

La variabilità spaziale degli strati deboli come possibile fattore d'innescò della frattura da trazione nei lastroni

VARIABILITÀ SPAZIALE degli STRATI DEBOLI

Johan Gaume
WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos, Svizzera
Corr.: gaume@slf.ch

**Guillaume Chambon,
Nicolas Eckert,
Mohamed Naaim**
IRSTEA, Grenoble, Francia

La valutazione della posizione della frattura per trazione nei lastroni rappresenta un aspetto importante ai fini della valutazione dell'estensione delle zone di distacco delle valanghe e dunque per la valutazione del rischio. Nel presente studio viene simulato, utilizzando un metodo stocastico degli elementi finiti, un modello statistico meccanico del sistema lastrone-strato debole che tiene conto della variabilità spaziale degli strati deboli, delle ridistribuzioni delle sollecitazioni per elasticità del lastrone e della possibile frattura del lastrone per trazione. Nell'ambito delle simulazioni si distinguono due tipologie di distacchi valanghivi: (1) distacchi su tutto il pendio, per i quali viene simulato il distacco sull'intero pendio e in cui l'eterogeneità non è sufficiente ad innescare una rottura da trazione all'interno del lastrone; (2) distacchi parziali sul pendio, per i quali la rottura per trazione avviene all'interno del lastrone a causa dell'eterogeneità, di modo che si verifica il distacco su una sola parte del pendio. Viene presentata la proporzione di queste due tipologie di distacchi in funzione dei diversi modelli di parametri ricavati dalle simulazioni con elementi finiti. Uno dei risultati principali è che, in presenza di una resistenza alla trazione del lastrone maggiore della coesione media dello strato debole, tutti i distacchi sembrano verificarsi sull'intero pendio, il che giustifica la maggiore influenza che hanno le caratteristiche topografiche e morfologiche, ad esempio rocce, alberi, curvatura del pendio, cresta e manto nevoso eterogeneo, come spesso riportato in letteratura.



INTRODUZIONE

Le procedure di mappatura del rischio valanghe hanno visto la crescente diffusione di modelli statistico-deterministici combinati per la valutazione della distanza d'arresto e delle distribuzioni delle pressioni massime in un qualsiasi punto della zona d'accumulo (Barbolini et al., 2000; Naaim et al., 2003; Ancey et al., 2004, Eckert et al., 2007a; Eckert et al., 2008 e Eckert et al., 2010). Questi modelli combinati richiedono il volume di distacco come dato di input, dato dalla combinazione tra spessore e area del distacco.

Riguardo la valutazione della profondità di distacco, vi sono già delle tecniche empiriche (linee guida svizzere: Salm et al., 1990) e, più recentemente, un modello statistico-meccanico combinato è stato proposto da Gaume et al., (2012, 2013) prendendo in esame fattori sia meccanici che meteorologici in un contesto probabilistico.

D'altra parte, la posizione ed ampiezza della zona di distacco sono stati oggetto di scarsi studi. Maggioni et al., (2002) e Maggioni e Gruber (2003), hanno preso in esame un database ben documentato di eventi valanghivi rispetto a diverse caratteristiche topografiche e hanno dimostrato come l'angolo medio del pendio, la curvatura e la distanza dalla cresta siano i parametri più importanti che vanno ad influire sulla distribuzione dei distacchi valanghivi. Failletaz et al., (2006), Fyffe e Zaiser (2004, 2007) hanno invece utilizzato approcci di tipo *automa cellulare*

(*cellular-automata*) per calcolare le distribuzioni delle aree di distacco delle valanghe. Questi modelli includono una fonte di variabilità stocastica, quale ad esempio l'eterogeneità delle proprietà meccaniche degli strati deboli. È interessante notare che questi modelli, in talune condizioni, sono in grado di riprodurre le distribuzioni a legge di potenza osservate mediante misurazioni sul campo (McClung, 2003, Failletaz et al., 2004).

