

PROALP - KARTIERUNG UND MONITORING VON PERMAFROST IN DER AUTONOMEN PROVINZ BOZEN SÜDTIROL, ITALIEN

Andreas Zischg¹, Volkmar Mair², Kathrin Lang³

ZUSAMMENFASSUNG

Bereits vor der gesetzlichen Einführung der Gefahrenzonenplanung in Südtirol im Jahre 2006 hat das Amt für Geologie und Baustoffprüfung der Autonomen Provinz Bozen Südtirol (Italien) das Projekt „PROALP – Kartierung und Überwachung von Permafrostphänomenen in Südtirol“ initiiert. Das Projekt zielte auf die flächendeckende Lokalisierung und Abgrenzung der Permafrostgebiete und auf den Aufbau eines Permafrost-Monitoring Verfahrens ab. Es sollten potentielle Gefahrenggebiete identifiziert und lokalisiert, das Gefährdungspotenzial für betroffene Infrastruktur abgeschätzt und damit Grundlagen für die Gefahrenzonenplanung geschaffen werden. Dabei kamen verschiedene Methoden zum Einsatz, sowohl flächendeckende Erhebungen von Permafrostphänomenen, Fernerkundungsmethoden für das Monitoring von Hangbewegungen und Modellierungen von Gefahrenhinweiskarten für Naturgefahren in Permafrostgebieten als auch detaillierte geophysikalische Erhebungen in Pilotgebieten. Die Methodenkombination erlaubte die Schaffung von wertvollen Grundlagen für die Beurteilung von Naturgefahren in Permafrostgebieten im Rahmen der Gefahrenzonenplanung.

Keywords: Permafrost, Monitoring, Gefahrenbeurteilung, Sturz, Murgang, Blockgletscher

ABSTRACT

Before the beginning of the elaboration of hazard zone maps in 2006, the Geological Service of the Autonomous Province of Bolzano/Bozen South Tyrol, Italy started the project "PROALP – Mapping and monitoring of permafrost phenomena in South Tyrol". The project aimed at the area-wide mapping of permafrost phenomena and at the development of a monitoring system for permafrost. Potential hazard zones in permafrost areas should be identified and localized, the hazard potential for infrastructures should be assessed and therefore basic data should be provided for the hazard mapping procedure. Different methods were used to fulfil these goals: area-wide mapping of the permafrost areas and monitoring of slope movements by means of remote sensing approaches, modelling of hazard index maps for natural hazards in permafrost areas, and detailed geophysical investigations in pilot areas. The combination of different methods allowed gaining valuable data needed for the elaboration of hazard zone maps.

Keywords: permafrost, monitoring, natural hazards assessment, rockfall, debris flows, rockglacier

EINLEITUNG

Bauten und Infrastrukturanlagen in Permafrostgebieten können durch das Ausschmelzen von Eis und davon verursachten Bodenbewegungen gefährdet werden. Im Hochgebirge kann die Destabilisierung von Lockermaterialhängen durch die Auslösung von sekundären Prozessen wie Felsstürze, Rutschungen und Murgängen Siedlungen in den Talböden gefährden. Um diese potenziellen Gefahren abschätzen und in der Raumplanung berücksichtigen zu können, hat die Autonome Provinz Bozen Südtirol ein Projekt für die Erhebung und die Beobachtung der Permafrostphänomene initiiert. Das

¹ Andreas Zischg, Abenis Alpinexpert GmbH, Bozen, Italien (e-mail: a.zischg@abenis.it)

² Volkmar Mair, Autonome Provinz Bozen Südtirol, Bozen, Italien

³ Kathrin Lang, Autonome Provinz Bozen Südtirol, Bozen, Italien

Amt für Geologie und Baustoffprüfung startete im Jahr 2006 das Projekt „PROALP – Kartierung und Überwachung von Permafrostphänomenen in Südtirol“. Das Projekt zielte auf die flächendeckende Lokalisierung und Abgrenzung der Permafrostgebiete und auf den Aufbau eines Permafrost-Monitoring Verfahrens ab. Es sollten potentielle Gefahrengebiete identifiziert und lokalisiert werden und damit Grundlagen für die Gefahrenzonenplanung geschaffen werden. Mit der detaillierten Untersuchung von verschiedenen Pilotgebieten sollten die Kenntnisse über den Zustand des Permafrost, über den Aufbau und die Struktur von Blockgletschern und über die aktuellen Entwicklungen in Relation zum Klimawandel vertieft werden.

METHODE

Um die anspruchsvollen Ziele des Projekts erfüllen zu können, mussten viele verschiedene Untersuchungsmethoden kombiniert werden. In einem ersten Schritt wurde ein Inventar der direkten Permafrostphänomene erstellt. Dabei wurden die Blockgletscher visuell auf Basis der Orthofotokarten und des Laserscanning Geländemodells kartiert. Ergebnis ist ein Blockgletscherinventar mit einem international kompatiblen Datenmodell. Die Aktivität der Blockgletscher wurde unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der satellitenbasierten Radarinterferometrie beurteilt. Im Rahmen von PROALP wurden flächendeckende Interferogramme von verschiedenen Zeiträumen erstellt. Diese geben qualitativ Auskunft über Gebiete mit Hangbewegungen. Mit Hilfe dieses Datensatzes konnten die aktiven sich bewegenden Blockgletscher von den inaktiven unterschieden werden. In einigen Pilotgebieten wurden detailliertere Auswertungen der Radarinterferometrie gemacht. Dabei konnten quantitative Aussagen über die Bewegungsraten gemacht werden. In einem weiteren Schritt wurden die perennierenden Schneeflecken als indirekte Permafrostindikatoren aus den Orthofotokarten von 1996, 1999 und 2003 extrahiert. Diese Inventare geben eine zusätzliche Information in Gebieten mit möglichem Permafrost ausserhalb von Blockgletschern. In weiteren Pilotgebieten wurden die Bodentemperaturen erhoben und Georadarmessungen für die Untersuchungen des Untergrundes von Blockgletschern durchgeführt. Auf Basis der erarbeiteten flächendeckenden Grundlagen in Kombination mit einer Modellierung der potentiellen Permafrostgebiete wurde eine synthetische Karte der Permafrostverbreitung erstellt. Diese Karte bildete die Grundlage für die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für Sturzprozesse aus Permafrostgebieten und eine Gefahrenhinweiskarte für Murgangprozesse aus Permafrostgebieten. Aus den bestehenden Gefahrenhinweiskarten wurden mit Hilfe der Permafrostkarte jene Prozessflächen ausgewählt, die Anriss- bzw. Abbruchgebiete in Permafrostbereichen haben. Diese Hinweiskarte zeigt auf, wo Sturz- und Murgangprozesse aus Permafrostgebieten Siedlungsgebiete und Strassen gefährden können.

