PROALP

RILEVAMENTO E MONITORAGGIO DEI FENOMENI PERMAFROST

Esperienze della Provincia di Bolzano

V. Mair, K. Lang, S. Tagnin
Provincia Autonoma di Bolzano
Servizio Geologico
Volkmar.Mair@provinz.bz.it

A. Zischg
Abenis Alpinexpert srl
Bolzano, Italy
a.zischg@abenis.it

K. Krainer, J. Stötter
University of Innsbruck
Faculty of Geo- and Atmospheric Sciences
Austria

J. Zilger, K. Belitz, A. Schenk
Teledata Geoconsult srl
team@td-geoconsult.com
Italy

B. Damm
Catholic University of Eichstätt-Ingolstadt
Germany

H. Kleindienst, K. Bucher
Grid-IT GmbH
Innsbruck, Austria

M. Munari
Provincia Autonoma di Bolzano
Ufficio Idrografico
Michela.Munari@provinz.bz.it

Il permafrost è molto sensibile ai cambiamenti di clima.
Nel corso delle ultime estati su tutte le Alpi si sono osservati eventi di crollo e colate detritiche di crescente intensità e di maggiore frequenza. Nel 2005, gli enti responsabili della gestione dei rischi naturali della Provincia Autonoma di Bolzano hanno avviato un progetto che mira a monitorare l'impatto delle mutazioni ambientali sulle aree di montagna interessate dal permafrost in modo da mettere a punto una database di informazioni per la valutazione dei rischi naturali legati alle zone interessate dal permafrost. Nell'ambito di questo progetto, si sono combinati diversi metodi di rilevamento e mappatura del permafrost. Per l'intero territorio è stato creato un inventario dei rockglacier sulla base delle informazioni provenienti da ortofoto, stereo coppie di foto aeree e DEM da scanner laser. Si sono utilizzate analisi multi- temporali per ottenere dalle ortofoto un inventario delle macchie di neve perenne e per definire un inventario dei movimenti superficiali nelle aree di montagna interessate dal permafrost per mezzo dell'interferometria SAR (DiffSAR,) utilizzando dati via satellite da banda C e L a partire dal 1993 fino al 2007. Oltre alle investigazioni su scala regionale, sono state realizzate dettagliate misurazioni geofisiche, idrologiche (temperatura acqua, conduttività elettrica, scarica), geochimiche e morfologiche in cinque siti campione specifici. Presso uno di questi siti, sono state ripetute su base annua le misurazioni della temperatura alla base del manto nevoso invernale BTS , che erano state avviate nel 1994. Su specifici rockglacier, le misurazioni georadar hanno fornito informazioni sulla struttura interna e lo spessore dei rockglacier attivi. Le velocità di movimento della superficie dei rockglacier sono state misurate utilizzando la tecnologia GPS differenziale.
I risultati dei rilievi terrestri dettagliati sono stati messi a confronto con i risultati delle misurazioni dei movimenti superficiali mediante rilievi DiffSAR.
Combinando i rilievi dettagliati su scala locale con i metodi di mappatura su scala regionale è stato possibile ottenere una cross-validation dei vari approcci e, in un ulteriore stadio, un'estrapolazione delle caratteristiche geomorfologiche dei diversi siti campione all'intera regione. Grazie ai metodi multi-temporali è stato possibile creare una base per studiare le caratteristiche degli sviluppi nelle zone di permafrost a causa della mutazione delle condizioni ambientali, per es. per i movimenti superficiali a partire dalla metà degli anni '90. Le serie di dati forniscono una preziosa base per il processo di decision-making nella gestione del rischio relativamente ai processi collegati ai fenomeni di permafrost.

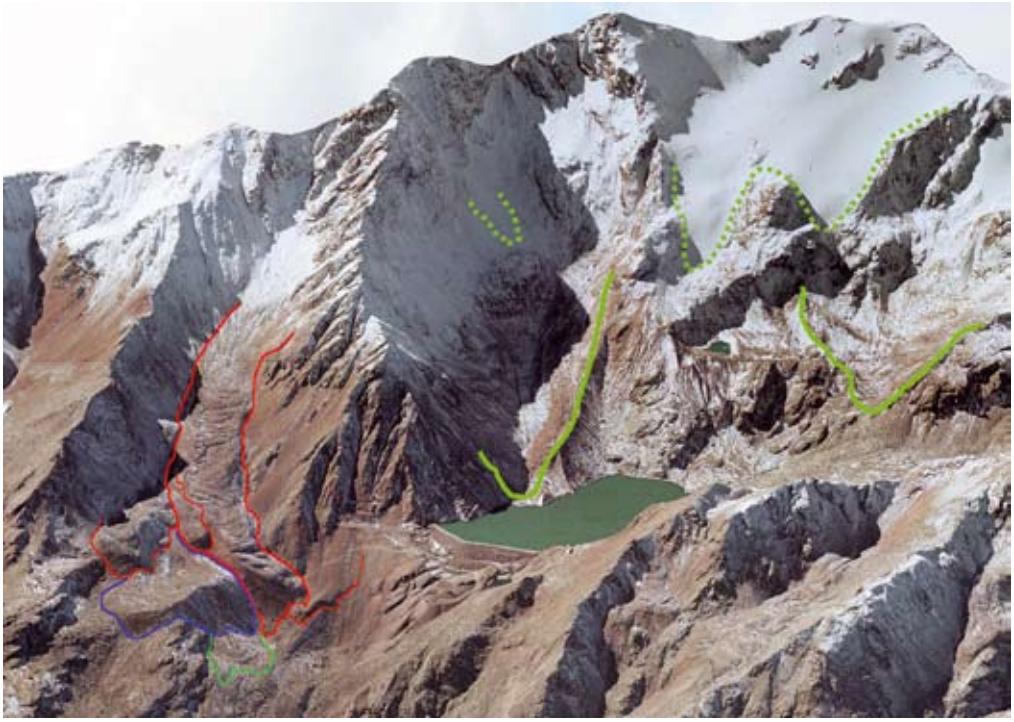


Fig. 1 - Ortofoto del rockglacier e del ghiacciaio della Cima Sternai, area campione 1, presso il Lago verde, alta Val d'Ultimo. Le linee rosse contornano le parti attive del rockglacier, quelle blu le parti quescenti; le linee verdi indicano la massima espansione dei ghiacciai durante la piccola età glaciale (1870 ca.) mentre le linee verdi tratteggiate indicano lo stato del ghiacciaio nel 2006.

