al. 2012b). International von Bedeutung sind Datenbanken zu Permafrostmerkmalen, sowohl statisch (d.h. Kartendarstellung mit der Ausweisung von Permafrost, Kartierung von Permafrostindikatoren) als auch dynamisch (Temperatur in Bohrlöchern, der Landoberfläche und saisonale Auftautiefe).

Aktuelles Permafrostmonitoring in Österreich ist Teil alpenweiter und europäischer Initiativen. Ein wichtiger Meilenstein war das Projekt PermaNET (*Permafrost long-term monitoring network in the European Alps*), welches durch den *European Regional Development Fund* (EFRE) im Rahmen des Alpine Space Programmes zwischen 2008 und 2011 finanziert wurde (Mair et al. 2011). Im Rahmen dieses Projektes wurde u.a. ein Inventar von Permafrostvidenzen erstellt (Cremonese et al. 2011) sowie aufbauend darauf eine Modellierung der Permafrostverbreitung für den gesamten Alpenraum durchgeführt (Boeckli et al. 2012). Die im Rahmen von PermaNET modellierte Permafrostverbreitung für Österreich stellt die aktuellste Grundlage der Permafrostverbreitung auf regionaler Ebene dar. Von Seiten Österreichs traten als Projektpartner die Universitäten Innsbruck und Graz, die ZAMG sowie das Lebensministerium auf. Die erfassten Permafrostvidenzen wurden auch in die Alpine Permafrost Database (APD) integriert, welche seither von der ARPA Piemonte, Italien, gewartet wird. Die Aktualität der Daten in der APD hängt von der Initiative einzelner WissenschaftlerInnen ab.

Die laufenden Bohrlochtemperaturmessungen gehen in die aktuellen Datenbanken von GTN-P ein. Dies umfasst Zeitreihen von Temperaturmessungen in unterschiedlichen Tiefen. Abbildung F-3 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf in fünf ausgewählten Tiefen im Bohrloch 3 am Hohen Sonnblick zwischen September 2011 und Jänner 2015. Die Metainformation zur Beschreibung der Bohrlochstandorte sind ein standardisierter Teil der Datenbank. Das Onlineportal wurde im Rahmen des EU FP7-Projektes PAGE21 konzipiert und wird aktuell durch Arctic Portal gewartet. Die österreichischen Bohrlöcher am Hohen Sonnblick (drei) sowie am Kitzsteinhorn (fünf) sind bereits in GTN-P integriert. Der neue Bohrlochstandort am Dachstein (Bohrung erfolgte erst im August 2014; temporäre Instrumentierung zwischen September 2014 und Juni 2015; permanente Instrumentierung mit Juli 2015) wurde im Juni 2015 in die GTN-P Datenbank aufgenommen. Somit werden ab Mitte 2015 zumindest von drei österreichischen Standorten Bohrlochtemperaturdaten an GTN-P gemeldet.

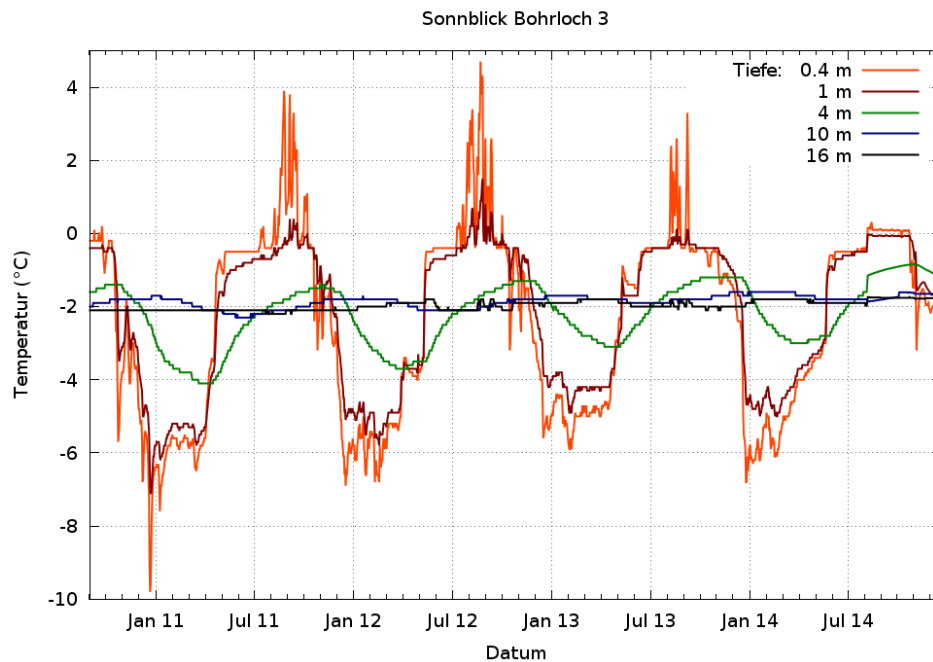


Abb. F- 3: Temperaturverlauf (Tagesdaten) in fünf ausgewählten Tiefen im Bohrloch 3, Hoher Sonnblick im Zeitraum September 2011 und Jänner 2015

Permafrost zählt zu den Komponenten der Kryosphäre und ist daher fester Bestandteil von *Global Cryosphere Watch* (GCW) – eine noch sehr junge Initiative der *World Meteorological Organisation* (WMO). Schnee, Gletscher, Permafrost und ggf. Meereis sollen koordiniert global an ausgewählten Standorten (CryoNet) erfasst werden (Schöner 2015). D.h. in einem integrativen Ansatz werden die Kryosphäre und damit im Zusammenhang stehende Eigenschaften an der Landoberfläche und der atmosphärischen Grenzschicht erfasst. Eine der ersten Stationen in CryoNet ist das Sonnblickobservatorium. Dieses ist eines von weltweit 17 so genannten *integrated sites*. Dies bedeutet, dass nicht nur die Kryosphäre alleine untersucht wird, sondern auch weitere „Sphären“. Bei so genannten *basic sites* (19 weitere Standorte weltweit) wird nur die Kryosphäre untersucht. Aktuell bietet CryoNet hauptsächlich Meta-Informationen zu den Stationen an.

Globale Karten zur Permafrostverteilung und dem Eisgehalt des Bodens werden durch die IPA akkreditiert zur Verfügung gestellt (Grundlage: Brown et al. 1997). Diese basieren auf der Interpolation von in situ-Messungen. Hinzu kommen zahlreiche Modellierungsergebnisse, welche die Verteilung hauptsächlich über die Temperatur berechnen (z.B. Gruber 2012). Eine Verifizierung solcher Produkte ist ein essentieller Beitrag zur internationalen Permafrostforschung.

F-3.4 Produkte mit nationaler Relevanz

Das Phänomen Permafrost ist Teil der Litho- und Kryosphäre und ein Teilaspekt der Problematik Naturgefahren im Alpenraum. Ein Monitoring und damit auch die Erarbeitung und Weitergabe von Produkten sollte daher im Zusammenhang mit weiteren Aspekten geomorphologischer und klimatologischer Veränderungen kommuniziert werden.

Für Produkte auf nationaler Ebene sind die unterschiedlichen Bedürfnisse von Seiten der Wissenschaft (*Science-to-Science*), der Behörden, Vereine und Unternehmen (*Science-to-Stakeholders*) und des allgemeinen öffentlichen Interesses (*Science-to-Public*) zu beachten. Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Thema Permafrost unterstützen Planungen im Bereich Hydrologie und Wasserwirtschaft. Um eine effektive Interaktion mit den WissenschaftlerInnen

zu gewährleisten, sollten Informationen über aktive Forschungsgruppen mit genauer Spezifizierung der jeweils verwendeten Messmethoden und Gebiete zentral zur Verfügung stehen.

Grundlegend für Entscheidungsträger sind Informationen zum Status von Permafrostgebieten wie die räumliche Verteilung, die thermischen Eigenschaften und sichtbare Indikatoren an der Erdoberfläche. In weiterer Folge sind gegenwärtige und zukünftige Veränderungen im Permafrost und ihre morphologischen Folgewirkungen von Interesse. Dabei sollte neben Veränderung im Frostregime des Permafrostes ein zusätzliches Augenmerk auf den saisonalen Frost gelegt werden, weil dieser ähnliche geomorphologische Auswirkung – und folglich ähnliches Naturgefahrenpotential – haben kann. Als nächster Schritt werden in Relation zu potentiell bedrohter Infrastruktur und Menschenleben Gefahrenpotentialkarten benötigt, welche sowohl den aktuellen Status als auch Zukunftsszenarien für die langfristige Planung berücksichtigen.

Ausgewählte und zuvor klar definierte Produkte und Informationen sollten über ein Onlineportal verfügbar sein, um auch die allgemeine Öffentlichkeit ansprechen zu können. Gefordert sind u.a. Temperaturen von Permafroststandorten – sei es von den wenigen tiefen Bohrlochstandorten oder den zahlreicheren seichten Bohrlöchern (d.h. in der saisonalen Auftauschicht) und Oberflächentemperaturstandorten – die Bereitstellung von historischen Daten, Karten von Blockgletschern inklusive Geschwindigkeitsangaben und Volumenveränderungen sowie Informationsmaterial für Schulen (Lieb & Krobath 2015). Eine gewisse räumliche Repräsentanz im Sinne einer ausgewogenen Verteilung der Monitoringstandorte sowie die Aktualisierung von Messdaten (zumindest jährlich) muss gewährleistet sein.

Die Natur von Permafrost als Phänomen des Untergrundes lässt nur begrenzt die Einbeziehung der Bevölkerung (*citizen science*) in das Monitoring zu. In Polarregionen werden beispielsweise Schulen in die Erfassung der jährlichen Auftautiefe einbezogen. In Österreich könnten beispielsweise Bergführer und MitarbeiterInnen von Nationalparks in der Erfassung von Permafrost-beeinflussten Ereignissen wie z.B. Steinschlag miteinbezogen werden.

F-4 Langzeitaufzeichnungen in Österreich: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten

F-4.1 Verbreitung von Permafrost und aktiven Periglazialformen

Die Erforschung von alpinem Permafrost und periglazialen Prozessen begann in Österreich in den 1920er Jahren mit den ersten Bewegungsmessungen an einem Blockgletscher. In jüngster Vergangenheit behandeln Permafroststudien im lokalen Bearbeitungsmaßstab Fragen zu internem Aufbau, Kinematik, Klima, Bodentemperatur, Hydrologie sowie Alter von Blockgletschern, Permafrostverbreitung, Permafrostmonitoring, Soliflukationsprozesse und –formen und die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Permafrost sowie Naturgefahren in Zusammenhang mit Permafrost. Auf regionaler Ebene wurden Fragestellungen zur Verteilung von Blockgletschern und zur Modellierung der aktuellen und einstigen Permafrostverbreitung bearbeitet. Details hierzu gibt Krainer et al. (2012).

Eine erste Permafrostverteilungskarte für ganz Österreich wurde durch Lieb (1996) im Rahmen eines FWF Projektes erstellt. Über ein Jahrzehnt später waren es Ebohon & Schrott (2008), die eine neuere, methodisch mit Lieb (1998) jedoch vergleichbare Modellierung auf Basis des Schweizer Permafrostmodells PERMAKART durchführten. Die erste Modellierung wies eine potentielle Permafrostfläche von ca. 2000 km² aus, die zweite von ca. 1600 km². Einige Jahre später wurde im Rahmen des EU-Projektes PermaNET durch Boeckli et al. (2012) eine wesentlich komplexere Modellierung für den gesamten Alpenbogen durchgeführt. Als Grundlagendaten für Österreich wurden hierzu Geländebefunde der Universitäten Graz und Innsbruck sowie der ZAMG verwendet. Diese sogenannte *Alpine Permafrost Index Map* (APIM) ist eine Indexkarte, welche auf Wahrscheinlichkeitsmodellen basiert. Als erklärende Variable werden in diesem Modell die Jahresmitteltemperatur, die potentielle kurzzeitige Sonneneinstrahlung sowie der mittlere Jahresniederschlag verwendet. Das Modell selbst besteht aus zwei Submodellen; eines für Felsflächen und eines für sedimentbedeckte Flächen. Für die Kalibration dieser Submodelle wurden zum einen Felstemperaturdaten und zum anderen Blockgletscherinventare herangezogen. Beide Modelle wurden auf Basis der Fuzzy-Zugehörigkeit (lineare Funktion abhängig von der Hangneigung) verbunden. Die APIM Karte basiert auf einer Rasterauflösung von 30x30 m und gibt Permafrostindexwerte von 0 bis 1 aus. Entsprechend dieser Auswertung nach Boeckli et al. (2012) wurden für Österreich 3285 km² mit Index $\geq 0,01$, 2907 km² mit Index $\geq 0,1$, 1557 km² mit Index $\geq 0,5$ und 484 km² mit Index $\geq 0,9$ ausgewiesen. Zusätzlich wurden noch 340 km² als vergletscherte Flächen identifiziert, wozu eine Auswertung von 2003 (Paul et al. 2011) verwendet wurde. Bei einem Indexwert zwischen $\geq 0,01$ und $< 0,1$ (378 km²) ist nur in den allerkältesten Lagen mit fleckenhaften Permafrost zu rechnen, bei einem Indexwert von $\geq 0,9$ findet sich Permafrost nahezu in allen Bereichen (Abb. F-4). Die ausgewiesene Fläche mit Index $> 0,5$ entspricht in etwa der Permafrostfläche von Ebohon und Schrott (2008).

Im Zuge von permAT wurde die APIM Karte auf Bezirks- und Länderebene ausgewertet und mit dem frei verfügbaren Gletscherkataster von Österreich GI2 der Aufnahmejahre 1997-1999 (Lambrecht & Kuhn 2007) verschnitten. Aufgrund der in Paul et al. (2011) beschriebenen Unterschiede in der Erfassung der Gletscherstände für 2003 (Paul et al. 2011) und für 1997/99 (Lambrecht & Kuhn 2007), weichen die als Gletscher ausgewiesenen Flächen deutlich voneinander ab: ca. 340 km² für 2003 versus ca. 470 km² für 1997/99. Diese Zahlendiskrepanz zeigt u.a. auch die Problematik in der „richtigen“ Abgrenzung von Gletscherflächen (insbesondere jene von schuttbedeckten Gletschern) auf.

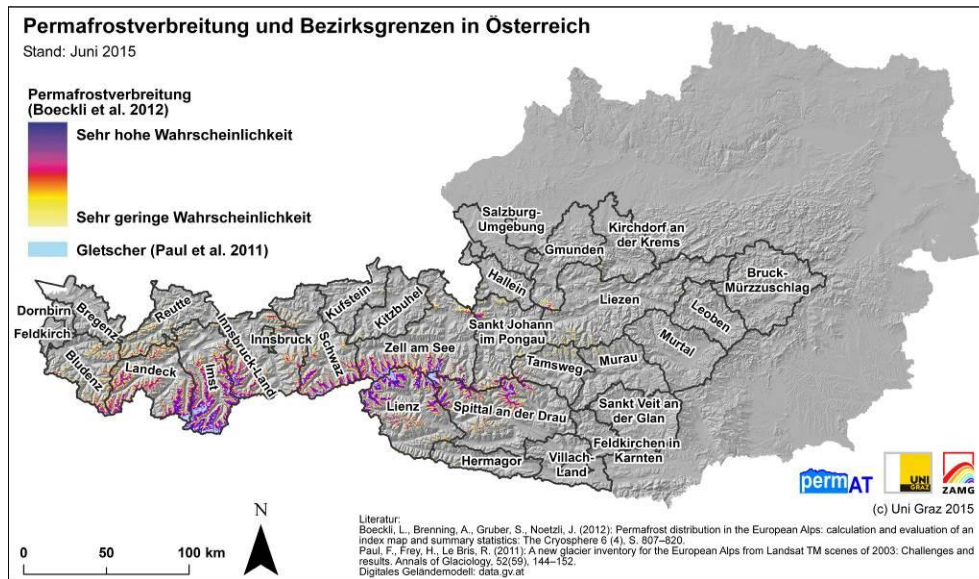


Abb. F- 4: Räumliche Verbreitung von Permafrost in Österreich auf Basis des Modellansatzes von Boeckli et al. (2012) in Relation zu beeinflussten Bezirken (vgl. Tabelle F-2).

Abbildung F-5 zeigt die Verteilung von Permafrost und Gletscher der 30 diesbezüglich relevanten Bezirke bzw. 6 Bundesländer in Österreich. Tabelle F-2 listet detailliert die entsprechenden Anteile relativ und absolut auf. Von der in Summe 3625 km² großen Fläche, die von Permafrost und Gletscher beeinflusst ist (d.h. APIM Index $\geq 0,01$ und vergletscherte Flächen), sind die bei weitem größten Anteile in den Bezirken Imst, Landeck, Lienz und Zell am See zu finden. In all diesen vier Bezirken liegt der Anteil der von Gletscher und Permafrost-beeinflussten Flächen bei über 400 km².

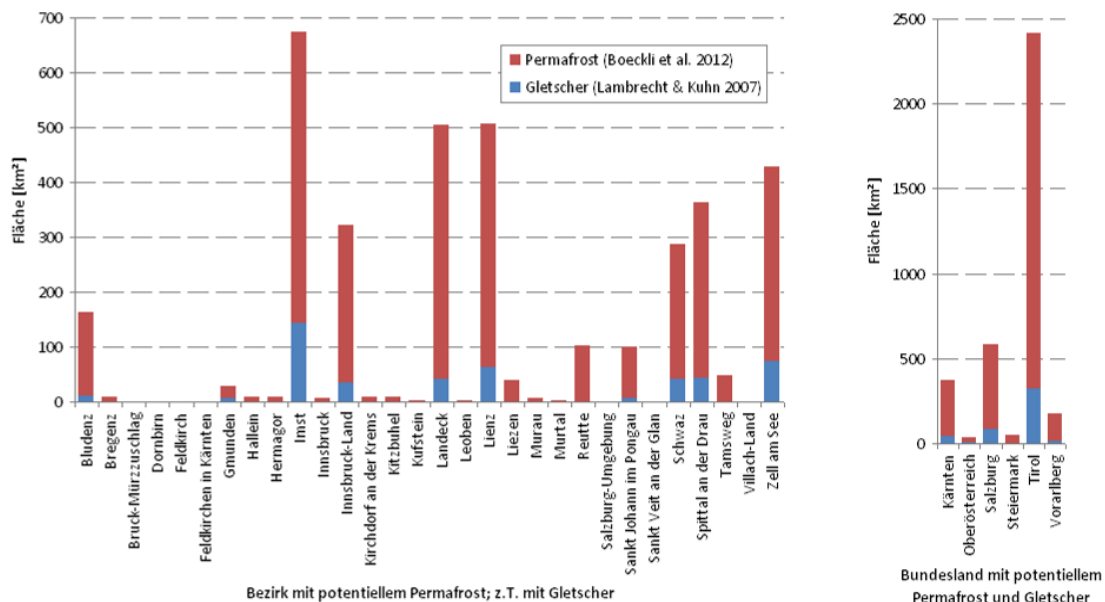


Abb. F- 5: Verbreitung von Permafrost und vergletscherte Flächen auf Bezirks- und Länderebene auf Basis der Modellierung von Boeckli et al. (2012) sowie des Gletscherinventars von Lambrecht & Kuhn (2007)

Tab. F- 2: Relative und absolute Flächenangaben der Permafrost- und Gletscherverbreitung in Österreich aufgeteilt auf betroffene Bezirke (A) und Bundesländer (B) auf Basis von Boeckli et al. (2012) sowie Lambrecht & Kuhn (2007).