BLOCKGLETSCHERKATASTER

Als Basis für die Kartierung der Blockgletscher wurde in einem ersten Schritt das Datenmodell für die Abbildung im GIS entwickelt. Das Datenmodell für die Kartierung der Blockgletscher lehnt sich an die Taxonomie von Burger et al. (1999) und an verschiedene Inventare des Alpenraums an (Carton et al. 1988; Frauenfelder 1997; Guglielmin & Smiraglia 1997; Imhof 1994, Juen 1999, Baroni et al. 2004). Der Datensatz wird geometrisch als Polygone dargestellt, Fliesslinien und Loben werden als Linien dargestellt. Die Blockgletscher wurden auf Basis der Orthofotos und des digitalen Lidar-Geländemodells kartiert (Bucher 2008). Grössere Blockgletscher mit eindeutig inaktiven und einem oberen aktiven Teil werden als zwei Teilflächen dargestellt. Das Datenmodell erlaubt den Export der Daten in die CARG-Datenbank und in die Datenbank des italienischen Inventars der Massenbewegungen (IFFI). Bestehende Kartierungen wie die Daten der Geologischen Karten (CARG) wurden in den Blockgletscherkataster eingearbeitet. In diesem Fall ist die Quelle im Datensatz zitiert. Die Datenbank wird vom Amt für Geologie und Baustoffprüfung gewartet und wird bei weiteren Detailuntersuchungen und neuen Erkenntnissen laufend ergänzt. Die Zuweisung der Information über die Aktivität der einzelnen Blockgletscher erfolgte neben der visuellen Interpretation der Formfaktoren und der Orthofotos mit Hilfe der Radarinterferometrie. Aufgrund der Lage der Blockgletscher oberhalb des dichten Vegetationsgürtels eignet sich diese Technik sehr gut für die Analyse von Hangbereichen, die sich verändern.

Tab. 1 Datenmodell für die Kartierung der Blockgletscher
Tab. 1 Data model for the mapping of rockglaciers

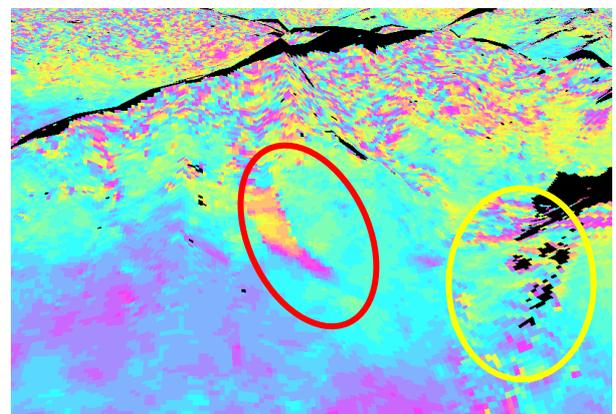
<i>Column Name</i>	<i>Data Format</i>	<i>Values/Units</i>	<i>Description</i>
RG_ID (Primary Key)	AutoValue (unique)		consecutive numbering of all rock glaciers
RG_ID_COMP	Long Integer		Consecutive numbering of complex rock glaciers
Shape	geometry		geometry
Shape_Length	Double	[m]	length
Shape-Area	Double	[m ²]	area
material	Char(50)	0-nn 1-talus 2-morainic debris	source of material
grain size	Integer	0-nn 1-coarse (>1 m) 2-finely granulated (<1m)	grain size of the rockglacier material
activity	Char(25)	0-nn 1-active 2-inactive 3-relict 4-active and inactive	rock glacier activity
interpretation	Integer	0-nn, 1-orthofoto, stereo image 2-hillshade of LidarDEM 3-topographical map 4-DTM 5-field 6-foto 7-documentation 8-method combination	interpretation method for cartography of rock glaciers
source	Char(100)		citation of existing rock glacier mapping
editor	Char(100)		name of the editor
locName	Char(100)		local name of the rock glacier site
altitude	Double	[m]	min. altitude of the rock glacier front
exposit	Char(2)	N-Nord NE-North East E-East SE-South East S-South SW-South West W-West NW-North West	average exposition along the rock glacier's central flow line
genesis	Integer	0-nn 1- debris-covered glacier 2- ice-cored rock glacier 3- ice-cemented rock glacier	type of rock-glacier genesis
surfrel	Char(50)	0-nn 1-very well developed 2-subdued to well developed 3-no furrows and ridges	surface relief
form	Char(50)	0-nn 1-singular 2-complex	form type
RGshape	Char(50)	0-nn 1-lobate (width ≥ length) 2-tongue (length ≤ width) 3-spatulate (lengt ≤ width)	description of rock glacier shape
interstr	Char(50)	0-nn 1-interstitial ice 2-massive ice	internal structure
width	Double	[m]	max. width of rock glacier
length	Double	[m]	max. length of rock glacier part
length complex	Double	[m]	max. length of whole rock glacier
notes	Char(250)		description and observations by the editor

