

VALANGHE da SLITTAMENTO

L'influenza di alcuni parametri meteorologici sulle valanghe da slittamento

**Lisa Dreier,
Christoph Mitterer,
Stephan Harvey**
WSL, Istituto per lo studio
della neve e delle valanghe SLF,
Davos, Svizzera
Corr.: lisa.dreier@slf.ch

Sebastian Feick
Istituto di geografia,
Università di Erlangen-Nürnberg,
Germania

Nel corso dell'inverno 2011-2012 sulle Alpi svizzere si è riscontrata un'elevata attività valanghiva per slittamento della neve. Il pericolo legato alle valanghe da slittamento, unitamente alle notevoli altezze del manto nevoso, hanno posto un'importante sfida alle autorità locali. Le valanghe da slittamento sono infatti difficili da prevedere e da controllare. Tempo, manto nevoso, suolo e terreno sono tutti fattori che influiscono sul fenomeno di slittamento. Finora, tuttavia, non si è riusciti a stabilire un chiaro nesso tra queste variabili e l'attività di slittamento della neve. I risultati di molte ricerche evidenziano che uno strato basale di neve umida è fondamentale per la formazione delle valanghe da slittamento. Sulla base di osservazioni, viene ipotizzato che vi siano processi diversi che favoriscono la formazione di questo strato basale e quindi l'innescio dei fenomeni di slittamento della neve in inverno e in primavera. In inverno il manto nevoso è solitamente freddo e asciutto, in primavera è più caldo e umido. Pertanto sono diversi i processi che formano acqua in corrispondenza dell'interfaccia neve-suolo. Per fare un po' di luce su questi due diversi periodi, il processo di slittamento della neve è stato monitorato presso un noto sito di valanghe da slittamento a Dorfberg, sopra Davos, in Svizzera, durante le stagioni invernali 2008-2009 e 2011-2012 utilizzando la tecnica della fotografia *time-lapse*. L'attività valanghiva da slittamento è stata messa confronto con i parametri meteorologici di una vicina stazione meteo. Ci siamo serviti di metodi statistici univariati e multivariati per analizzare i dati. I risultati evidenziano il verificarsi di processi diversi in inverno e in primavera. I parametri meteo più importanti in inverno sono la temperatura massima dell'aria, la sommatoria di 5 giorni di neve fresca e l'irraggiamento a onde corte in entrata. In primavera, appaiono invece più importanti parametri quali la temperatura della superficie della neve, la temperatura minima dell'aria, la differenza della temperatura dell'aria rispetto al giorno prima e l'umidità relativa. La differenza, in fatto di parametri importanti, tra inverno e primavera è indicativa del fatto che vi sono vari fattori alla base della formazione di strati d'acqua sottili sull'interfaccia neve-suolo e dunque che vi sono diversi processi alla base del fenomeno di slittamento della neve.



INTRODUZIONE

Nell'inverno 2011-2012, sulle Alpi svizzere si è registrata un'attività valanghiva per slittamento al di sopra della media. Unitamente alle notevoli altezze del manto nevoso, le valanghe di questo tipo, difficili da prevedere e da controllare, hanno costituito una sfida critica per le autorità locali.

È noto come la presenza di uno strato d'acqua sottile nel punto di contatto neve-suolo sia cruciale per lo slittamento della neve (Clarke e McClung, 1999; Mitterer e Schweizer, 2012).

L'acqua presente sull'interfaccia neve-suolo proviene: i) dalla fusione dello strato di neve basale sul terreno riscaldato, ii) dalla pioggia o dall'acqua di fusione che percola dalla superficie attraverso l'intero manto nevoso, iii) dalla fusione della neve in aree ad energia elevata (per es. rocce esposte al sole e riscaldate) con formazione di acqua che scorre lungo l'interfaccia neve-suolo (McClung e Clarke, 1987; Mitterer e Schweizer, 2012).

