

## 11<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA – 6-9 novembre 2007, Torino

### **Analisi della pericolosità geomorfologica dei bacini glaciali del versante destro della Val Ferret, massiccio del M. Bianco**

Luca DELLE PIANE, Dario FONTAN, Davide MARCHISIO

SEA Consulting Srl, Via Cernaia 27, 10121 Torino-Italy – [www.seaconsult.eu](http://www.seaconsult.eu)

#### **Riassunto**

L'attuale situazione di riscaldamento climatico e di incremento della temperatura media annua dell'aria (MAAT) si ripercuote sensibilmente sull'ambiente glaciale di alta montagna, determinando un aumento del rischio geomorfologico nei bacini glacializzati. I principali fattori di rischio sono riferibili a crolli di masse di ghiaccio, improvviso svuotamento di sacche d'acqua, fenomeni di instabilità dei versanti indotti dal ritiro dei ghiacciai o dall'innalzamento della quota del *permafrost*.

Uno studio realizzato sul versante destro della Val Ferret italiana, massiccio del Monte Bianco, ha integrato rilievi di terreno, fotointerpretazione e analisi di immagini satellitari multispettrali e multitemporali a media risoluzione (ASTER e ETM+). La valutazione della pericolosità relativa ai diversi fenomeni è stata ricavata con metodi semiquantitativi in ambiente GIS 2,5D. Il presente contributo illustra la metodologia seguita e i risultati ottenuti, rappresentati da una serie di mappe di sintesi della pericolosità geomorfologica, oltre ad alcune brevi considerazioni sull'utilizzo delle tecniche di telerilevamento in ambito professionale.

#### **Abstract**

The present phase of climatic warming, with a progressive rise of the mean annual air temperature (MAAT), affects significantly the high mountain glacial environment, causing an increase of the geomorphological hazard in glacial basins. The main hazard factors are represented by the detachment of ice masses, the sudden outburst of water reservoirs and to instability processes triggered by the glaciers retreat or by the permafrost altitude rising.

A study was carried out on the Italian Val Ferret, Mont Blanc massif, by merging field surveys and remote sensing including photo interpretation and satellite imagery analysis on medium-resolution multispectral and multitemporal images (ASTER and ETM+ sensors). The evaluation of risk related to the different typologies of instability has been obtained by means of semiquantitative methods in a 2,5D GIS environment. This contribution presents the adopted methodology and the results of the study, represented by synthetic geomorphological risk maps, and some simple remarks on the use of remote sensing techniques among professional consulting companies.

#### **Introduzione**

I bacini glaciali sono particolarmente sensibili alle variazioni climatiche, che hanno un'influenza determinante sui processi geomorfologici caratteristici dell'ambiente di alta quota (Zemp et al. 2006). Il processo di riscaldamento in corso rende di grande attualità lo studio dei rischi correlati a tali processi soprattutto in un'area densamente popolata come quella alpina. I bacini glaciali alpini sono caratterizzati da diversi processi morfodinamici a rapida evoluzione, tra cui i principali sono rappresentati da:

- instabilità delle fronti glaciali, con crollo di volumi anche ingenti, che possono evolvere in valanghe di ghiaccio (Funk, 1997, Déline et al., 2002) o valanghe miste di ghiaccio e roccia.

- Destabilizzazione di porzioni di pareti rocciose o di pendii detritici, per l'innalzamento della quota del *permafrost* e/o variazioni dello stato tensionale superficiale per l'azione del gelo/rigelo o in conseguenza del ritiro delle masse glaciali. I crolli possono coinvolgere parti di ghiacciaio ed evolvere in valanghe miste di ghiaccio e roccia.
- Svuotamento rapido di sacche d'acqua ipo-, endo-, o epiglaciali con possibile innesco di fenomeni di trasporto di massa o *debris flow* (Déline et al. 2004).
- Instabilità dei depositi sciolti superficiali, spesso alimentati da processi correlati al *permafrost* (ad es. *rock glaciers*), con possibile evoluzione a frane per colamento o a *debris flow*.