Das Grundprinzip der differentiellen Radarinterferometrie beruht auf der Kombination von zwei Radarszenen des gleichen Gebiets, die jedoch zu zwei verschiedenen Zeitpunkten und somit von zwei leicht unterschiedlichen Positionen des Radarsensors aufgenommen wurden (Zilger et al. 2006, Mair et al. 2008). Das Ergebnis der Kombination der Radarszenen ergibt ein sog. Interferogramm, das charakteristische Phasendurchgänge zeigt (sog. fringes). Diese Phaseninformation besteht aus den folgenden Komponenten: Topographie, Deformation der Oberfläche und Phasen-Rauschen. Für die Detektierung von Oberflächenbewegungen mit Hilfe der Interferogramme ist die Information zur Topographie nicht notwendig, so dass diese Komponente aus dem Interferogramm unter Verwendung eines externen Höhenmodells entfernt wird. Hierzu wurde das Höhenmodell der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol mit einer Auflösung von 20m verwendet. Nach der Subtraktion der topographischen Komponenten erhält man das sog. differentielle Interferogramm, das nun nur noch Informationen zur Deformation der Oberfläche sowie Phasenrauschen enthält. Für die großräumige Detektierung von Permafrosterscheinungen im gesamten Gebiet der Provinz wurden differentielle Interferogramme der Satelliten ERS-1/-2 sowie JERS verwendet. Die Detektierung erfolgt aufgrund von Signalen in den differentiellen Interferogrammen, die sich von ihrer Umgebung abheben und in den Bereich der möglichen Permafrostverbreitung fallen. Überflüge der ERS-1/-2 Satelliten (Mission von 1991 – 2000) erfolgten alle 35-Tage, sowie während der sog. Tandem-Mission mit einem 1-Tages-Abstand. JERS-Aufnahmen sind alle 44 Tage im Zeitintervall 1993 – 1998 verfügbar. Aus diesen beiden Missionen stehen insgesamt 41 ERS-1/-2 Szenen zur Verfügung sowie 19 JERS-Szenen. Aus diesen Szenen wurden differentielle Interferogramme erstellt, die verschiedene zeitliche Beobachtungsintervalle abdecken.

Die verfügbaren Radardaten wurden nach dem vorher beschriebenen Verfahren ausgewertet, wobei eventuelle Veränderungen nicht nur im einfachen Zeitintervall – bei ERS 35 Tage und bei JERS 44 Tage – sondern auch in mehrfachen wie 70 bzw. 88 Tage und 105 bzw. 132 Tage analysiert wurden. Eine beispielhafte Analyse mittels DiffSAR ist in Abbildung 1 im Ultental dargestellt.



a) Ultental, Blockgletscher Rossbänk in perspektivischer Ansicht von Nordosten gesehen.



b) Interferogramm 8/7/97 – 9/8/97 – 38 Tage – ERS-2 – asc – Track 172.

Fig. 1 Ergebnisse der differentiellen Radarinterferometrie in perspektivischer Ansicht. Quelle: Zilger et al. (2006)

Fig. 1 Results of the interferometry analyses in a perspective view. Source: Zilger et al. (2006)

Die differentielle Radarinterferometrie erlaubt zwei Detailierungsstufen: Die Interferogramme zeigen qualitativ die Bereiche mit Bewegungen der Oberflächen auf, in einer vertiefenden Analyse können die Bewegungsvektoren in Sichtrichtung berechnet werden. Für die Bewertung der Aktivität der Blockgletscher des Blockgletscherkatasters wurde eine rein qualitative aber flächendeckende Analyse durchgeführt. Für die im Detail untersuchten Gebiete wurden die Geschwindigkeiten der Bewegung berechnet (Mair et al. 2008). Abbildung 2 zeigt bildhaft die in den quantitativen Auswertungen enthaltenen Informationen am Beispiel des Blockgletschers „Steinernes Meer“ am Fusse der Tschenglser Hochwand im Suldental.

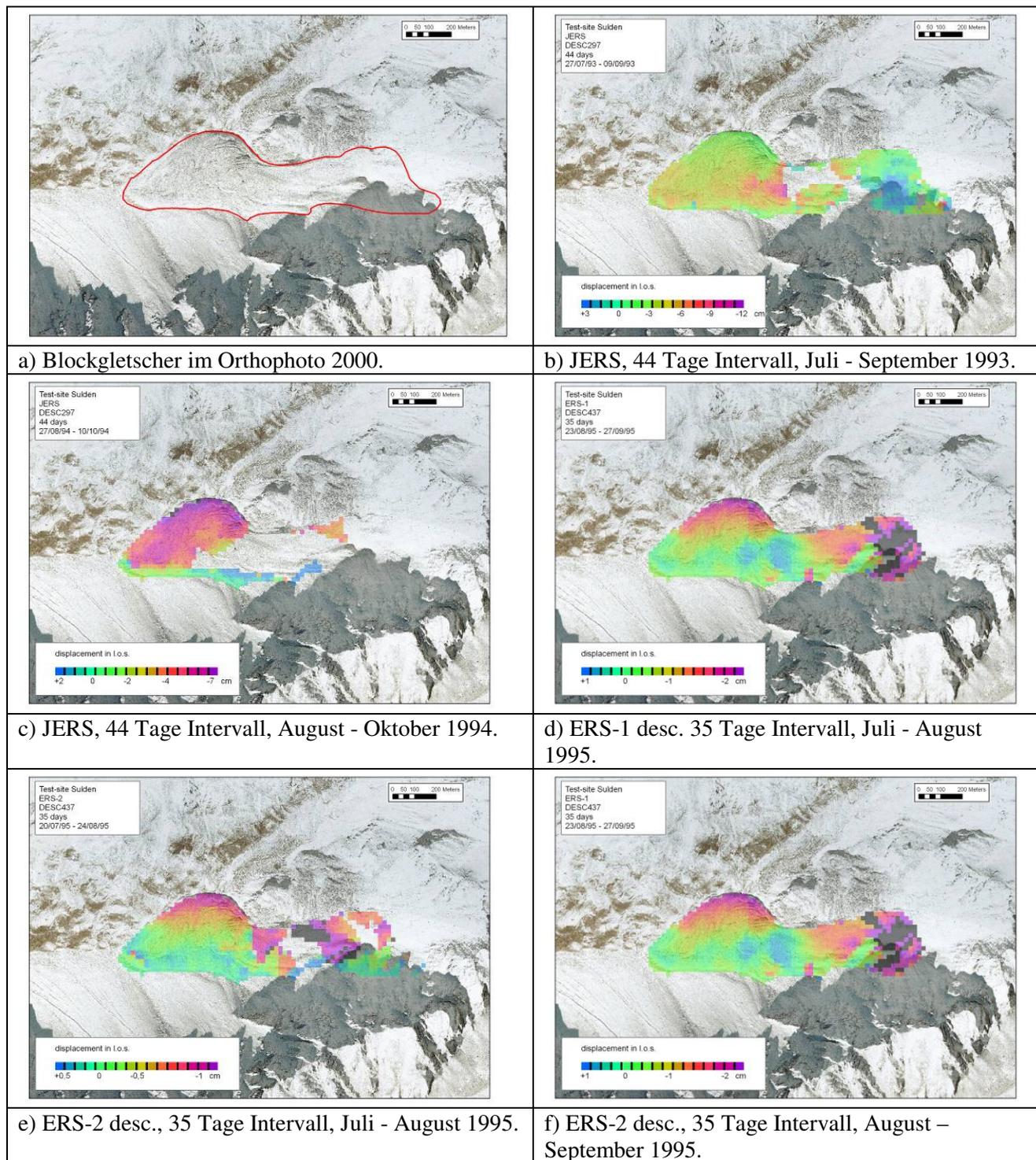


Fig. 2 Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen der Bewegungsraten von Blockgletschern mit Hilfe der Differenziellen Interferometrie. Quelle: Zilger et al. (2006).