Il nostro obiettivo è di utilizzare un modello probabilistico meccanico messo a punto in una fase precedente (Gaume et al., 2012, 2013) in modo da analizzare i parametri che influiscono sulla posizione della rottura per trazione dei lastroni e, dunque, sull'ampiezza della zona di distacco.

In un primo paragrafo, vengono richiamate le caratteristiche principali del modello e vengono illustrati i cambiamenti effettuati rispetto alle sue versioni precedenti. Nel secondo paragrafo, vengono estrapolate e presentate due tipologie di rottura. Infine, nel terzo paragrafo, viene quantificata l'influenza che l'eterogeneità degli strati deboli e la resistenza alla trazione dei lastroni esercitano sulla posizione della rottura per trazione nel lastrone.

PRESENTAZIONE DEL MODELLO

In questo studio viene utilizzato il modello statistico meccanico proposto da Gaume et al., 2013. Ricordiamo qui le sue caratteristiche principali.

Il sistema simulato consiste in un pendio uniforme costituito da un lastrone e da uno strato debole di 50 m di lunghezza. Le simulazioni vengono effettuate utilizzando il codice ad elementi finiti Cast3m in 2D (condizioni di sollecitazione piana). La gravità è la sola forza esterna applicata ed il sistema viene caricato incrementando progressivamente l'angolo del pendio θ fino al verificarsi della rottura.

Il cambiamento principale rispetto al modello di Gaume et al., 2013 riguarda la legge costitutiva del lastrone. Per prendere in esame la possibile frattura per trazione del lastrone, si ricorre alla legge di elasticità-fragilità. Il modulo di Young del lastrone è $E = 1$ MPa, il coefficiente di Poisson $\nu = 0,2$ e la densità $\rho = 250$ kg·m⁻³.

La resistenza alla trazione del lastrone viene indicata con il simbolo σ_T e viene fatta variare tra 500 e 2000 Pa.

Lo strato debole viene modellato come un'interfaccia quasi-fragile (assorbimento delle sollecitazioni) con un criterio di rottura Mohr-Coulomb caratterizzato da una coesione c e da un coefficiente d'attrito $\mu = \tan 30^\circ$. L'eterogeneità spaziale dello strato debole viene rappresentata attraverso una distribuzione stocastica della coesione c con una funzione di covarianza sferica della lunghezza di correlazione ϵ . La coesione media viene indicata come $\langle c \rangle$ e la sua deviazione standard complessiva σ_c .

Oltre a consentire la valutazione delle distribuzioni delle profondità del distacco valanghivo, questo modello ha permesso di attestare un effetto di mitigazione dell'eterogeneità causata dalla ridistribuzione delle sollecitazioni dovuta all'elasticità del lastrone e caratterizzato dal rapporto tra lunghezza di correlazione ϵ ed una tipica scala di lunghezza del sistema associata ad effetti elastici (vedere Gaume et al., 2012, 2013).

TIPOLOGIE DI DISTACCO

Nelle simulazioni si è distinto tra due tipologie di distacchi valanghivi:

(1) distacco sull'intero pendio, per il quale il distacco simulato si verifica sull'intero



pendio senza che vi sia rottura per trazione all'interno del lastrone (Fig. 1a);

(2) distacco parziale sul pendio, per il quale la rottura per trazione si verifica all'interno del lastrone, così che si ha il distacco solo di una parte del pendio (Fig. 1b).

È comunque importante sottolineare che, per entrambe le tipologie di distacco, il processo di rottura primario osservato è sempre la rottura da taglio del lastrone debole. La rottura del lastrone, quando si verifica, rappresenta in modo sistematico un processo secondario. Nel caso di distacco sull'intero pendio, il grado di eterogeneità non è sufficiente ad innescare una rottura da trazione all'interno del lastrone. La rottura da taglio basale nello strato debole si propaga così fino alla condizione al contorno superiore, che può essere vista come un punto d'ancoraggio o un'area di elevata concentrazione di sollecitazioni da trazione al cui interno può avvenire la rottura del lastrone per trazione (Fig. 1a). Ricollocata nel contesto di pendii valanghivi naturali, tale condizione al contorno può rappresentare una caratteristica morfologica forte suscettibile di innescare la rottura da trazione (creste, rocce, alberi, area convessa locale, ecc.).