(A) Bezirk	Fläche in km ²			Fläche in %		
	Gletscher	Permafr.	Summe	Gletscher	Permafr.	Summe
Bludenz	10,87	152,86	163,74	2,32	4,84	4,52
Bregenz	0,07	9,53	9,60	0,02	0,30	0,26
Bruck-Mürzzuschlag	0,00	0,58	0,58	0,00	0,02	0,02
Dornbirn	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Feldkirch	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
Feldkirchen in Kärnten	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
Gmunden	5,62	21,63	27,26	1,20	0,69	0,75
Hallein	0,00	7,77	7,77	0,00	0,25	0,21
Hermagor	0,18	8,40	8,58	0,04	0,27	0,24
Imst	143,72	530,22	673,94	30,67	16,80	18,59
Innsbruck	0,00	6,69	6,69	0,00	0,21	0,18
Innsbruck-Land	34,78	286,62	321,40	7,42	9,08	8,87
Kirchdorf an der Krems	0,00	7,98	7,98	0,00	0,25	0,22
Kitzbühel	0,00	9,40	9,40	0,00	0,30	0,26
Kufstein	0,00	2,43	2,43	0,00	0,08	0,07
Landeck	41,67	463,01	504,69	8,89	14,67	13,92
Leoben	0,00	1,23	1,23	0,00	0,04	0,03
Lienz	63,58	442,57	506,15	13,57	14,02	13,96
Liezen	0,06	38,03	38,08	0,01	1,20	1,05
Murau	0,00	7,24	7,24	0,00	0,23	0,20
Murtal	0,00	2,10	2,10	0,00	0,07	0,06
Reutte	0,25	101,72	101,97	0,05	3,22	2,81
Salzburg-Umgebung	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
Sankt Johann/Pongau	5,98	93,70	99,68	1,28	2,97	2,75
Sankt Veit an der Glan	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Schwaz	42,39	243,58	285,97	9,05	7,72	7,89
Spittal an der Drau	43,87	319,97	363,84	9,36	10,14	10,04
Tamsweg	0,71	46,68	47,38	0,15	1,48	1,31
Villach-Land	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Zell am See	74,88	352,64	427,52	15,98	11,17	11,79
Summe	468,64	3156,77	3625,41	100,00	100,00	100,00

(B) Bundesland	Fläche in km ²			Fläche in %		
	Gletscher	Permafr.	Summe	Gletscher	Permafr.	Summe
Kärnten	44,05	328,50	372,55	9,40	10,41	10,28
Oberösterreich	5,62	29,61	35,23	1,20	0,94	0,97
Salzburg	81,57	500,81	582,38	17,41	15,87	16,07
Steiermark	0,06	48,60	48,65	0,01	1,54	1,34
Tirol	326,39	2086,24	2412,64	69,65	66,10	66,56
Vorarlberg	10,94	162,43	173,37	2,33	5,15	4,78
Summe	468,64	3156,77	3625,41	100,00	100,00	100,00

Berücksichtigt man nur die potentiellen Permafrostflächen, so weist der Bezirk Imst mit 530,22 km² klar den höchsten Flächenanteil aller Bezirke in Österreich auf. Ähnliche Werte lassen sich für die Bezirke Landeck und Lienz ermitteln mit ca. 440-460 km². Die beiden Bezirke Spittal an der Drau und Zell am See weisen zumindest noch Werte über 300 km² auf, bei Innsbruck-Land und Schwaz werden zumindest noch Werte von über 200 km² erzielt. Bezirke die nur marginal von Permafrost beeinflusst sind (d.h. hier <1 km²), sind Bruck-Mürzzuschlag, Dornbirn, Feldkirch, Feldkirchen in Kärnten, Salzburg-Umgebung, St. Veit an der Glan und Villach-Land. Bezirke, die zwischen 1 und 10 km² Permafrost-beeinflusste Flächen aufweisen, sind Bregenz, Hallein, Hermagor, Innsbruck, Kirchdorf an der Krems, Kitzbühel, Kufstein, Leoben, Murau und Murtal. Permafrost-beeinflusste Flächen im Ausmaß von 10 bis 100 km² findet man in den vier Bezirken Gmunden, Liezen, St. Johann im Pongau und Tamsweg. Permafrostbereiche zwischen 100 und 200 km² finden sich in den beiden Bezirken Bludenz und Reutte.

Auf Bundesländerebene wird klar ersichtlich, dass zwei Drittel der sowohl Gletscher- als auch Permafrostflächen im Bundesland Tirol zu finden sind. Weit dahinter mit rund 16% Permafrostanteil liegt Salzburg gefolgt von Kärnten mit 10% und Vorarlberg mit 5%. Die beiden Schlusslichter bilden die Steiermark (1.5%) und Oberösterreich (1%).

Bereiche mit rezenter Periglazialformung sind in etwa mit der maximalen modellierten Permafrostverbreitung gleichzusetzen. In modellierten Permafrostbereichen mit der Wahrscheinlichkeit „gering“ findet man auf Hangbereichen eher gebundene Solifluktion vor, wohingegen Hangbereiche mit Wahrscheinlichkeiten „hoch“ Landschaftsformen der ungebundenen Solifluktion hervorbringen. Aktive Schutthalden aufgebaut aus Frostschutt, der durch Stein- und Felssturzereignisse aus dem Liefergebiet (Frost beeinflusste Felswand) ins Ablagerungsgebiet (Schutthalde) transportiert wurde, treten sowohl in permanent als auch jahreszeitlich gefrorenen Felswänden auf. Blockgletscher, als typische Formen des alpinen Permafrostes, können sich aus ganzjährig gefrorenen Schutthalden gebildet haben. Blockgletscher finden sich zumeist im Wahrscheinlichkeitsbereich „hoch“.

F-4.2 Permafrost und Naturgefahren

Das Phänomen Permafrost an sich ist an und für sich keine Naturgefahr. Meist hat der Permafrost eine stabilisierende Wirkung auf den Untergrund. Ebenso binden Temperaturen unter dem Gefrierpunkt das oft vorhandene Kluftwasser. Naturgefahren wie Murgänge oder Steinschlag können aber ebenso in Permafrostgebieten entstehen, dies v.a. während der Schneeschmelze, bei starken Niederschlägen oder aber auch während langen Hitzeperioden. Im letzten Jahrzehnt gab es in Österreich einige Sturzereignisse, wo Veränderungen im Permafrostmilieu eine Rolle spielten (z.B. Kellerer-Pirklbauer et al. 2012) und bei entsprechender Überschneidung mit menschlicher Infrastruktur zur Naturgefahr wurden (Fegerl 2015). Steinschlag und Felsstürze als Sturzereignisse werden in der Öffentlichkeit durch ihre steigende Publizität durch ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft häufiger wahrgenommen, Vorfälle wie die zahlreichen Felsstürze aus Permafrost am Matterhorn im Hitzesommer 2003 sind hier sehr gute Beispiele (Noetzi et al. 2004, Hasler et al. 2010).

Schutthalden im Permafrost und Blockgletscher werden durch Bodeneis stabilisiert und so vor Erosion geschützt. Schmilzt das Bodeneis, vergrößert sich die Mächtigkeit des potenziell labilen Schuttbereiches. In flacheren Hangbereichen führt dies zu Setzungserscheinungen, in steileren kann die Zunahme der Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht zu Rutschungen führen. Weiters stellt diese Schicht ein mobilisierbares Reservoir für Starkniederschlagsereignisse und folglich Muren dar. Dieser Umstand kommt ebenso bei Blockgletschern zum Tragen, diese werden als weitere Quelle für Geschiebeherde angesehen, was im Bereich des Sattelkars in der Venediger Gruppe in den letzten Jahren der Fall war (siehe auch Kap. 3.2).

Gletscher in hohen, strahlungsgeschützten Lagen treten in steilem Gelände als Hängegletscher auf. Deren Stabilität hängt u.a. vom Vorhandensein von Permafrost im Untergrund ab. Erwärmt sich der Untergrund, so reduziert sich die Reibung und der Hängegletscher wird

instabiler, bis Teile davon abbrechen können. Untersuchungen dazu werden u.a. am Nördlichen Bockarkess (Ferleiental, Salzburg) durchgeführt.

Für die Öffentlichkeit sind somit das Vorhandensein von menschlicher Infrastruktur und das gleichzeitige Auftreten von Permafrost von großem Interesse. In den Abbildungen F-6 bis F-8 sind Österreichs Schigebiete, Speicherseen und alpine Hütten mit der potenziellen Permafrostverbreitung dargestellt. Die Anhänge F-1 bis F-3 listen die jeweiligen Schigebiete, Speicherseen sowie alpine Hütten detailliert auf. Die Analysen ergaben, dass 23 Schigebiete in Österreich von Permafrost beeinflusst sind; 15 davon in Tirol, je drei in Kärnten und Salzburg, eines in Vorarlberg und eines im Grenzgebiet Oberösterreich/Steiermark.

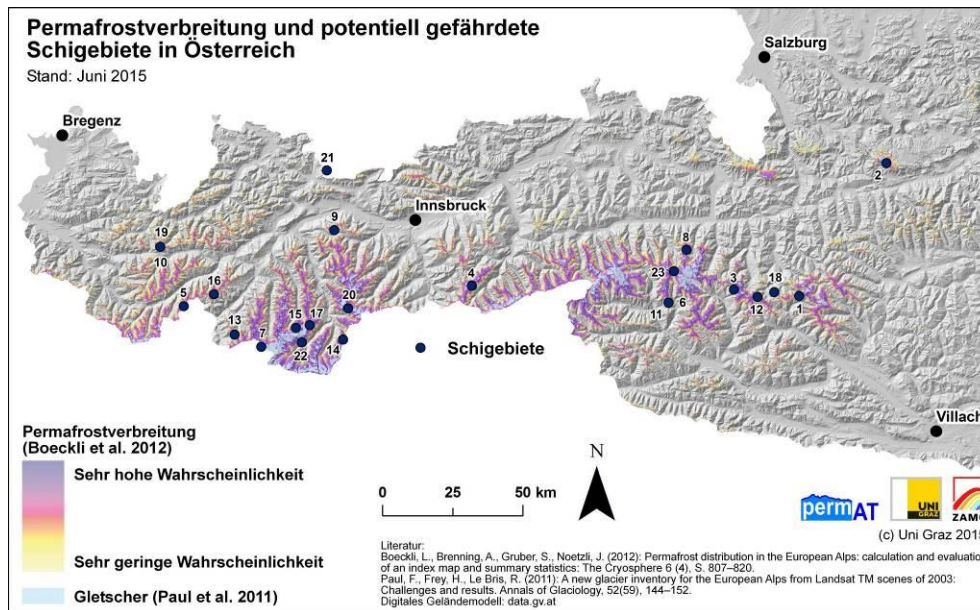


Abb. F- 6: Räumlicher Zusammenhang zwischen modellierter Permafrostverbreitung (Boeckli et al. 2012) und potentiell gefährdeten Schigebieten. Datenbasis eigene Erhebung. Codes siehe Anhang F-1

Österreichische Speicherseen sind prinzipiell im Bereich der Staumauer bzw. -dammes nicht wesentlich von Permafrost beeinflusst. Mögliche Ausnahmen sind einige Stauseen der Kraftwerksgruppen Reißbeck und Fragant, eventuell auch noch die obersten Seen des ÖBB-Kraftwerks Stubachtal sowie der Speicher Finstertal in der Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz. Ein mögliches Gefahrenpotential besteht aber darin, dass gravitativ bewegte Massen, welche sich aus Permafrostbereichen lösen, den Speichersee erreichen und somit schadbringend sein können. Abbildung F-7 zeigt die Verteilung der 31 potentiell von Permafrost beeinflussten Speicherseen. Die meisten der betroffenen Speicherseen liegen entsprechend der Datenanalyse in Kärnten (13), gefolgt von Salzburg und Tirol (je 7) sowie Vorarlberg (4). Nur bei zwei der 31 Speicherseen ist die Existenz von Permafrost im Nahbereich wahrscheinlich, an den meisten Speicherseen sporadisch möglich (Anhang F-2).

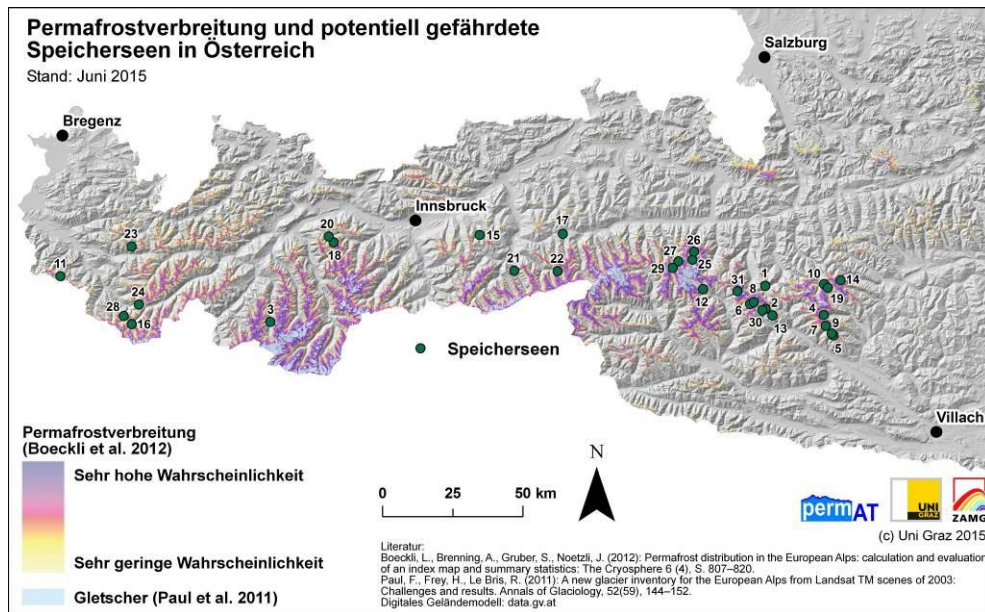


Abb. F- 7: Räumlicher Zusammenhang zwischen modellierter Permafrostverbreitung (Boeckli et al. 2012) und potentiell gefährdeten Speicherseen zur Energiegewinnung. Datenbasis eigene Erhebung. Codes siehe Anhang F-2.

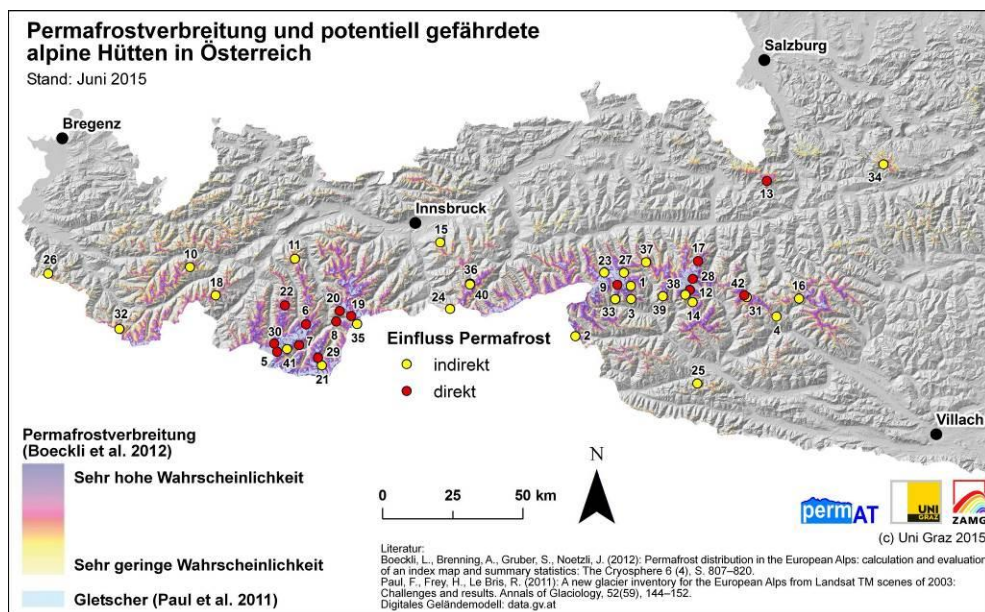


Abb. F- 8: Räumlicher Zusammenhang zwischen modellierter Permafrostverbreitung (Boeckli et al. 2012) und potentiell gefährdeten Hütten (meist bewirtschaftet) sowie eines Hotels (Tuxer-Ferner-H.). Datenbasis eigene Erhebung. Codes siehe Anhang F-3.

Die Anzahl von bewirtschafteten alpinen Hütten sowie eines Hotels mit Permafrost am Standort oder zumindest Permafrost im Nahbereich beläuft sich auf 42 (Abb. F-8), wobei auch hier der Großteil (29) in Tirol liegt (die Landshuter-Europa-Hütte liegt dabei genau an der Grenze zwischen Tirol und Italien). Des Weiteren liegen 6 entsprechende Hütten in Salzburg, 4 in Kärnten, 2 in Vorarlberg und 1 (die Seethaler- bzw. Dachsteinwarthütte) im Grenzgebiet Steiermark/Oberösterreich. Die bei weitem am höchsten gelegene Hütte im Permafrost ist die Erzherzog-Johann-Hütte auf 3454 m gefolgt vom Brandenburgerhaus auf 3277 m.