Fig. 2 - Localizzazione delle aree campione.

Fig. 3

Aree campione per le indagini sul permafrost nella Provincia di Bolzano

Sito ID	Denominazione	coordinate UTM	persone responsabili
1	Val d'Ultimo, Weissbrunn, Rossbänk, comune di Ultimo, rockglacier	32T/E638000/N5148000	K. Krainer, P. Ausserer
2	Val Senales, Alpe Lazaun, comune di Senales, rockglacier	32T/E634000/N5178500	K. Krainer, D. Bressan
3	Val Gardena, Masores de Murfreit, Passo Gardena, comune di Selva Gardena, rockglacier	32T/E715250/N5157000	K. Krainer, L. Mussner
4	Croda Rossa, Cadin del Ghacciaio, Cadin di Croda Rossa, Comune di Braies, 2 rockglacier	32T/E740800/N5170300	K. Krainer, K. Lang
5	Valle dei DOssi, Napfen, comune di Campo Tures, rockglacier	32T/E738000/N5206000	B. Damm
6	Val di Solda, Madriccio, comune di Stelvio, area sciistica	32T/E624000/N5150000	A. Zischg
7	Val di Solda, Steinernes Meer, comune di Stevio, rockglacier	32T/E623270/N5157400	A. Zischg

INTRODUZIONE

Vari studi scientifici hanno rilevato gli effetti dell'aumento delle temperature medie sulle zone d'alta montagna nell'Arco Alpino. Una delle conseguenze più palesi è il ritiro dei ghiacciai. Questo fenomeno può lasciare scoperte ampie zone di detrito destabilizzato e mobilizzabile in caso di eventi estremi di precipitazione.

Un'altra conseguenza dei cambiamenti climatici, meno evidente, ma assai rilevante per la destabilizzazione dei versanti, è lo scioglimento del permafrost (Fig. 1). Il significativo aumento delle temperature medie potrebbe modificare notevolmente il bilancio di gelo e disgelo causando così frane, crolli e smottamenti potenzialmente dannosi per la vita umana, i beni e le infrastrutture.

Recentemente, infatti, sull'Arco Alpino sono stati documentati alcuni eventi di crollo e colate detritiche che hanno avuto origine da aree interessate dal permafrost.

La Provincia di Bolzano ha avviato il progetto "PROALP – Rilevamento e monitoraggio dei fenomeni di permafrost" per approfondire le conoscenze sugli effetti dei cambiamenti climatici e per identificare e delimitare le aree in cui lo scioglimento del permafrost potrebbe accentuare il rischio naturale. Il progetto è coordinato dall'Ufficio di Geologia e Prove Materiale e dall'Ufficio Idrografico e si pone come obiettivo principale lo sviluppo e l'applicazione di metodi di rilevamento dei fenomeni legati al permafrost (principalmente rockglacier ed aree di neve perenne), nelle zone di alta montagna. Altro obiettivo del progetto è lo sviluppo e l'applicazione di un sistema di monitoraggio di tali fenomeni basato su dati provenienti da metodi differenti. Infine il progetto si propone di gettare le basi per l'impiego di questi risultati nell'elaborazione dei piani di pericolo e di rischio idrogeologico.

METODOLOGIA

Per delimitare le aree di permafrost è necessario studiare i fenomeni geomorfologici che le caratterizzano come ad esempio i rockglacier, le macchie di neve

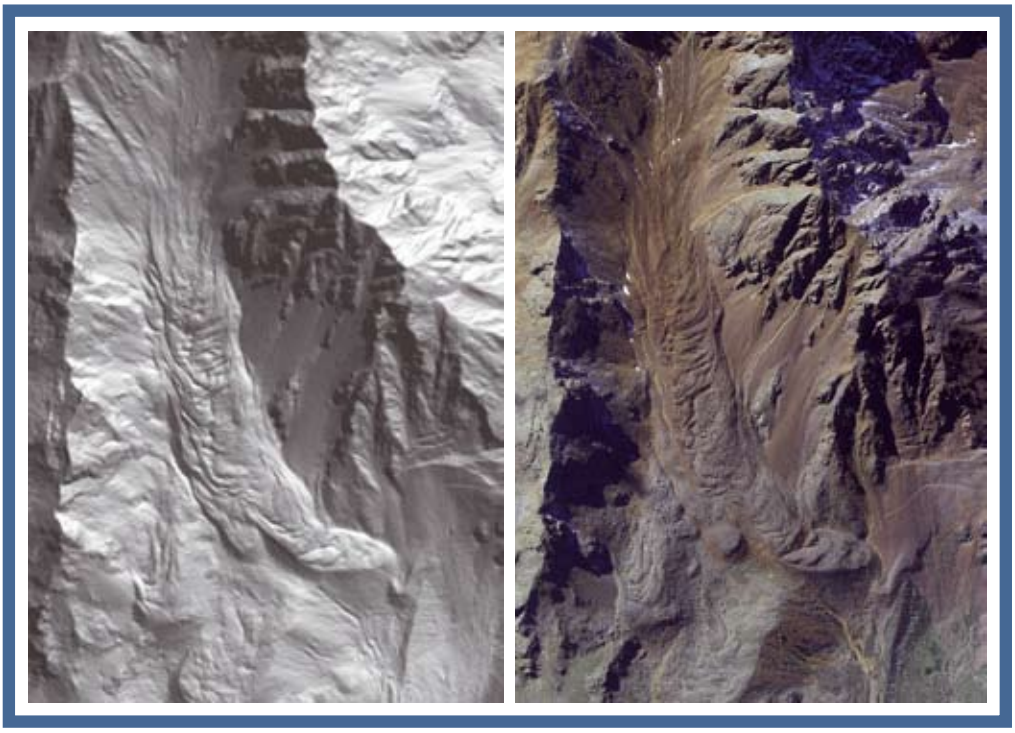
perenne, la mancanza di vegetazione, la temperatura del suolo e delle sorgenti, le forme geologiche relative ai processi periglaciali ed i movimenti superficiali ad esse connessi. Per questo studio il progetto PROALP si propone di combinare metodi di telerilevamento e misurazioni in sito e di confrontare i risultati derivanti.