Al contrario, nel caso di distacchi parziali sul pendio, le variazioni di coesione nello strato debole sono sufficienti a generare la rottura da trazione all'interno del sistema. La presenza di zone locali forti può arrestare in maniera efficace la progressione della rottura basale, e così l'eccesso di sollecitazione viene ridistribuito nel lastrone, generando l'apertura per trazione dello stesso.

RISULTATI

Nel presente paragrafo vengono presentati i risultati in termini di probabilità di distacco parziale sul pendio, anche chiamata probabilità di rottura per trazione e indicata con P_{Tf} in funzione dei seguenti parametri del modello: resistenza alla trazione σ_T , lunghezza di correlazione ϵ , spessore del lastrone h . In un primo stadio, la coesione media e la deviazione standard vengono mantenute fisse ($c = 1$ kPa, $\sigma_c = 300$ Pa).

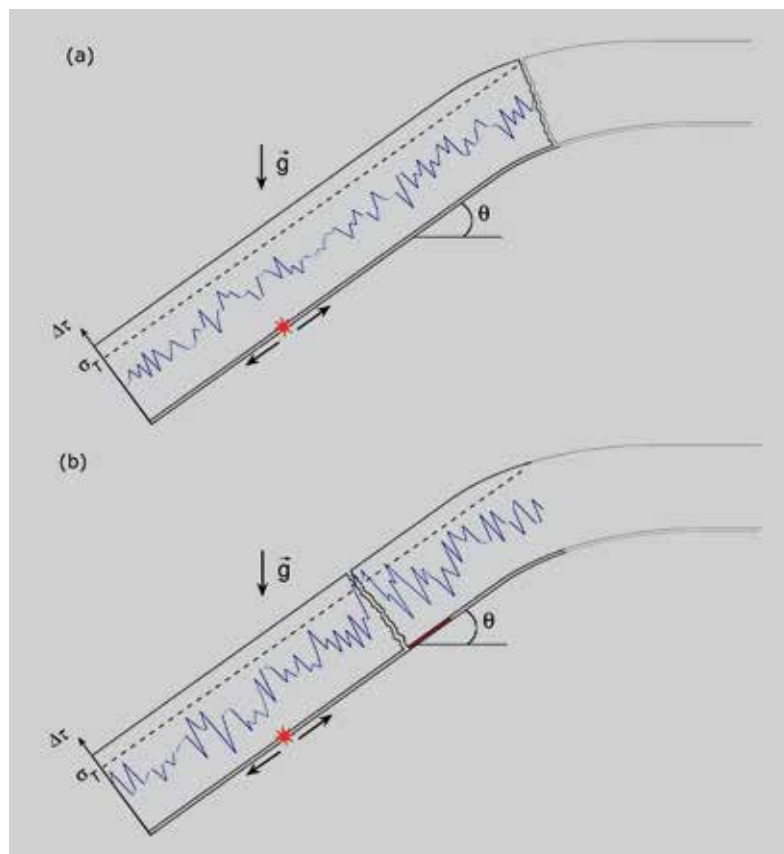


Fig. 1 - Diagramma rappresentante le due tipologie di frattura osservate nelle simulazioni. (a) Distacco sull'intero pendio: sulla posizione della rottura da trazione del lastrone influiscono le caratteristiche morfologiche (rocce, alberi, cresta, curvatura, ecc.). (b) Distacco parziale sul pendio: l'eterogeneità locale è sufficiente ad innescare la rottura da trazione all'interno del lastrone. La parte colorata in rosso dello strato debole rappresenta una zona locale di notevole resistenza al taglio. Le curve blu illustrano l'eterogeneità della differenza di sollecitazione di taglio tra due elementi adiacenti $\Delta\tau$, mentre la linea tratteggiata rappresenta la resistenza alla trazione σ_T .

