Prove sperimentali al sito della PUNTA SEEHORE nelle stagioni 2009-2010 e 2010-2011

INTRODUZIONE

Il sito della P.ta Seehore é operativo al 100% dalla stagione 2010-2011, dopo l'installazione dell'ostacolo strumentato per la misura delle forze di impatto delle valanghe, avvenuta nell'estate 2010.

Tuttavia, nella precedente stagione, 2009-2010, sono state effettuate delle prove sperimentali con la misurazione di vari parametri, quali per esempio l'estensione delle valanghe, le caratteristiche del manto nevoso in zona di distacco e le caratteristiche del deposito.

Nel paragrafo successivo vengono presentate brevemente tutte le prove sperimentali svolte nelle due stagioni 2009-2010 e 2010-2011 (tabella di Fig.1), in seguito viene descritta in dettaglio la prova sperimentale del 5 marzo 2011, dalla sua organizzazione logistica all'analisi critica dei dati registrati, come esempio reale delle attività che si svolgono nel sito e dell'utilizzo dei dati raccolti.

Nella pagina a fianco, eventi valanghivi di metà marzo 2011 al sito della P.ta Seehore (fonte: Arnoldo Welf).

PROVE SPERIMENTALI NELLE STAGIONI 2009-2010 E 2010-2011

Le valanghe distaccatesi nel sito della P.ta Seehore durante le due stagioni considerate sono state in totale 30 (11 nel 2009-2010 e 19 nel 2010-2011), tra valanghe spontanee e valanghe provocate.

La tabella di Fig. 1 riassume le caratteristiche principali delle prove realizzate, sia che abbiano avuto esito positivo sia negativo, riportando anche le date dei distacchi spontanei per una visione più completa dell'attività valanghiva del sito.

Stagione invernale 2010-2011

Meritano maggior approfondimento le prove realizzate durante la stagione 2010-2011, quando il sito sperimentale era operativo al 100%. La Figura 2 mostra l'estensione delle valanghe distaccate in tale stagione, e perimetrate tramite GPS nella loro zona di scorrimento e deposito.

In generale, le valanghe distaccate sono di piccola/media dimensione, di neve asciutta, con uno sviluppo consistente della componente polverosa (evento del 7 dicembre 2010). In alcuni casi si sono verificati eventi caratterizzati da neve a densità elevata (evento del 19 marzo 2011) o di neve umida (evento del 4 novembre 2010). Il volume al distacco non ha superato in genere i 300-400 m^3.

L'altezza di flusso della parte densa è stata esigua, stimata dai video non superiore al metro, ma ha raggiunto anche altezze maggiori in corrispondenza dell'ostacolo arrivando ai 140 cm (evento del 5 marzo 2011), a causa del processo di risalita del flusso sull'ostacolo.

Vengono qui rapidamente descritti due eventi caratteristici del sito di P.ta Seehore:

- il 7 dicembre 2010 si è staccata una valanga di medie dimensioni, tipicamente

Fig. 1 - Eventi valanghivi registrati nelle stagioni 2009-2010 e 2010-2011 al sito della P.ta Seehore.

DATA	VALANGA	METODO TIRO	N° TIRI	ESITO TIRI	TIPO VALANGA	DIMENSIONE*
Stagione 2009-2010						
4-12-2009	provocata	Carica Vassale	1	sì	densa	piccola
26-12-2009	spontanea					
6-02-2010	-	DaisyBell	1	no		
20-02-2010	provocata	Carica Vassale	2	sì	densa	piccola
27-03-2010	provocata	DaisyBell	3	sì	densa	media
31-03-2010	provocata	Carica Vassale	2	sì	mista	piccola
4-04-2010	spontanea					
5-04-2010	-	Carica Vassale	2	no		
28-05-2010 (?)	spontanea					
Stagione 2010-2011						
04-11-2010 (?)	spontanea					
24-11-2010	provocata	DaisyBell	3	2 no, 1 sì	densa	piccola
7-12-2010	provocata	DaisyBell	1	sì	mista	media
27-12-2010	provocata	Carica Vassale	1	sì	densa	scaricamento
16-02-2011	spontanea					
17-02-2011	provocata	Carica Vassale	1	sì	densa	scaricamento
1-03-2011	provocata	DaisyBell	2	sì	mista	piccola
5-03-2011	provocata	DaisyBell	3	2 sì, 1 no	mista	piccola
18-03-2011	provocata	Carica Vassale	3	2 no, 1 sì	densa	scaricamento
19-03-2011	provocata	Carica Vassale	2	sì	densa	media
20-03-2011	provocata	Carica Vassale	7	3 sì, 4 no	densa	piccola
7-04-2011	provocata	DaisyBell	2	1 sì, 1 no	densa	media