I rockglacier sono stati delimitati, sul territorio provinciale, con il Lidar-DEM e le ortofoto. Tali dati sono stati completati con quelli derivanti dai rilevamenti di campagna effettuati per la cartografia geologica (progetto CARG). Dalle ortofoto di diverse annate sono state identificate le macchie di neve perenne. Tramite l'interferometria satellitare DiffSAR, infine, sono state identificate e delimitate tutte le aree (di permafrost) che presentano movimenti superficiali. I dati raccolti con questi metodi di telerilevamento sono stati verificati a scala locale su aree campione distribuite sul territorio provinciale e scelte secondo criteri ben definiti (Fig. 2 e tabella di Fig. 3).

Nelle stesse aree campione sono state effettuate misure dei movimenti superficiali e in alcuni siti è stato eseguito un rilevamento della geomorfodinamica recente con metodi geodetici terrestri (tacheometria) e DGPS; sono state inoltre misurate le variazioni della temperatura del suolo e la temperatura alla base del manto nevoso invernale. Le strutture interne ai rockglacier sono state studiate con scansioni georadar.

Una banca dati territoriale (GIS) e multitemporale raccoglie tutti i risultati e permette di integrare, analizzare e confrontare i dati di telerilevemento con le misurazioni terrestri. Dalle elaborazioni delle misure si ottiene un inventario dei fenomeni di permafrost su scala regionale che sarà reso disponibile in internet.

Inoltre nelle aree campione il sistema permette di tracciare direttamente l'evoluzione dei fenomeni di permafrost su scala locale. Tale strumento è adattabile alle esigenze di diversi utenti finali (enti provinciali, statali ed altri). Una volta provata l'efficacia e l'affidabilità del sistema, ne sarà testata l'operatività a lungo termine.



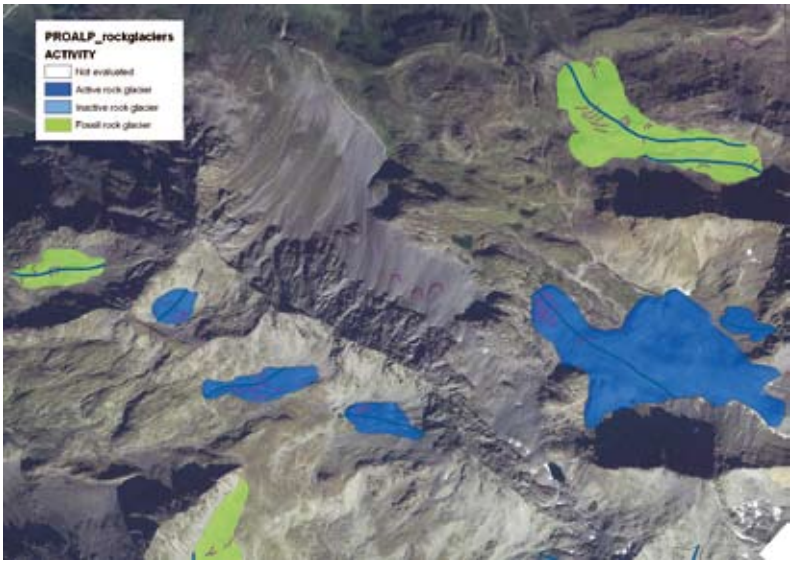


Fig. 4 - Confronto tra ortofoto e modello digitale del terreno ad alta risoluzione del rockglacier della Val d'Ultimo area campione 1 "Rossbänk". Il Lidar-DEM evidenzia tutte le peculiarità del rockglacier che possono essere cartografate con la massima precisione.

Fig. 5 - Rappresentazione cartografica del catasto dei rockglacier con la distinzione dello stato di attività.

ACQUISIZIONE DATI

Individuazione, delimitazione e creazione di un inventario dei rockglacier tramite Lidar-DEM e ortofoto

I rockglacier sono stati cartografati sulla base delle ortofoto e del hillshade ricavato dal modello digitale del terreno ad alta risoluzione (Lidar-DEM; Fig. 4) e raccolti in un inventario dall'Istituto di Geografia dell'Università di Innsbruck in collaborazione con Grid-IT GmbH e Abenis Alpinexpert srl.

La struttura ed il contenuto dell'inventario sono stati sviluppati prendendo spunto dalle banche dati già in uso presso l'Ufficio geologia e prove materiali o pubblicati (IFFI Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, CARG Carta Geologica d'Italia, Burger 1999, Imhof 2000, Frauenfelder 1997, Baroni et. al 2004, Guglielmin & Smiragla 1997). Una condizione fondamentale a cui l'inventario deve rispondere è la compatibilità con sistemi esistenti e la possibilità di essere esteso ai rockglaciers dell'intero Arco Alpino (Fig. 5 e tabella di Fig. 6).

Identificazione e delimitazione delle aree interessate da movimenti superficiali tramite DiffSAR

L'interferometria differenziale radar da satellite (DiffSAR) è un metodo speditivo

Fig. 6

Modello dati dell'inventario rockglacier

Column Name	Data Format	Values / units	Description
RG_ID (primary Key)	Auto Value (unique)		Consecutive numbering of all rockglaciers
RG_ID_COMP	Long Integer		Consecutive numbering of complex rockglaciers
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 (<1 m)	grain size of the rockglaciers material
activity	Char (25)	0-nn 1-active 2-inactive 3-relict 4-active and in active	rockglaciers 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 rockglaciers
source	Char (100)		citation of existing rockglaciers mapping
editor	Char (100)		name of editor
locName	Char (100)		local name of the rockglaciers site
altitude	Double	[m]	min. altitude of the rockglaciers 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 rockglacier's central flow line
genesis	Integer	0-nn 1-debris-covered glacer 2-ice-cored rockglacier 3-ice-cemented rockglacier	type of rock-glacier genesis
surfrel	Char (50)	0-nn 1-very well developed 2-sudued 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 (length<=width)	description of rockglacier shape
interstr	Char (50)	0-nn 1-interstitial ice 2-massive ice	internal structure
width	Double	[m]	max. width of rockglacier
length	Double	[m]	max. length of rockglacier part
length complex	Double	[m]	max. length of whole rockglacier
notes	Char (250)		description and observations by the editor

e affidabile per individuare e delimitare movimenti superficiali del terreno. Il suo utilizzo è indicato su terreni non coperti da vegetazione, è quindi vantaggioso nelle aree di alta montagna al di sopra di 2.000 m s.l.m.. Il suo impiego però è condizionato da fattori quali l'acclività, l'esposizione dei versanti e l'orbita, la velocità di rotazione e la configurazione del satellite.

