

# SNOW

## Modello numerico del manto nevoso

**Esperienze compiute in  
Alto Adige nell'inverno  
2004 - 2005**

**Norbert Raderschall,  
Christoph Oberschmied,  
Fabio Gheser**

Ufficio Idrografico  
Provincia Autonoma di Bolzano

**Michael Lehning**

Istituto Federale per lo studio  
della neve e delle valanghe  
Davos (CH)

Durante l'inverno 2004/05, nell'ambito di un progetto di test, presso il Servizio Prevenzione Valanghe dell'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano - Alto Adige Südtirol, si è impiegato per la prima volta un modello numerico del manto nevoso, in tre distinti siti.

Lo scopo era, seguire l'evoluzione del manto nevoso nel corso dei mesi invernali e ricavare delle informazioni circa il pericolo di valanghe. Si è impiegato il modello del manto nevoso denominato SNOWPACK, sviluppato presso l'Istituto Federale per lo studio della neve e delle valanghe SLF di Davos (Svizzera). Lo SNOWPACK è attualmente in fase di sperimentazione anche presso altri Servizi di prevenzione valanghe dell'arco alpino, ad esempio in Veneto, in Tirolo e in Baviera. A partire dai parametri meteorologici registrati da una stazione meteo automatica, il modello è in grado di calcolare il comportamento del manto nevoso in corrispondenza della stazione stessa. Il modello fornisce l'evoluzione nel tempo della coltre nevosa sotto forma di profili stratigrafici. Raffrontando costantemente le misurazioni comparative effettuate durante tutto l'arco dei mesi invernali si è operata una verifica dei risultati forniti dal modello, la quale ha indicato come il modello fornisca risultati utili in riferimento alla struttura dello stesso. I risultati dipendono tuttavia in larga misura dalla qualità dei dati in ingresso e dalla corretta inizializzazione del modello. Mancando inoltre parametri affidabili circa la stabilità del manto nevoso ed il carico di rottura degli strati fragili risulta assai difficile tradurre questi risultati forniti da SNOWPACK in indicazioni precise circa il pericolo di valanghe. Per trasformarlo in strumento utilizzabile operativamente nell'ambito della prevenzione valanghe sulla base di profili simulati, è quindi opportuno proseguire la ricerca in merito. I primi risultati di queste ricerche sono stati discussi nell'autunno 2005, in un workshop al centro del SLF.

# PACK



## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il numero delle stazioni meteorologiche automatiche è andato sensibilmente aumentando in tutto l'arco alpino. Si ha in tal modo a disposizione in maniera continuativa tutta una molteplicità di importanti dati meteorologici che forniscono indicazioni circa l'evoluzione del tempo e quindi, indirettamente, anche del manto nevoso in alta montagna. Combinando ad essi l'analisi dei profili stratigrafici della neve risulta così possibile ricavare indicazioni circa il pericolo di valanghe.

I dati meteorologici e nivologici sono stati finora analizzati e interpretati da esperti dei Servizi prevenzione valanghe, consentendo così di stimare l'evoluzione del

manto nevoso. Parametri come la velocità e la direzione del vento offrono indicazioni circa l'intensità del trasporto di neve, mentre dalla temperatura dell'aria e dalla radiazione si deduce lo stato termico del manto nevoso. Dalla combinazione di questo insieme d'informazioni viene infine fatta la previsione del pericolo di valanghe.

Modelli informatici del manto nevoso descrivono tramite formule fisiche e metodi numerici quanto accade all'interno del manto nevoso e sulla superficie dello stesso nonché nel punto di contatto con il suolo, offrendo la possibilità di valutare oggettivamente la situazione del manto stesso.