Des Weiteren befinden sich einige Straßenübergänge oder öffentliche Zufahrten zu Tourismusbereichen in potenziellen Permafrostbereichen. Hier sind die Straßen auf den Rettenbach- und Tiefenbachferner (Sölden), Weißseeferner (Pitztal), die Timmelsjoch-Straße (nahe Obergurgl), die Grossglockner-Hochalpenstraße (im Bereich Hochtörl) oder die Straße zum Kaunertaler Gletscherschigebiet zu nennen. Andere Straßen werden höchstens durch gravitative Prozesse aus nahen Permafrostgebieten indirekt beeinflusst.

Alpine Wege und Steige sind durch ihre Lage mit Abstand am direktesten von den Auswirkungen der sich verändernden Permafrostverbreitung betroffen. Zustiege zu Hütten, wie auch beliebte Übergänge und Gipfelrouten (vgl. Kap. 3.2), mussten in den letzten Jahren immer wieder saniert oder gänzlich verlegt werden. Die Hüttenerhalter sehen sich mehrerer Probleme aufgrund des Klimawandels gegenüber: Hier sind einerseits die Sicherheit der Hütten in Bezug auf die Standfestigkeit (z.B. Zittelhaus) oder Bedrohung durch Rutschungen und andererseits die Gewährleistung der Wasserversorgung zu nennen. Die Durchführung von Hochtouren wird v.a. in sehr warmen Perioden vor größere Probleme gestellt. Das tiefere Auftauen von Bodenschichten führt zu einem Ansteigen der Steinschlagaktivität. Das größere Angebot von Schmelzwasser in Klüften und die Sättigung der aktiven Bodenschicht können sogar zu größeren Fels- wie auch zu Bergstürzen führen (z.B. Mittlerer Burgstall, Glocknergruppe; Kellerer-Pirklbauer et al. 2012a).

F-4.3 Verbreitung von aktuellen Monitoringstandorten und Forschungsintensität

Monitoringmessnetze in Permafrostgebieten in Österreich gibt es erst seit der Mitte des letzten Jahrzehnts, wobei gegenwärtig nur drei Standorte (zwei in den Hohen Tauern gelegen, eine in den Nördlichen Kalkalpen) mit Bohrlöchern im Permafrost existieren (vgl. Kapitel F-3.1). Neben den drei Bohrlochstandorten gibt es 19 weitere lokale Permafrostuntersuchungsgebiete in Österreich, wo mit verschiedenen Methoden Permafrost und periglaziale Prozesse direkt oder indirekt untersucht werden (Abb. F-9).

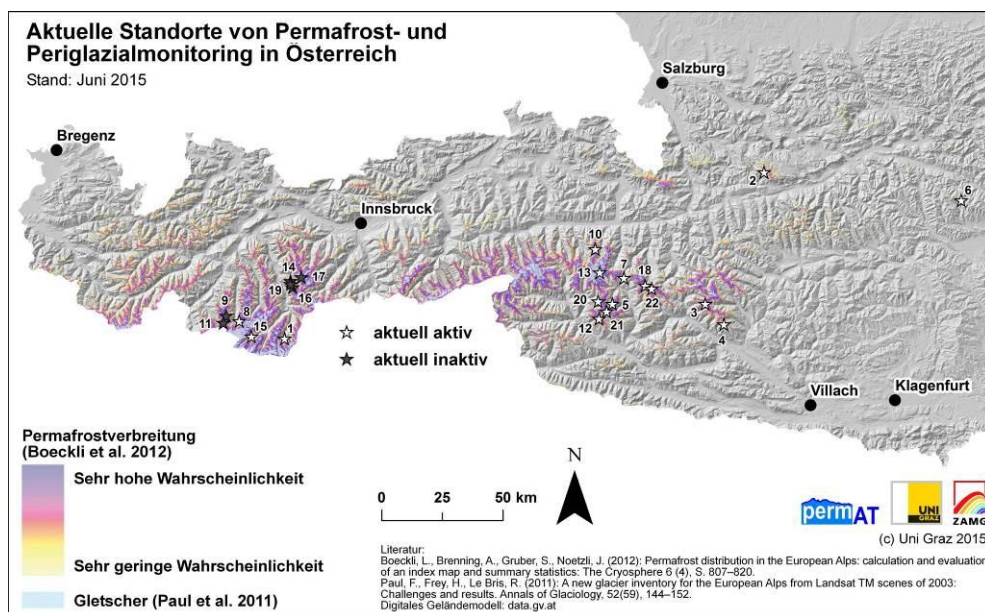


Abb. F- 9: Verbreitung von aktuellen Permafrost- und Periglazialmonitoringstandorten (mit Unterscheidung zwischen aktuell „aktiv“ und „inaktiv“; vgl. Text) in Österreich sowie modellierte Verbreitung von Permafrost (Boeckli et al. 2012). (vgl. Tabelle F-3).

Tab. F- 3: Aktuelle Permafrost- und Periglacialmonitoringstandorte in Österreich (Zahlencodierung in Klammer siehe Abb. F-9) mit Auflistung der untersuchten Parameter; Abkürzungen: Bohrl.=Bohrloch; GST=Bodenoberflächentemperatur; GT=Seichte Bohrlöcher (innerhalb der saisonalen Auftauschicht); n=Anzahl der Standorte; t=maximale Tiefe der Bohrlöcher (auf ganze Zahl gerundet) in m; a=aktiv; ia=inaktiv; m=Monitoring; ei=Einzelmessung; Abkürzungen Institutionen: AlpS=AlpS Innsbruck; GBA=Geologische Bundesanstalt; IGF=Institut für Gebirgsforschung, ÖAW; TUG=TU Graz; UGE=Uni Graz Erdwissenschaften; UGG=Uni Graz Geographie, UIGE=Uni Innsbruck Geographie; UIGL=Uni Innsbruck Geologie; USG=Uni Salzburg Geographie; ZAMG-Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

Monitoring-standort	Institut.	Bohrl.			GST/GT			Geophysik				Kinematik			Hydro.		Aktuell	
		ja	n	t	a	ia	n	a	in	m	ei	a	in	m	a	m	a	ia
Äußere Hoch-ebenkar (1)	UIGL, UIGE, IGF					X	2		X		X	X		X	X	X	X	
Dachstein (2)	UGG	X	1	7	X		12		X		X						X	
Dösen (3)	UGG, TUG				X		12		X		X	X		X			X	
Hintereggen-graben (4)	UGG				X		8										X	
Hinteres Lang-talkar (5)	UGG, TUG				X		15		X		X	X		X			X	
Hochreichart-Schöneben (6)	UGG, UGE				X		6		X		X						X	
Hochtor-Fallbichl (7)	UGG				X		3										X	
Innere Ölgrube (8)	UIGL, UIGE					X			X		X		X	X	X	X	X	
Kaiserberg (9)	UIGL, UIGE					X			X		X		X	X	X	X		X
Kitzssteinhorn (10)	USG, AlpS, GBA	X	5	29	X		29	X		X	X	X		X	X	X	X	
Krummgam-Pental (11)	UIGL, UIGE					X			X		X							X
Leibnitzkopf (12)	TUG											X		X			X	
Pasterze-Burgställe (13)	UGG				X		7					X		X			X	
Reichenkar (14)	UIGL, UIGE					X			X		X		X	X	X	X		X
Rofenberg (15)	UIGE				X		5		X		X	X		X			X	
Rosskar (16)	UIGL, UIGE					X												X
Schrankar (17)	UIGE, IGF					X												X
Sonnblick (18)	ZAMG	X	3	20	X		15		X	X	X						X	
Sulzkar (19)	UIGL					X			?			?						X
Tschadinalm (20)	TUG											X		X			X	
Weissenkar (21)	UGG, TUG				X		3		X		X	X		X			X	
Wintergasse (22)	ZAMG				X		28										X	

In Abbildung F-9 sind Standorte, an welchen in der jüngsten Vergangenheit noch intensiv Permafrost-bezogene Forschung betrieben wurde (Monitoring aktuell inaktiv: 6 Standorte)

von solchen, an denen aktuell noch Monitoring durchgeführt wird (Monitoring aktuell aktiv: 16 Standorte), unterschieden worden. An 20 der 22 Standorte wurde in jüngster Vergangenheit die Bodenoberflächentemperatur (*ground surface temperature/GST*) oder die Temperatur in seichten Bohrlöchern innerhalb der saisonalen Auftauschicht (*ground temperature/GT*) gemessen. Die längste geschlossene Bodentemperaturzeitreihe in Österreich für ein Permafrostareal gibt es für das Hochreichartgebiet (Niedere Tauern), wobei seit 2004 ein klarer Erwärmungstrend der oberflächennahen Bodenschichten und somit auch des Permafrostes zu beobachten ist (Kellerer-Pirklbauer 2015).

Ein Geophysikmonitoring findet hingegen nur an einem Standort aktuell statt (Kitzsteinhorn mit Hilfe der Geoelektrik); an 12 weiteren Standorten wurden zumindest geophysikalische Einzelmessungen durchgeführt. Die Kinematik von labilen Permafrostarealen wird aktiv an 9 Standorten untersucht, wobei in den meisten Fällen aktive Blockgletscher beobachtet werden. Weiters stehen aber auch Felsflanken unter Beobachtung, welche mit Hilfe von terrestrischem Laserscanning (Pasterze-Burgställe) oder Extensometer (Kitzsteinhorn) untersucht werden. Hydrologische Messungen im Bereich von Permafrost werden lediglich an 5 Standorten durchgeführt, vier davon in Quellbereichen von vier Blockgletschern in Tirol. Die Tabelle F-3 gibt einen detaillierten Überblick über alle Monitoringstandorte sowie den eingesetzten Methoden. In der Tabelle F-4 ist die modellierte Permafrostverbreitung von Österreich, Schweiz und Italien (nach Boeckli et al. 2012) der Anzahl der Bohrlochstandorte sowie Bohrlöchern gegenübergestellt. Klar ersichtlich wird in dieser Darstellung, dass die Anzahl der Bohrlochstandorte pro km² in Österreich deutlich schlechter ausfällt, als in den beiden benachbarten Ländern, trotz nicht so dramatischen Unterschieden in der Permafrostverbreitung.

Tab. F- 4: Anzahl von Bohrlöchern in der Schweiz, Österreich und Italien bezogen auf die Permafrostverteilung auf Basis von Boeckli et al. (2012).

Land	Permafrostverbreitung [km ²]			Bohrlochstandorte [n]	Bohrlöcher [n]	km ² pro Bohrlochstandort		
	Index ≥ 0.1	Index ≥ 0.5	Index ≥ 0.9			Index ≥ 0.1: km ² /Sta.	Index ≥ 0.5: km ² /Sta.	Index ≥ 0.9: km ² /Sta.
CH	3710	2163	754	13	28	285	166	58
IT	3353	1786	569	7	10	479	255	81
AT	2907	1557	484	3	9	969	519	161

F-4.4 Räumliche Repräsentativität

Wie im Kapitel zuvor dargestellt wurde, sind räumlich gesehen die aktuellen Forschungstätigkeiten im Bereich Permafrost und Periglazialmonitoring in Österreich im Wesentlichen auf zwei Hauptregionen – Zentrale und östliche Hohe Tauern sowie Stubai und Ötztaler Alpen (vgl. Abb. F-9) - beschränkt. Zwei Ausnahmen sind die Monitoringaktivitäten im Dachsteingebiet (einziger Standort in Österreich in den Nördlichen Kalkalpen) sowie jene im Hochreichartgebiet (einziger Standorte in den Niederen Tauern). Vor allem die stark von Permafrost beeinflussten Gebiete in der Grenzregion Tirol und Vorarlberg (Verwall, Silvretta, Samnaungruppe und Lechtaler Alpen) und die Region Zillertaler Alpen-Venediger Gruppe werden aktuell von keinem diesbezüglichen Monitoring berücksichtigt. Weiters gibt es auch kein Monitoring im Bereich Nördliche Kalkalpen in Tirol und Salzburg (dort v.a. Hochkönig) sowie in der westlichsten Untergruppe der Niederen Tauern, den Schladminger Tauern, die auch weit verbreitete Permafrostgebiete aufweisen.

Wie die Analysen der von Permafrost beeinflussten Schigebiete, Staudämme und alpinen Schutzhütten gezeigt haben (siehe Kap. 4.2), ist jedoch in diesen aktuell unberücksichtigten Gebieten Infrastruktur von potentieller Permafrostveränderung definitiv betroffen, weshalb auch aus sozioökonomischen Gründen eine Erweiterung des Messnetzes sowie eine – zu-

mindest an einzelnen existierenden Monitoringstandorten – Intensivierung des aktuellen Monitorings anzustreben ist. Wie weitere Raumanalysen ergaben (Abb. F-10), befindet sich ein großer Anteil der betroffenen Infrastruktur an SW-exponierten Hängen, insbesondere wenn sich diese in Höhen von über 2800 m befindet. Abbildung F-10 zeigt auch gut, dass die meiste betroffene Infrastruktur in der Höhenzone 2500 bis 3000 m zu finden ist und nur fünf alpine Hütten (Ramolhaus, Erzherzog-Johann-Hütte, Hochstubaithütte, Brandenburgerhaus und Zittelhaus) auf über 3000 m Seehöhe liegen.

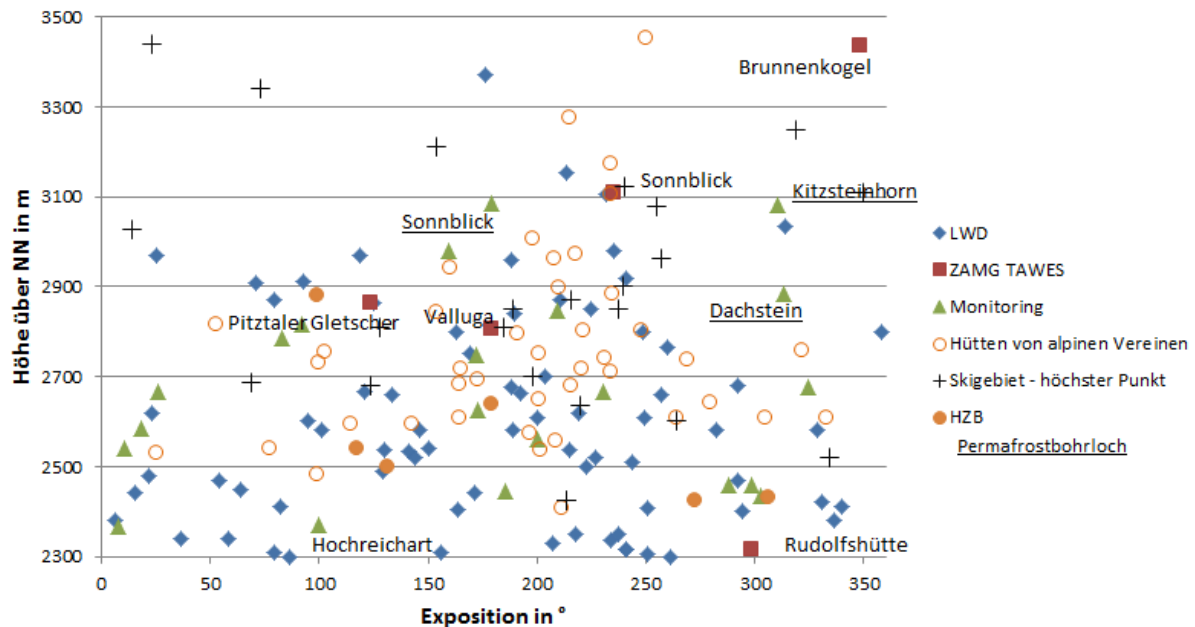


Abb. F- 10: Exposition und Höhenlage (beide Grundlage 10 m DEM) von Permafrost-beeinflusster Infrastruktur (Ausgenommen Bergstationen von Seilbahnen, etc.), aktuellen Permafrost-monitoringsstandorten und möglichen relevanten ZAMG, HZB und LWD Standorten. Im Fall von Bergstationen kann die Exposition abweichen, da nicht eindeutig bestimmbar. Die ZAMG-Station Rudolfshütte liegt bereits außerhalb des Bereiches „Permafrost wahrscheinlich“.

F-4.5 Methoden, Parameter und Forschungsintensität

Bei der Untersuchung von Permafrost kann man prinzipiell zwischen indirekten, direkten und halbdirekten Methoden der Permafrosterkundung unterscheiden. *Indirekte Methoden* basieren zumeist auf geomorphologischen Anzeigern (z.B. aktive Blockgletscher) oder groben Faustregeln, welche die Basis für Modellierungen bilden können. Die Bewegung der von Permafrost beeinflussten Formen (z.B. Blockgletscher, gefrorene Moränen, geklüfteter, gefrorener Fels) und Temperatur der Oberfläche kann durch verschiedene terrestrische, Flugzeug-gestützte oder Satelliten-gestützte Systeme erfasst werden. *Halbdirekte Methoden* erfassen nur indirekt Permafrost, wobei die thermische Situation der Geländeoberfläche (Bodenoberflächentemperatur) und des oberflächennahen Untergrundes (seichte Bohrlöcher) sowie die physikalischen Eigenschaften des Permafrostes darunter durch verschiedene geophysikalische Verfahren (z.B. Geoelektrik, Seismik, Bodenradar und Gravimetrie) bestimmt werden. Eine weitere halbdirekte Methode ist die Messung der Quelltemperatur von Quellen im Nahbereich von Permafrost. Bei *direkten Methoden* haben BeobachterInnen direkten Kontakt mit dem Permafrost in Grabungen, Bohrlochsondierungen, natürlichen Aufschlüssen (z.B. nach einem Felssturz oder einer tiefgründigen Massenbewegung in Permafrost) oder in Form von Temperaturmessungen in tieferen Bohrlöchern (d.h. tiefer als die saisonale Auftauschicht) in Permafrost. Der Einsatz dieser Methoden in Bereichen von tiefgründigem saisonalem Frost (v.a. Temperaturmonitoring) erscheint auch als relevant, da Verwitterung und geomorphologische Prozesse hier ähnlich wirken können wie im Permafrost (vgl. Kap. 3.2).

Tabelle F-5 listet die gegenwärtig (d.h. aktuell und in jüngster Vergangenheit) in Österreich verwendeten Methoden im Bereich Permafrost- und Periglazialmonitoring auf. Die wichtigsten Parameter – in Bezug auf Messhäufigkeit – sind dabei die Temperatur sowie die Bewegung von Blockgletschern.