Per ovviare a questi limiti si è proceduto ad un'accurata scelta dei parametri e dei tempi d'acquisizione (Mair et al. 2006, Zilger et al. 2006), tenendo conto della configurazione satellitare (ERS1, ERS2, JERS, ENVISAT, ALOS-PALSAR).

Prima di estendere le analisi a tutto il territorio provinciale sono stati eseguiti alcuni test su aree campione (Fig. 2 e 3).

L'elaborazione dei dati a microonde è stata effettuata da Teledata GeoConsult GmbH-srl con il software di GAMMA AG (CH), adattato alle esigenze specifiche del progetto.

Identificazione e delimitazione delle macchie di neve perenne dalle ortofoto

Le macchie di neve perenne, altro indicatore del permafrost, sono state cartografate dalle ortofoto degli anni 1996, 1999 e 2003. Sono stati ottenuti tre set di dati ognuno relativo ad un'annata delle ortofoto; questi dati mostrano l'evoluzione nel tempo delle superfici innevate (Fig. 7).

Rilievi sul campo e indagini geofisiche

In sette siti campione distribuiti sul territorio provinciale (Fig. 2 e 3) sono stati eseguiti i seguenti rilevamenti di dettaglio sul terreno: rilievi geomorfologici e sedimentologici, rilevamenti della geomorfodinamica recente con metodi geodetici terrestri (tacheometria, Fig. 8), misure puntuali delle temperature della superficie del suolo, degli strati più profondi del suolo e del manto nevoso durante l'inverno (Fig. 9). In alcuni siti sono state eseguite anche misure idrologiche, con idrometri e misurazioni puntuali, per determinare il deflusso delle acque dai rockglacier. Inoltre è stata misurata periodicamente la conduttività elettrica

delle acque e sono state eseguite analisi chimiche.

Tra il 2006 e il 2008 è stata misurata la velocità di movimento della superficie dei rockglacier tramite DGPS e interferometria differenziale (Fig. 10 e Fig. 11).

La struttura interna dei rockglacier è stata analizzata con misure georadar (GSS SIR System 2000, multiple low frequency antenna; center frequency 35 MHz, constant antenna spacing in point mode; Fig 12).

RISULTATI E CONCLUSIONI

Il progetto ha portato alla localizzazione degli indicatori di permafrost (rockglacier e le macchie di neve perenne) sull'intero territorio provinciale. Questi dati costituiscono l'inventario PROALP dei fenomeni di permafrost e sono stati implementati nel sistema informativo provinciale. In Figura 5 e in Figura 7 vengono riportati rispettivamente un estratto del catasto dei rockglacier e delle carte delle macchie di neve perenne.

L'interferometria differenziale dai dati radar sia nella banda C (satellite ERS ed Envisat) che nella banda L (satellite JERS ed ALOS-PALSAR) da buoni risultati. I primi rilievi DiffSAR sulle aree campione danno risultati significativi, sebbene solo semiquantitativi, sul movimento superficiale dei rockglacier.

Sovrapponendo i risultati ottenuti dall'interferometria radar DiffSAR al catasto dei rockglaciers si ottengono informazioni sull'eventuale attività (= movimenti) del fenomeno. L'approccio multi-temporale permette inoltre di monitorare l'evoluzione dei fenomeni studiati.

L'ordine di grandezza dei movimenti ricavati dall'interferometria corrisponde con quanto misurato con la tacheometria in sito; l'affidabilità e la congruenza del telerilevamento con le analisi in campagna è quindi provata.

Le misurazioni tacheometriche e GPS dei movimenti superficiali dei rockglacier hanno restituito risultati interessanti: il rockglacier Croda Rossa si muove con una velocità massima orizzontale di 23 cm/anno (Fig. 8), il rockglacier Lazaun con