Le condizioni presenti in corrispondenza del punto di contatto neve-suolo dipendono

dal tempo atmosferico, dal manto nevoso e dalle caratteristiche del suolo e del terreno. Tuttavia, finora non è stato possibile stabilire un rapporto chiaro tra queste variabili e l'attività di slittamento della neve.

L'influenza delle condizioni meteorologiche sul processo di slittamento della neve è stata esaminata in diversi lavori. Le varie osservazioni hanno evidenziato una maggiore frequenza di valanghe da slittamento della neve a seguito di periodi di pioggia e neve (Clarke e McClung, 1995; Lackinger, 1987; Stimberis e Rubin, 2005; Stimberis e Rubin, 2011). Höller (2001) ha riportato frequenti distacchi di valanghe da slittamento in primavera, in concomitanza con un rialzo della temperatura della neve. Peitzsch et al. (2012) hanno invece studiato le valanghe da slittamento e le valanghe di neve umida in primavera. I ricercatori hanno indicato nella temperatura dell'aria e nell'assettamento del manto nevoso due importanti parametri ai fini della classificazione di giorni con valanghe e giorni senza valanghe.

In der Gand e Zupančič (1966) e Höller (2001) hanno messo in relazione l'incremento delle velocità di scorrimento e la frequente formazione di crepe nel manto nevoso con un più elevato carico di neve. Lo slittamento della neve è probabilmente dovuto a diversi processi in inverno, quando il manto nevoso è freddo e asciutto, e in primavera, quando il manto è più caldo e umido. Clarke e McClung (1999) hanno descritto le valanghe da slittamento della neve in inverno come *eventi con basse temperature* che, contrariamente agli *eventi con alte temperature* in primavera, non si possono porre in relazione con periodi più caldi. Nel presente lavoro abbiamo esaminato l'influenza del tempo atmosferico sulle valanghe da slittamento, allo scopo di fare luce sui processi che sono alla base dei fenomeni di slittamento della neve in inverno (*eventi con basse temperature*) quando il manto nevoso è freddo e asciutto e in primavera (*eventi con alte temperature*) quando il manto nevoso è isotermico e umido.

Il nostro obiettivo era consolidare la conoscenza dei processi di slittamento della neve e contribuire al miglioramento della prevedibilità delle valanghe da slittamento.

DATI E METODI

Monitoraggio degli eventi di slittamento della neve

Abbiamo utilizzato la tecnica di riprese temporizzate (intervalli di 15 minuti) per monitorare le valanghe da slittamento presso il sito di Dorfberg sopra Davos (Alpi svizzere orientali), un sito noto per questo tipo di valanghe. La fotocamera per il monitoraggio è stata installata sopra un edificio di Davos e copre gran parte dei pendii di Dorfberg esposti a est-sud-est (Fig. 1), la cui altitudine varia da 1700 m a 2400 m sopra il livello del mare (vetta principale: Salezer Horn, 2536 m s.l.m.). La copertura del terreno è costituita per lo più da prati ripidi e molto ripidi, ma anche da zone rocciose, cespugli e boschi chiusi e aperti. Le fotocamere standard riprendono immagini nello spettro del visibile e la qualità è legata alla buona visibilità. Nei periodi di scarsa visibilità, legata a condizioni di tempo brutto o di notte, non si possono raccogliere informazioni, o si hanno informazioni incomplete. I periodi presi in esame vanno dal 9 dicembre 2008 al 2 aprile 2009 e dall'8 dicembre 2011 al 9 marzo 2012, poiché in ambedue gli anni si è riscontrato un numero di eventi valanghivi per slittamento della neve superiore alla media. Ogni immagine è stata analizzata manualmente e sono state registrate data e ora del primo avvistamento di ogni valanga (Feick et al., 2012).

Dati meteorologici

Per la nostra analisi sono stati utilizzati i parametri meteo (Tab. 1) registrati presso la stazione meteorologica del sito sperimentale di Weissfluhjoch (2540 m s.l.m.), localizzato a nord-ovest di Dorfberg.