** Riferimento alla classificazione dei EAWS del 2003*

© AINEVA

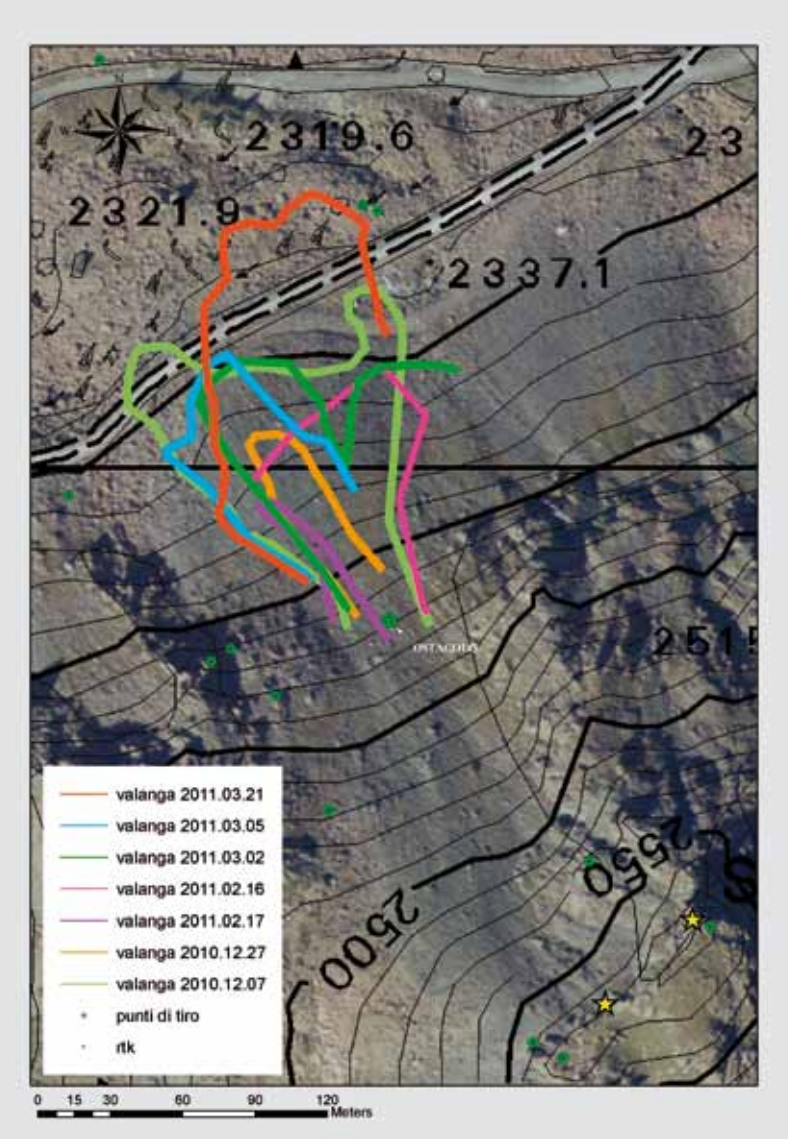


Fig. 2 - Estensione delle valanghe distaccate nel sito sperimentale nella stagione 2010-2011 rilevata tramite GPS nelle zone di scorrimento ed accumulo. I punti verdi indicano i riferimenti topografici utilizzati per la georeferenziazione dei rilievi laser scanner e delle ortofotoimmagini, nonché la posizione dell'ostacolo, mentre le stelle gialle indicano i punti principali di tiro.

invernale, costituita da neve a debole coesione asciutta (densità al distacco intorno a 100 kg/m^3) che ha sviluppato un'importante componente polverosa. In tale occasione, come in altre (evento del 1 marzo 2011), i processi di erosione hanno contribuito alla maggior mobilitazione della massa nevosa che, sebbene al distacco non superasse i 400 m^3, ha di fatto attraversato la pista "Collegamento Gabiet" ostruendola per ca. 40 m con un'altezza di deposito superiore a 3 m. L'evento descritto ha inoltre generato due distacchi secondari a quota più bassa che hanno anch'essi contribuito all'incremento della massa nevosa totale mobilitata. Le analisi dei video e dei dati registrati dalle celle di carico dell'ostacolo hanno permesso di stimare un'altezza di flusso maggiore ad 1 m nella zona di scorrimento, con due picchi di forza ben distinti a circa 3 s di intervallo, di 14.2 kN e 9.6 kN, agenti sulla superficie di 1m^2;

- a metà-fine marzo, dopo tre giorni consecutivi di condizioni meteorologiche avverse, sono state provocate numerose valanghe di media dimensione, da zone di distacco poste a quote inferiori rispetto a quelle solite per il sito del Seehore (Fig. 3).

I distacchi sono avvenuti per lo più in corrispondenza di accumuli da vento, di spessore anche considerevole, presenti prevalentemente al di sotto dei 2500 m di quota.

In data 19 marzo 2011, si è avuto il distacco di una valanga primaverile, radente: il volume della massa nevosa, stimato in 800 m^3 in zona di distacco, è notevolmente aumentato in fase di scorrimento ed il flusso nevoso ha oltrepassato la pista "Collegamento Gabiet". La valanga è stata di tipo denso, con densità fino a 340 kg/m^3, ben superiori alle densità riscontrate nelle valanghe invernali registrate al sito della P.ta Seehore.

Queste due valanghe devono essere considerate diversamente nella valutazione delle forze d'impatto sull'ostacolo, poiché presentano una dinamica differente con regimi di flusso che devono quindi essere descritti da leggi fisiche differenti.

ESPERIMENTO DEL 5 MARZO 2011

In questo paragrafo vengono presentate tutte le attività svolte in occasione dei rilievi del 5 marzo 2011 ed i risultati ottenuti dalla successiva analisi dei dati raccolti in campo. Gli eventi del 5 marzo 2011 (Fig. 1) possono essere considerati come tipologia prevalente di valanghe distaccate sul pendio settentrionale della P.ta Seehore.

Quadro nivo-meteorologico dell'evento, sistema di allerta e organizzazione dell'esperimento.

A partire dalla giornata di giovedì 3 marzo 2011, un'area depressionaria sul Mediterraneo occidentale dirige un flusso umido perturbato da SE verso le Alpi, causando precipitazioni nevose oltre 500-700 m slm anche sulla Regione Valle d'Aosta; la nevicata si esaurisce già nella tarda mattinata del 4 marzo 2011.

Il Bollettino Valanghe della Regione Autonoma Valle d'Aosta, emesso in data 4 marzo, riporta quantitativi massimi di neve fresca, pari a 30-50 cm a 2000 m di quota, nelle valli di Gressoney e Champorcher. La nevicata è accompagnata da venti deboli/moderati da E-SE con la possibile conseguente formazione di lastroni anche compatti sui pendii W e NW, già sede d'accumulo eolico nei giorni precedenti.

Nel Bollettino è indicato un pericolo valanghe pari a 3-marcato su tutta la Regione, con probabilità di numerose valanghe spontanee di neve a debole coesione, di piccole e talvolta medie dimensioni, dai pendii molto ripidi a tutte le esposizioni.