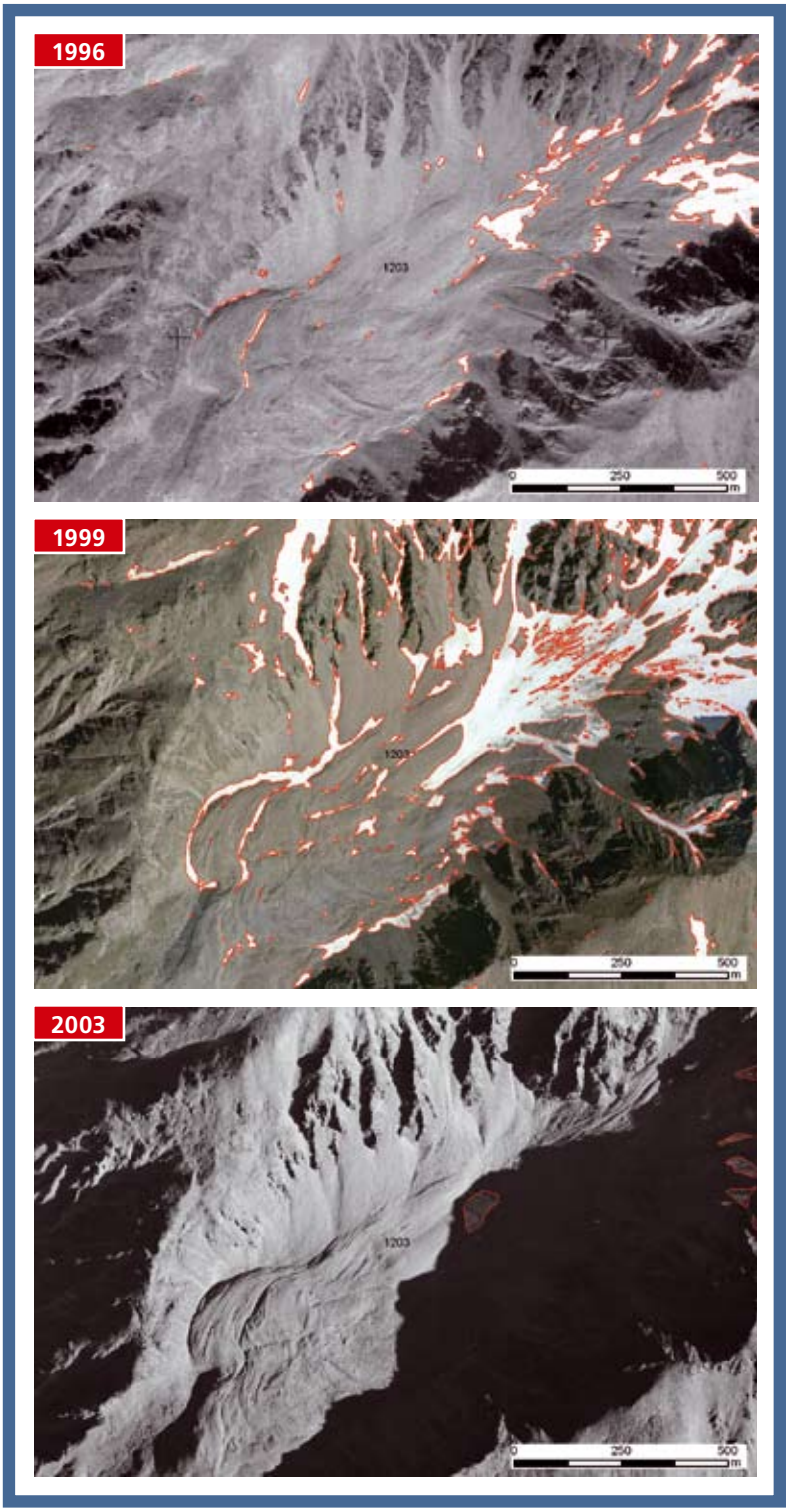


Fig. 7 - Delimitazione delle macchie di neve perenne della stessa area in diverse annate (riprese in autunno). Si può notare che alcune macchie di neve perenne persistono negli anni a differenza di altre.

Infrastrutture per il turismo invernale colpite dai fenomeni di disgelo del permafrost.

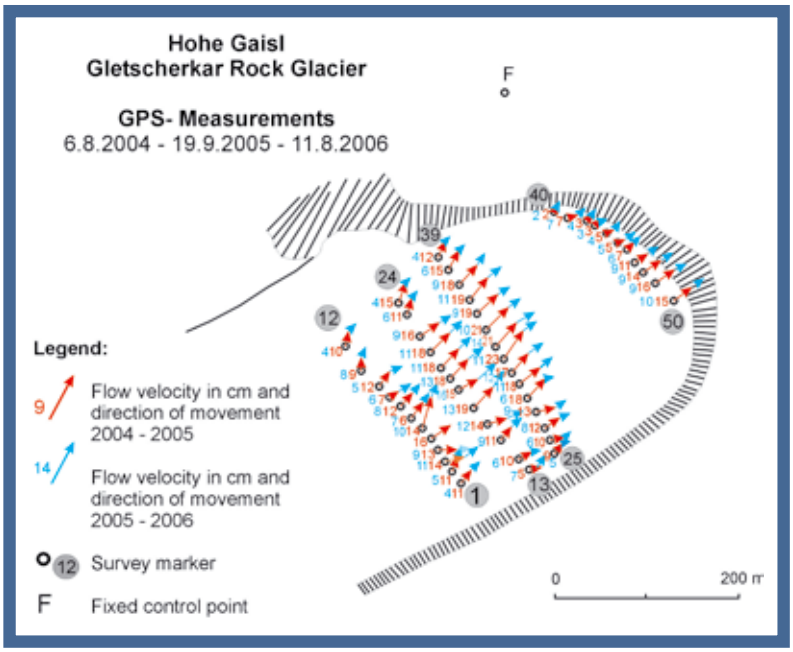


Fig. 8 - Misure GPS del movimento superficiale del rockglacier; area campione 4, Cadin di Croda Rossa, comune di Braies. La direzione delle frecce indica la direzione di movimento, il numero accanto alle frecce lo spostamento in centimetri; i colori delle frecce si riferiscono al periodo di misura; F è il punto fisso di riferimento (stazione tacheometrica).