Fig. 2 Results of the quantitative analyses of rockglacier flow velocities by means of radar interferometry. Source: Zilger et al. (2006).

Alle verfügbaren Datensätze über dem Landesgebiet wurden einer qualitativen DiffSAR-Analyse unterworfen, und auf deren Basis die Aktivität der Blockgletscher klassifiziert. Alle Blockgletscher oder deren Teilflächen, die in den untersuchten Zeitschritten (ein differentielles Interferogramm) Bereiche mit beobachteten Oberflächenveränderungen aufweisen, wurden als aktiv klassifiziert. Die Datenbank des Blockgletscherkatasters enthält die Metainformation der Blockgletscher, für die Radarinterferogramme als Grundlage für die Klassifikation verwendet wurden.

PILOTGEBIETE

In 7 Pilotgebieten wurden detaillierte Erhebungen im Gelände durchgeführt. Dabei wurden die Bodentemperaturen gemessen, die Bewegungen von Blockgletschern mittels dGPS oder terrestrischer Vermessung gemessen, hydrologische und geophysikalische Messungen durchgeführt. Die Pilotgebiete sind der Rossbänk-Blockgletscher im Ultental (Ausserer 2008), der Lazaun-Blockgletscher im Schnalstal (Bressan 2009), der Blockgletscher am Murfreit oberhalb des Grödnerjochs (Mussner 2009), die zwei Blockgletscher an der Croda Rossa (Krainer & Lang 2007), der Napfen Blockgletscher in Taufers (Damm & Langer 2006), Sulden Madritsch (Zischg 2009) und der Blockgletscher "Steinernes Meer" in Sulden (Zischg 2009).

BERÜCKSICHTIGUNG VON PERMAFROST IN DER GEFAHRENZONENPLANUNG

Das Amt für Geologie und Baustoffprüfung erstellt Karten der prozessspezifischen Bearbeitungstiefe bei der Erstellung von Gefahrenzonenplänen für die Gemeinden. Zu diesem Zweck erstellte das Amt im Jahre 2006 eine Gefahrenhinweiskarte für Sturzprozesse (Amt für Geologie und Baustoffprüfung 2006). In Überlagerung der Gefahrenhinweiskarte mit der Karte der Schadenpotenzialkategorien wird der Detaillierungsgrad bei der Erstellung der Gefahrenzonenpläne ausgewiesen. In den Kompetenzbereich des Amtes und der anderen für das Naturgefahrenmanagement verantwortlichen Ämtern fällt die Entscheidung, welche Prozesse an bestimmten Lokalisationen mit welchem Detaillierungsgrad untersucht werden sollen (Phase A – Festlegung der Bearbeitungstiefen). Im Rahmen von PROALP wurde eine Entscheidungsgrundlage erstellt, die für das gesamte Landesgebiet jene potentiellen Sturz- und Murgangbereiche aufzeigen soll, deren Aktivität möglicherweise durch Permafrost beeinflusst sein kann. Die durch diese Gefahrenhinweiskarte aufgezeigten potentiell gefährdeten Gebiete sollen im Rahmen der Erstellung der Gefahrenzonenpläne im Detail näher untersucht werden, unter spezieller Berücksichtigung der Beeinflussung der Naturgefahren durch Permafrost und Permafrostdegradation.

Die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Sturz- und Murgangprozesse aus Permafrostbereichen erfolgte auf Basis der Überlagerung von bereits bestehenden Datensätzen mit den im PROALP-Projekt erarbeiteten Datengrundlagen. In einem ersten Schritt werden die Daten zu den Permafrostphänomenen zu einer Synthesekarte zusammengeführt. In einem weiteren Schritt werden die Startpunkte der Gefahrenhinweiskarte Sturzprozesse des Amtes für Geologie und Baustoffprüfung ausgewählt, die in Permafrostbereichen liegen. Ausgehend von diesen potentiellen Sturzabbruchgebieten in Permafrostbereichen wurden die zugehörigen Sturztrajektorien berechnet. In einem weiteren Schritt wurden die Startpunkte für Murgangprozesse der Gefahrenhinweiskarte Murgang der Abteilung Wasserschutzbauten (Abteilung Wasserschutzbauten 2008) ausgewählt, die in Permafrostbereichen liegen. Ausgehend von diesen potentiellen Murganganrissbereichen wurden die zugehörigen Trajektorien selektiert. Ergebnisse dieses Vorgehens waren eine synthetische Karte der Permafrostareale, eine Gefahrenhinweiskarte für Sturzprozesse aus Permafrostgebieten und eine Gefahrenhinweiskarte für Murgangprozesse aus Permafrostgebieten. Diese Kartengrundlagen zeigen auf, in welchen Flächen Permafrost im Rahmen der Erstellung von Gefahrenzonenplänen berücksichtigt werden soll.

SYNTHETISCHE KARTE DER PERMAFROSTVERBREITUNG

Für die Abgrenzung der Permafrostgebiete wurden die folgenden Datensätze aus dem PROALP-Projekt verwendet:

- Inventar der perennierenden Schneeflecken aus den Orthofotokarten 1996
- Inventar der perennierenden Schneeflecken aus den Orthofotokarten 1999
- Inventar der perennierenden Schneeflecken aus den Orthofotokarten 2003
- Inventar der Blockgletscher
- Modellierung der potentiellen Permafrostverbreitung nach Stötter (1994)

Als erstes wurden die drei Inventare der Perennierenden Schneeflecken miteinander verschnitten. Dieser Verschnitt und die Perennierenden Schneeflecken aus den Jahren 1996 und 2003 wurden in einen Rasterdatensatz umgewandelt. Die Perennierenden Schneeflecken aus dem Jahr 1999 wurden

nur indirekt berücksichtigt, da die Orthofotokarten dieses Jahres im Ortlergebiet einen hohen Neuschneeanteil aufweisen. Aufgrund der Übereinstimmung mit den bestehenden Gefahrenhinweiskarten und der Karte der Permafrostverbreitung wurde für diesen Schritt das Digitale Geländemodell mit einer räumlichen Auflösung von 20m verwendet.