Parametri meteorologici come,

direzione del vento, velocità del vento, temperatura dell'aria, temperatura della superficie del manto e radiazione forniscono informazioni circa lo stato del punto di contatto tra manto nevoso e atmosfera e quindi la condizione superiore per il modello, mentre la temperatura del suolo rappresenta la condizione inferiore. L'aumento della massa del manto nevoso viene determinato dalla quantità di neve fresca e, dal momento che è tecnicamente difficile e impreciso misurare in maniera automatica la quantità di neve fresca (Snow pillows, pluviometri riscaldati), la si stima in base alla variazione dell'altezza della neve al suolo. Tramite formule matematiche si simulano poi i processi naturali all'interno del manto nevoso e sulla sua superficie. Processi come il metamorfismo da gradiente e da isoterma, l'umidificazione totale degli strati del manto nevoso, la formazione di brina di superficie e il modificarsi della coesione della neve vengono calcolati dal modello, consentendo così agli addetti alla previsione delle valanghe di ricavare informazioni circa l'evoluzione nel tempo del manto nevoso.

Il modello del manto nevoso integra i profili stratigrafici rilevati manualmente in campo, offrendo quindi informazioni sullo stato del manto nevoso anche in corrispondenza di luoghi, d'inverno inaccessibili, in alta montagna.

## SNOWPACK

Negli studi compiuti presso l'Ufficio Idrografico di Bolzano abbiamo utilizzato il modello del manto nevoso denominato „SNOWPACK“. SNOWPACK è stato sviluppato negli ultimi 10 anni presso l'Istituto Federale elvetico per lo studio della neve e delle valanghe di Davos



(Lehning et al., 1999) e al momento si trova ancora in fase di ulteriore perfezionamento (Lehning et al., 2005). Oltre a trovare applicazione nell'ambito della prevenzione valanghe, SNOWPACK viene impiegato anche per il calcolo del bilancio di massa di ghiacciai e bacini idrografici nonché per lo studio dei rapporti tra neve, suolo e vegetazione.

Nell'ambito della prevenzione valanghe è attualmente in uso una versione sperimentale (Lehning et al., 2004), costantemente ottimizzata in base alle esperienze degli utenti. SNOWPACK offre la possibilità di simulare l'evoluzione del manto nevoso sulla base dei parametri meteorologici di cui sopra in corrispondenza delle stazioni meteorologiche automatiche.

Ogni punto in cui SNOWPACK simula il manto nevoso si compone di una stazione nivometrica, che dovrebbe trovarsi in corrispondenza di un terreno possibilmente uniforme e non troppo esposto all'azione del vento, e di una stazione vento su cui possibilmente non influisca la topografia circostante.

Trovandosi il modello operativo del manto nevoso a Davos, per consentire la modellizzazione è necessario il seguente flusso di dati:

- Rilevamento dei dati in corrispondenza della stazione nivometrica e della stazione vento (ogni 10 min);
- Trasmissione dei dati dalla stazione meteorologica alla banca dati di Bolzano (ogni 30 min);
- Trasmissione dei dati dalla banca dati di Bolzano alla banca dati di Davos (ogni 6 ore)
- Calcolo del modello con lo SNOWPACK a Davos (ogni 6 ore)
- Trasmissione dei risultati di Davos a Bolzano (ogni 6 ore)