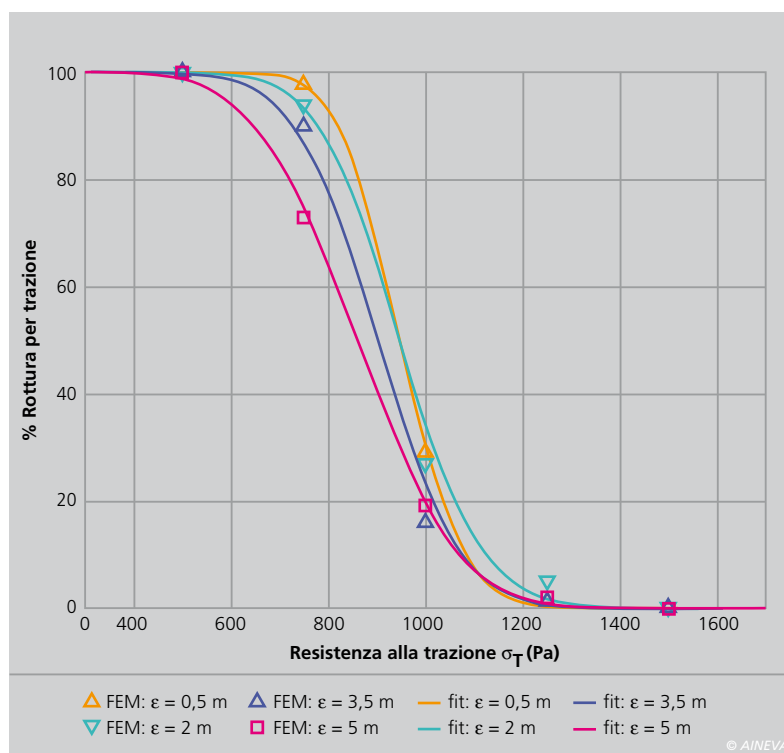


Fig. 2 - Probabilità di rottura per trazione del lastrone P_{Tf} all'interno del sistema simulato (distacco su pendio parziale) in funzione della resistenza alla trazione σ_T per diversi valori di ϵ ed uno spessore del lastrone costante $h=1$ m che rappresenta le due tipologie di frattura osservate nelle simulazioni. Le curve raffigurano la rettifica data dal modello statistico presentato.

Influenza della resistenza alla trazione

La Fig. 2 rappresenta la probabilità di rottura da trazione P_{Tf} all'interno del sistema in funzione della resistenza alla trazione σ_T per diversi valori della lunghezza di correlazione ϵ ed uno spessore costante del lastrone $h=1$ m.

I valori di resistenza alla trazione vengono fatti variare da 0,5 e 1,5 kPa. Come previsto, questa probabilità diminuisce con la resistenza alla trazione σ_T dal 100 % allo 0 %. La velocità di decrescita e i valori di resistenza alla trazione a 0 e 100 % dipendono dalla lunghezza di correlazione ϵ .

Influenza della lunghezza di correlazione

L'influenza della lunghezza di correlazione ϵ si nota anche nella Fig. 2. Più ϵ è elevato, più lentamente scende la probabilità con σ_T . Inoltre, per valori di resistenza alla trazione costanti, P_{tf} generalmente decresce con ϵ . Il valore di σ_T per $P_{tf} = 100\%$ decresce al crescere della lunghezza di correlazione, mentre sul valore per $P_{tf} = 0\%$ ϵ non influisce quasi per nulla.

Influenza dello spessore del lastrone

La Fig. 3 illustra la probabilità di rottura per trazione P_{tf} in funzione di h per diversi valori di resistenza alla trazione ed una lunghezza di correlazione costante $\epsilon = 0,5$ m.

Per $\sigma_T < 0,75$ kPa, P_{tf} è all'incirca pari allo 0% per $\sigma_T > 1,5$ kPa. Per valori intermedi di σ_T , P_{tf} scende da $h = 0,5$ m a $h = 2$ m.

Una singola simulazione per $h = 0,25$ m è stata eseguita anche per $\sigma_T = 1$ kPa per confermare l'incremento di P_{tf} con h per $h < 0,5$ m, che verrà evidenziata nel modello statistico illustrato nel prossimo paragrafo.