Abbiamo calcolato i valori minimi, massimi e medi per giornata e le differenze corrispondenti a diversi giorni prima, in modo da tener conto delle potenziali influenze di sfasamento di questi parametri sull'attività valanghiva per slittamento.

L'altezza della neve fresca è stata misurata ogni mattina a Davos (1560 m s.l.m.) e sul Weissfluhjoch (2540 m s.l.m.) da osservatori locali. La media di entrambi i valori è stata considerata rappresentativa per Dorfberg. Dal momento che riteniamo che

Fig. 1 - Pendii monitorati (autunno e inverno) a Dorfberg sopra Davos (Svizzera).



il carico causato dalla neve fresca svolge un importante ruolo nell'attività valanghiva per slittamento, abbiamo calcolato la sommatoria della neve fresca su cinque giorni (il giorno presente più quattro giorni prima) e abbiamo aggiunto il risultato al set di dati dei parametri meteo. Il set di dati utilizzato per l'analisi statistica è costituito da 26 parametri meteo.

Clarke e McClung (1999) hanno distinto tra *eventi con basse temperature* ed *eventi con alte temperature*. Abbiamo supposto che vi siano diversi processi alla base dello slittamento di un manto nevoso asciutto e freddo (soprattutto in inverno) e di un manto nevoso umido e caldo in primavera. Allo scopo di far luce su questi processi, abbiamo suddiviso le due stagioni invernali 2008-2009 e 2011-2012 in periodo invernale e primaverile. L'inizio del periodo primaverile è stato fissato al 16 febbraio 2009 per l'inverno 2008-2009 e all'11 febbraio 2012 per l'inverno 2011-2012. I periodi di primavera e inverno di ambedue le stagioni invernali sono stati analizzati insieme.

Analisi statistica univariata e multivariata

L'attività valanghiva per slittamento è stata considerata come una variabile binaria: le valanghe sono state osservate in un giorno prestabilito o meno (giorni con valanghe/senza valanghe). Abbiamo utilizzato dei *boxplot* per descrivere la distribuzione dei parametri meteo sui giorni con valanghe e senza valanghe. È stato eseguito il *rank-sum test* di Wilcoxon per testare la coerenza di distribuzione di un dato parametro meteo sui giorni con valanghe e senza valanghe (significativo: valore $p < 0,05$, altamente significativo: valore $p < 0,01$).

I metodi di statistica multivariata includevano alberi di decisione e foreste casuali (Breiman, 2001; Hothorn et al., 2006; Liaw e Wiener, 2002) e sono stati applicati per analizzare l'influsso di combinazioni di diversi parametri meteo sull'attività valanghiva per slittamento. Gli alberi di decisione binaria forniscono un'idea degli effetti dei parametri di input (Hothorn et al., 2006). Questo metodo consolidato è stato utilizzato in diversi lavori di previsione delle

valanghe per l'analisi dei dati, oltre che per l'attività di previsione (Peitzsch et al., 2012). Gli alberi di decisione binaria suddividono il set di dati in due categorie, in questo caso giorni con valanghe e giorni senza valanghe. L'albero suddivide ricorsivamente il set di dati in base al parametro di input che presenta il nesso più forte con la variabile di risposta e un valore $p < 0,05$. Se non è possibile trovare alcun parametro significativo, l'albero smette di crescere. Le foreste casuali sono costituite da numerosi alberi di classificazione binaria (n. d'alberi = 2500) e in questo lavoro sono state utilizzate per calcolare i parametri meteo più importanti. Due terzi del set di dati sono stati utilizzati per far crescere l'albero. Per suddividere il set di dati è stato testato un sottoinsieme di parametri meteo di input ($N = 12$). Questo sottoinsieme variava per ogni albero, così che sono stati sviluppati numerosi alberi diversi. Ogni giorno osservato è stato classificato come giorno con valanghe o giorno senza valanghe a seconda di quale categoria prevaleva su tutti gli alberi.