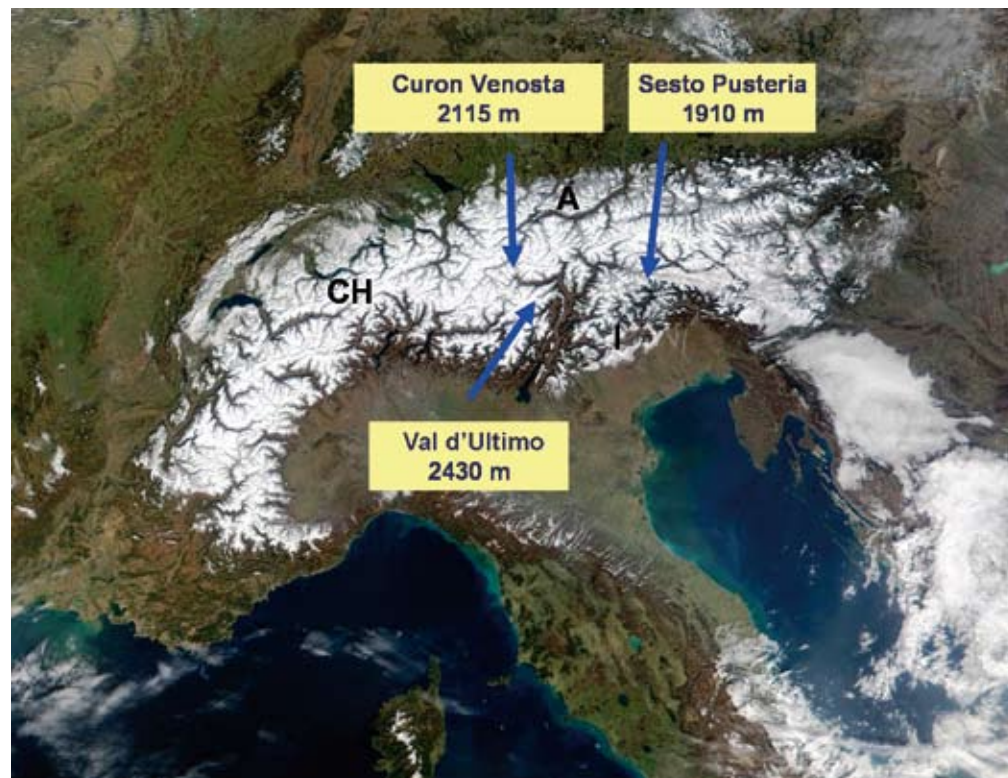


Figura 1 - ubicazione delle tre stazioni nivometeorologiche.

• Visualizzazione dei risultati a Bolzano (in qualsiasi momento). Un presupposto importante per il corretto funzionamento di SNOWPACK è l'affidabilità dei dati rilevati e della trasmissione degli stessi. Eventuali piccole interruzioni nelle serie dei dati rilevati (poche ore) vengono interpolate con un controllo di routine prima del calcolo del modello. Se l'interruzione del flusso dei dati da una stazione si protrae invece più a lungo (diversi giorni) il modello deve essere nuovamente inizializzato.

Il modello è molto sensibile ad eventuali errori nei rilevamenti, il che significa che i risultati del modello possono essere falsati notevolmente già da piccoli errori nelle misurazioni. Ad esempio, una temperatura troppo bassa della superficie del manto nevoso induce il modello a stimare in eccesso la formazione di brina di superficie. Se si hanno osservazioni ridondanti, ad esempio temperatura della superficie e radiazione solare diretta a onda corta e lunga, il modello

del manto nevoso consente di rivelare errori sistematici nelle misurazioni.

Essendo un flusso costante e corretto di dati presupposto fondamentale perché il modello funzioni, si rende quindi necessario molto impegno per garantire il controllo dei dati.

## SNOWPACK IN ALTO ADIGE

Nel corso dell'inverno 2004/05 SNOWPACK è stato utilizzato in Alto Adige in corrispondenza di tre siti. La figura 1 mostra l'ubicazione delle tre stazioni meteorologiche.

La stazione meteorologica di Belpiano Curon Venosta/ Schöneben Graun im Vinschgau si trova lungo la dorsale alpina nella zona di confine tra Italia, Svizzera e Austria, la stazione di Pian dei cavalli – Val d'Ultimo / Rossbänke - Ultental - si trova sul lato orientale della zona dell'Ortles al confine con Trentino e Lombardia e la stazione di Sesto Pusteria - Prati di Croda Rossa / Sexten – Rotwandwiesen si trova nelle Dolomiti orientali al