Tab. F- 5: Gegenwärtig in Österreich eingesetzte Methoden im Bereich Permafrost- und Periglazialmonitoring unterschieden zwischen indirekten, halbdirekten und direkten Methoden. Plattform gestützt: d.h. Flugzeug, Helikopter, oder *unmanned aerial systems/UAS* bzw. *unmanned aerial vehicle/UAV*

Methoden- gruppe	Messgröße	Methode	Eingesetzt
Indirekt	Blockgletscher- bewegung – Ober- fläche	geodätisch	Ja
		Bild basiert – terrestrisch	Ja
		Bild basiert – Plattform gestützt*	Ja
		Bild basiert – Satelliten gestützt	Ja
		Laser Scanning - terrestrisch	Ja
		Laser Scanning – Plattform ge- stützt*	Ja
		InSAR Scanning – Satelliten ge- stützt	Ja
	Blockgletscher- bewegung – interne Deformation	Deformationsbewegung mit Inkli- nometer in Bohrlöcher	Nein
Halbdirekt	Temperatur	Temperatur der Bodenoberfläche (GST)	Ja
		Seichte Bohrlöcher innerhalb der saisonalen Auftauschicht (GT)	Ja
	Struktur und Fes- tigkeit	Geophysik (v.a. Geoelektrik, da- neben Seismik, Magnetik, Geora- dar); Bohrlochuntersuchung	Ja
	Wasser	Quelltemperatur und Quellche- mismus (Schwermetallbelastung), Felsfeuchtigkeit (TDR-Sonden, Fernerkundung)	Ja
Direkt	Temperatur	Bohrloch in Festgestein	Ja
		Bohrloch in Lockergestein/ Block- gletscher	Nein

Neben der Messung der Temperatur im Permafrost mit Hilfe von tiefen Bohrlöchern, ist die Messung der Bodenoberflächentemperatur eines der wichtigsten in Österreich angewendeten Monitoringverfahren. Die Bodenoberflächentemperatur (*Ground Surface Temperature – GST*) ist dabei definiert als die Oberflächen- bzw. oberflächennahe Temperatur des Untergrundes (anstehendes Gestein bzw. Sedimentablagerungen), gemessen in den obersten Zentimetern, wobei der Temperatursensor vor direkter Strahlung geschützt sein muss. Die GST ist abhängig von der Energiebilanz der Oberfläche wie auch von standortspezifischen Charakteristika, wie Vegetationsbedeckung, Oberflächenrauigkeit und Farbe sowie Feuchtegehalt (Klene et al. 2001). Das GST-Monitoring trägt zum Verständnis der standortspezifischen Energie- und Wärmetransporte bei.

Für das Auftreten von Permafrost spielt die Schneedecke eine zentrale Rolle, da sie den Boden vom Einfluss der Atmosphäre isoliert und durch ihre hohe Albedo einen großen Teil der Sonnenenergie reflektiert. Diese Eigenschaften wirken sich zu unterschiedlichen Jahreszeiten anders aus. In einem schneereichen Winter wird der Boden durch die Schneedecke vor eindringender kalter Luft geschützt (wärmender Effekt). Im Frühjahr und Sommer wird der Boden, der noch immer unter Schnee liegt, vor warmer Luft und Strahlung abgeschirmt (kühlender Effekt). Beginnt ein Winter kalt und schneearm, sind das die besten Bedingungen für Permafrost, da der Boden stark auskühlen kann. Bildet sich im Verlauf des Winters eine dicke und sich lang in das Frühjahr haltende Schneedecke, sind auch dies günstige Bedingungen für Permafrost. Ist die Schneedecke mächtig genug (>1 m), um den Untergrund von atmosphärischen Einflüssen abzuschirmen, stellt sich in der Regel eine relativ konstante Temperatur an der Basis der Schneedecke ein. Haeberli (1975) hat eine empirische Faustregel für die Interpretation der Basistemperatur der Schneedecke (BTS) entwickelt. Liegt die BTS unter -3 °C, verbirgt sich im Untergrund wahrscheinlich Permafrost. Zwischen -3 °C und -2 °C liegt der Unsicherheitsbereich, worin möglicherweise Permafrost auftritt. Bei Temperaturen größer -2 °C ist der Untergrund wahrscheinlich nicht das ganze Jahr über gefroren. Da die Schneedecke im Verlauf des Winters jedoch relativ stark variieren kann, sind Permafrost-bezogene Aussagen, die rein auf BTS-Messungen basieren, mit äußerster Vorsicht zu behandeln. Bei der Detektion von Permafrost-Standorten ist innerhalb einer mehrjährigen Messreihe von GST-Daten prinzipiell immer mit einigen solcher „Ausreiser“ zu rechnen.

F-4.5.1 Indirekte Methoden der Permafrostbestimmung: Beispiele

Die Messung der Bewegung von Blockgletschern begann in Österreich bereits in den 1920er Jahren; nur wenige Jahre nach den ersten Bewegungsmessungen an Blockgletschern (dies geschah in den Schweizer Alpen) überhaupt (Kaufmann & Kellerer-Pirklbauer 2015). Aktuell wird die Bewegung von aktiven Blockgletschern lediglich in Kärnten und Tirol gemessen, wobei zumeist der Fokus auf Einzelblockgletscher liegt und terrestrische Verfahren (geodätisch, photogrammetrisch, terrestrisches Laserscanning) angewendet werden. Die Blockgletscher Äußeres Hochebenkar (Stubai Alpen), Dösen, Hinteres Langtalkar, Leibnitzkopf, Tschadinalm und Weißenkar (alle Hohe Tauern) sind die aktuell am besten untersuchtesten Blockgletscher in Österreich. Kaufmann & Kellerer-Pirklbauer (2015) geben einen detaillierten Überblick über die in Österreich verwendeten, gängigen Verfahren des Blockgletschermonitorings. In der gleichen Studie wird auch gezeigt, dass über eine größere Fläche (125 km²) auf Basis von Orthofotos aktive Blockgletscher gut erkannt und in weiterer Folge beobachtet werden können. Abbildung F-11 zeigt beispielsweise die mittlere jährliche Bewegungsrate von aktiven Blockgletschern in der Zentralen Schobergruppe im Zeitraum 2002-2009. Deutlich kann man sehr schnelle Blockgletscher (z.B. Nr. 2 und 4 in der Karte) von sehr langsamen (Nr. 3) und inaktiven Blockgletschern unterscheiden.

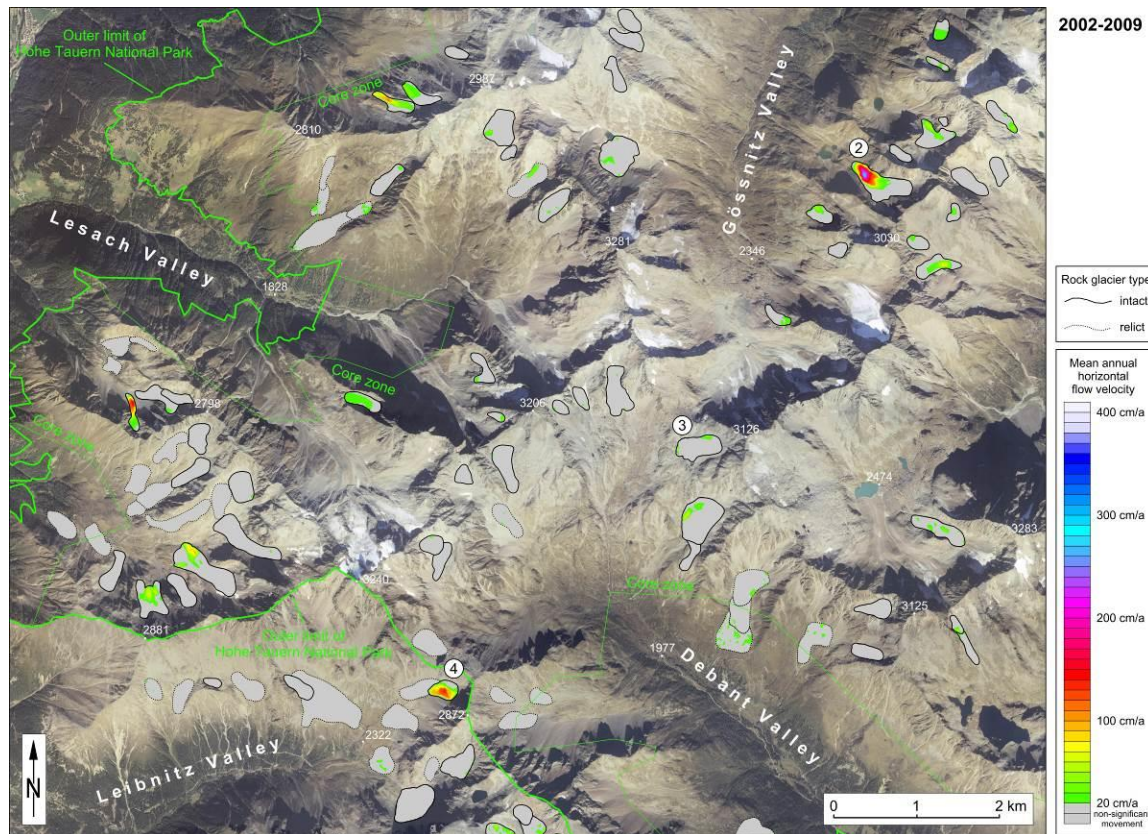


Abb. F- 11 Mittlere jährliche Bewegungsrate von Blockgletschern in der Zentralen Schobergruppe im Zeitraum 2002 bis 2009. Bewegungsraten >20cm/a wurden in der Auswertung als signifikant ermittelt. Blockgletscherkodierung: 2=Hinteres Langtalkar, 3=Weißenkar, 4=Leibnitzkopf (Quelle: Kaufmann & Kellerer-Pirklbauer 2015; Abb.9).

F-4.5.2 Halbdirekte Methoden der Permafrostbestimmung: Beispiele

Die aktuell am gängigsten halbdirekten Methoden zur Bestimmung des Permafrostes sind Temperaturmessungen an oder nahe der Bodenoberfläche (vgl. Kap. 4.3 – GST und GT), wobei die Messungen im Untergrund nicht den Permafrost selbst erreichen, sondern nur innerhalb der saisonalen Auftauschicht durchgeführt werden, sowie verschiedene geophysikalische Verfahren, wobei vor allem die Geoelektrik zur Detektion von Permafrost eingesetzt wird. In den folgenden Absätzen werden die Bodentemperaturmessnetze im Bereich des Sonnblicks (durch die ZAMG) sowie jenes der Universität Graz im Nationalpark Hohe Tauern kurz vorgestellt.

Zur Erfassung der Bodenoberflächentemperatur im Bereich des Hohen Sonnblicks wurden im Jahr 2006 die ersten Temperatursensoren an der Südflanke des Hohen Sonnblicks, an der südexponierten Flanke der Goldbergspitze sowie in der nord- bis nordwestexponierten Wintergasse installiert. Insgesamt wurden 40 Datenlogger des Typs Universal Temperatur Logger 1 (UTL-1) ausgelegt. Hiervon waren 20 Stück an der Südflanke des Sonnblickgipfels und jeweils 10 Stück im Bereich Goldbergspitze und Wintergasse im Einsatz. Zusätzlich wurden für die Erfassung der Felstemperatur 20 Datenlogger des Typs HOBO TidbiT im nord- bis nordwestexponierten Gipfelbereich des Sonnblicks installiert. Das Untersuchungsgebiet Goldbergspitze wurde aufgrund der heterogenen Temperaturverteilung, die keine Abhängigkeit der Seehöhe, Exposition und Hangneigung sowie Untergrundmaterial erkennen ließ, nach der ersten Projektphase von PERSON (Permafrostmonitoring Sonnblick) im Jahr 2010 aufgegeben. Gleichzeitig wurde das Monitoring im Bereich des Untersuchungsgebietes Wintergasse intensiviert. Im aktuellen Projekt PERSON-GCW – Permafrostmonitoring Sonnblick (BMLFUW) – Etablierung des Sonnblicks (Hohe Tauern) als *Global Cryosphere Watch supersite* – wird das im Rahmen der Projekte PERSON 1 und PERSON 2 begonnene Permafrostmonitoring fortgeführt und ausgebaut, so dass im Jahr 2015 im Bereich der Winter-

gasse Bodentemperaturmessungen an 28 Standorten durchgeführt werden. Hiervon sind 13 Datenlogger des Typs Universal Temperatur Logger 1 (UTL-1), 9 des Typs iButton und sechs HOBO Pendant Datalogger im Einsatz. Im September 2010 wurden die ersten seichten Bohrlöcher (GT) im Gebiet der Wintergasse mit einem Durchmesser von 36 mm und einer Tiefe zwischen 30 cm und 140 cm gebohrt. In diesen Bohrlöchern wurden zwei bzw. vier Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen installiert. Im Jahr 2013 folgten zwei weitere Bohrlöcher mit 81 bzw. 85 cm Tiefe. Zusätzlich wurde im Herbst 2013 durch Unterstützung des LWD Salzburg ein weiteres Bohrloch mit einer Tiefe von 1m unmittelbar neben der LWD-Station auf der Fraganter Scharte gebohrt. Ende September 2014 wurden drei weitere Bohrlöcher gebohrt und instrumentiert. Somit steht aktuell ein recht dichtes Messnetz für GST- und GT- (hier als NST bezeichnet) Standorte zur Verfügung. Abbildung F-12 zeigt die aktuelle Verbreitung von GST- und GT- (hier als NST bezeichnet) Standorte im Gipfelbereich des Hohen Sonnblicks. Ebenso sind in der Abbildung die drei 20m tiefen Bohrlöcher südlich der Gipfelverbauung verortet.

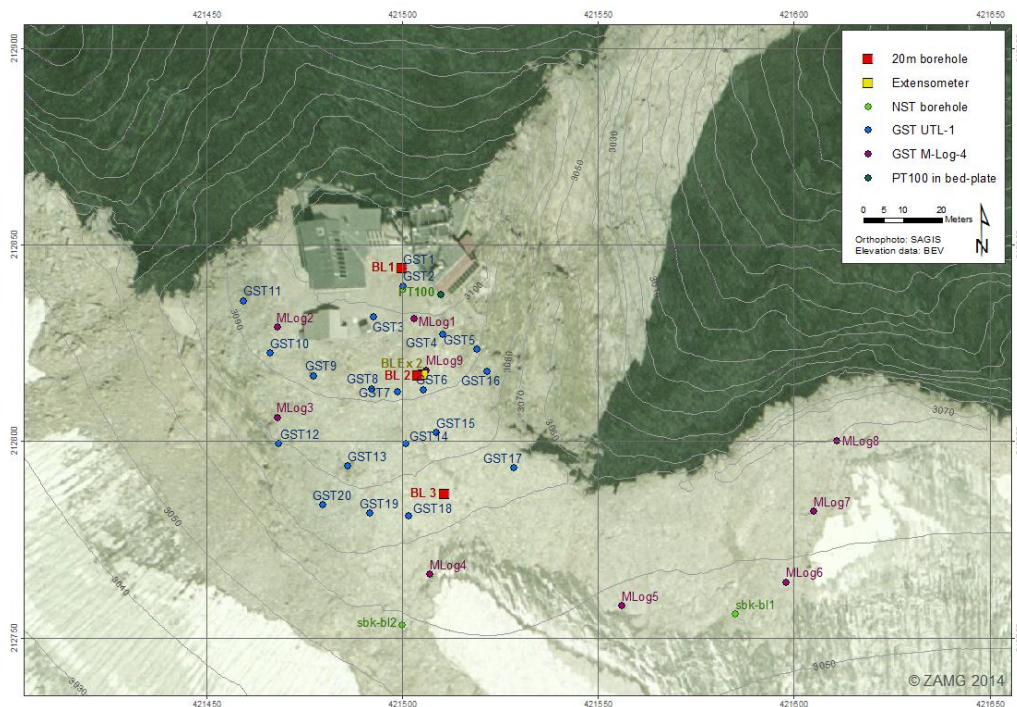


Abb. F- 12 Räumliche Verteilung von Temperaturmessungen an der Oberfläche (GST/PT100), nahe der Oberfläche (hier als „NST borehole“ bezeichnet) sowie tiefere Bohrlöcher (20m), welche in den eigentlichen Permafrostbereich unterhalb der saisonalen Auftauchsicht eindringen.

Das zweite hier kurz vorgestellte Messnetz zum Monitoring der Bodenoberfläche (GST) und des oberflächennahen Untergrundes ist das Messnetz der Universität Graz. Im Rahmen des FWF-Projektes ALPCHANGE wurde durch die Universität Graz, mit Unterstützung der TU Graz, im Jahr 2006 begonnen ein Permafrostmonitoringmessnetz in Zentral- und Ostösterreich aufzubauen. Der räumliche Fokus lag dabei auf die Hohen und Niederen Tauern. In den Folgeprojekten PermaNET und permAfrost wurde dieses Messnetz gewartet und teilweise erweitert. Tabelle F-6 gibt einen Überblick über die neun Standorte, welche in Summe mit 57 Datenlogger und 131 Temperaturmesssensoren ausgestattet sind. Nahezu alle Datenlogger sind GeoPrecision (Deutschland) Produkte (wenige UTL-Standorte). 23 der 57 Datenlogger sind 1-Kanaldatenlogger, an 34 Lokalisationen sind 3-Kanaldatenlogger installiert. Die Analyse der Datenreihen von 2006 bis 2012 hat beispielsweise gezeigt, dass die Veränderung in der Bodentemperatur innerhalb der Hohen Tauern regional recht unterschiedlich ausgefallen ist (Kellerer-Pirklbauer 2013).

Tab. F- 6: Permafrost und Periglazialmonitoringstandorte der Universität Graz und der Technischen Universität Graz. Die Anzahl der installierten Datenlogger und Sensoren sowie die Messtiefenbereiche sind gelistet. *=Fallbichl und Hochtor sind in der Tabelle F-3 zu einem Standort zusammengefasst; **=Kögelekar und Hinteres Langtalkar sind in der Tabelle F-3 zu einem Standort zusammengefasst.