I dati storici dimostrano come questi fenomeni siano completamente svincolati dalle condizioni climatiche stagionali, potendo verificarsi, spesso senza alcun preavviso, in qualunque periodo dell'anno (Chiarle, 2000). Per approfondire queste tematiche, su incarico della Regione Autonoma della Valle d'Aosta è stato realizzato uno studio sulla pericolosità geomorfologica del versante destro della Val Ferret, nel massiccio del Monte Bianco, tra il Colle del Gigante e il bacino del Triolet (Figura 1). Scopo dello studio è stata l'individuazione dei bacini caratterizzati da pericolosità più elevata, che quindi rappresentano un elemento di rischio soprattutto in considerazione della presenza nel fondovalle di numerose strutture turistico-ricettive.

Attraverso la progressiva riduzione della scala di indagine e la combinazione di tecniche di telerilevamento e analisi 3D in ambiente GIS (Kääb et al., 2002), è stato definito un modello geomorfologico per l'individuazione dei potenziali dissesti, propedeutico alla successiva mappatura del rischio e alla pianificazione di interventi mirati di studio, monitoraggio e messa in sicurezza.

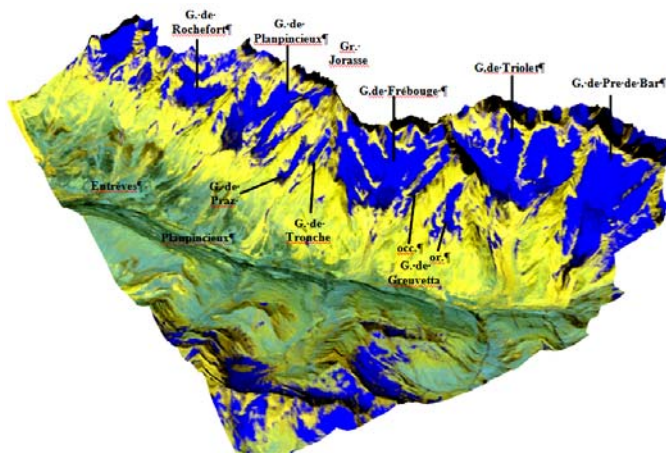


Figura 1 – DTM dell'area oggetto di studio, combinato con la scena LANDSAT ETM+ del 30/07/2001 (da una combinazione in falsi colori 754-RGB); in blu scuro le aree ricoperte da ghiaccio o neve).

### Analisi dei dati satellitari

Per una prima analisi dell'area di studio sono state impiegate tre scene del sensore TERRA/ASTER relative alle estati 2003 e 2004 e una scena relativa al mese di marzo 2004, rappresentativa di uno stato di buon innevamento. A supporto dei dati ASTER è stata esaminata anche una scena LANDSAT ETM+ relativa all'estate del 2001. I dati satellitari sono stati utilizzati per la perimetrazione speditiva dei settori di ghiacciaio potenzialmente instabili, per la stima dell'estensione della copertura nevosa nel periodo invernale, infine per l'analisi preliminare della pericolosità geomorfologica. I dati raccolti sono stati combinati con il DTM dell'Ufficio Cartografico regionale a maglia 10 m.

Le scene acquisite sono state calibrate in radianza e riflettanza e successivamente georiferite nel sistema UTM WGS84; sono stati quindi applicati dei procedimenti automatici (indici e rapporti tra bande) o semiautomatici (classificazione assistita) volti all'individuazione delle aree coperte da ghiaccio, neve, rocce e vegetazione.

Come noto, i rapporti semplici tra bande spettrali permettono di sfruttare la differenza di riflettanza di un materiale accentuandone la risposta nell'immagine risultante; a tale scopo sono stati utilizzati diversi algoritmi derivati da letteratura, in particolare: i rapporti  $TM4/TM5$  e  $TM3/TM5$  per il sensore ETM+ (Paul, 2001; Figura 2); il rapporto  $AST3/AST4$  per il sensore ASTER (Kääb, 2003). Sulle immagini invernali è stato usato l'indice NDSI (*Normalized Difference Snow Index*:  $[TM2-TM5]/[TM2+TM5]$ ; Kääb, 2003) per l'identificazione delle aree innevate; sulla base della corrispondenza tra le bande ASTER e ETM+, è stato inoltre valutato per le immagini ASTER un indice di neve dato da:  $[AST1-AST4]/[AST1+AST4]$ . Infine, è stata utilizzata per l'immagine ETM+ dell'estate 2001 una procedura di classificazione assistita, campionando dei pixel prescelti come modello del materiale da discriminare (neve e ghiaccio).