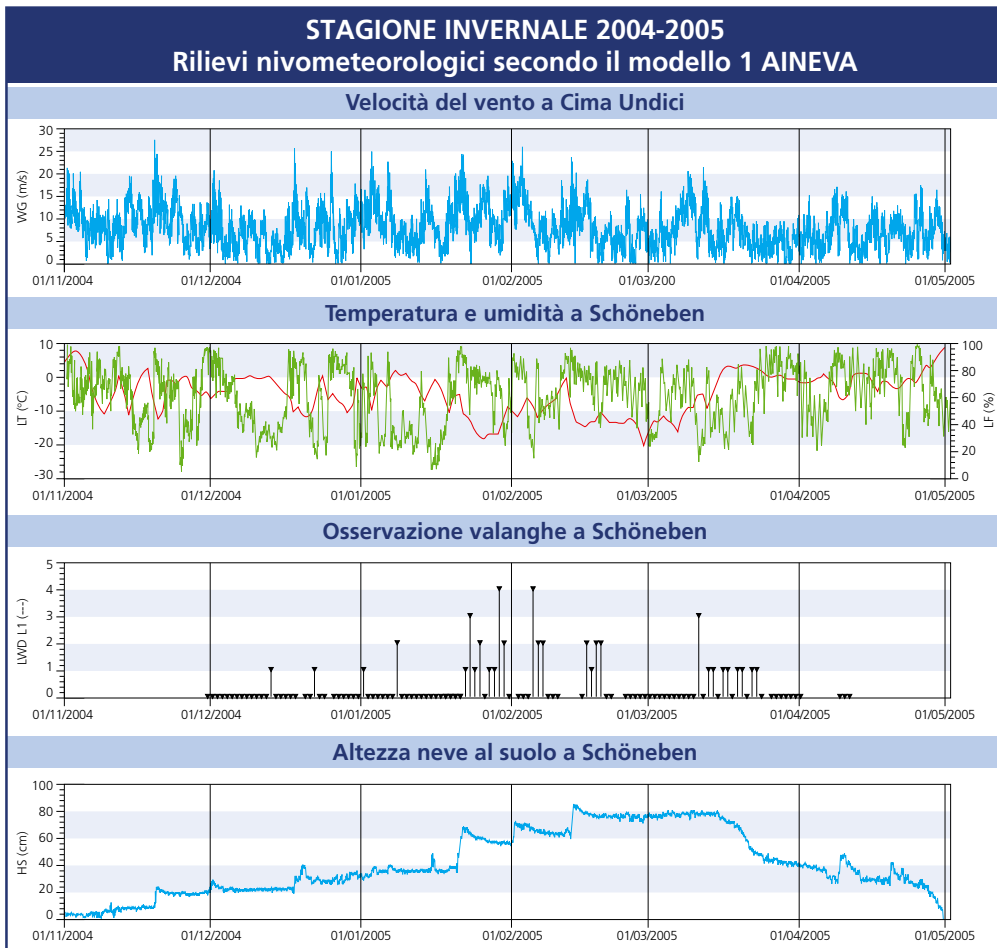
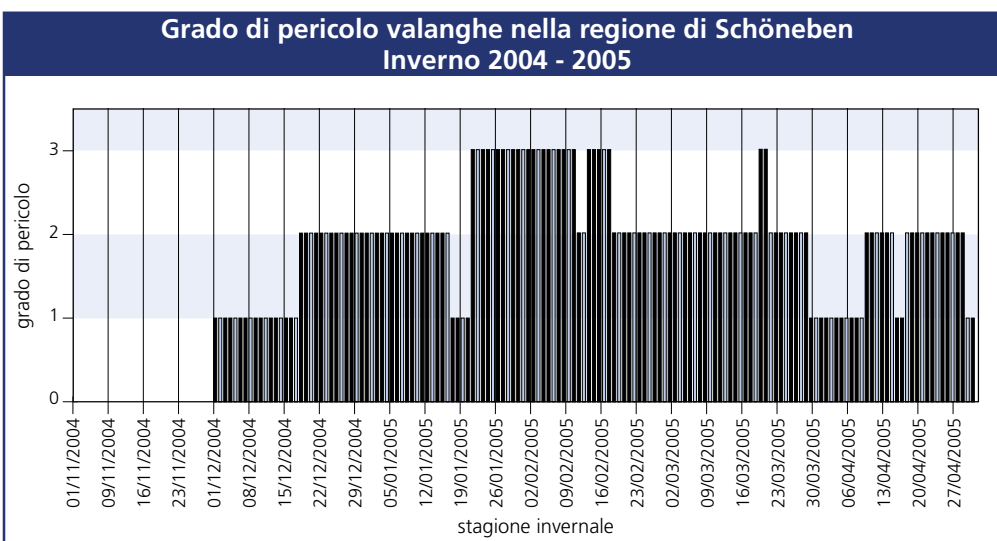