Il distacco provocato di valanghe a lastroni, anche di medie dimensioni, è dato come possibile già al passaggio del singolo sciatore (debole sovraccarico), in particolare oltre i 2200-2400 m slm ed alle esposizioni occidentali.

Alle ore 8:30 del 4 marzo, quando la stazione meteorologica automatica "Gabiet" (2379 m slm) indica 25 cm di neve fresca (Fig. 4), scatta lo stato di allerta del gruppo DynAval per una possibile imminente nuova prova sperimentale.

Il Direttore delle piste del comprensorio sciistico, nonché responsabile dei distacchi anche per il sito della P.ta Seehore, Arnoldo Welf, viene consultato e, dopo un suo opportuno sopralluogo sul posto, atto a verificare le condizioni relative alla possibile presenza di accumuli nella zona di distacco, la prova sperimentale al sito della P.ta Seehore viene fissata per l'indomani, sabato 5 marzo 2011.

La mattina dell'esperimento, alle ore 6:30, due tecnici esperti di laser-scanner risalgono con un gatto delle nevi e raggiungono le postazioni per effettuare il rilievo pre e post evento. Il resto del gruppo si ritrova alle ore 7:30 alla partenza della cabinovia Staffal-Gabiet, risale con la prima corsa di servizio utilizzata dagli operatori

Fig. 3 - Bonifica del sito della P.ta Seehore a metà marzo del 2011 (Fonte: Arnoldo Welf).

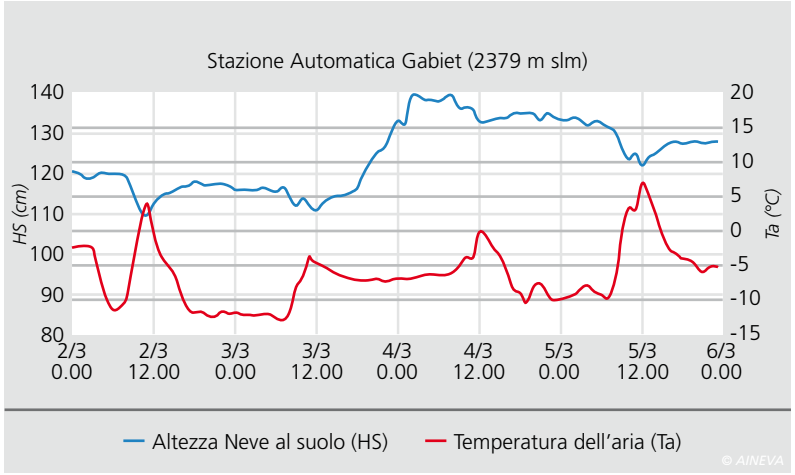


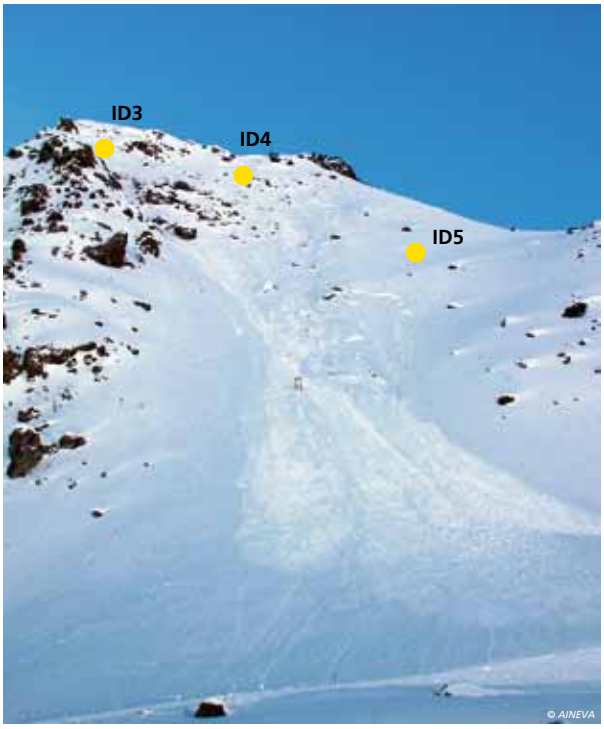
Fig. 4 - Andamento dell'altezza della neve al suolo e della temperatura dell'aria nel periodo compreso tra le ore 0.00 del 3 marzo 2011 e le ore 0.00 del 6 marzo 2011 (Fonte: Ufficio Centro Funzionale della Regione Autonoma Valle d'Aosta).

della Monterosa Ski e si porta nella postazione di ripresa video.

Descrizione della valanga

L'elicottero utilizzato dalla Monterosa Ski, equipaggiato con sistema di distacco artificiale DaisyBell, giunge in loco alle ore 8:45 ed esegue tre tiri nel sito sperimentale (Fig. 5), con esito positivo nei punti ID3 e ID4 e negativo nel punto ID5 (rif. Fig. 2 art. 3). Si staccano due valanghe a lastroni di piccola dimensione, che durante il movimento verso valle sviluppano anche una componente polverosa.

Sotto, fig. 5 - Visione generale delle due valanghe con indicazione dei punti di tiro del sito.



La prima inoltre provoca un ulteriore distacco in sinistra orografica a quota più bassa, che va ad unirsi al flusso principale. Entrambe impattano contro l'ostacolo, fermandosi a monte della pista "Collegamento Gabiet".

In Figura 6 la linea azzurra mostra il perimetro della valanga, rilevato tramite GPS nelle zone di scorrimento ed accumulo.