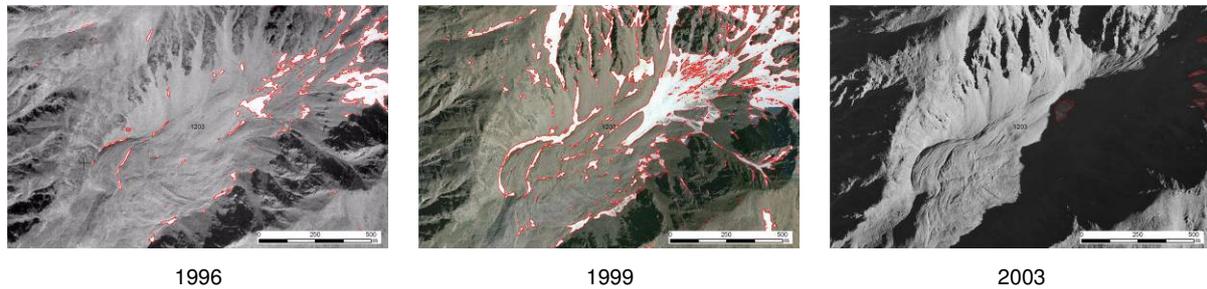


Fig. 3 Kartierung von perennierenden Schneeflecken aus den Orthofotokarten 1996, 1999, 2003. Beispiel aus dem Schnalstal.

Fig. 3 Mapping of perennial snow patches from orthoimages of the years 1996, 1999, 2003. Examples from Val Senales.

Die in dieser Weise kombinierten Inventare der Perennierenden Schneeflecken wurden mit dem Inventar der Blockgletscher und mit einer Permafrostmodellierung nach Haeberli (1975) und Stötter (2004) ergänzt. Von diesem Datensatz wurden die Gletscherflächen aus der Realnutzungskarte und aus dem Gletscherkataster des Hydrographischen Amtes abgezogen. Ergebnis dieser Kombination von verschiedenen Datengrundlagen ist eine synthetische Karte der Permafrostverbreitung. Sie gibt sowohl die potentiellen (Modellierung) als auch die evidenten Permafrostbereiche wieder.

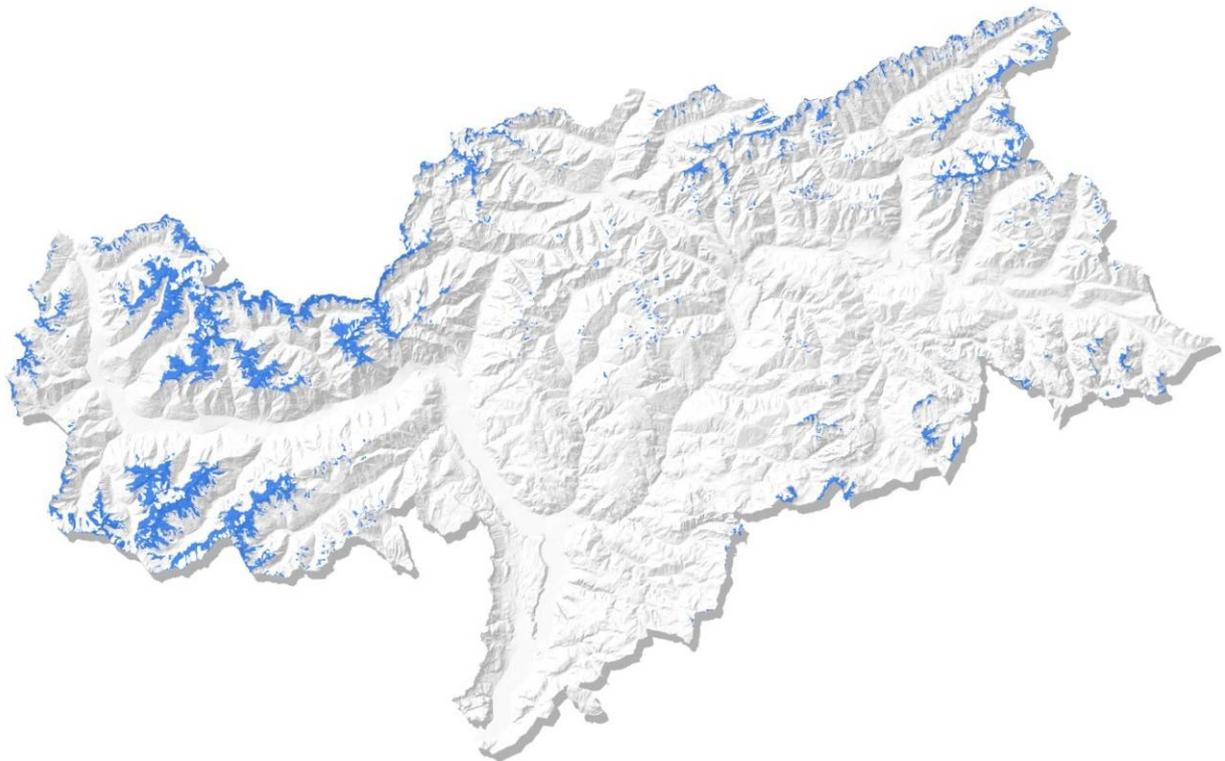


Fig. 4 Synthetische Karte der Permafrostverbreitung in Südtirol.

Fig. 4 Synthesis map of permafrost areas in South Tyrol.