UN MODELLO STATISTICO SEMPLICE

Allo scopo di valutare la proporzione tra

due tipologie di distacchi, è possibile definire la probabilità che la sollecitazione di trazione σ_{xx} nel lastrone sia superiore alla resistenza alla trazione σ_T . È stato dimostrato che una condizione necessaria per il distacco di lastroni è la rottura primaria da taglio del lastrone debole.

Si assume dunque che questa probabilità $P(\sigma_{xx} > \sigma_T)$ sia uguale a $P(\Delta_T > \sigma_T)$, che è la probabilità che la differenza di sollecitazione di taglio Δ_T tra due elementi adiacenti dello strato debole superi la resistenza alla trazione σ_T .

La differenza di sollecitazione al taglio Δ_T è legata all'eterogeneità di coesione degli strati deboli.

A causa del carattere gaussiano dell'eterogeneità degli strati deboli, si assume che anche Δ_T segua una legge delle medie gaussiane $\langle \Delta_T \rangle$ e la deviazione standard σ_{Δ_T} .

Con quest'ultimo assunto, è possibile calcolare in modo analitico la probabilità di eccedenza $P(\Delta_T > \sigma_T)$. Questa viene data da:

$$P(\Delta_T > \sigma_T) = 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\sigma_T - \langle \Delta_T \rangle}{\sqrt{2} \sigma_{\Delta_T}} \right) \right] \quad (1)$$

Tale equazione è stata rettificata in base ai risultati ottenuti con gli elementi finiti, cioè all'evoluzione di P_{tf} con σ_T per diversi valori di ϵ (Fig. 2, linee continue) e all'e-

voluzione di P_{tf} con σ_T per diversi valori di h (non rappresentati). I due parametri $\langle \Delta_T \rangle$ e σ_{Δ_T} sono così stati valutati in funzione di h ed ϵ . Di conseguenza, questo modello consente di prevedere la proporzione tra le due tipologie osservate per tutti i valori dei parametri. Per esempio, in Fig. 3 è stata raffigurata in forma di linee continue l'evoluzione completa di questa proporzione per diversi valori di spessore del lastrone. La concordanza con i punti dati FEM è eccellente. In particolare, il modello è stato calibrato utilizzando solo valori di $h > 0,5$ m. L'incremento di P_{tf} tra 0 e 0,5 m è stato dunque prima previsto dal modello, e successivamente confermato da un'ulteriore simulazione FEM condotta per $h = 0,25$ m.

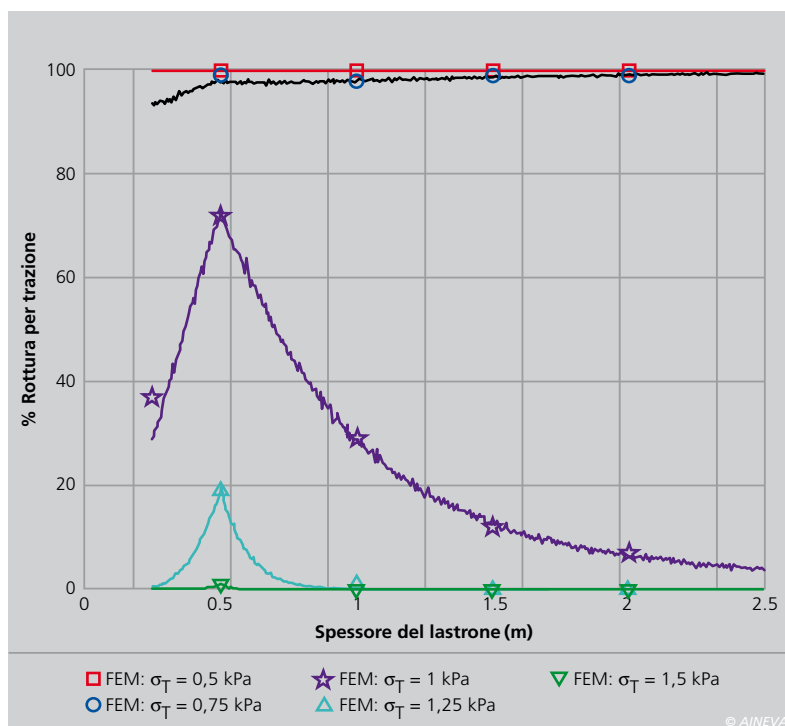
Ne consegue che questo modello semplice è in grado di riprodurre con un buon grado di precisione la proporzione relativa dei distacchi su pendio interi e parziali.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Sono state presentate due differenti tipologie di distacco osservate nelle nostre simulazioni. (1) I distacchi sull'intero pendio sono influenzati dalla morfologia del percorso e/o dalle variazioni del manto nevoso, dal momento che la sola eterogeneità non è sufficiente ad innescare una rottura da trazione. Per esempio la rottura da trazione sarà molto sensibile alla presenza di alberi, rocce, creste e curvatura locale. (2) I distacchi parziali, per i quali le variazioni locali della coesione degli strati deboli sono sostanziali e possono da sole innescare la frattura per trazione nel lastrone. È importante osservare che, per entrambe le tipologie di distacco, il processo di rottura primaria osservato è sempre la rottura basale da taglio dello strato debole. Dunque la rottura del lastrone costituisce sistematicamente un processo secondario.