Rilievi laser-scanner pre e post evento

I rilevamenti laser scanner sono stati eseguiti in due fasi differenti, in particolare nella fase di pre e post evento. I dati laser scanner pre-evento sono stati acquisiti mediante un sensore Riegl LMS-Z420 a doppio distanziometro laser (CI1 e CI3R) con portata massima di 1500 m. La digitalizzazione è avvenuta da un punto di ripresa particolarmente favorevole che ha permesso la descrizione dell'intero versante. Dati i tempi lunghi per effettuare questo tipo di acquisizione a distanza, lo strumento è stato posizionato su un pilastrino in cemento a centramento forzato in modo tale da non essere soggetto ai classici movimenti dovuti al cedimento del terreno innevato o ghiacciato. Il dato acquisito consiste in una nuvola di punti ad elevata densità (ca. 1 punto ogni 5 cm) e ad elevata precisione (ca. 1.5 cm). Contestualmente alle fasi di rilievo del modello tridimensionale sono state acquisite anche un set di immagini digitali con macchina fotografica fullframe Canon Eos 5D da 22 Mpx con obiettivi calibrati da 24 e 50 mm dell'intero versante.

L'integrazione dei due sensori, ed in particolare il calcolo della posizione e dell'orientamento della macchina fotografica rispetto al sensore laser scanner, ha consentito di colorare la nuvola di punti con i colori reali del sito.

I rilevamenti sono stati conclusi ca. 15 min prima del distacco della valanga.

Tutti i rilevamenti sono stati ripetuti con la medesima tecnologia alla fine dell'evento valanghivo, utilizzando lo stesso strumento e le stesse risoluzione, precisioni e caratteristiche di scansione. In aggiunta, nel rilevamento del post evento, sono stati acquisiti tre modelli supplementari con un sensore laser scanner Riegl VZ400 avente precisione 5 mm e portata 400 m equipaggiato con camera digitale fullframe Nikon D700 da 12 Mpx con obiettivo calibrato di focale 14 mm. La digitalizzazione effettuata con questo sensore è stata aggiunta a quella effettuata col sensore LMS-Z420 per descrivere in modo più dettagliato il perimetro della valanga.

La scelta di questo secondo sensore è dovuta alla necessità di acquisire il fronte della valanga utilizzando un treppiede posizionato sul terreno o manto nevoso o su rocce affioranti. Su strati nevosi, per quanto si posizioni opportunamente il treppiede, sono da considerare effetti di cedimento o spostamento lenti del treppiede e quindi del sensore. Questo effetto è dovuto al riscaldamento al sole dell'attrezzatura e del treppiede che causa scioglimento del manto nevoso, o del terreno ghiacciato. Per minimizzare questo effetto è stato scelto uno strumento in grado di misurare il fronte ad altissima velocità, perdendo però in portata. L'effetto dello spostamento dovuto allo scioglimento è stato comunque calcolato e corretto nelle fasi di elaborazione dei dati.

Oltre al rilevamento laser scanner è stato effettuato un rilevamento GPS di alcuni punti di riferimento per la georeferenziazione dei dati tridimensionali.

I dati laser scanner sono stati elaborati nei

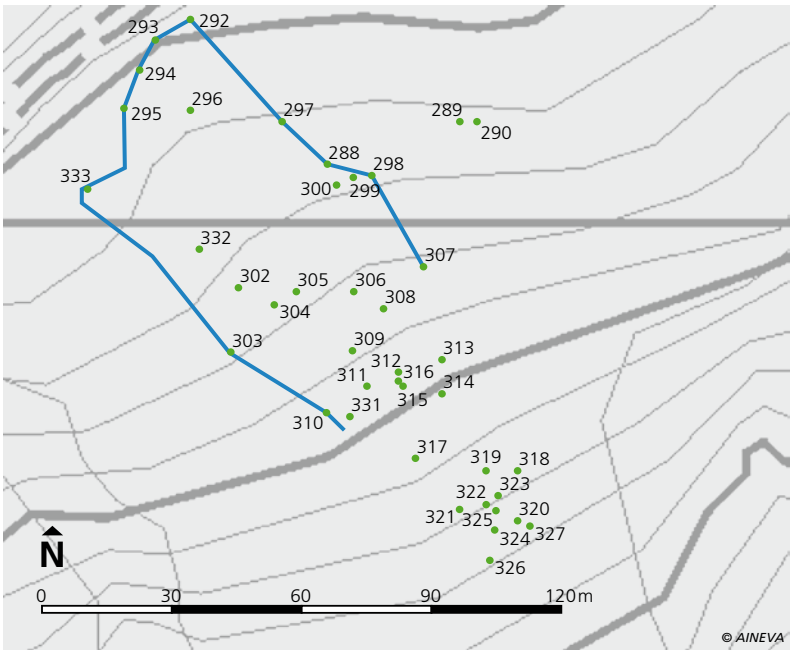


Fig. 6 - Rilievo tramite GPS del perimetro delle valanghe del 5 marzo 2011. I punti indicano dove è stata misurata l'altezza complessiva della neve al suolo con il valore riportato in cm.

giorni successivi al rilevamento mediante una metodologia di calcolo sviluppata dalla società Ad Hoc 3D Solutions. I dati sono stati filtrati dal rumore di acquisizione e da eventuali errori di misura dovuti a riverbero, multi-riflessioni e ad elementi estranei (come gli sciatori nelle fasi post evento). Le scansioni eseguite da treppiede posizionato su manto nevoso sono state controllate e corrette dagli errori di cedimento causato dal riscaldamento e scioglimento della neve. I dati sono inoltre stati allineati secondo un unico sistema di riferimento e sono stati espressi, calcolandone le eventuali deformazioni, nei sistemi di riferimento necessari allo studio, quali un sistema di riferimento locale non deformato, che garantisce la correttezza delle misure di aree, volumi e distanze della valanga, ed i sistemi di riferimento cartografici UTM WGS84 e UTM ED50 per l'inserimento dei dati nel GIS regionale. Tutti i sistemi di riferimento cartografici, per loro definizione, sono una rappresentazione bidimensionale di un ambiente tridimensionale complesso. Per questo motivo sono rappresentazioni che rispetto alla realtà sono sempre deformate nelle componenti planimetriche. Per il sito in oggetto, posizionato ad una quota di ca. 2400 m slm., le deformazioni cartografiche sono di ca. 80 cm per ogni km, quindi spesso non trascurabili nello studio dei volumi e delle aree coinvolti in una valanga, soprattutto se questo è effettuato per la messa in sicurezza delle persone. Questo è il motivo per cui i dati sono stati espressi anche in un sistema di riferimento locale. I dati laser scanner sono stati consegnati nei formati di scambio comuni ed in aggiunta sono stati consegnati con un software di visualizzazione ed uso dei dati di nome Ad Hoc, software sviluppato dalla società omonima. Questo software è stato personalizzato con appositi plugin per la gestione e l'estrazione dai dati delle informazioni utili allo studio nivologico e valanghivo come sezioni, profili, spessori di neve lungo sezioni specifiche, confronti pre-post eventi, misura di differenze di volumi e confronto sezioni pre-post evento per la misurazione dell'erosione e del deposito, confrontabili in campo con i risultati dello straw test (rif. art. 5).