GEFAHRENHINWEISKARTE STURZPROZESSE AUS PERMAFROSTGEBIETEN

Die bestehende Gefahrenhinweiskarte für Sturzprozesse des Amtes für Geologie und Baustoffprüfung liegt im Rasterformat vor. Deshalb können nicht die einzelnen Sturzbahnen von bestimmten Abbruchpunkten zurückverfolgt werden. Im Rahmen von PROALP wurden die Sturzabbruchpunkte der Gefahrenhinweiskarte extrahiert, die in Permafrostgebieten liegen. Ausgehend von diesen Sturzabbruchpunkten die Sturzbahnen in Vektorformat gerechnet. Für die Berechnung der Sturzbahn wurde das Trajektorienmodell D16 von Meissl (1998) mit einem random-walk Ansatz zur Berücksichtigung von mehreren möglichen Sturzbahnen je Abbruchgebiet implementiert (Zischg 2008). Für die Berechnung der Reichweite wurde der Pauschalgefälleansatz mit demselben Winkel angewandt, wie er für die Berechnung der Gefahrenhinweiskarte Sturzprozesse verwendet wurde (Amt für Geologie und Baustoffprüfung 2006). Anschließend wurden die zugehörigen Trajektorien selektiert und in einen Polygon-Datensatz umgewandelt. Die Gefahrenhinweiskarte Sturzprozesse aus Permafrostgebieten stellt einen Extrakt aus der bestehenden Gefahrenhinweiskarte für Sturzprozesse dar. Sie zeigt jene potentiellen Sturzbereiche auf, deren Abbruchgebiete in Permafrost liegen. Der resultierende Datensatz liegt in Form von Linien oder in Form von Polygonen vor.

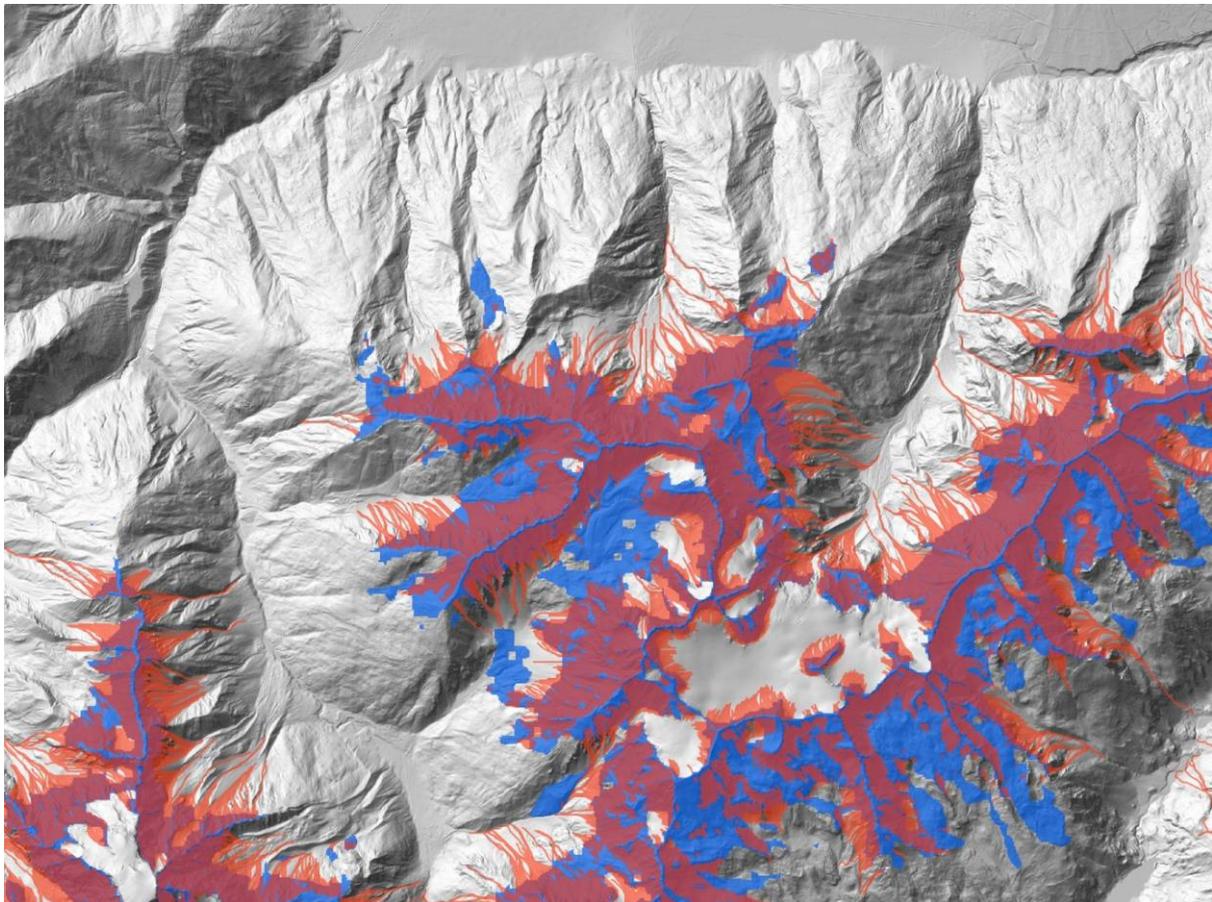


Fig. 5 Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für Sturzprozesse aus Permafrostgebieten im Bereich des Ortlesgebiets.

Fig. 5 Extract from the hazard index map for rockfall processes in permafrost areas. Example from the Ortles area.

GEFAHRENHINWEISKARTE MURGANGPROZESSE AUS PERMAFROSTGEBIETEN

Im Rahmen des Interreg IIIA-Projektes „Informationssystem Hydrogeologische Risiken“ (Italien-Schweiz) wurde eine GIS-basierte Gefahrenhinweiskarte für Murgänge nach der Methode von BUWAL (1998) für das gesamte Landesgebiet erstellt. Die Gefahrenhinweiskarte ermöglicht eine

generelle Charakterisierung von Wildbacheinzugsgebieten bezüglich der geomorphologischen und hydrogeologischen Prozesse. Die bestehenden Schutzbauten wurden dabei nicht berücksichtigt, sofern sie im digitalen Höhenmodell nicht abgebildet werden. Diese bestehende Gefahrenhinweiskarte wurde im Rahmen von PROALP folgendermaßen ausgewertet. In einem ersten Schritt wurden aus den Murgangtrajektorien die Startpunkte berechnet. Aus diesem Datensatz wurden jene Startpunkte ausgewählt, die in Permafrostgebieten liegen. Anschliessend wurden die zugehörigen Trajektorien selektiert und in einen Polygon-Datensatz umgewandelt. Die Gefahrenhinweiskarte Murgangprozesse aus Permafrostgebieten stellt einen Extrakt aus der bestehenden Gefahrenhinweiskarte für Murgangprozesse dar. Sie zeigt jene potentiellen Murgangbereiche auf, deren Anrissgebiete in Permafrost liegen. Der resultierende Datensatz liegt in Form von Linien oder in Form von Polygonen vor.