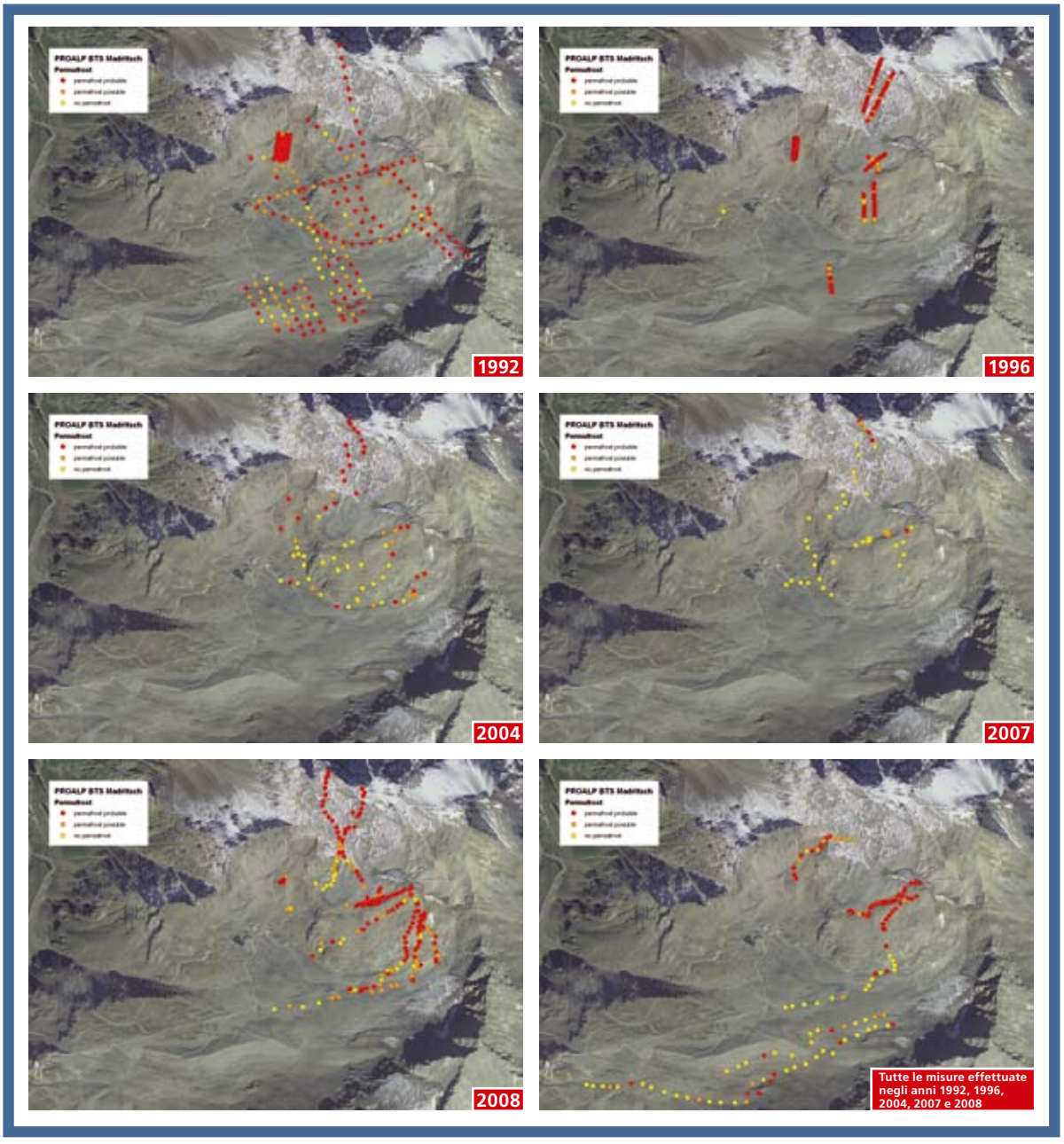
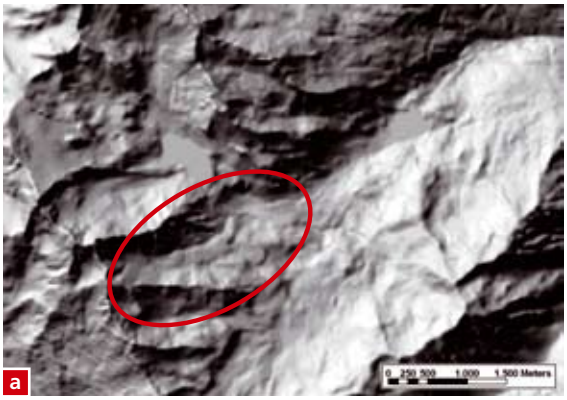
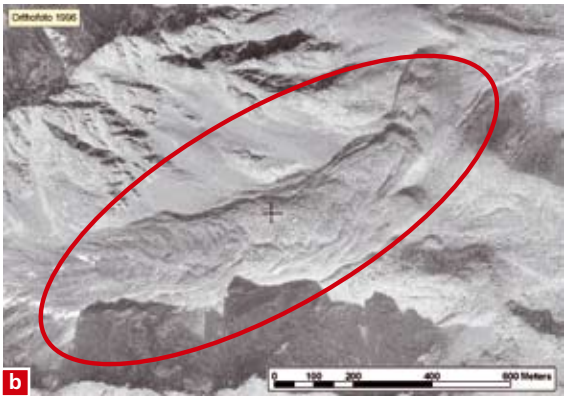


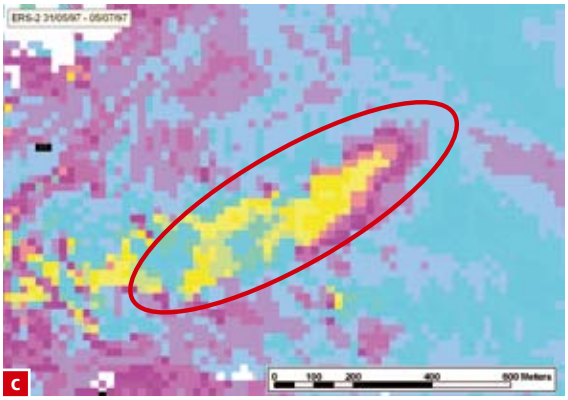
Fig. 9 - Misurazioni della temperatura alla base del manto nevoso (BTS), area campione 6 "Madriccio" in Val Solda.



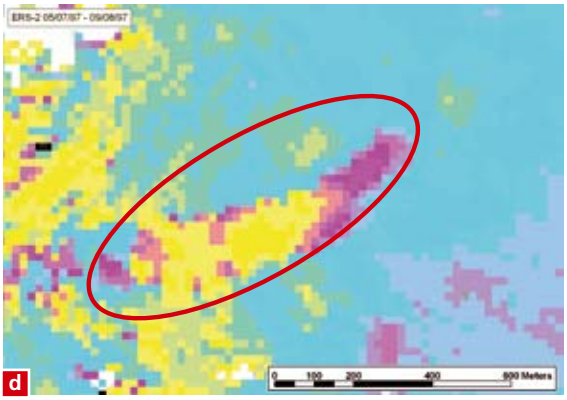
DEM Val d'Ultimo. Cartografia di base: Provincia di Bolzano.



Fotografia aerea. Val d'Ultimo. Cartografia di base: Provincia di Bolzano.



ERS-2, periodo: 31/5/97 – 5/7/97 (35 giorni) d) ERS-2, periodo: 5/7/97 – 9/8/97 (35 giorni)



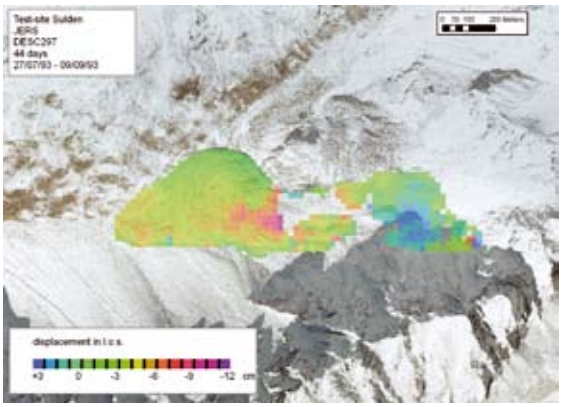
ERS-2, periodo: 5/7/97 - 9/8/97 (35 giorni)

Fig. 10 - DEM a 20 m (a), ortofoto (b) e interferogrammi (c-d) dell'area campione 1 "Rossbänk", Val d'Ultimo, Provincia di Bolzano. I due interferogrammi sono stati ottenuti dal confronto di due scatti fatti a distanza di 35 giorni (periodo del satellite). I colori rivelano la misura della differenza di fase sullo stesso pixel (35X35 m) e indicano dunque un movimento superficiale.