Fig. 7 - Visione della zona di distacco delle due valanghe.

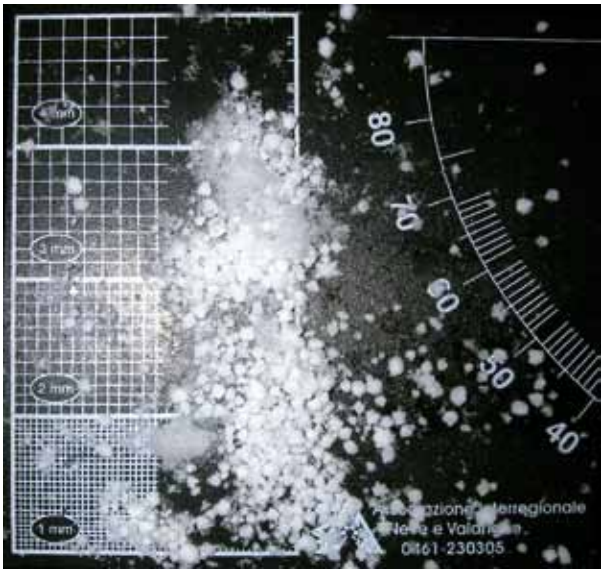
Fig. 8 - Particolare della zona di distacco: si nota lo spessore variabile della frattura.

Riprese video e misure fotogrammetriche dell'evento

Oltre ai rilevamenti laser scanner sono state effettuate alcune riprese video con macchina fotografica fullframe Canon Eos 5D a 22 Mpx con obiettivo calibrato da 24 mm con frequenza video pari a 25 fps.
I video sono stati effettuati durante le fasi di distacco e scivolamento della valanga. I video ottenuti, elaborati mediante tecniche avanzate di videogrammetria, sono stati posizionati e orientati rispetto ai modelli tridimensionali laser scanner.
L'integrazione del modello tridimensionale con il video della valanga permette di misurare la velocità del fronte valanghivo lungo una serie di linee di scorrimento scelte da un esperto. La velocità misurata rappresenta la sola velocità del fronte. Non è possibile infatti misurare la velocità della coda in quanto questa non risulta visibile nel video a causa della componente polverosa che si sviluppa immediatamente dopo il fronte. Oltre alla velocità lungo la linea di scorrimento è possibile conoscere la distanza planimetrica ed il profilo altimetrico del fronte lungo la linea stessa. L'integrazione della videogrammetria con i modelli laser scanner è stata realizzata mediante un apposito plugin del software Ad Hoc che consente di gestire il video ed estrarre le linee e le relative velocità di scorrimento.

Caratterizzazione della zona di distacco

Data la presenza di accumuli da vento in cresta, anche dopo la bonifica, e data la residua possibilità di provocare il distacco di ulteriori lastroni al passaggio con gli sci, si decide, per ragioni di sicurezza, di non recarsi a perimetrare tutta la zona di distacco. Lo spessore del lastrone, variabile lungo la linea di frattura, viene perciò stimato a distanza tra 25 e 60 cm (Fig. 7 e 8).



Sopra da sinistra a destra: fig. 9 - Neve pallottolare osservata nel corso della precipitazione del 4 marzo; fig. 10 - ECT eseguito in zona di distacco a quota 2450 m slm.

Fig. 11 - ECT eseguito in prossimità della frattura a quota 2440 m slm.

Sotto, fig. 12 - Fratture sul lato in sinistra orografica delle due valanghe.

Il profilo è realizzato ad una quota di ca. 2450 m slm, in corrispondenza di una delle corone del lastrone, di spessore pari a ca. 60 cm.

Lo strato superficiale (20 cm) risulta costituito da particelle di precipitazione parzialmente frammentate e, rispetto agli strati sottostanti, è caratterizzato da una maggiore resistenza alla penetrazione e da una densità più elevata, probabilmente perché maggiormente compattato dall'azione eolica.

Inoltre nel primo strato superficiale si ritrovano tracce abbondanti di neve pallottolare di dimensioni intorno ai 3 mm (Fig. 9). A 60 cm di profondità, sotto la spessa coltre di neve recente, si trovano invece forme sfaccettate piene (2 mm di dimensione) ed alla base ca. 30 cm di calici misti a cristalli angolari.

Osservando il profilo, i punti di maggiore discontinuità risultano due: il primo all'interno della neve fresca dove cambiano densità e dimensione delle particelle di precipitazione e il secondo tra lo strato di neve recente e lo strato di cristalli sfaccettati a 60 cm di profondità.

Sono realizzati quattro Extended Column Tests, due in corrispondenza del profilo a quota 2450 m slm (Fig. 10), due a quota 2440 m slm (Fig. 11), in corrispondenza di una frattura formatasi nel manto nevoso indisturbato al passaggio con gli sci, e propagatasi fino all'interno del deposito (Fig. 12). In corrispondenza del profilo i test danno esito negativo.

Al contrario i test eseguiti vicino alla frattura danno esito positivo con la formazione e propagazione della frattura a 60 cm di profondità e conseguente caduta del blocco nella buca (rispettivamente ai colpi n. 6 e n. 16 del test).