L'importanza dei parametri meteo di input è stata valutata mediante le misurazioni del decremento medio dell'accuratezza e del coefficiente di Gini. Il processo di valutazione segue i seguenti passi: i) calcolo della misura specificata per ogni albero, ii) permutazione dei dati del parametro di input usato per suddividere il set di dati e iii) nuovo calcolo della misura specificata. La permutazione spezza il legame tra variabile esplicativa e variabile di risposta. Se, per esempio, la variabile esplicativa spiega bene la variabile di risposta, l'accuratezza della classificazione diminuisce dopo la permutazione (Breiman, 2001; Strobl et al., 2008). Le misure specificate sono state ripartite in modo proporzionale su tutti gli alberi per ogni parametro meteo di input. Le differenze dei parametri meteo più importanti risultanti dalle diverse misurazioni sono state sincronizzate manualmente con i cinque parametri più importanti.

Per eseguire l'analisi statistica è stato utilizzato il linguaggio e l'ambiente R per il calcolo statistico, compresi i pacchetti di ambiente R *'party'* (Hothorn et al., 2006) e *'randomForest'* (Liaw e Wiener, 2002).

Parametro	Unità
Temperatura aria	°C
Umidità relativa	%
Radiazione onde corte incidente	W/m ²
Radiazione onde corte riflessa	W/m ²
Radiazione onde lunghe incidente	W/m ²
Radiazione onde lunghe in uscita	W/m ²
Altezza neve	cm

© AINEVA

Tab.1 - Parametri meteo registrati presso il sito sperimentale di Weissfluhjoch (2540 m s.l.m.).

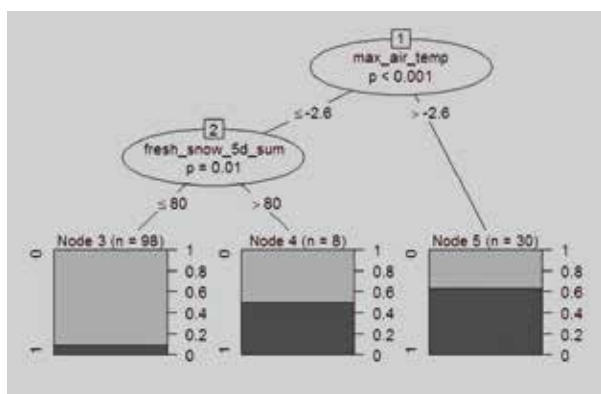
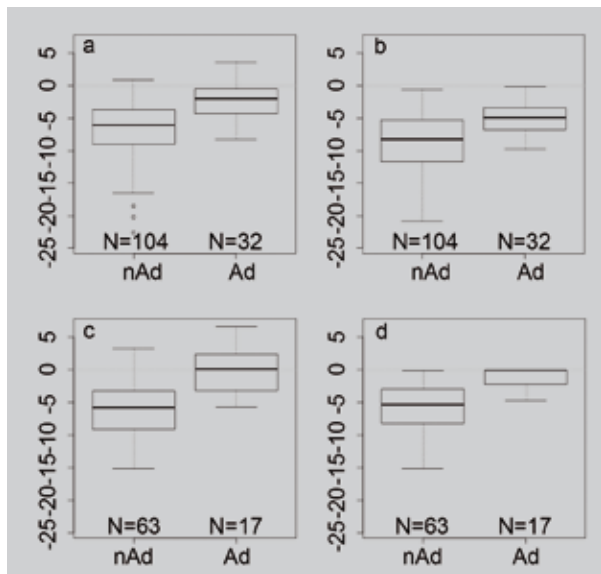
RISULTATI E DISCUSSIONE

Abbiamo registrato 73 valanghe da slittamento su 23 giorni nell'inverno 2008-2009 e 101 eventi su 26 giorni durante l'inverno 2011-2012. Nell'inverno 2008-2009 sono stati identificati due periodi di attività elevata in dicembre e alcuni giorni in marzo e aprile. La stagione invernale 2011-2012 ha evidenziato un'attività continua di slittamento della neve con cinque distinti periodi di elevata attività da dicembre agli inizi di marzo.