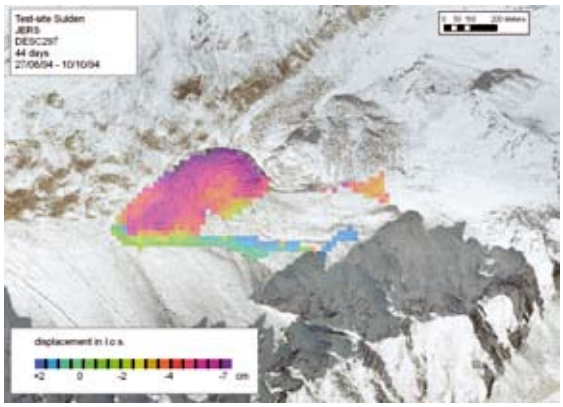
Sotto, misurazioni georadar, area campione 2 "Lazaun".

Fig. 11: Estratto dall'inventario delle aree soggette a movimenti superficiali, area campione 7 "Steinernes Meer", alta Val Solda.

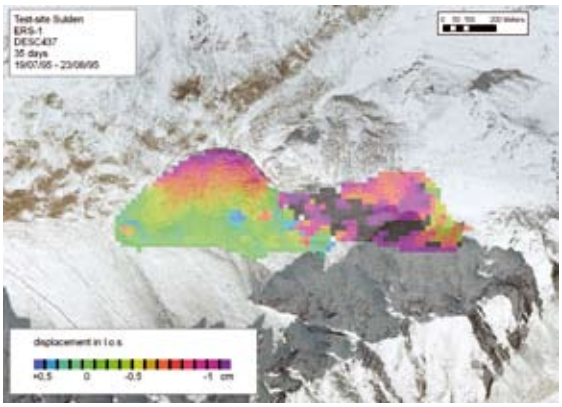
Ortofoto con delimitazione del rockglacier (Val Solda)



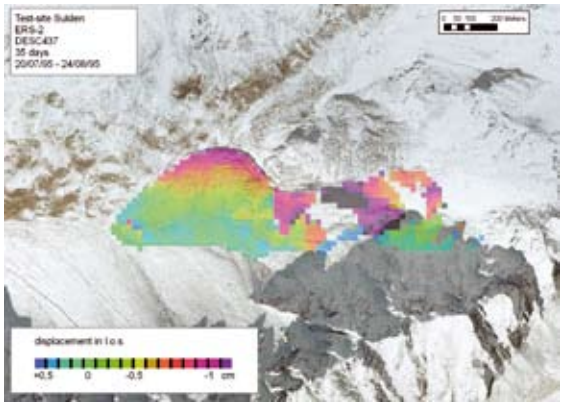
JERS: Movimenti registrati Luglio - Settembre 1993



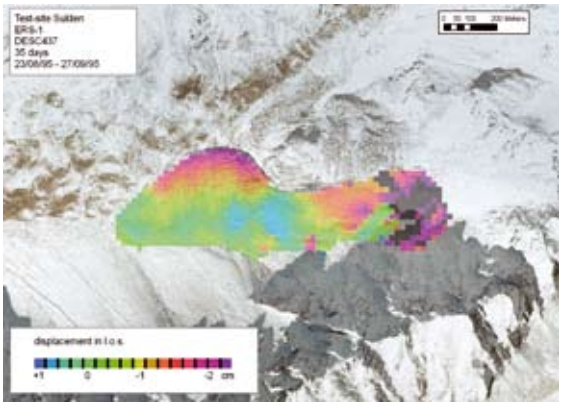
JERS: Movimenti registrati Agosto - Ottobre 1994



ERS-1: Movimenti registrati Luglio - Agosto 1995



ERS-2: Movimenti registrati Luglio - Agosto 1995



ERS-1: Movimenti registrati Agosto - Settembre 1995

Rockglacier Croda Rossa, area campione 4.

una velocità di 77 cm/anno, il rockglacier Murfreit con una velocitá di 30 cm/anno e il rockglacier Rossbänk con una velocitá di 41 cm/anno. I movimenti verticali si aggirano su valori massimi di -64 cm/anno (Rossbänk).

In figura 9 vengono presentate le misure della temperatura alla base del manto nevoso (BTS); si noti che le variazioni della temperatura nello spazio rispecchiano i cambiamenti topografici.

I rilievi geologici e geofisici eseguiti sulle aree campione hanno dato informazioni sulla struttura interna e sullo spessore dei rockglacier (Fig. 12). Lo spessore

del rockglacier "Croda Rossa" arriva al massimo a 25 m, il rockglacier "Lazaun" supera i 30 m e il rockglacier "Rossbänk" supera i 60 m.

L'inventario contiene, infine, informazioni di base su vasta scala che potranno essere utilizzate in futuro per investigazioni di dettaglio e per monitoraggi a lungo termine.

Le metodologie descritte saranno applicate ed approfondite in tutto l'arco alpino nell'ambito del progetto "PermaNET – Long-term Permafrost Monitoring Network" (programma comunitario Interreg IVB Spazio Alpino).

Nella Provincia di Bolzano sono state individuate alcune zone in cui il fenomeno di disgelo influisce sui processi di crollo e sul deflusso dei torrenti mettendo quindi a rischio tratti di strada sui passi ed infrastrutture per il turismo invernale.

È dunque evidente che questo tipo di fenomeno non può essere trascurato nella gestione del rischio in zone di alta montagna.

Ci si aspetta, infatti, che all'aumento delle temperature medie corrisponda un incremento dell'attività dei processi legati allo scioglimento del permafrost.