I test di stabilità confermano la presenza di una discontinuità più importante, tra lo strato di neve recente e lo strato di cristalli sfaccettati, che rende il manto nevoso debolmente consolidato.

Caratterizzazione delle zone di scorrimento e di deposito

Nella zona di scorrimento, dall'analisi dei filmati, si può notare che le due valanghe

hanno tenuto una larghezza abbastanza costante (maggiore per il primo distacco - intorno ai 20 m, e minore per il secondo) ed hanno entrambe impattato contro l'ostacolo strumentato. Nelle Figure 5 e 13 si nota l'area interessata dalle due valanghe, dove però non è visibile la larghezza della parte nubiforme della valanga, maggiore di quella densa. In zona di accumulo, al termine della prova sperimentale, è difficile distinguere l'accumulo del primo distacco da quello del secondo; dall'analisi dei filmati infatti i loro percorsi si sono sovrapposti già nella zona di scorrimento. Si suppone che la seconda valanga non abbia potuto erodere ulteriormente il manto nevoso fermandosi quindi un po' più a monte della prima. La Figura 6 mostra il perimetro della valanga in zona di scorrimento ed accumulo (linea azzurra) ed i punti dove è stata misurata l'altezza di neve al suolo e dove sono stati valutati l'erosione ed il deposito della massa di neve. I dati registrati in tali punti evidenziano una profondità del manto nevoso in zona di scorrimento e accumulo compresa fra i 55 cm e i 330 cm (spessore massimo misurabile con la sonda).

Rilievi intorno all'ostacolo

L'evento del 5 marzo ha formato a monte dell'ostacolo un deposito che è stato oggetto di numerosi rilievi, anche grazie alla sua particolare forma (Fig. 13) mai verificatasi nel resto della stagione, probabilmente influenzata dal parziale riempimento al di sotto dei traversi a seguito dell'evento del 1 marzo (Fig. 14).

Come mostrato in Figura 15, la neve a monte dell'ostacolo è stata erosa (come conferma la mancanza di una cannuccia a 2.1 m dalla struttura) lasciando una lingua di neve non erosa di larghezza di 30 cm fino ad una distanza di ca. 1 m dal bersaglio, per poi aprirsi a ventaglio (Fig. 16).

A ca. 0.5 m a monte dell'ostacolo, il deposito inizia a risalire la struttura (Fig. 17): in tale zona, la neve risulta maggiormente compattata, come viene confermato dalle misure di densità e dal test della mano (Fig. 15).

Per i primi 30 cm di spessore del deposito,

Fig. 13 - Visione a monte dell'ostacolo della zona di scorrimento delle due valanghe.

Fig. 14 - Deposito a monte dell'ostacolo a seguito dell'evento del 1 marzo 2011.

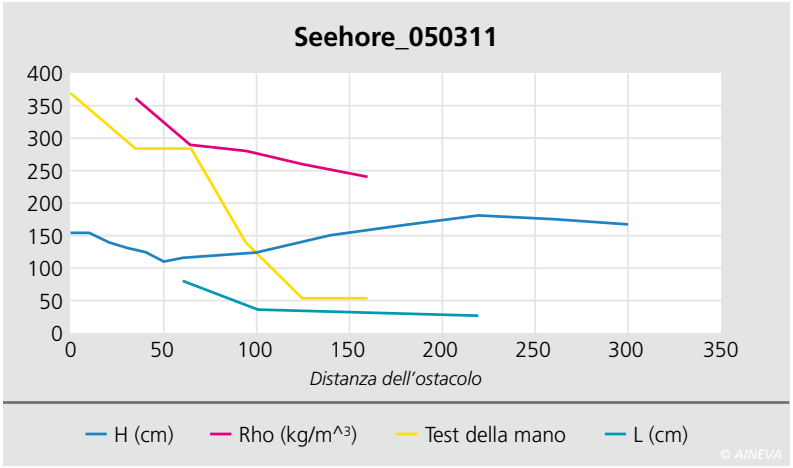


Fig. 15 - Risultati del rilievo eseguito attorno l'ostacolo.

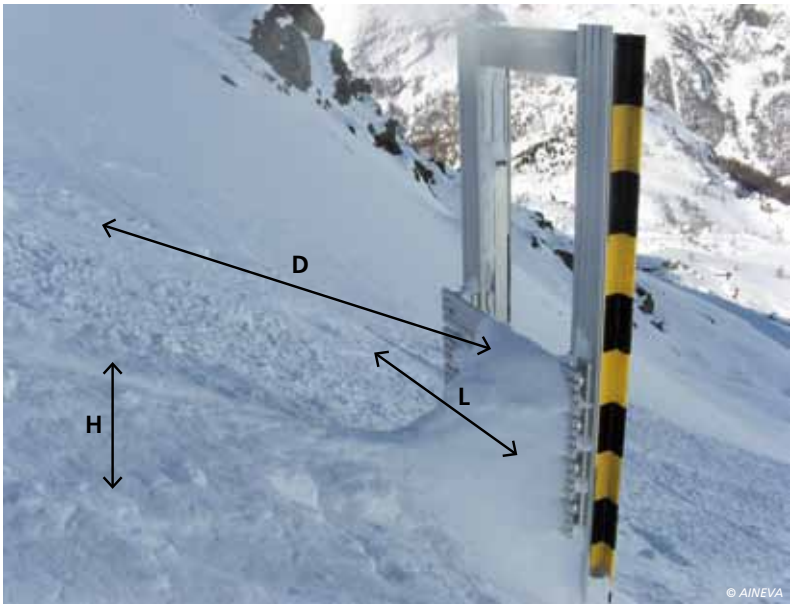


Fig. 16 - Deposito a monte dell'ostacolo.