Monitoringstandort der Grazer Universität	Code	Anzahl der Loggerstandorte	Anzahl der Sensoren	Tiefen (cm)
Dösen, Ankogelgruppe	DOV	12	30	0 - 300
Fallbichl, Goldberggruppe*	FAB	2	6	0 - 75
Hintereggengraben, Reisseckgruppe	HEV	8	17	0 - 275
Hinteres Langtalkar, Schobergruppe**	HLC	14	30	0 - 150
Hochreichartgebiet, Seckauer Tauern	HOR	6	11	0 - 125
Hochtor, Glocknergruppe*	HOT	1	3	0 - 60
Kögelekar, Schobergruppe**	KC	2	6	0 - 50
Pasterze-Burgställe, Glocknergruppe	PAG	9	23	0 - 75
Weissenkar, Schobergruppe	WEI	3	5	0 - 100
<i>Summe</i>		<i>57</i>	<i>131</i>	<i>0 - 300</i>

F-4.5.3 Direkte Methoden der Permafrostbestimmung: Beispiele

Wie bereits angesprochen, sind im Bereich der direkten Methoden für Österreich v.a. Temperaturmessungen in tieferen Bohrlöchern relevant. Neben der Problematik und den hohen Kosten bei Bohrungen in Permafrost (insbesondere bei Kernbohrungen in intakte Blockgletscher), kann sich auch der Einbau von Temperatursensoren auf Grund von Vereisung im Bohrloch als schwierig erweisen (zum Beispiel am Kitzsteinhorn). Bisher können die Sensoren bei keinem Bohrloch (weltweit) regelmäßig geeicht werden. Messungen die bei der Datenprüfung unplausible Werte anzeigen, werden meist händisch korrigiert oder entfernt. Je mehr Bohrlochdaten sich in der (näheren) Umgebung befinden, umso eher ist eine Qualitätskontrolle möglich (derzeit in Österreich nicht der Fall). In Echtzeit verfügbar sind aktuell Messungen von den drei Bohrlöchern am Standort Sonnblick (vgl. Abb. F-3). Mittels fix installierten Lichtwellenleitern die ins Observatorium führen, werden die Daten einmal täglich übermittelt. Die Messdaten werden im Rahmen des Sonnblick-Messnetzes publiziert (www.sonnblick.net).

Neben dem Bohrlochstandort am Hohen Sonnblick sind vor allem die westlich des Gipfelbereiches des Kitzsteinhorns gelegen Felsflanken gut mit Permafrost-relevanten Messgeräten bestückt. Im Rahmen des MOREEXPERT Projektes, welches gemeinsam von Universität Salzburg und dem alpS (*Centre for Climate Change Adaptation Technologies*, Innsbruck) initiiert wurde, erfolgte in den Jahren 2010 und 2011 die Bohrung von fünf Bohrlöchern mit Tiefen von 20 bis 30 m. Alle Bohrlöcher wurden in weiterer Folge mit Messinstrumenten (eigens dafür entwickelt) der Firma GEODATA bestückt. Eindringendes Schmelzwasser führte bei der Instrumentierung immer wieder zu Problemen (Abb. F-13). Zusätzlich zu den fünf Bohrlöchern wurden im Rahmen dieses Projektes ca. 20 seichte Bohrlöcher (10-80cm tief) mit Messinstrumenten bestückt. Daneben kommen am Kitzsteinhorn u.a. auch geophysikalische Methoden sowie terrestrisches Laserscanning zum Einsatz.



Abb. F- 13 Permafrostbohrlöcher am Kitzsteinhorn: (Links) Bohrung eines 30 m tiefen Bohrlochs am Kitzsteinhorn, Hohe Tauern, im Frühherbst 2011 auf einer Seehöhe von 3000 m. (Rechts) Instrumentierung eines Bohrloches durch die Firma GEODATA. Fotos Ingo Hartmeyer.

F-4.6 Synergien mit internationalen Netzwerken und internationale Strategien

Die Permafrost-Forschungsgemeinschaft in Österreich ist v.a. im Alpenraum gut vernetzt. Dadurch können Synergien mit anderen Forschungsgruppen genutzt werden und gemeinsame Forschungsstrategien entwickelt werden. Allgemein existieren international Strategien, um auf der einen Seite die Instrumentierung und Vernetzung von ausgewählten *super sites/master sites/integrated sites (oder ähnlich)* und auf der anderen Seite die Sammlung von Daten und deren zumeist kostenlose und freie Weitergabe (national, regional und global) zu ermöglichen. Letztere inkludieren Daten der Monitoringstandorte, gehen aber auch darüber hinaus. Zum Teil werden auch Vorgaben über Metadaten-Dokumentation gemacht. Kriterien für *super sites* sind insbesondere langfristige Finanzierung und der Umfang der gemessenen Parameter. Dies setzt institutionalisiertes Monitoring voraus. Diese Kriterien sind für die reinen Datenplattformen nur begrenzt relevant. Generell wird eine Erweiterung von Messnetzen zur Verbesserung der Repräsentativität kaum bzw. nur vereinzelt auf nationaler Ebene gesteuert.

Im Rahmen von GCW sowie dem Observationsmessprogramm CryoNet (vgl. Kap. 3.3) wird Permafrostmonitoring als Bestandteil des Gesamtpaketes Kryosphärenmonitoring verfolgt. Das Ziel von CryoNet ist die Verknüpfung existierender Netzwerke durch: (a) Harmonisierung der Messungen, (b) zur Verfügung stellen von Datensätzen für Prozessstudien und Modellierung, (c) Kalibrierung und Validierung von Fernerkundungsprodukten, (d) Verknüpfung von Modellen und *in situ*-Messungen, (e) Ausbildung auf dem Gebiet des Kryosphärenmonitorings, (f) Standardisierung von Kryosphärenmonitoring, sowie (g) langfristiges Monitoring. Wie bereits in Kapitel F-3.3 angeführt, werden unterschiedliche Kategorien von Standorten je nach Komplexität und Institutionalisierung unterschieden. Der Sonnblick fällt dabei in die *integrated-site* Kategorie (im Gegensatz zu *basic sites*).

Weitere Synergien könnten aber im Rahmen von LTER (*Long-term Ecosystem Research Network*) Standorten bzw. LTSER (*Long-Term Socio-economic and Ecosystem Research*) Gebiete genutzt werden (Mirtl et al. 2015). Das österreichische LTER-Netzwerk ist ein Bestandteil einer international ausgerichteten Initiative (400 Standorte in Europa). Im konkreten Fall könnten sich mögliche Synergien mit der LTER *extensive site* Stubacher Sonnblickkees (Salzburg) oder im Gebiet der LTSER Plattform Tyrolean Alps, welche einige Permafrost-relevante LTER-Standorte beinhaltet, ergeben (Mirtl et al. 2015). Ebenso von Interesse könnte das GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpine Environments*) Netzwerk sein, welches einen relevanten Permafroststandort in Tirol (*master site* Schrankogel) bearbeitet und wo auch kontinuierlich Bodentemperatur gemessen wird. Die *master site* Schrankogel ist auch gleichzeitig eine *extensive site* im LTER Messnetz.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) werden die jährlichen Ereignisse in Wildbächen und gravitativen Massen-

bewegungen im Zuständigkeitsbereich des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung zusammengefasst. Auch hier könnten möglicherweise ständig gefährdete Lokalitäten in einem nationalen Messnetz berücksichtigt werden. Hier muss aber angemerkt werden, dass zumeist Gebiete im saisonalen Frost und weniger Gebiete im Permafrost für die WLV von Bedeutung sind (Mölk 2015).

Im Rahmen vom GCOS Programm GTN-P sind zum aktuellen Zeitpunkt ausschließlich Temperaturmessungen in Bohrlöchern und die Erfassung der saisonalen Auftauschicht als Schlüsselparameter aber keine periglazialen Prozesse gefordert. Ein Großteil der existierenden Monitoringstandorte ist jedoch in weitere nationale und internationale Monitoringprogramme integriert. Permafrost-spezifisches Monitoring auf nationaler Ebene wird insbesondere in Norwegen (NORPERM), Alaska, der Schweiz (PERMOS) und Frankreich (PERMAFRANCE) institutionalisiert durchgeführt. Die Messungen an sich werden von Universitäten, Forschungsinstituten oder geologischen Bundesämtern durchgeführt, die Daten zentral gesammelt und aufbereitet sowie im Internet bereitgestellt. Im Fall von Alaska und GTN-P wurden isländische Unternehmen mit der Entwicklung und Wartung des Onlineportals beauftragt. Dieses Service wird u.a. von Entwicklern der relevanten Messtechnik (Anwendung Alaska) als auch von regionalen Datenzentren (Arctic Portal für GTN-P) angeboten.

Ein wichtiger Aspekt für Österreich sind Synergien mit Permafrostnetzwerken im Alpenraum bzw. in Europa. Die Implementierung der in Kap. 3.3 erwähnten APD wurde durch die EU gefördert. Die Aktualisierung von österreichischer Seite aus erfolgt aktuell individuell durch einzelne WissenschaftlerInnen. Auch die Weiterführung von APD durch ARPA Piemonte ist nicht finanziell gesichert. Ein Virtuelles Alpenobservatorium (VAO) wird derzeit vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Finanzierung der Bayrischen Forschungsallianz koordiniert. Dabei wird ein alpenweites Datenzentrum angestrebt (Alpen-DAZ). On-demand-Berechnungen sollen ebenfalls angeboten werden. Das Sonnblick-Observatorium ist Bestandteil dieses Netzwerkes.

F-4.7 Nationale Synergien und mögliche Erweiterung des Monitoringnetzwerkes

Grundsätzlich muss man bei der potentiellen Erweiterung des Permafrost/Periglazialmonitoringnetzwerkes zwischen Standorten im Bereich von primär Felspermafrost und Standorten im Bereich von primär Lockersedimentpermafrost (Stichwort Blockgletschermonitoring) unterscheiden. In diesem Kapitel wird zuerst auf mögliche neue Felspermafroststandorte eingegangen, danach wird die mögliche Erweiterung des Blockgletschermonitorings diskutiert.

Auf Basis der in Kapitel F-4.6 beschriebenen internationalen Messnetze sowie der in Kapitel 4.4. beschriebenen räumlichen Lücken im aktuellen Permafrost/Periglazial-Monitoringmessnetz, würden sich besonders zwei Standorte für eine mögliche Messnetzerweiterung besonders gut anbieten. Zum einem ist dies der LTER Standort Stubacher Sonnblick, zum anderen wäre es sehr sinnvoll den GLORIA- (und gleichzeitig auch LTER-) Standort Schrankogel auch ins Permafrostmessnetz aufzunehmen, um damit auch besser internationale Synergien zu nutzen (Abb. F-14).

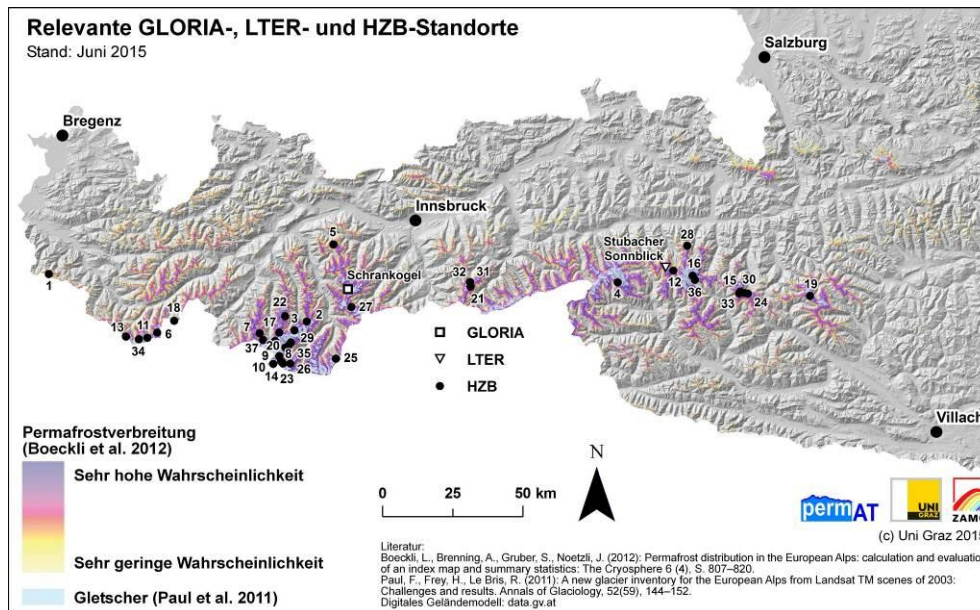


Abb. F- 14: Karte mögliche Synergien mit bestehenden intern. Messnetzen (GLORIA und LTER) so wie dem HZB. Datenbasis eigene Erhebung. Codes siehe Anhang F-4.

Neben diesen beiden Standorten bieten die bestehenden Stationsmessnetze des Hydrographischen Dienstes (HZB), der ZAMG sowie der Lawinenwarndienste (LWD) eine mögliche Grundlage für weitere Permafrostmonitoringstandorte. HZB-, ZAMG- und LWD-Stationen mit modellierter geringer oder sehr geringer Permafrostwahrscheinlichkeit wurden nicht weiter behandelt, da diese langfristig gesehen keine optimalen Monitoringstandorte darstellen.

Die durchgeführten räumlichen Analysen ergaben, dass 37 HZB-Stationen in den Permafrostmodellierungsbereich „mittlere Wahrscheinlichkeit“ oder höher fallen (Abb. F-17). Mehrere Stationen in der Silvrettagruppe sowie eine im Rätikon (Brandner Gletscher) würden sich besonders im westlichen Landesteil als neue Permafrostmonitoringstandorte anbieten. In den Zillertaler Alpen sind es zwei Stationen (Tuxer Ferner Haus und Riepensattel), die sich für eine Erweiterung anbieten würden. In der Venediger- und Granatspitzgruppe könnte man die beiden HZB-Stationen Defregger Haus und Kalser Törl auf ihr Erweiterungspotential überprüfen. Im Bereich der Pasterze liegen zwei HZB-Stationen (Wasserfallwinkel und Oberwalderhütte), die man mit dem bestehenden Messnetz der Universität Graz (siehe Tab. F-3) besser abstimmen könnte. Weiter im Osten, in der Ankogelgruppe, würde sich noch die HZB-Station Pleßnitzkees als Erweiterungsstandort anbieten.

Die mittlere Jahreslufttemperatur kann als Indikator für Permafrostvorkommen herangezogen werden. Als grobe Richtwerte nimmt man in den Alpen eine Jahresmitteltemperatur von -2° als Grenzwert zu diskontinuierlichem und von 0°C als Grenzwert zu sporadischem Permafrost an (Barsch 1978). Dieser Ansatz hat aber die wesentliche Einschränkung, dass weder die saisonale Schneedecke, die Vegetation noch das Substrat berücksichtigt werden und somit der Jahresmittelwert der Lufttemperatur sich deutlich (positiv wie negativ) von jenem der Bodentemperatur unterscheiden kann. Messungen der Bodentemperatur sind daher unumgänglich. Im aktuellen Messnetz der ZAMG befinden sich vier Stationen (Tabelle F-7, Abb. F-15) in potentiellen Permafrostgebieten von zumindest „mittlerer Wahrscheinlichkeit“. Eine davon ist am Hohen Sonnblick. Zwei weitere befinden sich in relativer Nähe zueinander (Brunnkogel und Pitztaler Gletscher) in den Ötztaler Alpen. Die vierte ZAMG-Station (Valluga) wäre für einen neuen Permafrostmonitoringstandort besonders interessant, da diese in den noch unberücksichtigten Lechtaler Alpen liegt.

Tab. F- 7: TAWES-Stationen der ZAMG die sich laut Modellrechnung wahrscheinlich im Permafrost (Permafrostindex $\geq 0,5$ nach Boeckli et al. 2012) befinden. An allen gelisteten Standorten ist die Jahresmitteltemperatur $< 0^\circ\text{C}$. Codes siehe Abb. F-15.

Stationsname	Lon [°]	Lat [°]	Höhe [m]	Bundesland	Messbeginn
Brunnkogel (1)	10.861667	46.912778	3437	Tirol	2003
Pitztaler Gl. (2)	10.879167	46.926944	2864	Tirol	1994
Sonnblick 1 (3)	12.957500	47.054167	3109	Salzburg	1891
Valluga (4)	10.212778	47.157500	2805	Tirol	2010

Von den Station des LWD sind es 43, welche sich in Gebieten mit zumindest mittlerer Permafrostwahrscheinlichkeit befinden (Abb. F-18). Zu beachten hierbei ist aber, dass in dieser Liste z.T. auch unterschieden wird zwischen beispielsweise Schneemess- und Windmessstandorte. So befinden sich z.B. im Bereich des Hochgasser in der Venedigergruppe 5 Einzelmesspunkte innerhalb eines Radius von ca. 700 m Luftlinie. Von Seiten der LWD gibt es Stationen in den Lechtaler Alpen, Verwallgruppe, Samnaungruppe und in der Silvretta, welche sich als Permafroststandorte anbieten würden (in Summe 8 Stationen). Mehrere relevante LWD-Stationen gibt es auch in den Stubai und Ötztaler Alpen, die jedoch schon einige bestehende Permafrostmonitoringstandorte aufweisen. In den Tuxer Alpen würden sich ggf. die Standorte Wandspitze sowie Rastkogel anbieten. Im Bereich der Venedigergruppe wäre sicherlich der Standorte Hochgasser für eine Permafrosterweiterung zu prüfen. Gleiches gilt für den Standort Rudolfshütte/Kalser Törl. Eine Erweiterung mit einem seichten Bohrloch wurde bereits am Standort Innerfragant/Eissee durchgeführt. Die östlichste, möglicherweise relevante LWD-Station liegt oberhalb von Mallnitz am Ebeneck. Hier wäre auch durch die Ankogelbahn eine erleichterte Erreichbarkeit des Standortes gegeben.