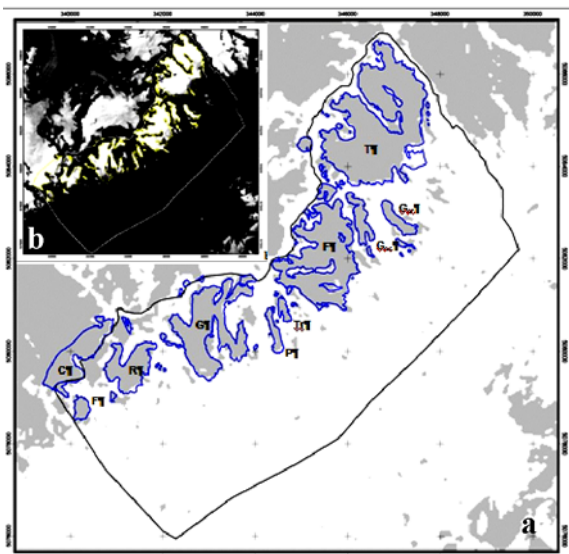


Figura 2 - Rapporto  $TM4/TM5$  sulla scena ETM+ del 30/07/01. a: immagine sogliata; b: risultato originale.

Sono evidenziati per confronto i contorni dei ghiacciai (linee in blu) determinati mediante le fotografie aeree del volo "Ghiacciai 2003" della Regione Valle d'Aosta.

Ghiacciai:

C: Col du Géant; F: M. Fréty; R: Rochefort, G: Gr. Jorasses-Planpincieux; P: Praz Sec; T: Tronchey; F: Frébouge; G<sub>oc</sub>/G<sub>or</sub>: Greuvettaz occ.le/or.le; T: Triolet.

I risultati, a seguito della definizione di opportune soglie definite manualmente, sono stati confrontati con immagini in falsi colori derivate dalle stesse scene satellitari e con le fotografie aeree del volo "Ghiacciai 2003" eseguito dalla Regione Valle d'Aosta nel settembre 2003. Il confronto ha messo in luce, una discreta precisione della classificazione effettuata mediante rapporti semplici tra bande, anche se si riscontra la tendenza a sovrastimare le aree occupate da ghiaccio e neve. Si è osservata comunque l'imprecisione di tutti i metodi nel classificare correttamente le aree con ghiaccio sporco o coperto da detrito fine, anche se in pieno sole.

L'indice NDSI (ETM+) fornisce una risposta simile al rapporto semplice, con una sovrastima più accentuata delle aree innevate, anche nelle zone di fondovalle. La sovrastima è stata in parte corretta con un aggiustamento del valore di soglia che comunque non ha consentito di eliminare del tutto le imprecisioni. Per contro, le zone di ghiaccio in ombra sono state classificate correttamente mentre il ghiaccio vivo con detrito e polveri fini non è stato riconosciuto completamente. Il confronto tra la scena ETM+ del 2001 e il volo fotogrammetrico del 2003 (Figura 2), risulta inoltre sensibilmente condizionato dalla differente copertura nevosa dei due periodi. Tenuto conto di tutti questi fattori, si può concludere che non esiste, per il caso in esame, un unico metodo che consenta di classificare univocamente le aree ricoperte da ghiacciaio. I dati ottenuti dall'analisi delle scene satellitari devono comunque essere validati e implementati con altre fonti di informazioni, in particolare voli fotogrammetrici e rilievi di terreno.

### Rilevamento geomorfologico

In una fase successiva, attraverso rilievi di terreno, supportati dalla fotointerpretazione, è stata realizzata una carta geomorfologica dei bacini oggetto di studio. È stata cartografata la distribuzione dei depositi detritici, di origine glaciale e non; si è inoltre verificata la posizione effettiva delle fronti glaciali, anche con l'ausilio di elicottero per i ghiacciai sospesi di meno agevole accessibilità.

I dati mostrano come l'arretramento delle fronti glaciali esponga una percentuale crescente di apparati morenici, a valle della zona di ablazione, a fenomeni di dissesto, ruscellamento superficiale e dinamica torrentizia, il cui potere erosivo è favorito dall'elevata energia di rilievo. La vulnerabilità dei depositi all'erosione è aumentata da fattori quali il loro stato poco consolidato, l'assenza di vegetazione, lo spessore non uniforme, l'appoggio su un substrato roccioso impermeabile, l'aumento della MAAT.