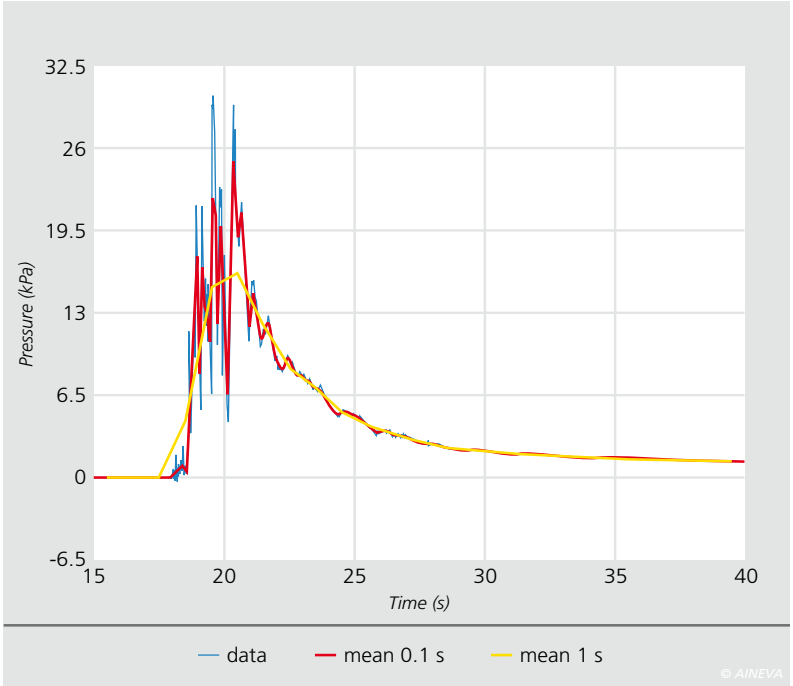


Fig. 17 - Sezione del deposito a monte dell'ostacolo.

Fig. 18 - Variazione della pressione sull'ostacolo nel tempo (dati e valori mediati ogni 0,1 s e 1 s).

la densità rimane pressoché costante al variare dell'altezza. L'analisi dei cristalli (di tipo 2 con dimensione di 1 mm a distanze di 160 e 125 cm e presenza di neve pallottolare, con dimensione maggiore, per distanze inferiori di 95 cm) conferma che la neve è stata erosa a distanze maggiori, mentre è stata depositata in prossimità dell'ostacolo (presenza di uno strato di ca. 20 cm di cristalli tondi al di sopra della neve pallottolare). A valle dell'ostacolo, i valori di densità misurati (360 kg/m^3 nella zona centrale, 250 kg/m^3 dietro i sostegni, 270 kg/m^3 a ca. 1.5 m a valle dei sostegni) fanno ipotizzare che il flusso sia passato al di sotto dei traversi nei primi attimi dell'impatto, compattandone la neve, prima di depositarsi a monte dell'ostacolo. I sostegni hanno invece svolto un ruolo di protezione ("zona d'ombra") immediatamente a valle degli stessi, con una zona d'influenza minore di 1.5 m.

Misura delle forze sull'ostacolo

Da una prima analisi svolta sulla forza totale di impatto, è stato possibile stimare la pressione agente sulla struttura.
In particolare si può notare come il massimo di pressione misurato sia di 30.7 kPa (Fig. 18). Tuttavia, mediando le misurazioni ogni 0.1 s o 1.0 s, tale valore decresce a 25.4 kPa e a 16.5 kPa rispettivamente. Una possibile spiegazione della vasta fluttuazione dei valori risiede nella natura di saltazione/sospensione della massa impattante, essendo la valanga di tipo misto con un notevole sviluppo della componente polverosa. Si noti infine come il fronte della valanga abbia valori maggiori di pressione rispetto alla coda.

Simulazioni di dinamica delle valanghe

L'evento del 5 marzo è stato inoltre oggetto di simulazioni numeriche utilizzando il modulo valanghe del programma RAMMS, sviluppato dal WSL-SLF per la simulazione numerica di valanghe dense (Christen et al, 2008). I parametri di input sono stati il DEM dell'area con risoluzione a 2 m, l'altezza e l'area di distacco come stimate dai rilievi in campo e dall'analisi dei filmati e delle foto, i coefficienti di attrito dinamico e turbolento, i parametri di erosione del manto nevoso e quelli legati alla random kinetic energy (Buser and Bartelt, 2009). Essendo il programma ben calibrato per valanghe estreme, ma meno testato ed ancora in fase di sviluppo per valanghe frequenti di piccola dimensione (tema di ricerca del progetto transfrontaliero Italia-Svizzera 2007-2013 STRADA), sono state svolte diverse simulazioni variando i parametri di input in modo da riuscire a descrivere l'evento. Questa back-analysis ha portato alla scelta di parametri di input che hanno permesso di riprodurre realisticamente la distanza di arresto e la forma

del deposito, mentre le velocità modellate da RAMMS risultano sempre minori di quelle calcolate analizzando le immagini della valanga in moto dell'evento specifico. Ulteriori simulazioni verranno svolte, considerando anche i dati di erosione e deposito ricavati dai rilievi laser scanner, per riprodurre completamente l'evento e non solo le altezze di flusso.

Anche la stessa interazione con l'ostacolo è stata simulata numericamente con il software COMSOL Multiphysics (rif. art. 6) utilizzando la versione 2D nel piano del pendio, semplificando l'ostacolo ad un rettangolo. I parametri di input utilizzati sono la velocità di impatto, la densità e la viscosità del flusso nevoso. Considerando una sezione che intecetta la posizione dell'ostacolo, è stata stimata una velocità di ca. 18 m/s grazie alla procedura descritta precedentemente.

Data la natura mista della valanga, è stato considerato il valore di densità ρ pari a 28 kg/m^3, inferiore ai 270 kg/m^3 misurati in zona di distacco, ottenuto da un'analisi a ritroso grazie alla relazione $p=0{,}5Cd\ \rho v^2$ che lega pressione p, velocità v, densità ρ e coefficiente di forma C_d. Per la viscosità μ, non misurabile direttamente in sito, si è utilizzato il valore di letteratura pari a $\mu = 2{,}1\ \rho$ (Kern et al., 2004). I valori delle pressioni risultanti dalla simulazione risultano essere in accordo con i valori di pressione misurati sperimentalmente.