È stato dimostrato come la proporzione tra queste due tipologie dipenda notevolmente dai parametri del modello quali: resistenza alla trazione σ_T , spessore del lastrone h , lunghezza di correlazione ϵ e, più probabilmente, da altri parametri

Fig. 3 - Probabilità di rottura per trazione del lastrone P_{tf} con il sistema simulato (distacco su pendio parziale) in funzione dello spessore del lastrone h per diversi valori della resistenza alla trazione σ_T ed una lunghezza di correlazione costante $\epsilon = 0,5$ m. Le curve raffigurano la rettificata data dal modello statistico presentato.



che non sono stati modificati nel presente studio, come ad esempio la coesione media $\langle c \rangle$ e la deviazione standard della coesione σ_c . Inoltre, è stato presentato un modello statistico semplice in grado di riprodurre la proporzione tra tipologie di distacchi in funzione dei parametri del modello. Due illustrazioni di questo modello semplice sono riportate in Fig. 1. Nel primo caso (Fig. 1a), la differenza di sollecitazione di taglio $\Delta\tau$ è sempre inferiore alla resistenza alla trazione σ_T . La frattura basale si propaga così nell'intero sistema fino alla condizione al contorno superiore, che è una zona ad elevata concentrazione di sollecitazioni di trazione. Questa zona può essere identificata in una cresta, una roccia, un albero o una curvatura locale. Nel secondo caso (Fig. 1b), una zona locale di sostanziale differenza di sollecitazione da taglio $\Delta\tau$, a seguito di forti variazioni della coesione genera una frattura da trazione locale all'interno del lastrone, poiché $\Delta\tau > \sigma_T$. E' stato dimostrato che per valori di σ_T più elevati della coesione media $\langle c \rangle = 1$ kPa (in questo caso) i distacchi avvengono quasi sempre sull'intero pendio e di conseguenza sono controllati dalla morfologia del percorso. Ricordiamo che i valori di resistenza alla

trazione ricavati dai test di laboratorio appaiono essere in generale più elevati di 1 kPa (Jamieson e Johnston 1990, Sigrist 2006) anche con tecniche diverse di misurazione, mentre i valori di resistenza al taglio degli strati deboli sono tipicamente inferiori a 1kPa.

Ciò denota, per valori realistici dei parametri meccanici, la notevole influenza che la morfologia e la topografia del pendio hanno sulla posizione della frattura da trazione del lastrone e quindi sull'ampiezza della zona di distacco.

Questo effetto è ulteriormente amplificato quando lo spessore del lastrone è elevato rispetto alla lunghezza di correlazione e l'elasticità tende ad attenuare l'influenza dell'eterogeneità.