Le temperature dell'aria e della neve sembrano influire sull'attività valanghiva per slittamento, dal momento che nei periodi invernali e primaverili sia la temperatura massima dell'aria sia la temperatura massima della superficie del manto nevoso (legata alle radiazioni a onde lunghe in uscita) hanno evidenziato differenze molto significative tra i giorni con valanghe e i giorni senza valanghe (Fig. 2). In inverno, le temperature dell'aria in oltre il 75% dei giorni con valanghe si sono mantenute al di sotto di 0 °C, mentre le temperature dell'aria sono salite sopra 0 °C in metà dei giorni con valanghe in primavera. Le temperature della superficie del manto nevoso si sono mantenute ben al di sotto di 0 °C in inverno. Tuttavia, nella metà dei giorni con valanghe in primavera le temperature della superficie del manto hanno raggiunto 0 °C. I regimi di temperatura nei giorni con valanghe sono risultati notevolmente diversi da quelli rilevati nei giorni senza valanghe. I risultati ottenuti con gli alberi di classificazione hanno sottolineato l'importanza delle temperature dell'aria e della superficie del manto nevoso. Per i periodi invernali specificati la temperatura massima dell'aria è risultato il parametro più importante, seguito dal dato della sommatoria di neve fresca in 5 giorni (Fig. 3).

Sotto, dall'alto in basso: Fig. 2 - Boxplot di (a) temperatura massima dell'aria e (b) temperatura massima della superficie del manto nevoso per i periodi invernali nei giorni con valanghe (Ad) e nei giorni senza valanghe (nAd). Boxplot della (c) temperatura massima dell'aria e (d) temperatura massima della superficie del manto nevoso per i periodi primaverili specificati di entrambe le stagioni invernali 2008-2009 e 2011-2012. I set di dati non sono bilanciati, poiché in ambedue le stagioni invernali sono stati monitorati più giorni senza valanghe che giorni con valanghe. La linea orizzontale grigia contrassegna il livello 0 °C.

Fig. 3 - Albero di decisione per i periodi invernali specificati di ambedue le stagioni invernali 2008-2009 e 2011-2012.



La temperatura massima dell'aria divide il set di dati con un valore soglia di $-2,6$ °C nei giorni con valanghe (temperature più elevate) e nei giorni senza valanghe (temperature uguali o inferiori). I giorni senza valanghe vengono poi ulteriormente classificati in base alla sommatoria di neve fresca caduta in 5 giorni nei giorni con valanghe (più di 80 cm) e nei giorni senza valanghe (80 cm o meno di 80 cm di neve fresca in cinque giorni). I box in Fig. 3 indicano la percentuale di giorni con valanghe osservati (grigio scuro) e giorni senza valanghe (grigio chiaro) per ogni nodo finale. Le temperature elevate dell'aria e il forte caricamento del manto nevoso sembrano favorire il verificarsi di valanghe da slittamento in inverno. L'albero di classificazione per i periodi primaverili specificati, suddivide il set di dati in base alla temperatura media dell'aria nei giorni con valanghe ($> -0,4$ °C) e nei giorni senza valanghe ($\le -0,4$ °C).

In primavera, le elevate temperature medie dell'aria sembrano favorire il processo di slittamento della neve come unico impor-

tante parametro meteo. Le foreste casuali hanno nuovamente evidenziato come la significatività delle temperature dell'aria e della superficie del manto nevoso siano i parametri più importanti in inverno e primavera (Tab. 2). Oltre alle temperature dell'aria e della superficie del manto nevoso (legate alle radiazioni a onde lunghe in uscita), la quantità di neve fresca, la variazione di altezza della neve e l'irraggiamento a onde corte in entrata sono risultati i parametri meteo più importanti legati alle valanghe da slittamento della neve nei periodi invernali. Le temperature della superficie del manto nevoso e dell'aria e le variazioni di altezza della neve e di umidità relativa hanno invece influito molto sullo slittamento della neve nei periodi di primavera.