### Rilevamento strutturale

Il rilevamento strutturale ha permesso di individuare nel basamento roccioso (graniti e migmatiti) quattro set principali di discontinuità (Figura 3), con direzione subparallela alla valle principale (SW-NE: K1 e K3) e ai valloni laterali (NW-SE: K2 e K4). L'analisi dei parametri di scabrezza, planarità e persistenza ha messo in rilievo la preponderanza di superfici poco scabre e planari; la spaziatura media delle discontinuità più persistenti (>10 m) è compresa tra 2 e 5 m circa.

I cinematismi di distacco sono condizionati dalla geometria dei giunti e dalla loro intersezione con la topografia. Sono stati individuati due cinematismi principali: Tipo A, predominante sulle pareti esposte a SE, parallele all'asse della valle principale; Tipo B predominante sulle pareti dei valloni laterali. Il Tipo B è stato ulteriormente differenziato in due sottotipi: B1 per le pareti in destra orografica e B2 per le pareti in sinistra. Si tratta in generale di cinematismi per scivolamento planare lungo superfici di scorrimento basale a franapoggio rappresentate dai set K1 per il Tipo A, K4 per il Tipo B1 e K2 per il Tipo B2.

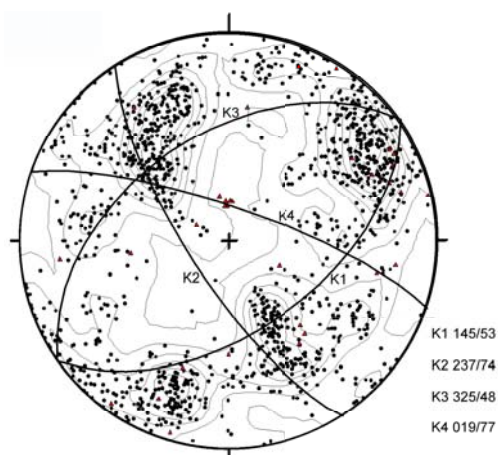


Figura 3 - Diagramma di densità dei principali set di giunti (proiezione equiareale di Schmidt, emisfero inferiore).

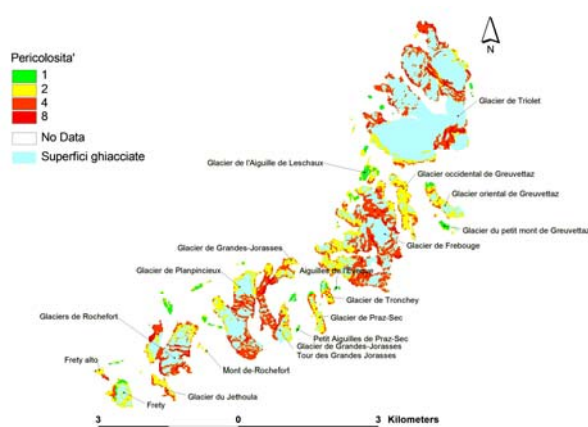


Figura 4 - Valutazione dell'instabilità per crollo dei margini glaciali. In rosso gli indici di pericolosità più elevati.

### Analisi della pericolosità geomorfologica

L'analisi della pericolosità ha riguardato in particolare il crollo di porzioni di ghiacciaio, la suscettibilità al dissesto dei depositi detritici e i crolli in roccia con volume > 10.000 m<sup>3</sup>.

**Ghiacciai** - La pericolosità per crollo è stata valutata sulla base di una relazione empirica che, per i ghiacciai temperati, lega la stabilità della superficie di scivolamento basale alla MAAT. Per MAAT = 0 °C a 2500 m (quota media delle fronti nell'area studiata) si ha instabilità potenziale per pendenze > 25°. Sovrapponendo i *grid* derivati dalle varie categorie informative (ghiacciai, pendenza, densità delle fratture, spessore medio del ghiaccio) si è ottenuta una mappa dei ghiacciai a maggiore pericolosità, tra cui i Gh. di Planpincieux/Gr. Jorasses, Triolet, Whymper, Frébouge, Tronchey e Greuvettaz (Figura 4).