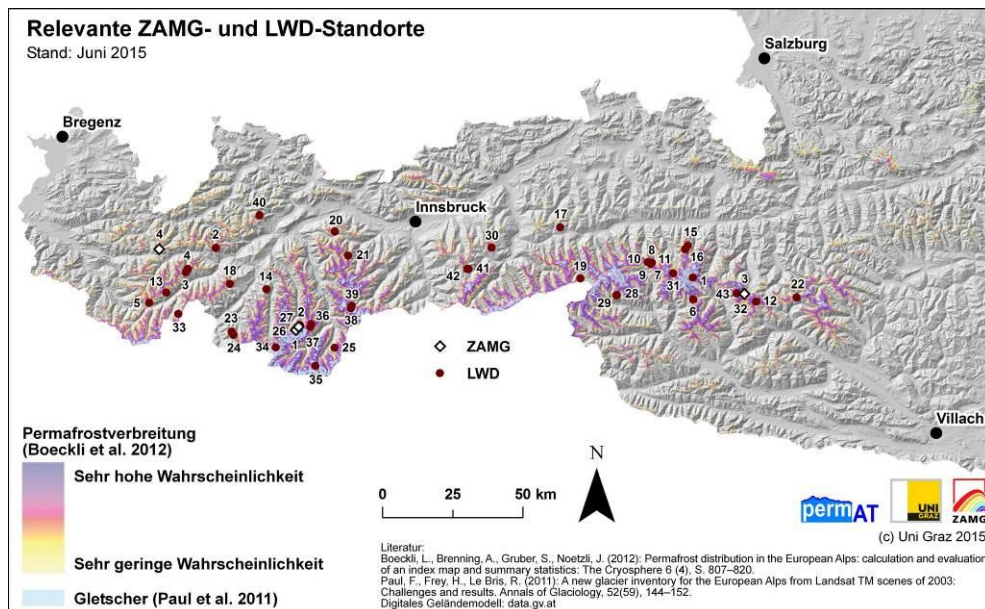


Abb. F- 15: Karte mögliche Synergien mit bestehendem Messnetz der ZAMG sowie der LWD. Datenbasis eigene Erhebung. Codes siehe Tabelle F-7 (ZAMG) und Anhang F-5.

Mögliche weitere Synergien – neben den angesprochenen GLORIA, LTER, HZB, ZAMG und LWD Messnetzen – ergeben sich in Kooperation mit anderen Interessensgruppen, insbesondere den alpinen Vereinen, Seilbahnbetreibern und Kraftwerksbetreibern (vgl. Abbildungen in Kapitel F-4.2). In diesen Fällen existiert Infrastruktur, welche für ein Messnetz heran-

gezogen werden kann. Gesammelte Daten könnten direkt bei Betroffenen vorliegen. Hinzu kommen ggf. Interessen der National- und Naturparke, des Umweltbundesamtes, der Geologischen Bundesanstalt oder des Bundesheeres.

Neben der potentiellen Erweiterung des Messnetzes im Bereich Felspermafrost muss auch überlegt werden, wie es um mögliche Erweiterungen im Bereich Lockersedimentpermafrost (Blockgletschermonitoring) stehen könnte. Wie im Kapitel F-4.3. angesprochen, wird aktuell an rund 10 Blockgletschern in Österreich aktiv Monitoring betrieben. Berücksichtigt man jedoch die große Anzahl von intakten Blockgletschern (also jene mit Permafrost), so findet man alleine in Tirol 1432 intakte Blockgletscher (Krainer & Ribis 2012). In den anderen Bundesländern (bis auf Vorarlberg) gibt es mindestens 200 weitere intakte Blockgletscher (Kellerer-Pirklbauer et al. 2012b). Allein diese Zahlen – <10 Blockgletscher in Beobachtung versus >1600 intakte Blockgletscher in Österreich – zeigt gut, dass eine Erweiterung des Monitoringnetzwerkes im Bereich Blockgletschermonitoring (inklusive der hydrologischen Komponente) notwendig wäre.

Permafrostmonitoring ist ebenfalls von Relevanz für die Klimaforschung und liegt damit im Interessensbereich von Climate Change Centre Austria (CCCA). Eine österreichweite Datenbank wird aktuell eingerichtet. Ein national abgestimmtes Permafrost-Periglazialmonitoring einzubringen, wäre daher sehr sinnvoll.

F-4.8 Kosten und Einsetzbarkeit von Messmethoden

Die verschiedenen Messmethoden wurden in Kap. F-4.5 vorgestellt. Für ein Projektfinanzmanagement sind aber zum einen die Erstkosten im Sinne der Anschaffung und Installation einer Gerätschaft, als auch die laufenden Kosten der einzelnen Methoden von wesentlichem Interesse. Die Kosten variieren v.a. mit der Notwendigkeit von Personal, Instrumentierungskosten und technischer Ausstattung bzw. bei Fernerkundungsdaten mit der räumlichen bzw. der zeitlichen Auflösung stark. In weiterer Folge muss die Erhaltung von Messsystemen im Gelände (Überprüfung, Kalibrierung, Ausbau von defekten Sensoren und Neuinstrumentierung) als budgetwirksamer Posten angesehen werden.

Die Auswahl der Messmethoden unterliegt der Ausrichtung des Forschungsbereiches im Sinne des Monitorings von Temperatur, internem Aufbau und Veränderung, Hydrologie oder Bewegung von Permafrostbereichen. Temperaturmonitoring für GT und GST kann mit einfachen Ein- oder Mehrkanalloggern durchgeführt werden (Kosten im hundert €-Bereich). Bei Temperaturmessungen innerhalb von Permafrost selbst sind Bohrlöcher unumgänglich und diese sind kostenintensiv (bis 100.000 € mit Instrumentierung und Bohrkernanalyse). Monitoring zum internen Aufbau und Veränderungen des Untergrundes (Temperatur, Feuchtigkeit) funktioniert am besten mit geoelektrischen Verfahren (ERT); hierzu müsste hochgebirgstaugliche Gerätschaft permanent installiert werden (Anschaffungskosten & Wartung). Hydrologische und hydrogeologische Messungen in Permafrost können relativ einfach gehalten werden (Quellentemperaturmonitoring mit Datenloggern) oder aber auch sehr komplex ausfallen (Isotopenanalysen, Tracerversuche).

Die Kinematik von Permafrost kann – wie in Tabelle F-5 dargestellt – unterschiedlich erfasst werden. Beim Einsatz terrestrischer Methoden (Photogrammetrie, Laserscanning) spielt v.a. die Geometrie der Aufnahme eine Rolle, d.h. die Lage des Aufnahmepunktes zur Ausrichtung des Messobjektes bzw. die Entfernung zum Messobjekt. Bei den plattformgestützten Methoden (Helikopter, Flugzeug, *unmanned aerial systems/UAS* oder auch *unmanned aerial vehicle/UAV* genannt) ist die Flughöhe entscheidend, die direkt die räumliche Auflösung und die Größe des Untersuchungsgebietes bestimmt und somit die Kosten. Satellitendaten (optisch, Radar) bilden v.a. bei größeren Untersuchungsgebieten einen wertvollen Datensatz. Limitierende Faktoren sind auch hier die zeitliche (Bildwiederholfrequenz) wie auch räumliche Auflösung, die indirekt proportional sind. Im Allgemeinen bestimmen die räumliche Auflösung und die verwendete Analysemethode (z.B. DInSAR, Photogrammetrie) die Qualität des Produktes. Die Kosten für satellitengestützte Daten reichen von kostenlos (z.B. Sentinel-1 bei Verfügbarkeit am *rolling archive*) bis mehrere Tausend €/Aufnahme, wobei letztere

räumlich höher aufgelöst sind, die Ausdehnung jedoch nur mehrere 10er km beträgt. Für ein zielführendes Monitoring mit Fernerkundungsdaten wird – prozessabhängig – eine mindestens jährliche Auflösung benötigt. Bei sehr aktiven und damit meist bedrohlicheren Prozessen wird die Überwachung dann kontinuierlich oder zumindest eine Messungen mehrmals pro Jahr erfolgen (Felsstürze, Sackungen).

Die Erstinspektion von Massenbewegungen kann durch Flugzeug-gestützte Erfassung mit Laserscannern bzw. optischen Sensoren durchgeführt werden. Eine Ersterfassung eines Untersuchungsgebietes mittels InSAR auf der Basis von Sentinel-1 Daten ist die aktuell kostengünstigste Variante, methodisch jedoch auf Bewegungen in Aufnahme-richtung beschränkt. Ca. 5 % der Blockgletscher in Österreich sind im Fall von Sentinel von der Exposition her optimal für eine Bestimmung der Bewegungsrate gelegen. Diese verteilen sich gleichmäßig über alle Höhenlagen, Größen und Permafrostgebiete. Es gibt jedoch keine Überschneidungen mit aktuellem in-situ Blockgletschermonitoring. Für die Erfassung aktiv/inaktiv ist diese Einschränkung weniger relevant. Methodisch die besten Ergebnisse werden mittels Photogrammetrie erzielt. Die Verwendung von ALS Daten für ein kinematisches Monitoring hängt vor allem von der Punktdichte ab, die bei den allgemeinen ALS-Befliegungen meist bei 4 Pkt/m² beträgt. Damit können nur Blockgletscher mit größerer Oberflächenbewegung untersucht werden. Bei entsprechender Flughöhe können bei gleichzeitig wolkenarmen Bedingungen über Grauwertähnlichkeiten Differenzen im cm-Bereich berechnet werden (Kaufmann & Kellerer-Pirklbauer 2015). Luftbilder aus amtlichen Befliegungen sind für Forschungszwecke günstig, jedoch nur über bestimmte Zeitpunkte erhältlich. Die Kosten für Eigenbefliegungen bewegen sich für ALS als auch für Bildflüge zwischen 1500 €/km² bei kleineren Untersuchungsgebieten bis zu 1000 €/km² bei größeren Gebieten.

Im terrestrischen Monitoring mittels Fernerkundung wird v.a. TLS und terrestrische Photogrammetrie verwendet. TLS kann bis zu einer Entfernung von 800-1000 m (geometrieabhängig) für Analysen benutzt werden. Bei kinematischen Ansätzen sollte die Entfernung max. 500 m betragen, um eine entsprechende Punktdichte zu erlangen bzw. messmethodische Limitierungen nicht zu überschreiten. Die Arbeit mit TLS ist v.a. durch das Gesamtgewicht der Instrumente (TLS-Messeinheit, Referenzmessungen) beschränkt, eine genügende Anzahl an Personen ist dadurch erforderlich. Noch stärker als beim TLS benötigt die terrestrische Photogrammetrie eine zufriedenstellende Geometrie zum Messobjekt, um Produkte mit guter Qualität zu liefern. Mit den heute zur Verfügung stehenden digitalen Kameras ist die terrestrische Photogrammetrie dem TLS hinsichtlich des Personalbedarfs (Kostenfaktor) überlegen.

Bewegungsmessungen mittels Inklinometer in Bohrlöchern setzen selbige voraus. Das Abteufen von tieferen Bohrlöchern stellt eine aufwändige Maßnahme dar und ist bisher nur an drei Standorten in Österreich durchgeführt worden. Die Kosten dafür hängen auch sehr stark davon ab, ob im Festgestein (Felsen) oder in einem gefrorenen Schuttkörper (z.B. Blockgletscher) gebohrt wird, welches Bohrverfahren verwendet wird, wie aufwändig die Bohrlogistik ist, welche Instrumentierung durchzuführen ist, sowie welche Analysen angestrebt werden. Krainer et al. (2015) zeigten anschaulich, dass sehr viele unterschiedliche Informationen aus einem einzigen Bohrkern eines Blockgletschers gezogen werden können.

Tab. F- 8: Aufstellung der Kosten für unterschiedliche Methoden zu Erfassung von Permafrost: Methodengruppe (MG): Indirekt (I), halbdirekt (H), direkt (D).

MG	Messgröße	Methode	Kosten in €	Limitierung und Kommentar
I	Blockgletscherbewegung/instabile Felsflanken – Oberfläche	geodätisch	1000 €/Jahr/Objekt	Geodätisch oder mit DGPS Quantität (nur Punktmessung); kontinuierliche DGPS-Messung möglich; witterungsunabhängig
		Bild basiert - terrestrisch	1000 €/Jahr/Objekt	Flächendeckend; Messgeometrie; witterungsabhängig
		Bild basiert – platt-	1000-1500 €/km ²	Flughöhe; Untersuchungsgebietsgröße;

		formgestützt	(Untersuchungsgebiet 10-15 km ²)	witterungsabhängig
		Bild basiert – Satelliten gestützt	0- >1000 €/km ²	Zeitliche wie auch räumliche Auflösung
		Laserscanning – terrestrisch (TLS)	Ca. 1500 €; inkl. Auswertung pro Messpunkt	Messgenauigkeit, Messdistanz, Transport,
		Laserscanning – plattform gestützt (ALS)	Ca. 1000-1500 €/km ² (Untersuchungsgebiet 10 – 15 km ²)	Originalpunktwolken von bestehenden Datensätzen in mehreren Bundesländern erhältlich; Preis punktdichteabhängig, Punktdichte bei Landesaufnahmen im Hochgebirge wesentlich geringer
		InSAR– Satelliten gestützt	>3000 €	nur Bewegungen in Sensorblickrichtung detektierbar, aber Bewegungen weniger cm erfassbar
	Blockgletscherbewegung – interne Deformation	Deformationsbewegung mit Inklinometer in Bohrlöchern	Mehrere k€	Möglich nur bei Bohrlöchern in Blockgletschern; aktuell keine in Österreich
HD	Temperatur	Temperatur der Bodenoberfläche (GST)	Erstabschätzung: Billiglogger (iButton) á 25 €; Monitoring: Logger guter Qualität á 200 €	Redundante Messungen pro Standort notwendig, eingeschränkte Genauigkeit bei Billigprodukten, generell keine Datenübertragung; Hochwertige Geräte (z.B. GeoPrecision-Produkte) empfohlen.
		Seichte Bohrlöcher innerhalb der saisonalen Auftauschicht (GT)	1.000 € Bohrung; 2000 € für Instrumentierung; Wartungskosten 500 €/a	Sinnvoll bei bestehenden Messnetzen einzurichten/zu intensivieren; bei gefährdeten Objekten sollten GT-Standorte eingerichtet werden
	Struktur	Geophysik (v.a. Geoelektrik, daneben Magnetik, Seismik, Georadar)	40.000 € Erstan-schaffung plus jährliche Kosten (>2000 €/a)	Blitzschlaggefährdung in exponierten Lagen; Gewährleistung der Stromversorgung (Hütte, Bergstation oder Brennstoffzelle – wiederum kostenintensiv)
	Wasser	Quelltemperatur und Quellchemismus (Schwermetallbelastung)	2000 €/Datenlogger; +Kosten für Einrichtung von Messstelle, Analysen etc.	Quellen von beobachteten Blockgletschern sollten zumindest mit einem Datenlogger ausgestattet werden; zusätzliche Untersuchungen mit künstlichem Tracer, Isotopen und Wasserchemismus vorteilhaft
D	Temperatur	Bohrloch in Permafrost	50.000 - 100.000 € für Einrichtung; mehrere k€/a für Wartung	Deutlicher Unterschied in Kosten ob Bohrung im Festgestein oder gefrorenen Sedimenten; Kernbohrung oder nicht, Erreichbarkeit. Ggf. Kombination von Temperaturmesskette und Extensiometer

Für die Erweiterung einer bestehenden Permafrostmonitoringstation oder einer meteorologischen Station mit GST, seichten Bohrlöchern oder gar tieferen Bohrlöchern muss bei größerer Distanz zur bestehenden Messstelle eine weitere Außeneinheit installiert werden. Außerdem muss auch geprüft werden, ob neue Sensoren mit der bestehenden Infrastruktur kompatibel ist. Um den internen Aufbau, die Struktur des Untergrundes zu erkunden, kommen geophysikalische Methoden im Einsatz. Diese sind i.A. im Einsatz sehr aufwändig, da die Instrumentierung sehr umfangreich ist. Ähnlich wie beim Einsatz von TLS, ist bei der Durchführung geophysikalischer Verfahren ein größerer (kostenintensiver) Personaleinsatz notwendig. Tabelle F-8 gibt einen Überblick über zu erwartende Kosten.

F-5 Umsetzungsstrategien

F-5.1 Methodik

Herausforderungen für repräsentatives Permafrostmonitoring sind die eingeschränkte Zugänglichkeit sowie der finanzielle und logistische Aufwand. Zusätzlich sollte man auch in Österreich – gleich wie im Rahmen des PERMOS-Monitoringprogrammes in der Schweiz – zwischen Standorten mit vorwiegend Bodentemperaturmessungen (*Temperature Sites*) und Standorten mit vorwiegend Bewegungsmessungen (*Kinematic Sites*) unterscheiden (Hoelzle 2015). Zusätzlich gibt es in der Schweiz noch fünf Standorte, wo kontinuierlich geoelektrische Messungen des Untergrundes in Form von fix installierten Profilen durchgeführt werden (*ERT Sites*). Eine eigene Messstandortkategorie Hydrologie/Hydrogeologie gibt es im Rahmen von PERMOS nicht, wäre aber aufgrund der nationalen Expertise sowie der Wichtigkeit der Ressource Wasser für Österreich durchaus sinnvoll. Für Österreich wäre somit vorzuschlagen, dass zwischen „Temperaturmessstandort“ (ggf. mit Geoelektrik- und Hydrologiekomponente) und „Kinematikstandort“ (ggf. auch mit Geoelektrik- und Hydrologiekomponente) unterschieden wird.

Unter Berücksichtigung der Kosten und der im oberen Absatz angesprochenen Punkte ergeben sich folgende Prioritäten: (1) Weiterführung und Ausbau bestehender Monitoringstandorte sowie Zuweisung zu einer Standortgruppe (Temperatur vs. Kinematik), wenn eine Fortführung als sinnvoll erscheint; (2) Verbindung von bestehenden Monitoringstandorten durch Systematisierung (Standards) und geeignete Kommunikationsstrategien (Gewährleistung der Vergleichbarkeit; national wie international); (3) Erweiterung des Messnetzes nach erfolgte Prioritätensetzung. Grundlage für die Erweiterung des Messnetzes sollte die gesellschaftliche und wirtschaftliche Relevanz sein, wobei dies auch wissenschaftliche Fragestellungen einschließt. Vulnerabilitätsabschätzungen bedürfen der Berücksichtigung geomorphologischer Prozessdomänen und der gefährdeten Infrastruktur. Höhenlage, Exposition, Geologie und Präsenz von Lockermaterial beeinflussen das Vorkommen von Permafrost, Massenbewegungen und Sensitivität der Bodeneigenschaften in Bezug auf den Klimawandel. Diese Faktoren, in Kombination mit der Zugänglichkeit, bilden die Basis für eine Messnetzerweiterung. Die Zugänglichkeit hat dabei einen starken Einfluss auf die anwendbare Methodik.

Eine zusätzliche Entscheidungsgrundlage und gleichzeitig Alternative in schlecht zugänglichen Regionen bieten großräumige Erfassungen der Kinematik mit Methoden der Fernerkundung. Wie in Abb. F-11 exemplarisch gezeigt, können periglaziale Prozessbereiche an sich mit klassischen GIS-Analysen ausgewiesen werden. Auf die Erfassung der Kinematik sollte insbesondere in der Umgebung von Stauseen und entlang von Weganlagen (Zufahrten und Wanderwege) Wert gelegt werden.