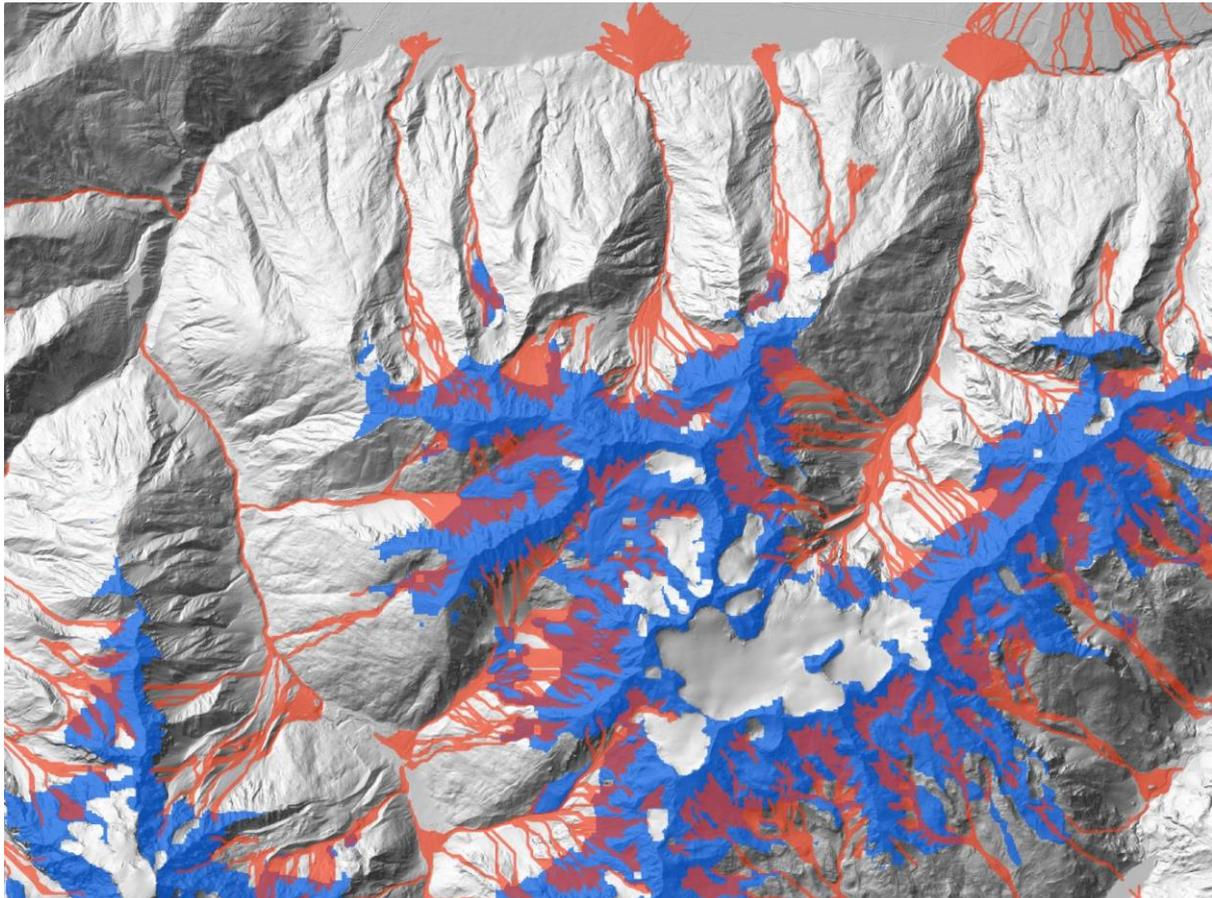


Fig. 6 Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte für Murgangprozesse aus Permafrostgebieten im Bereich des Ortlergebiets.

Fig. 6 Extract from the hazard index map for debris flows triggered in permafrost areas. Example from the Ortles area.

ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Kombination von verschiedenen Methoden für die flächendeckende Erhebung von Permafrostphänomenen erlaubte innerhalb kürzester Zeit eine verlässliche Datenbasis zur Verbreitung von Permafrostgebieten in Südtirol zu schaffen und Sturz- und Murgangprozesse aus diesen Gebieten zu erkennen und zu lokalisieren. Die Kartierung der Blockgletscher auf Basis des Laserscanning-Geländemodells in Kombination mit der detaillierten Auswertung der Orthofotokarten verschiedener Jahrgänge erlaubte eine flächendeckende und dennoch hochauflösende und detailgenaue Erhebung dieser Phänomene. Die satellitenbasierte Radarinterferometrie erlaubte die Beurteilung der Aktivität der Blockgletscher. Damit ist ein flächendeckender Datensatz zu den evidentesten

Permafrostbereichen entstanden. Die Kombination des Blockgletscherkatasters mit weiteren Phänomenen zur Permafrostverbreitung wie die Perennierenden Schneeflecken und mit einer Modellierung der Permafrostverbreitung erlaubte die Erstellung einer konsistenten Karte der Permafrostverbreitung. Die Synthesekarte zur Permafrostverbreitung stellt die potentiellen und evidenten Permafrostgebiete in Südtirol dar und erlaubt sowohl die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten von Naturgefahren aus Permafrostbereichen als auch weitere Überlagerungen wie beispielsweise mit Datensätzen zum Schadenpotenzial. Dabei konnten relevante Gefahrenbereiche erkannt werden, bzw. der Zusammenhang mit Permafrost in bekannten Gefahrenbereichen bestätigt werden (siehe Fig. 7).



Fig. 7 Murgangereignis am Grödnertalpass im Jahr 2003 mit Ausgangspunkt an einer Blockgletscherstirn.

Fig. 7 Debris flow event in 2003 at the Grödnertalpass road triggered at a rockglacier front.

Die Überlagerung der Gefahrenhinweiskarten zu Sturz- und Murgangprozessen aus Permafrostgebieten mit den Karten zum Schadenpotenzial erlaubte die Abschätzung der Bedeutung von Permafrost für das Naturgefahrenmanagement. In Südtirol sind ca. 438 km² oder ca. 6 % der Landesfläche von Permafrost betroffen.