Una conclusione di questo tipo corrobo-

ra e apporta una qualche giustificazione di tipo meccanico ai risultati raccolti da Maggioni e Gruber 2003, che hanno analizzato l'influenza che le caratteristiche morfologiche del percorso esercitano sull'ampiezza della zona di distacco ricorrendo a un approccio statistico puramente basato sui dati, arrivando a concludere che la geometria locale gioca un ruolo dominante nella localizzazione e dimensione delle valanghe.

Dunque, in pratica, la zona di distacco dipende per lo più dalla topografia del pendio (curvatura locale, cresta, ecc.), o dalla presenza di rocce e alberi. Per esempio, la Fig. 4 mostra una tipica zona di distacco di una valanga a lastroni definita dalla cresta in corrispondenza del fronte e da rocce e alberi sui fianchi del pendio.



Fig. 4 - Dittico. Valanga innescata da uno snowboarder. L'area di distacco è definita dalla cresta alla corona e dalle rocce e alberi ai fianchi. Lato sinistro: prima dell'impatto dello snowboarder. Lato destro: dopo l'impatto. © Rémi Petit

Bibliografia

- Ancey, C, C Gervasoni and M Meunier, 2004. Computing extreme avalanches, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 39, 161–180.
- Barbolini, M, U Gruber, C Keylock, M Naaim and F Savi, 2000. Application and evaluation of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 31(2), 133–149.
- Eckert, N, M Naaim and E. Parent, 2010. Long-term avalanche hazard assessment with a Bayesian depth-averaged propagation model, *J. Glaciol.*, 56(198), 563–586.
- Eckert, N., E. Parent, M Naaim and D. Richard, 2008. Bayesian stochastic modelling for avalanche predetermination: from a general system framework to return period computations, *SERRA*, 22, 185–206.
- Eckert, N, E. Parent and D. Richard, 2007. Revisiting statistical topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 49(1), 88–107.
- Failletaz, J, F Louchet and J.R Grasso, 2004. Two-threshold model for scaling laws of noninteracting snow avalanches, *Phys. Rev.Lett.*, 93(20), 208001.
- Failletaz, J, F Louchet and J.R Grasso, 2006. Cellular automaton modelling of slab avalanche triggering mechanisms : from the universal statistical behaviour to particular cases, *Proceedings of the ISSW*, 174- 180.
- Fyffe, B and M Zaiser, 2004. The effects of snow variability on slab avalanche release, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 40, 229–242.
- Fyffe, B and M Zaiser, 2007. Interplay of basal shear fracture and slab rupture in slab avalanche release, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 49, 2638.
- Gaume, J., G. Chambon, N. Eckert and M. Naaim, 2013. Influence of weak-layer heterogeneity on snow slab avalanche release: Application to the evaluation of avalanche release depths., *J.Glaciol.*, 59(215), 423-437
- Gaume, J., G. Chambon, N. Eckert and M. Naaim, 2012. Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distributions., *Geophys. Res. Lett.*, 39, L12401
- Jamieson, B and C Johnston, 1990. In-situ tensile tests of snowpack layers, *J. Glaciol.*, 36(122), 102– 106.
- Maggioni, M. and U Gruber, 2003. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 37, 407–419.
- Maggioni, M., U. Gruber and M. Stoffel, 2002. Definition and characterisation of potential avalanche release areas, *Proceedings of the ESRI Conference*, San Diego.
- McClung, D.M., 2003. Size scaling for dry snow slab release, *J. Geophys. Res.*, 108(B10), 2465–2477. Naaim, Mohamed, T Faug and F Naaim-Bouvet, 2003. Dry granular flow modelling including erosion and deposition, *Surveys in Geophysics*, 24, 569–585.
- Salm, B., A. Burkard and H. Gubler, 1990. Berechnung von fließlawinen: eine anleitung für pratiker mit beispielen, *Internal report EISLF (in German)*, 47.
- Sigrist, C, 2006. Measurements of fracture mechanical properties of snow and application to dry snow slab avalanche release, (PhD thesis), ETHZ.