**Depositi superficiali** - La pericolosità legata ai depositi superficiali è correlata alla possibilità che essi vengano mobilizzati e presi in carico da meccanismi di erosione e trasporto di massa: frane,



*debris flow*, piene torrentizie. Questi meccanismi possono essere legati sia a dinamiche di ambiente glaciale (un *debris flow* può originarsi per l'improvviso svuotamento di una sacca d'acqua subglaciale; Déline et al., 2004) sia a fenomeni come ad esempio un evento piovoso intenso. La pericolosità è tanto maggiore quanto più elevata è la suscettibilità al dissesto dei terreni detritici, a sua volta funzione di permeabilità, angolo di attrito, coesione, pendenza, uso del suolo, presenza di dissesti pregressi, eventi di pioggia, ecc.

Per la mappatura sono stati utilizzati, semplificando, i due parametri fondamentali pendenza e litologia; quest'ultimo esprime, in maniera pesata, il comportamento geotecnico e idrogeologico dei vari terreni. I depositi a permeabilità e angolo di attrito maggiori, anche se privi di coesione (es.: detrito di versante o *till di ablazione*), sono stati classificati come meno suscettibili al dissesto rispetto a terreni a minore permeabilità, anche se coesivi (es.: coltre detritico-colluviale o *till di alloggiamento*). La combinazione tramite GIS dei dati di affioramento, litologia e pendenza ha portato alla realizzazione della mappa tematica di Figura 5. Va rilevato che tale rappresentazione non prende in considerazione il fattore dinamico, rappresentato da eventi piovosi o dall'impulso di un'onda di piena.

**Crolli in roccia** - È stata valutata la pericolosità associata a frane di crollo con volume compreso tra 10.000 e 20.000 m<sup>3</sup>, limite imposto dalla scala di rappresentazione cartografica (1:25.000) e dalla fotointerpretazione.

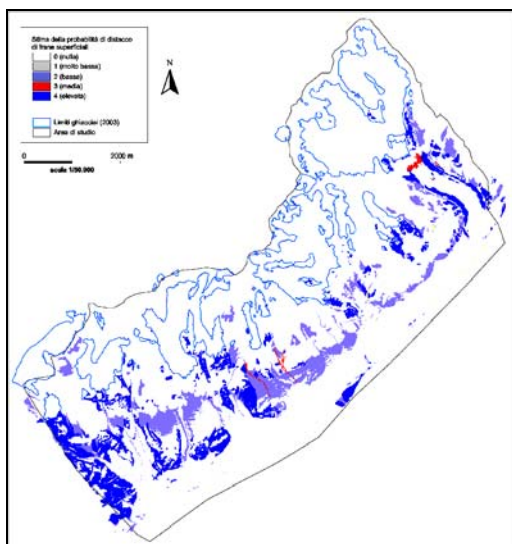


Figura 5 – Carta di sintesi della suscettibilità al franamento dei depositi detritici.

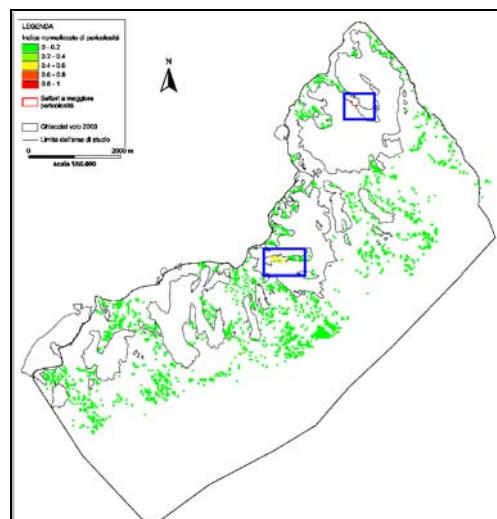


Figura 6 - Indice normalizzato di pericolosità per crollo. Nei riquadri i settori a maggiore pericolosità.

L'analisi è stata eseguita secondo il metodo *Matterock* (Baillifard et al., 2001) calcolando la probabilità che si verifichi un crollo in funzione del numero di discontinuità presenti in ogni cella analitica. La probabilità che un giunto ricada nella cella è calcolato mediante l'utilizzo di una funzione di distribuzione casuale di Poisson ( $P = 1 - e^{-n}$ ), essendo  $n = A/S \cdot L$ , dove  $n$  = numero medio di discontinuità nella cella,  $A$  = area della cella,  $S$  = spaziatura media delle discontinuità,  $L$  = persistenza media delle tracce.