L'inventario, offrendo la possibilità di combinare i diversi indicatori e i diversi dati sul permafrost nel GIS, darà modo di individuare le zone critiche e permetterà di analizzare i dati necessari per elaborare i piani del pericolo idrogeologico e del rischio specifico, dai quali potranno essere poi decise le misure di salvaguardia come le opere di mitigazione e i piani di protezione civile.

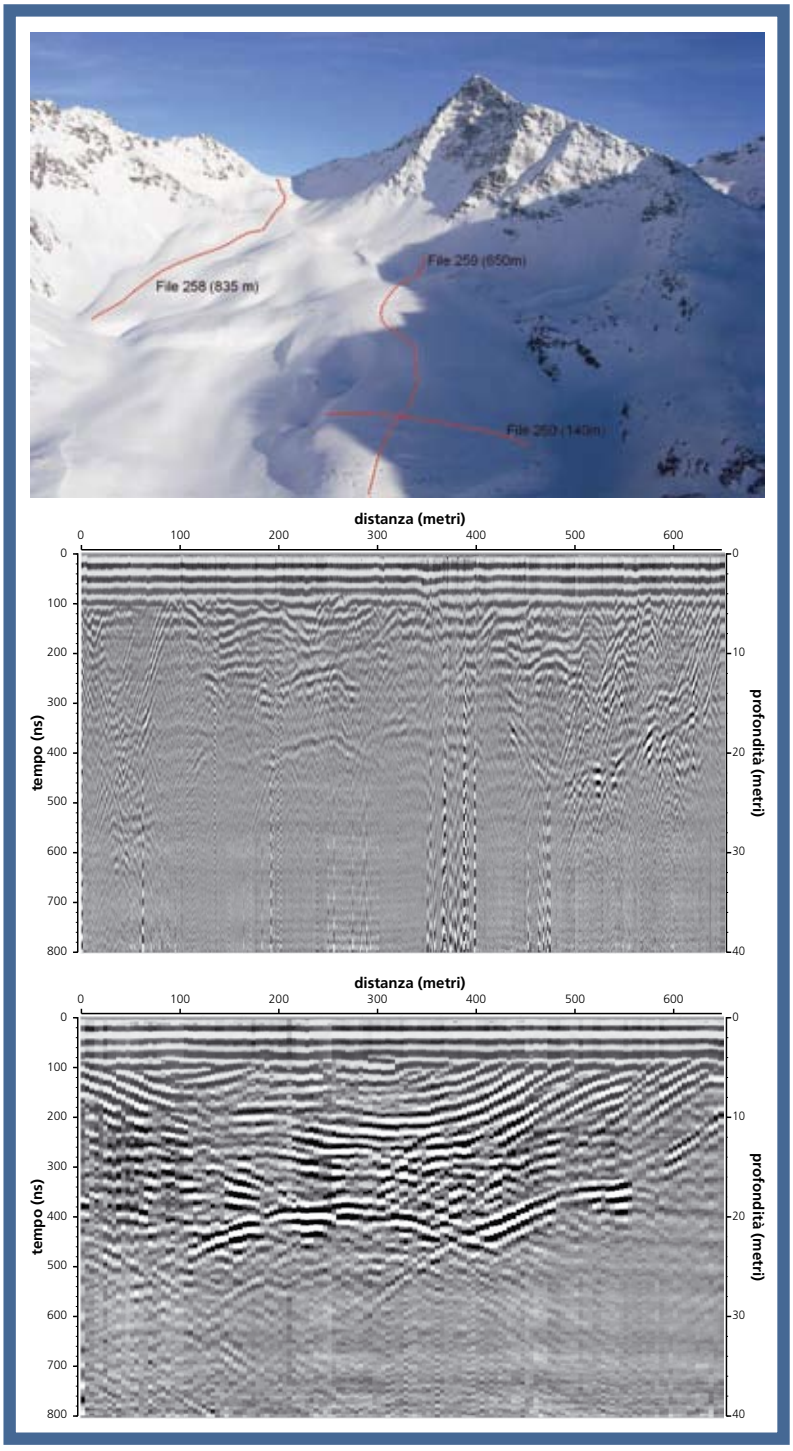


Fig. 12 - Strutture interne ai rockglaciers, immagine georadar, area campione 5 "Napfen", Valle di Riva.

Bibliografia

- Baroni, C.; Carton, A., Seppi, R. (2004): Distribution and Behaviour of Rockglaciers in the Adamello–Presanella Massif (Italian Alps). Permafrost and Periglacial Processes; 15, 243-259.
- Belitz, K., Mair, V., Marks, F., Zilger, J., Zischg, A., (2006): Mapping and Monioring of Permafrost phenomena using Differential Interferometry: First results from test-sites in South Tyrol, Italy. Geophysical Research Abstracts, 8.
- Burger, K. C.; Degenhardt, J. J., Giardino, J. R. (1999): Engineering geomorphology of rockglaciers. Geomorphology, 31, 93-132.
- Frauenfelder, R. (1997): Permafrostuntersuchungen mit GIS. Unpublished Diploma Thesis. University of Zurich.
- Guglielmin, M. Smiraglia, C. (1998): The Rockglaciers Inventory of the Italian Alps. Proceedings 7th International Permafrost Conference, Yellowknife, 375-382.
- Imhof, M.; Pierrehumbert, G.; Haeberli, W., Kienholz, H. (2000): Permafrost Investigation in the Schilthorn Massif\ Bernese Alps\ Switzerland.
Permafrost and Periglacial Processes; 11, 189-206.
- Krainer, K.; Lang, K. (2007): Active rockglaciers at Hohe Gaisl (Eastern Dolomites). Geo.Alp, 4, 127-131.
- Mair, V., Marks, F., Zilger, J., and Zischg, A. (2006): Rilevamento e monitoraggio dei fenomeni permafrost sulla base di interferometria differenziale. Proceedings ASITA 2006.
- Mair, V., Zischg, A., Stötter, J., Krainer, K., Zilger, J., Belitz, K., Schenk, A., Damm, B., Bucher, K. (2008): PROALP - Mapping and monitoring of permafrost phenomena in the Autonomous Province of Bolzano, Italy. Geophysical Research Abstracts, 10.
- 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: J. Strobl, T. Blaschke, and G.
- Griesebner (eds.): Angewandte Geoinformatik 2006. Beiträge zum 18. AGIT-Symposium Salzburg. Heidelberg,783-792.