Discussione sui parametri meteo statisticamente significativi nei periodi invernali

In entrambe le stagioni invernali, le temperature dell'aria e della superficie del manto nevoso sono risultate più elevate nei giorni con valanghe che nei giorni senza valanghe (Fig. 2). Nei periodi invernali non si è avuta formazione d'acqua liquida in superficie poiché le temperature del manto nevoso raggiungevano appena 0 °C, il che suggerisce che non si è avuta percolazione d'acqua di fusione nel manto nevoso. La presenza d'acqua all'interfaccia neve-suolo era probabilmente da porre in relazione con il processo di fusione della neve a contatto con il terreno caldo oppure con la presenza d'acqua che sale dal terreno e dall'erba per effetto della capillarità (Mitterer e Schweizer, 2012).

L'analisi statistica ha dimostrato come una grande quantità di neve fresca sia altamente correlata ai giorni con valanghe. La neve fresca accresce il carico sul manto nevoso, il che si traduce in elevate velocità di assestamento e una maggiore attività di slittamento e reptazione del manto nevoso. Le forze presenti lungo il pendio crescono con l'aumentare del carico sul manto nevoso (Höllner, 2001; In der Gand e Zupančič, 1966). Il movimento del e all'interno del manto nevoso potrebbe turbare l'equilibrio di forze e portare a un distacco della neve

che sostiene la zona di scorrimento, che conseguentemente potrebbe staccarsi in forma di valanga per slittamento (Bartelt et al., 2012).

Gli incrementi delle temperature dell'aria e della superficie del manto sono legati ai giorni con nevicate, e dunque è ovvio che questi tre parametri indichino un'elevata attività di slittamento della neve. Giorni molto freddi senza nevicate hanno invece evidenziato un'attività di slittamento marginale. Il forte influsso dell'irraggiamento a onde corte in entrata è indicativo di come le valanghe da slittamento si verificano di frequente nei giorni soleggiati in inverno. Clarke e McClung (1999) hanno supposto che le radiazioni a onde corte riscaldino le rocce sottostanti il manto nevoso, con conseguente fusione dello strato di neve basale. L'acqua presente sull'interfaccia neve-suolo riduce l'attrito sul terreno del manto nevoso, con conseguenti maggiori velocità di slittamento (McClung e Clarke, 1987). Le ipotesi avanzate da Clarke e McClung (1999) si adattano a diverse zone del Dorfberg (Fig.1). Questo risultato è fortemente legato alla topografia locale dell'area di studio e potrebbe non essere generalizzato.

Discussione sui parametri meteo statisticamente significativi nei periodi primaverili

Le temperature dell'aria e della superficie del manto nevoso (derivate dall'irraggiamento a onde lunghe in uscita) si sono rivelate importanti ai fini del moto di slittamento della neve nei periodi primaverili (Fig. 2). Le temperature indicano un manto nevoso con 0 °C o una superficie della neve prossima a 0 °C nei giorni con valanghe. Potrebbe essersi verificato un processo di fusione con conseguente infiltrazione di acqua nel manto nevoso (Mitterer e Schweizer, 2012). Questo risultato è in linea con le osservazioni di Clarke e McClung (1999), che hanno messo in correlazione periodi di elevate temperature dell'aria a giorni con elevate velocità di slittamento della neve. Peitzsch et al. (2012) hanno identificato il processo di assestamento del manto nevoso come un altro importante parametro.