- Ca. 20% der Wildbacheinzugsgebiete sind im Oberlauf von Permafrost beeinflusst.
- Ca. 1.4 % der Siedlungsfläche ist Murgangprozessen ausgesetzt, die von Permafrost beeinflusst sind.
- 973 Gebäude und ca. 4000 Personen sind von Murgängen aus Permafrostgebieten potentiell betroffen.
- 12 Gebäude und ca. 50 Personen sind von Sturzprozessen aus Permafrostgebieten potentiell betroffen.
- Ca. 2.5 km Strassenabschnitte sind von Sturzprozessen aus Permafrostgebieten potentiell betroffen.

Die satellitenbasierte Radarinterferometrie wurde erstmals grossflächig in operativen Aufgaben des Naturgefahrenmanagements angewandt. Diese Methode zeigt ein hohes Potential für weitere Anwendungen, sei es für die Erkennung und Kartierung von Hangbewegungen als auch für das Monitoring. Die wesentlichen Vorteile der Methode sind

- Nutzbarkeit von Archivdaten seit 1991, damit sind historische Bewegungsanalysen möglich,
- flächenhafte Messung in der Zusammenschau,
- erheblich reduzierte Geländetätigkeit, sie beschränkt sich auf Verifikationskampagnen,
- wetter- und tageslichtunabhängige Datenaufzeichnung,
- kontinuierliche Datenaufzeichnung für die laufende Beobachtung und Nachführung der Messungen.

Alle Ergebnisse und die Messreihen des PROALP Projektes sind in einer Datenbank gespeichert. Diese kann über GIS abgefragt werden und bildet eine wertvolle Grundlage für die Gefahrenzonenplanung in Südtirol. Die in Südtirol im Rahmen von PROALP durchgeführten Arbeiten und die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen erlauben dem Amt für Geologie und Baustoffprüfung, eine führende Rolle in der Thematik im gesamten Alpenraum zu übernehmen. Im Rahmen des Interreg Alpenraum Projekts „PermaNET – Permafrost monitoring network in the Alpine Space“ konnten die gewonnenen Erfahrungen den verantwortlichen Verwaltungen im gesamten Alpenraum weitergegeben werden.

LITERATUR

- Abteilung Wasserschutzbauten (2008). IHR - Informationssystem zu hydrogeologischen Risiken. Methodischer Endbericht. Bozen.
- Amt für Geologie und Baustoffprüfung (2006). Gefahrenhinweiskarte Sturzprozesse. Endbericht IHR. Bozen.
- Ausserer P. (2008). Die Blockgletscher im Hinteren Ultental. Diplomarbeit an der Universität Innsbruck.
- Bressan D. (2008). Aufbau und Dynamik aktiver Blockgletscher am Beispiel der Lazaunalm (Ötztaler Alpen/ Südtirol). Diplomarbeit an der Universität Innsbruck.
- BUWAL (1998). Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85 Naturgefahren. Bern.
- Baroni C., Carton A., Seppi R. (2004). Distribution and Behaviour of Rock Glaciers in the Adamello–Presanella Massif (Italian Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*; 15, 243-259.
- Bucher K. (2008). Kartierung der Blockgletscher in Südtirol. Projektbericht PROALP. Bozen.
- Burger K.C., Degenhardt J.J., Giardino J.R.(1999). Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology*, 31: 93-132.
- Carton A., Dramis, F., Smiraglia C. (1988). A first approach to the systematic study of the rock glaciers in the Italian Alps. *Proc. Fifth Intern. Conf. on Permafrost, Trondheim, 1988*, 712-717.
- Damm B., Langer M. (2006). Kartierung und Regionalisierung von Permafrostindikatoren im Rieserfernergebiet (Südtirol/Osttirol). - *Mitt. Österr. Geogr. Ges.* 148:295-314.
- Frauenfelder R. (1997). Permafrostuntersuchungen mit GIS. Unpublished Diploma Thesis.Zurich, Zurich.
- Guglielmin M., Smiraglia C. (1997). Rock Glacier Inventory of the Italian Alps. Italian Glaciological Committee Archive 3, Torino.
- Haeberli W. (1975). Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch. *VAW Mitteilungen*. Zürich.
- Imhof M. (1994). Die Verbreitung von Permafrost in den Berner Alpen.University of Bern, Bern.
- Juen I. (1999). Blockgletscheruntersuchungen im hinteren Ultental. Diplomarbeit an der Universität Innsbruck.
- Krainer K., Lang K. (2007). Active rock glaciers at Hohe Gaisl (Eastern Dolomites). *Geo.Alp*, 4, 127-131.
- Mair V., Zischg A., Krainer K., Stötter J., Zilger J., Belitz K., Schenk A., Damm B., Kleindienst H., Bucher K., Lang K., Tagnin S., Munari M. (2008). PROALP – Rilevamento e monitoraggio dei fenomeni permafrost. *Esperienze della Provincia di Bolzano. AINEVA*, 64: 50-59.
- Meissl G. (1998). Modellierung der Reichweite von Felsstürzen - Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. *Innsbrucker Geographische Studien*, 28.
- Mussner L. (2009). Die Geologie der Sella-Nordseite (Dolomiten - Südtirol) unter besonderer Berücksichtigung der Blockgletscher. Diplomarbeit. Innsbruck.
- Stötter J. (1994). Veränderungen der Kryosphäre in Vergangenheit und Zukunft sowie Folgeerscheinungen. Untersuchungen in ausgewählten Hochgebirgsräumen im Vinschgau (Südtirol). - Unveröffentlichte Habilitationsschrift an der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München.

- Zischg A. (2008). Schutzwald-Hinweiskarte Südtirol. Endbericht Projekt APB Schutzwald, Amt für Forstplanung, Bozen.
- Zilger J., Marks F., Mair V., Belitz K., Zischg A. (2006). PROALP - Kartierung und Überwachung von Permafrost-Phänomenen in den Alpen mit Hilfe Differentieller Radar-Interferometrie. In: Strobl J., Blaschke T., Griesebner G. (eds.). Angewandte Geoinformatik 2006. Beiträge zum 18. AGIT-Symposium Salzburg. Heidelberg, pp. 783-792.