Si è inoltre notato come la presenza dell'ostacolo influenzi la velocità della valanga, facendola diminuire fino ad annullarsi a monte dello stesso.

Ipotizzato il meccanismo di deposito per una velocità inferiore ai 0.5 m/s (Bovet et al, 2011) e modificando la forma dell'ostacolo per tenere conto della neve depositata (Fig. 19), è stato possibile ricostruire il cuneo di neve creatosi a monte dell'ostacolo. Esso è assimilabile ad un triangolo avente un'altezza di ca. 55 cm, paragonabile ai 50 cm misurati sperimentalmente. Le simulazioni numeriche confermano inoltre il rapporto tra i coefficienti di forma (C_d) per la struttura rettangolare iniziale e triangolare finale proposti in letteratura.

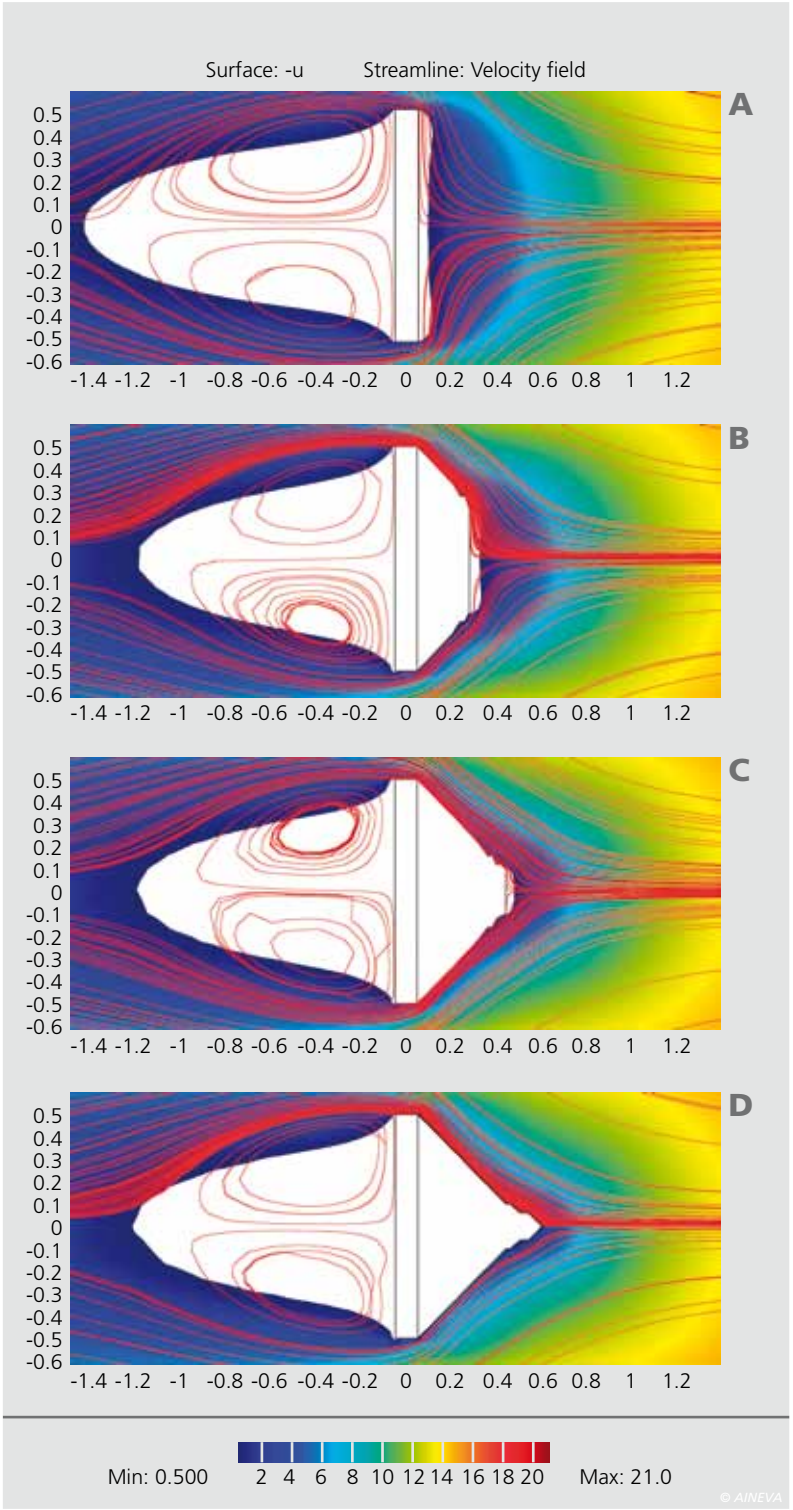


Fig. 19 - Alcuni dei diversi passaggi svolti per ottenere il deposito triangolare finale (la valanga impatta da destra sull'ostacolo). La zona bianca indica una velocità inferiore a 0,5 m/s nella quale la neve si deposita. Si notino anche le linee di flusso.

Bibliografia

- Buser, O. and P. Bartelt. 2009. Production and decay of random kinetic energy in granular snow avalanches. J. Glaciol., 55(189), 3–12.
- Christen, M., J. Kowalski, P. Bartelt and A. Stoffel. 2008. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. In Proceedings of the International Snow Science Workshop, 21–27 September 2008, Whistler, British Columbia, Canada. Whistler, B.C., International Snow Science Workshop, 709–716.
- Kern, M., Tiefenbacher, F., McElwaine, J.N., 2004 The rheology of snow in large chute flows. Cold Regions Science and Technology, 39, 181-192
- Bovet, E., Chiaia, B., Frigo, B. (2011) Modelling and testing of avalanche impact on structures. In Proceedings of the AIMETA Congress, 12-15 September 2011, Bologna.