In questo lavoro l'approccio multivariato delle foreste casuali ha sottolineato l'importanza della variazione dell'altezza del manto nevoso (Tab. 2). Poiché la direzione di variazione dell'altezza della neve non si ottiene in modo inequivocabile dalle foreste casuali, è difficile analizzare questo aspetto. Da un lato una variazione dell'altezza della neve potrebbe dipendere dalla neve fresca che, come sopra discusso, comporta un maggiore carico e dunque un movimento all'interno del manto nevoso che può influire sull'equilibrio delle forze tra la zona di slittamento e il piede del lastrone sottostante (Bartelt et al., 2012). Dall'altro lato l'assestamento del manto nevoso potrebbe essere responsabile di una variazione dell'altezza della neve. Il processo di assestamento spesso procede di pari passo con la fusione della neve, e dunque può accadere che l'acqua risultante percoli attraverso il manto nevoso e riduca l'attrito all'interfaccia neve-suolo (Peitzsch et al., 2012). In primavera sembrano essere più probabili periodi con un più accentuato assestamento del manto nevoso.

Separazione di periodi invernali e primaverili

La differenza in fatto di parametri importanti fra periodi invernali e primaverili denota la presenza di diversi processi fondamentali alla base del moto di slittamento della neve. Clarke e McClung (1999) e Mitterer e Schweizer (2012) condividono questo punto di vista. Clarke e McClung (1999) hanno suddiviso le valanghe da slittamento da loro osservate in *eventi con basse temperature* ed *eventi con alte temperature*. Nel presente lavoro le valanghe da slittamento sono state classificate di conseguenza, separando le stagioni invernali in periodi invernali e periodi primaverili. In inverno (*eventi con basse temperature*), l'acqua non è percolata attraverso il manto nevoso per la presenza di un manto nevoso sempre freddo (superficie manto nevoso ≤ 0 °C) e asciutto. L'acqua presente all'interfaccia neve-suolo è provenuta da altre fonti (Mitterer e Schweizer, 2012). In primavera (*eventi con alte temperature*), l'acqua di fusione si è infiltrata nel manto nevoso. L'acqua di fu-

Inverno	Primavera
Temperatura massima aria	Radiazioni onde lunghe in uscita
Sommatoria 5 giorni di neve fresca	Temperatura minima dell'aria
Differenza altezza della neve in 24 h	Differenza temperatura aria in 24 h
Radiazioni onde corte in entrata	Differenza altezza della neve in 72 h
Radiazioni onde lunghe in uscita	Umidità relativa media

© AINEVA

sione è probabilmente percolata attraverso il manto nevoso e ha formato una pellicola d'acqua sottile all'interfaccia neve-suolo che ha ridotto l'attrito tra zona di slittamento e terreno (Clarke e McClung, 1999).

CONCLUSIONE

Abbiamo preso in esame l'attività valanghiva per slittamento della neve a Dorfberg sopra Davos (Alpi svizzere orientali). L'influenza dei parametri meteorologici è stata esaminata con metodi statistici univariati e multivariati, tra cui gli alberi di decisione e le foreste casuali. Sono state eseguite analisi per i due periodi, invernale e primaverile, sulla base della supposizione che nei due periodi vi sono processi diversi che causano il moto di slittamento della neve (Clarke e McClung, 1999). I risultati avvalorano tali ipotesi, dal momento che diversi parametri meteo sembrano essere importanti nei due periodi. In inverno, i parametri più importanti sono la temperatura dell'aria, la sommatoria della neve fresca e l'irraggiamento solare (onde corte). In primavera, hanno un ruolo importante la temperatura della superficie della neve, la temperatura dell'aria e la variazione di altezza della neve. Lo strato d'acqua sottile (In der Gand e Zupančič, 1966) presente all'interfaccia neve-suolo ha origini diverse per i due periodi. In inverno (*eventi con basse temperature*), si ha la formazione di una pellicola d'acqua in corrispondenza dello strato di neve basale del manto nevoso freddo e asciutto a causa della fusione dello strato di neve basale a contatto con il terreno caldo o per l'afflusso d'acqua che sale dal terreno e filtra nel manto nevoso per gli effetti della capillarità (Mitterer e Schweizer, 2012). In primavera (*eventi con alte temperature*), l'acqua di fusione s'infiltra e percola attraverso il manto nevoso, fino a raggiungere l'interfaccia neve-suolo (Clarke e McClung, 1999). Il fatto che vi siano diverse fonti d'acqua indica chiaramente la presenza di

diversi processi che causano lo slittamento della neve nei due diversi periodi.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo Matthias Braun e Jürg Schweizer per averci supportato nello svolgimento del presente lavoro.