Die im Kapitel F-4.7 dargestellten relevanten Standorte von ZAMG (4), HZB (37) und der Lawinenwarndienste (43) sollten auf ihre lokalen Permafrostbedingungen sowie Erweiterbarkeit (insbesondere Stromversorgung) geprüft werden. Von den ZAMG-Stationen wäre v.a. jene auf der Valluga für einen neuen Permafrostmonitoringstandort interessant, da diese in den aktuell noch unberücksichtigten Lechtaler Alpen liegt. Ebenso könnte auch geprüft werden, ob die beiden ZAMG-Stationen Brunnkogel und Pitztaler Gletscher (2 separate Messstellen) interessante zusätzliche Standorte wären. Von Seiten des LWD-Messnetzes sollte geprüft werden, ob Monitoringerweiterungen an bestehenden Stationen in den Lechtaler Alpen, der Verwallgruppe, der Samnaungruppe sowie in der Silvretta durchgeführt werden könnten. Die LWD-Standorte (sowie auch die HZB-Standorte) in den Stubai- und Ötztaler Alpen sollten diesbezüglich nicht prioritär behandelt werden, da die Anzahl der bereits eingerichteten Monitoringstandorte in dieser Region relativ hoch ist. Die Zillertaler und Tuxer Alpen sowie die Venediger Gruppe sind aktuell noch ein großer weißer Fleck auf der Monitoringlandkarte. Hier gäbe es einige LWD und HZB-Standorte, die auf ihre Erweiterung überprüft werden könnten. Manche der Standorte sind in der Nähe von alpinen Schutzhütten, was ein weiterer (auch logistischer) Vorteil wäre. Schließlich könnten noch weiter im Osten die LWD-

Station Ebeneck oberhalb von Mallnitz oder die HZB-Station Pleßnitzkees in der Ankogelgruppe auf ihre Eignung als Permafrostmonitoringstandort überprüft werden. Besonders hervorzuheben sind die beiden Standorte GLORIA-Schrankogel und LTER-Stubacher Sonnblickkees, welche beide als „Temperaturmessstandorte“ interessant sein könnten.

Trotz der relativ guten Abdeckung der verschiedenen oben genannten Messnetze bleiben einige interessante Regionen mit Permafrost mit dem bestehenden Messnetz-Ansatz unberücksichtigt. Dies sind beispielsweise der Hochkönig oder die westlichen Niederen Tauern. Ebenso sollten auch bestehende Schigebiete mit Permafrostbeeinflussung (23) sowie Standorte von potentiell beeinflussten alpinen Speicherseen (31) und Schutzhütten (42) in den Messnetzüberlegungen berücksichtigt werden. Was Schigebiete angeht, könnten Permafrostuntersuchungen in den Regionen, für welche in Zukunft eine Expansion geplant ist, relevant sein. Da Strom, Wartung und effizienter Materialtransport gewährleistet sein muss, bieten die 42 potentiell gefährdeten Schutzhütten wertvolle Standorte für ein erweitertes Monitoring. Um eine ähnliche Repräsentativität wie in PERMOS zu erreichen, sind bis zu 7 neue (tiefe) Bohrstandorte notwendig. Diese Bohrlöcher sollten aber nicht nur in Festgestein abgeteuft werden, es sollten auch ein bis zwei Bohrlöcher in aktive Blockgletscher (z.B. 1 x Tirol, 1 x Kärnten) erbohrt und instrumentiert werden. Allgemein sollten Bohrlöcher im Grenzgebiet Vorarlberg/Tirol, in den Öztaler und Stubai Alpen, in den Zillertaler Alpen oder Venediger Gruppe sowie in der Schober- oder Ankogelgruppe eingerichtet werden. Langfristig gesehen wäre ein Bohrloch im Bereich des Großglockners (nahe der Erzherzog-Johann Hütte) anzustreben.

Die Initiierung von neuen Standorten ohne Bezug zu bestehender Infrastruktur sollte in einem mehrstufigen Prozess erfolgen. (1) Methoden der Fernerkundung zur Erfassung der Oberflächenkinematik und Eingrenzung von neuen Standorten; (2) Kurzfristiges GST-Monitoring; (3) geophysikalische Einzelmessungen; (4) aufwändigere (teurere) Methoden wie Bohrlöcher (hier ebenfalls zuerst seichte Bohrlöcher, später evtl. tiefere Bohrungen durchführen).

Seilbahnen bieten die für eine kontinuierliche Wartung notwendige Infrastruktur. Dies wird bereits im Bereich Stubai Gletscher (LWD), Pitztal (ZAMG und LWD), Dachstein (Uni Graz), Rudolfshütte (ZAMG und LWD) und Kitzsteinhorn (Uni Salzburg/AlpS) genutzt. Aktuell von Interesse ist die Erweiterung der Eisgratbahn welche im Bereich Stubai Gletscher geplant ist. Die Fertigstellung ist laut Betreiber (<http://www.stubaier-gletscher.com/stubai-live/news/bautagebuch/bauabschnitte/>) für Herbst 2016 vorgesehen.

Ein Monitoring mittels seichter Bohrlöcher oder nur der Bodenoberfläche ist an allen hoch gelegenen Schutzhütten und höchsten Punkten der Schigebiete mit Permafrost empfohlen. Für die bisher nicht oder kaum abgedeckten Regionen sind Hütten der verschiedenen alpinen Vereine als Standorte möglich. Priorität für seichte bis tiefe Bohrlöcher für langfristiges Monitoring im Kernbereich sollte bei folgenden Hütten liegen: (a) Mannheimer Hütte zusätzlich zur Erweiterung ZAMG Station Valluga für Vorarlberg; (b) Monitoringlücke Tirol: Barmer Hütte, Neue Pragerhütte, Defreggerhaus (Nutzung Kombination HZB Niederschlags-Messstation); (c) Erweiterung Monitoringregion Gepatsch-Pitztal-Ötztal: Brandenburgerhaus, Braunschweiger Hütte, Hochwildehaus, Kaunergrathütte, Hochstubaihütte als Ergänzung zu den ZAMG Standorten Pitztaler Gletscher und Brunnkogel; (d) Oberwalderhütte, Stüdlhütte, Erzherzog Johann Hütte insbesondere im Hinblick auf die Gefährdung der Wege im Bereich Großglockner-Pasterze und als Ergänzung zum Monitoringprogramm der Universität Graz.

Von besonderem Interesse sind Standorte im Übergangsbereich von potenziellen Permafrostbereichen zu permafrostfreien Gebieten, da in diesen Regionen bei Erwärmung des Permafrostes und anschließender –degradation mit einem sehr hohen Gefährdungspotential zu rechnen ist. Eine zusätzliche Entscheidungsgrundlage sind daher Modellrechnungen sowohl auf der Grundlage aktueller Bedingungen als auch Zukunftsszenarien. Solche Szenarien ermöglichen auch die Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Es

sollten folgende potentielle Standorte in der Übergangsstufe auf Permafrost geprüft werden bzw GST für einen begrenzten Zeitraum gemessen werden: (a) Umgebung Speicherseen: Plauener Hütte (oberhalb Speicher Zillergründlsee), Duisburger Hütte (Nähe Speicher Hochwurten), Heinrich-Schwaiger-Haus (liegt oberhalb Speichersee Mooserboden). In Summe ergeben sich zahlreiche Erweiterungsmöglichkeiten für bestehende Monitoringstandorte sowie für ZAMG-, HZB-, LWD-, Hütten- und Schigebietsstandorte.

Für die Erfassung von Massenbewegungen bietet sich auch die Einbindung der Bevölkerung (*citizen science*) an. Im Rahmen von Permos werden Informationen zu Felsstürzen gesammelt: <http://www.permos.ch/rockfall.html>. Dies könnte über die alpinen Vereine unterstützt werden (Berichte von Hüttenwirten). Ein ähnliches Massenbewegungsmonitoring auf Basis von Erfassungsblättern ist im Bereich des Nationalparks Hohe Tauern gemeinsam mit der Universität Graz im Entstehen. Auch hier werden Hüttenwirte, Ranger, Bergführer etc. im Erfassungsprozess miteingebunden.

Ein in der Hydrologie übliches Verfahren ist die Ausstattung mit einer Vielzahl von Sensoren zu Beginn, dann der Vergleich der Messreihen und Evaluierung der Repräsentativität für den Standort und letztendlich eine Reduktion der Standorte. Ein solches Vorgehen wäre – wie weiter oben ausführlich dargestellt – anwendbar für das Monitoring von Blockgletschern, wenn nicht spezifisches Interesse durch Anwender an einem bestimmten Einzugsbiet dagegenspricht. Es besteht der Bedarf an integrierten Standorten, also an solchen mit gleichzeitiger Erfassung von verschiedenen klimarelevanten Aspekten. Dies sollte nicht nur Permafrost an sich sondern auch Frostverwitterung, Steinschlag, Felssturz und hydrologische Prozesse umfassen. Als Ergänzung können Satellitendaten zur Erfassung von Frostwechseln (z.B. Park et al. 2012, Naeimi et al. 2012) und Schneebedeckung (Isolation des Bodens) verwendet werden, wobei hier die Datenlage noch limitiert (eingeschränkte räumlich-zeitliche Auflösung). Im Rahmen von Sentinel (Copernicus) ist eine Verbesserung in den nächsten Jahren zu erwarten.

Zum Schluss dieses Kapitels muss auch betont werden, dass die Vergleichbarkeit von Messungen an verschiedenen Standorten durch Standardisierung bei der Instrumentierung gewährleistet sein sollte. Dies ist nicht einfach! Zur Festlegung von Standards in der Permafrost- und Periglazialforschung muss der Weg über internationale Vereinigungen (z.B. IPA) und Programme (z.B. GTN-P) gegangen werden.

F-5.2 Finanzierung

Die Frage der Finanzierung ist unter Berücksichtigung von bestehenden Netzwerken und Zuständigkeiten differenziert zu betrachten. Die wichtigsten Netzwerke mit aktuellem und potentiell Bezug zu Monitoring sind: (a) die bestehenden Monitoringstandorte der Universitäten und anderen Forschungsinstitutionen (projektbasiertes Monitoring, Hochschulraum-Strukturmittel des BMWFW); (b) Hydrographischer Dienst (BMLFUW), (c) Messnetz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, einschließlich des integrierten Standortes Sonnblick (BMWFW und projektbasiertes Monitoring); (d) Messnetz der Lawinenwarndienste (Lawinenwarndienst ist Ländersache, daher unterschiedliche Budgets); (e) BEV und Landes-GIS-Stellen: Generierung von Höhenmodellen mit Laserscannung und stereophotogrammetrischen Methoden. Potentielle Geldgeber für Einzelprojekte sind die ÖAW (BMWFW), der FWF (BMWFW), FFG (BMLFUW und BMVIT) und direkt das BMLFUW (z.B. eHYD) und BMVIT (Programm KIRAS). Hinzu kommen Aufträge der Länder und weiterer Interessengruppen wie Nationalparks (Abb. F-16).

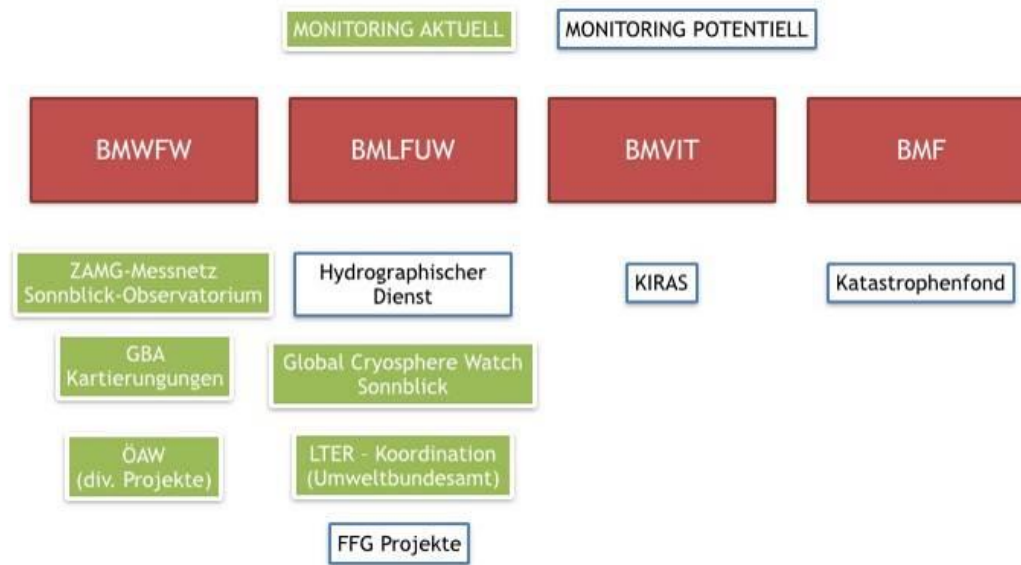


Abb. F-16: Finanzierungsmöglichkeiten und Messnetze laufender und potentieller neuer Projekte. Universitäten bzw. universitätsnahe Institutionen sind hier nicht extra angeführt.

Die Erweiterung aller Monitoringaktivitäten fällt jedoch zumeist letzten Endes in die Zuständigkeit des Bundes (verteilt auf verschiedene Ministerien), da hier die Budgets für die einzelnen Förderprogramme zugewiesen werden. In nachweislich aktuell gefährdeten Regionen wäre eine Erweiterung über den Katastrophenfond (BMF) denkbar. Eine effizientes Permafrostmonitoring in Österreich erfordert daher insbesondere die Kooperation der nationalen Messnetzbetreiber auf Bundesebene (ZAMG, GBA und HZB), d.h. des BMFWF und BMLFUW unter intensiver Einbindung der WissenschaftlerInnen an den Universitäten, welche ihre Erfahrung hier einbringen können. Teil der Strategie sollte die Nutzung der bestehenden und neu geplanten Infrastruktur der Interessensgruppen sein. Dies umfasst insbesondere die Seilbahnbetreiber, Energiewirtschaft und alpinen Vereine. Eine geeignete Kommunikationsplattform bzw. zentrale Anlaufstelle – beispielsweise an einem Forschungsstandort/Universität – sollte dafür geschaffen werden. Beispiele für zentrale Anlaufstellen in anderen Ländern sind: Schweiz (PERMOS): Universität Zürich (gestützt durch Ministerien); Norwegen (NORPERM): Geological Survey of Norway (NGU); USA-Alaska: www.permafrostwatch.org; Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks; USA-gesamt : US-Geological Survey Climate Monitoring.

Wie im Kapitel zuvor bereits angesprochen, müssten einige Bohrlöcher im Festgestein sowie in aktive Blockgletscher gebohrt werden, um eine ähnliche Repräsentativität der Monitoringstandorte wie in der Schweiz zu erhalten. Eine Ergänzung mit permanenten ERT-Messungen sollte wenn möglich gleichzeitig erfolgen. Für eine Aufrüstung von den bereits existierenden Permafroststandorten sowie von möglichen neuen ZAMG, HZB und LWD Standorten mit seichten Bohrlöchern in Permafrostgebieten mit hoher modellierter Wahrscheinlichkeit müssten 20.000€ (ohne Arbeitszeit am Standort und Planung) veranschlagt werden. Hinzu kommen die Folgekosten der Wartung der neuen und bestehenden Standorte.

Tab. F-9: Ungefähre Kosten eines für Österreich repräsentativen Permafrostmonitoringnetzwerkes. Angaben für Aufwand Personalkosten sowie Reisekosten sind hier bewusst ausklammert, da dies stark abhängig ist, ob von Universitäten, Ämtern oder privaten Firmen entsprechende Arbeiten (und Kostenverrechnung) durchgeführt werden.

Methode	Standortart	Anzahl	Kosten
Temperaturmessung tiefe Bohrlöcher (Festgestein & Blockgletscher)	Bevorzugt mit bestehender Infrastruktur und bestehendem Permafrostmonitoring	7	800.000
ERT	In Kombination mit tiefen Bohrlöchern	7	280.000
Seichte Bohrlöcher (GT), langfristiges Monitoring	Upgrade bestehende Permafroststandorte sowie ausgewählte neue Standorte: ZAMG, HZB, LWD, GLORIA, LTER, Hütten	100	200.000
Oberflächentemperatur (GST); iButtons (billig) oder GeoPrecision (teurer; zuverlässiger)	Hütten, Schilifte, Speicherseen	300 (30 Standorte)	75000
Oberflächentemperatur (GST) an aktiven Blockgletscher	Auswahl basierend auf Fernerkundung	500 (20 Standorte)	50000
Fernerkundung – grob aufgelöst	Flächendeckend eine Saison	5 Regionen	10.000
Fernerkundung – hoch aufgelöst + dGPS + terrestrische Photogrammetrie	Ausgewählte Blockgletscher	15	Pro Standort und Jahr 7.500 = 112.500
Hydrologisches und hydrogeologisches Monitoring	Ausgewählte Blockgletscherquelle; v.a. im Bereich bestehender Monitoringstandorte	10	Pro Standort 3000 = 30.000
Hydrologisches und hydrogeologisches Monitoring	Wasserchemismus	10	Pro Standort und Jahr 3000 = 30.000

Die Kosten für kinematische Auswertungen umfassen größtenteils Personalkosten, wenn erforderliche Software und Aufnahmegeräte (terrestrische Verfahren) vorhanden sind. Eine flächendeckende Erfassung von Bodenbewegungen ist nicht nur im Permafrost von großer Relevanz für das Monitoring von Naturgefahren. Zusätzlich kommen insbesondere Schutzhütten mit Stromversorgung und Schilifte als Monitoringstandorte, insbesondere in Randbereichen der Permafrostverbreitung, in Frage.

In Summe ist eine Investition von ca. 1.5 Mio € über einen Zeitraum von 3 Jahren für die Initiierung eines repräsentativen Monitorings erforderlich (Tabelle F-9). Die jährlichen Folgekosten für Wartung, Datenweitergabe und Datenauswertung (Produkte für Stakeholder) betragen ca. 200.000. Darin sollten auch die Kosten für den Monitoringmessnetz-Manager (eine diesbezügliche Stelle sollte eingerichtet werden) inkludiert werden.

F-5.3 Produkte

Eine essentielle Aufgabe von Forschungsgruppen und Institutionen ist die adäquate Wissenschaftskommunikation, die sich nach den Bedürfnissen der Zielgruppe richtet.