La carta di sintesi rappresenta un indice qualitativo di pericolosità in relazione ai cinematismi considerati. I risultati del modello mostrano che gran parte dei settori con orientazioni compatibili con i cinematismi studiati ha una pericolosità relativa bassa. Solo due aree ubicate nei bacini del Frébouge e del Triolet presentano valori di pericolosità sensibilmente maggiori, fatto confermato dalla valutazione di un indice di pericolosità normalizzato (Figura 6).

## Conclusioni

Il telerilevamento applicato alla pianificazione territoriale inizia a essere una tecnologia utilizzata anche nel campo della consulenza professionale, al di fuori quindi dell'ambito della ricerca, grazie alla facile accessibilità a dati a basso costo, con risoluzione sufficiente per indagini a scala locale. Uno scoglio per la diffusione di tali metodi è ancora rappresentato dalla necessità di basi teoriche ancora poco diffuse nel settore professionale e della formazione per la gestione dei software, tuttora caratterizzati da costi relativamente elevati. Esiste quindi ancora un certo divario tra le potenzialità degli istituti di ricerca e quelle di piccole-medie società di consulenza che iniziano a confrontarsi con queste tematiche. Tale gap andrà a ridursi negli anni a venire, grazie all'istituzione, da parte di diversi atenei, di corsi specifici di telerilevamento.

Nel caso in esame, l'utilizzo di dati telerilevati ha consentito di eseguire una prima mappatura della pericolosità dei bacini glaciali attraverso semplici metodi classificativi tratti da letteratura. Su questa base sono state programmate indagini di terreno di maggiore dettaglio. Il confronto con gli eventi storici ha consentito di individuare i bacini più attivi in relazione a differenti processi morfodinamici, sebbene il numero di eventi significativi registrati sia relativamente esiguo.

Alcuni problemi sono stati riscontrati in merito all'ortorettificazione delle scene satellitari (fattore tempi/costi) soprattutto a causa del forte dislivello (>3.000 m) tra fondovalle e spartiacque. Anche l'identificazione delle aree di ghiaccio sporco non si è rivelata sufficientemente precisa, nonostante le correzioni radiometriche. La successiva fotointerpretazione ha comunque consentito di ridurre sensibilmente le incertezze.

Tra i principali risultati ottenuti dallo studio emerge una riduzione della superficie totale glacializzata pari a 312.700 mq, cioè il 3% del totale nel solo periodo 1999-2003. Singoli ghiacciai di piccole dimensioni hanno subito riduzioni di superficie (in pianta) comprese tra il 10% (Gh. Di Greuvettaz orientale) e il 35% (Gh. del Petit Mont de Greuvettaz).

## Bibliografia

- Baillifard F., Jaboyedoff M., Rouiller J.D., Tosoni D. (2001), "Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des instabilités rocheuses", Programme Interreg 2c – "Falaises", 70-79.
- Chiarle M. (2000), "Analisi dei pericoli naturali in ambiente glaciale", Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 206 pp.
- Déline P., Chiarle M., Mortara G. (2002), "The frontal ice avalanche of Frébouge glacier (Mont Blanc massif, Valley of Aosta, NW Italy)", *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 25 (2), 101-104.
- Déline, P., Chiarle, M. & Mortara, G. (2004), "The July 2003 Frébouge debris flows (Mont Blanc Massif, Valley of Aosta, Italy): water pocket outburst flood and ice avalanche damming", *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 27, 107-111.
- Funk M. (1997), "Grandes Jorasses: Glacier Whymper. Rapport sur le problème des chutes de séracs", VAW Zurigo / Regione Autonoma Valle d'Aosta, 24 pp.
- Paul F. (2001), "Evaluation of different methods for glacier mapping using Landsat TM", *EARSel Workshop on Remote Sensing of Land Ice and Snow, Proceedings, Dresden, 16.-17.6.2000*, 1, 239-245.
- Huggel C., Haerberli W., Käab A., Bieri D., Richardson S. (2004), "An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps", *Can. Geotech. J.*, 41, 1068-1083.
- Käab A., Paul F., Maisch M., Hoelzle M., Haerberli W. (2002), "The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods", *Annals of Glaciology*, 34, 362-366.
- Käab A. (2003), "Glacier- and permafrost-related hazards: processes, early recognition, protection", *ISASUT Workshop, Courmayeur (I), 16-19 June 2003*.

Zemp M., Haeberli W. Hoelzle M., Paul F. (2006), "Alpine glaciers to disappear within decades?", *Geophys. Res. Lett.*, 33, 1-4.