Bibliografia

- Bartelt, P., Feistl, T., Bühler, Y. and Buser, O., 2012. Overcoming the stau-chwall: Viscoelastic stress redistribution and the start of full-depth gliding snow avalanches. *Geophysical Research Letters*, 39(16).
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.
- Clarke, J.A. and McClung, D.M., 1995. Correlation of fast rates of snow glide with full-depth avalanche occurrence, International Snow Science Workshop ISSW 1994. ISSW 1994 Organizing Committee, Snowbird UT, USA, Snowbird, Utah, USA, pp. 405-407.
- Clarke, J.A. and McClung, D.M., 1999. Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding. Coquihalla, British Columbia, Canada. *Journal of Glaciology*, 45(151): 539-546.
- Feick, S., Mitterer, C., Dreier, L., Harvey, S. and Schweizer, J., 2012. Automated detection and mapping of glide-snow events using satellite based optical remote sensing and terrestrial photography, International Snow Science Workshop ISSW 2012, Anchorage AK, USA, pp. 603-609.
- Höller, P., 2001. Snow gliding and avalanches in a south-facing larch stand, Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models (Symposium at 6th IAHS Scientific Assembly). International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, Oxfordshire, U.K., Maastricht, The Netherlands, pp. 355-358.
- Hothorn, T., Hornik, K. and Zeileis, A., 2006. Unbiased Recursive Partitioning: A Conditional Inference Framework. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 15(3): 651-674.
- In der Gand, H.R. and Zupančič, M., 1966. Snow gliding and avalanches, Symposium at Davos 1965 - Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches. Int. Assoc. Hydrol. Sci., Wallingford, UK, pp. 230-242.
- Lackinger, B., 1987. Stability and fracture of the snow pack for glide avalanches. In: B. Salm and H. Gubler (Editors), Symposium at Davos 1986 - Avalanche Formation, Movement and Effects. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, Oxfordshire, U.K., pp. 229-241.
- Liaw, A. and Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2(3): 18-22.
- McClung, D.M. and Clarke, G.K.C., 1987. The effects of free water on snow gliding. *Journal of Geophysical Research*, 92(B7): 6301- 6309.
- Mitterer, C. and Schweizer, J., 2012. Towards a Better Understanding of Glide-Snow Avalanche Formation, International Snow Science Workshop ISSW 2012, Anchorage, AK, USA, pp. 610-616.
- Peitzsch, E.H., Hendrikx, J., Fagre, D.B. and Reardon, B., 2012. Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA. *Cold Regions Science and Technology*, 78: 73-81.
- Stemberis, J. and Rubin, C., 2005. Glide avalanche detection on a smooth rock slope, Snoqualmie Pass, Washington. In: K. Elder (Editor), International Snow Science Workshop ISSW 2004, Jackson Hole, WY, USA, pp. 608-610.
- Stemberis, J. and Rubin, C., 2011. Glide avalanche response to an extreme rain-on-snow event, Snoqualmie Pass, Washington, USA. *Journal of Glaciology*, 37(203): 468-474.
- Strobl, C., Boulesteix, A.-L., Kneib, T., Augustin, T. and Zeileis, A., 2008. Conditional Variable Importance for Random Forests, *BMC Bioinformatics*.

Tab. 2 - Importanza della variabile secondo l'analisi delle foreste casuali. I principali parametri meteo sono elencati in ordine discendente.