F-5.3.1 Science-to-Science

Ähnlich dem Schweizer Permos sollten umfassende Jahres- – oder Zweijahresberichte – erscheinen. Diese Berichte sollten dem Stand der Wissenschaft entsprechen und müssen von einer zentralen Verwaltungsstelle (z.B. einer Uni, ZAMG, CCCA) koordiniert werden. Das CCCA kann als übergeordnete Stabstelle als Datenmanagement und -vermittlungseinheit dienen. Hier wird eine sichere Speicherung, Qualitätskontrolle und Harmonisierung der Daten gewährleistet und diese dann für alle Nutzer zur Verfügung gestellt. Der Vorteil liegt u.a. darin, dass die Datensätze wesentlich größere Gebiete abdecken und somit umfassendere Analysen möglich sind. Innerhalb eines Webauftrittes ermöglicht ein Data-Browser das leichte Auffinden von Daten bzw. Plots. Folgende Funktionalität ist im Datenbankzentrum CCCA geplant: (a) Zugang zu verteilten Informationen und anderer Institutionen als Daten Provider zur Klimaforschung der CCCA Mitglieder; (b) An zentraler Stelle soll der Zugang zu den verteilten Informationen gewährleistet sein: Integration, Auffinden und Verfügbarmachen von Information; (c) gespeichert sind Daten, Metadaten, Modelle und Rechenressourcen; (d) Schnittstelle zu Standards und Herstellung der Grundfunktionalität. Die Herstellung der Grundfunktionalität wird im Zeitraum 2015 – 2018 hergestellt.

F-5.3.2 Science-to-Stakeholder

Die Schnittstelle Wissenschaft-Stakeholder ist für die Gesellschaft v.a. bei der effektiven Nutzung von Fördergeldern aber auch bei der Bewusstseinsmachung von Problemfeldern von enormer Bedeutung. Die Herausforderung für die Wissenschaft besteht darin, die komplexen Zusammenhänge in allgemein verständlicher Form Entscheidungsträgern zur Verfügung zu stellen. Dies kann durch folgende Produkte geschehen. Primärprodukte: (a) Verbreitungskarten von flächigen und Punktphänomenen (Jahresmitteltemperatur der Bodenoberfläche, Permafrost, Blockgletscher); (b) Darstellung von Modellierungsergebnissen von Prozessen; Sekundärprodukte (Verschnitt mit räumlicher Infrastrukturinformation) wie Gefährdungskarten (Vulnerabilität, Suszeptibilität). Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Kommunikation mit diesen Interessensgruppen. Leicht zugängliche Kontaktlisten relevanter Personen und Gruppen bieten einen großen Mehrwert im Austausch und Umgang. Generell muss die Kommunikation der Wissenschaft mit Entscheidungsträgern folgende Ziele verfolgen: (a) Bewusstseinsmachung; (b) Herausarbeitung der gesellschaftlichen Relevanz, (c) Unterstützung der Politik in Entscheidungsfragen.

F-5.3.3 Science-to-Public

Grundlegend für die Interaktion mit potentiellen Nutzern ist die Erstellung eines Onlineportals. Das Service sollte die Dissemination von Ergebnissen aus früheren Initiativen als auch aktuellen Aktivitäten umfassen. Ein österreichisches Permafrost-Portal sollte sowohl die Bedürfnisse auf nationaler Ebene berücksichtigen als auch zur internationalen Integration beitragen. Dafür erforderlich sind Informationen zur Repräsentanz in verschiedenen Netzwerken als auch die Nutzung der Visualisierungskomponenten als externen Bestandteil. Eine Aufarbeitung von historischen Daten (Messungen und Produkte) sollte im Rahmen des Aufbaus des Portals erfolgen. Das Portal könnte folgende Komponenten umfassen: (1) Wer betreibt Permafrostforschung in Österreich mit: Liste von Institutionen und Kontakten (Verlinkung zu Veröffentlichungen und Standorten), historischem Abriss (Verlinkung zu Veröffentlichungen), Projekte der Vergangenheit; (2) Wo werden Zeitreihen erfasst? Link beispielsweise zu Echtzeitmessungen bzw. GTN-P-Datenbank und APD; (3) Neuigkeiten wie Veranstaltungen, Pressemitteilungen, etc.; (4) Kontaktlisten und schließlich (5) die Geldgeber.

Literaturverzeichnis

- Boeckli L., Brenning A., Gruber S. & Noetzli J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics, *The Cryosphere*, 6, 807-820.
- Brown J.O., Ferrians J.J., Heginbottom J.A. & Melnikov E.S. (1997): Circum- Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Washington, DC: U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000.
- Cremonese E., Gruber S., Phillips M., Pogliotti P., Boeckli L., Noetzli J., Suter Ch., Bodin X., Crepaz A., Kellerer-Pirklbauer A., Lang K., Letey S., Mair V., Morra di Cella U., Ravel L., Scapozza C., Seppi R., & Zischg A. (2011): An inventory of permafrost evidence for the European Alps. *The Cryosphere*, 5, 651-657.
- Delaloye R., Perruchoud E., Avian M., Kaufmann V., Bodin X., Ikeda A., Hausmann H., Käab A., Kellerer-Pirklbauer A., Krainer K., Lambiel C., Mihajlovic D., Staub B., Roer I. & Thibert E. (2008): Recent Interannual Variations of Rockglaciers Creep in the European Alps. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, USA, June – July 2008, 343-348
- Ebohon B. & Schrott L. (2008): Modelling Mountain Permafrost Distribution - A New Permafrost Map of Austria. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, USA, 397-402.
- Fegerl, L. (2015): Bedeutung von Permafrost und Periglazial bedingte Naturgefahren bei geologischen Landesdienststellen: Das Beispiel Salzburg. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.
- Gruber S. (2012): Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6, 221–233, 2012
- Haeberli W & Patzelt G (1982): Map of permafrost distribution in area of Hohebenkar-Blockgletscher, Austria. doi:10.1594/PANGAEA.802398, In Supplement to: Haeberli, Wilfried; Patzelt, Gernot (1982): Permafrostkartierung im Gebiet der Hohebenkar-Blockgletscher, Obergurgl, Ötztaler Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 18(2), 127-150, hdl:10013/epic.40222.d001
- Hallet B., Walder J. & Stubbs C.W. (1991): Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained sub-zero temperatures: Verification from an experimental study using acoustic emissions. – *Permafrost and Periglacial Processes* 2: 283-300.
- Hasler, A., Gruber, S. & Beutel, J. (2010): Kinematics of steep bedrock permafrost. *Journal of Geophysical Research*, 117, F01016.
- Hoelzle M. (2015): Das Langzeitpermafrostmonitoring Programm PERMOS in der Schweiz: Past, Present and Future. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.
- Kapelari, P. 2015: Bedeutung von Langzeitmonitoring von Permafrost und Periglazialen Prozessen für die Prävention von Naturgefahren: Die Sicht des Österreichischen Alpenvereins. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.
- Kaufmann V. & Kellerer-Pirklbauer A. (2015): Active rock glaciers in a changing environment: Geomorphometric quantification and cartographic presentation of rock glacier surface change with examples from the Hohe Tauern Range, Austria: Kriz K. (ed.): 16 years of the Commission on Mountain Cartography (CMC) of the International Association of Cartography (ICA) – in Druck
- Keller, F., 1994: Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost. Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* 127, ETH Zürich.
- Kellerer-Pirklbauer A. (2013): Ground surface temperature and permafrost evolution in the Hohe Tauern National Park, Austria, between 2006 and 2012: Signals of a warming climate? 5th Symposium for Research in Protected Areas - Conference Volume, 10 to 12 June 2013, Mittersill, Austria, 363-372.
- Kellerer-Pirklbauer A. (2014): Permafrost. In Stowasser R. & Köhler M., *Global Climate Observing System – Bericht Österreich*, Vienna 2014, 58-59.

- Kellerer-Pirklbauer A. & Kaufmann V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 94-112.
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Avian M. & Carrivick J. (2012a): Climate change and rock fall events in high mountain areas: Numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94, 59-78.
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K. & Kleinfelchner H. (2012b): A new rock glacier inventory of the eastern European Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 78-93.
- Kern K., Lieb G.K., Seier G. & Kellerer-Pirklbauer A. (2012): Modelling geomorphological hazards to assess the vulnerability of alpine infrastructure: The example of the Großglockner-Pasterze area, Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 113-127.
- Klene A.E., Nelson F.E. & Shiklomanov N.I. (2001): The n-factor as a tool in geocryological mapping: seasonal thaw in the Kuparuk River Basin, Alaska. *Physical Geography* 22: 449–466.
- Krainer K. & Ribis M. (2012): A rock glacier inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 32-47.
- Krainer K., Kellerer-Pirklbauer A., Kaufmann V., Lieb G.K., Schrott L. & Hausmann H. (2012a): Permafrost Research in Austria: History and recent advances. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2, 2-11.
- Krainer K., Kellerer-Pirklbauer A., Kaufmann V., Lieb G.K., Schrott L. & Hausmann H. (2012b): Permafrost in Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105/2; <http://www.univie.ac.at/ajes/>
- Krainer K., Bressan D., Dietre B., Haas J.N., Hajdas I., Lang K., Mair V., Nickus U., Reidl D., Thies H. & Tonidandel D. (2015): A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). *Quaternary Research*, 83, 2, 324–335.
- Lambrecht, A. & Kuhn, M. (2007): Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.
- Lieb, G.K. (1998): High-mountain permafrost in the Austrian Alps (Europe). *Proceedings of the 7th International Permafrost Conference, Yellowknife, Canada*, 663-668.
- Lieb G. K. (2007): Vom Klimawandel beeinflusste Naturprozesse im Hochgebirge als potenzielle Gefahren für Freizeitaktivitäten – qualitative Überlegungen mit Beispielen aus den Hohen Tauern. In: *Geograph. Jahresbericht aus Österreich LXII/LXIII*, 79-94.
- Lieb G. K. & Krobath M. (2015): Permafrost – ein sinnvolles Thema im GW-Unterricht? *GW-Unterricht* 138/2, 44–55.
- Lieb, G.K., Kern, K. & Seier, G. (2010): AlpinRiskGP - Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpentouristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich). Endbericht von StartClim2009.F in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF
- Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoenreich, P., Cremonese, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L., 2011: PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesis report. INTERPRAEVENT Journal Series 1, Report 3. Klagenfurt. 28 pp
- Matsuoka, N. (2008): Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994–2006) observations. – *Geomorphology* 99: 353-368.
- Mirtl M., Bahn M., Battin T., Borsdorf A., Dirnböck T., Englisch M., Erschbamer B., Fuchsberger J., Gaube V., Grabherr G., Gratzer G., Haberl H., Klug H., Kreiner D., Mayer R., Peterseil J., Richter A., Schindler S., Stocker-Kiss A., Tappeiner U., Weisse T., Winiwarter V., Wohlfahrt G., Zink R. (2015): Forschung für die Zukunft – LTER-Austria White Paper 2015 zur Lage und Ausrichtung von prozessorientierter Ökosystemforschung, Biodiversitäts- und Naturschutzforschung sowie sozio-ökologischer Forschung in Österreich. LTER-Austria Schriftenreihe, Vol. 2, 74 S.
- Mölk, M. 2015: Bedeutung und Einfluss von Permafrost und periglazialen Prozessen auf den Schutz vor Naturgefahren im Tätigkeitsbereich der Wildbach- und Lawinenverbauung. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.

Naeimi V., Paulik C., Bartsch A., Wagner W., Kidd R., Boike J. & Elger K. (2012): ASCAT Surface State Flag (SSF): Extracting Information on Surface Freeze/Thaw Conditions From Backscatter Data Using an Empirical Threshold-Analysis Algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2177667.

Noetzli, J., Gruber, S., and Hoelzle, M. 2004. Permafrost und Felsstürze im Hitzesommer 2003. GEOforum actuel, 20, 11-14

Paul F., Frey H. & Le Bris R. (2011): A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results, Ann. Glaciol., 52, 144-152.

Park, S.E., Bartsch, A., D. Sabel, W. Wagner, V. Naeimi, Y., Yamaguchi (2011): Monitoring Freeze/Thaw Cycles using ENVISAT ASAR Global Mode Remote Sensing of Environment 115, 3457-3467.

PERMOS 2013. Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. Noetzli, J. (ed.), Glaciological Report (Permafrost) No. 10/11 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 80 pp.

Pfeiler, S. 2015: Permafrost und Periglazial bedingten Naturgefahren: Bedeutung für die Geologische Bundesanstalt. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.

Pröbstl U. & Damm B. (2009): Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren als Folge von Gletscherschwund und Permafrostdegradation in Tourismus-Destinationen am Beispiel des Tuxer Tals (Zillertaler Alpen/Österreich). Endbericht von StartClim2008.F in StartClim2008: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BML-FUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF

Schoeneich P., Bodin X., Echelard T., Kaufmann V., Kellerer-Pirklbauer A., Krysiacki J.M. & Lieb G.K. 2014: Velocity changes of rock glaciers and induced hazards. In: G. Lollino et al. (eds.), Engineering Geology for Society and Territory – Volume 1, Springer International Publishing Switzerland, 223-227. DOI:10.1007/978-3-319-09300-0_42

Schöner W. 2015: The Global Cryosphere Watch (GCW) - Surface Observations Programme CryoNet. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.

Stowasser R., 2015: Das Global Climate Observing System (GCOS) und die Rolle von Permafrost darin. Vortrag im Rahmen des permAT Workshops in Graz, 26. und 27. Februar 2015.

Vaughan, D.G., J.C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen and T. Zhang, 2013: Observations: Cryosphere. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 317-382.

ZAMG (2013): Permafrost-Monitoring Sonnblickgebiet. Abschlußbericht: SSBO (Strukturprojekt „Sonnblick Observatorium – Begleitende Maßnahmen zur Umsetzung der ENVISON Ziele), 48 S.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

- Abb. F- 1: Diskussionsrunden am Tag 2 des permAT Workshops in Graz
- Abb. F- 2: Ein großer instabiler Block (ca. 4m x 1.2 m x 1 m) aus Orthogneis im Nahbereich des alpinen Steiges 533 zwischen dem Arthur-von-Schmid Haus und der Mallnitzer Scharte in der Ankogelgruppe.
- Abb. F- 3: Temperaturverlauf (Tagesdaten) in fünf ausgewählten Tiefen im Bohrloch 3, Hoher Sonnblick
- Abb. F- 4: Räumliche Verbreitung von Permafrost in Österreich auf Basis des Modellsansatzes von Boeckli et al. (2012) in Relation zu beeinflussten Bezirken (vgl. Tabelle F-2).
- Abb. F- 5: Verbreitung von Permafrost und vergletscherte Flächen auf Bezirks- und Länderebene auf Basis der Modellierung von Boeckli et al. (2012) sowie des Gletscherinventars von Lambrecht & Kuhn (2007)
- Abb. F- 6: Räumlicher Zusammenhang zwischen modellierter Permafrostverbreitung (Boeckli et al. 2012) und potentiell gefährdeten Schigebieten.
- Abb. F- 7: Räumlicher Zusammenhang zwischen modellierter Permafrostverbreitung (Boeckli et al. 2012) und potentiell gefährdeten Speicherseen zur Energiegewinnung.
- Abb. F- 8: Räumlicher Zusammenhang zwischen modellierter Permafrostverbreitung (Boeckli et al. 2012) und potentiell gefährdeten Hütten (meist bewirtschaftet) sowie eines Hotels (Tuxer-Ferner-H.).
- Abb. F- 9: Verbreitung von aktuellen Permafrost- und Periglazialmonitoringstandorten (mit Unterscheidung zwischen aktuell aktiv und inaktiv) in Österreich sowie modellierte Verbreitung von Permafrost (Boeckli et al. 2012).
- Abb. F- 10: Exposition und Höhenlage (beide Grundlage 10 m DEM) von Permafrostbeeinflusster Infrastruktur (ausgenommen Bergstationen von Seilbahnen, etc.), aktuellen Permafrostmonitoringstandorten und möglichen relevanten ZAMG, HZB und LWD Standorten.
- Abb. F- 11: Mittlere jährliche Bewegungsrate von Blockgletschern in der Zentralen Schobergruppe im Zeitraum 2002 bis 2009.
- Abb. F- 12: Räumliche Verteilung von Temperaturmessungen
- Abb. F- 13: Permafrostbohrlöcher am Kitzsteinhorn
- Abb. F- 14: Karte mögliche Synergien mit bestehenden intern. Messnetzen (GLORIA und LTER) sowie dem HZB.
- Abb. F- 15: Karte mögliche Synergien mit bestehenden Messnetz der ZAMG sowie der LWD.
- Abb. F-16: Finanzierungsmöglichkeiten und Messnetze laufender und potentielle neue Projekte.

Tabellen

Tab. F- 2:	Keynote-Vorträge (chronologisch geordnet) am Tag 1 des permAT Workshops, 26-27. Februar 2015, Graz.
Tab. F- 2:	Relative und absolute Flächenangaben der Permafrost- und Gletscherverbreitung in Österreich aufgeteilt auf betroffene Bezirke (A) und Bundesländer (B) auf Basis von Boeckli et al. (2012) sowie Lambrecht & Kuhn (2007).
Tab. F- 3:	Aktuelle Permafrost- und Periglazialmonitoringstandorte in Österreich (Zahlencodierung in Klammer siehe Abb. F-9) mit Auflistung der untersuchten Parameter.
Tab. F- 4:	Anzahl von Bohrlöchern in der Schweiz, Österreich und Italien bezogen auf die Permafrostverteilung auf Basis von Boeckli et al. (2012).
Tab. F- 5:	Gegenwärtig in Österreich eingesetzte Methoden im Bereich Permafrost- und Periglazialmonitoring unterschieden zwischen indirekten, halbdirekten und direkten Methoden.
Tab. F- 6:	Permafrost und Periglazialmonitoringstandorte der Universität Graz und der Technischen Universität Graz. Die Anzahl der installierten Datenlogger und Sensoren sowie die Messtiefenbereiche sind gelistet.
Tab. F- 7:	TAWES-Stationen der ZAMG die sich laut Modellrechnung wahrscheinlich im Permafrost (Permafrostindex $\geq 0,5$ nach Boeckli et al. 2012) befinden. An allen gelisteten Standorten ist die Jahresmitteltemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$. Codes siehe Abb. F-15
Tab. F- 8:	Aufstellung der Kosten für unterschiedliche Methoden zu Erfassung von Permafrost: Methodengruppe (MG): Indirekt (I), halbdirekt (H), direkt (D).
Tab. F-9:	Ungefähre Kosten eines für Österreich repräsentativen Permafrost-monitoringnetzwerkes.