Fig. 2  
Fig. 3



confine con il Veneto. Mentre in corrispondenza della stazione di Schöneben si hanno abbondanti precipitazioni nevose, soprattutto in caso di correnti da nordovest, nelle stazioni di Rossbänke e di Rotwandwiesen si ha neve fresca soprattutto con correnti provenienti da sudovest o con stau da sud.

L'analisi presenta a titolo esemplificativo i risultati delle modellizzazioni realizzate alla stazione meteorologica di Schöneben.

La figura 2 mostra l'andamento dell'inverno 2004/05 in corrispondenza della stazione nivologica automatica di Schöneben, a 2115 m s.l.m.. I dati relativi al vento provengono dalla stazione vento Cima Undici, a 2965 m s.l.m.. Come nel resto dell'area alpina centrale e meridionale, anche nella zona di Resia l'inverno 2004/05 ha presentato scarse precipitazioni nevose e forti venti in quota. L'inizio dell'inverno è stato caratterizzato da continue oscillazioni di temperatura e scarse precipitazioni. A 2000 m la temperatura saliva temporaneamente leggermente al di sopra dello 0° e fino alla metà di gennaio 2005 alla stazione di Schöneben vi erano circa 40 cm di neve. Il modesto spessore della neve ha indotto un forte metamorfismo da gradiente del manto, con conseguente formazione di una base del manto molto fragile. Dalla metà di gennaio fino alla metà di marzo si è avuta una fase con prevalente influsso da nord e temperature spesso al di sotto dei -10° a 2000 m. Sino alla metà di febbraio si sono inoltre avute tre consistenti precipitazioni nevose con complessivi circa 75 cm di neve fresca, per cui l'altezza del manto nevoso al suolo è salita a 84 cm. In questo periodo è stata registrata una forte attività valanghiva, e il pericolo di valanghe

nella regione è salito al grado 3 "MARCATO " (vedi figura 3).

Le nevicate sono state accompagnate da forte vento, per cui sul terreno aperto si sono avuti grandi accumuli eolici. La foto di pagina 10 mostra la situazione neve sulla dorsale alpina principale in pieno inverno 2004/05; i forti venti hanno trasportato e accumulato la neve soprattutto nelle conche e nei canali, mentre i punti esposti erano prevalentemente privi di neve. Fino alla metà di marzo il tempo è poi stato asciutto e freddo, successivamente si è avuta una precoce fusione del manto nevoso, interrotta da alcune fasi più fredde. Alla fine di aprile la stazione si presentava completamente priva di neve.

La figura 4 mostra l'andamento dell'altezza della neve totale e le forme dei grani calcolate tramite SNOWPACK nella stazione di Schöneben. Le diverse forme sono munite di un codice colore. Ben riconoscibile risulta la struttura assai complessa del manto nevoso, formatosi nel corso dell'inverno a seguito dei diversi periodi di precipitazioni, di momenti più caldi e più freddi all'interno del manto nevoso di scarso spessore. A partire dalla prima nevicata del 7.11.04, all'inizio dell'inverno si sono formati alcuni strati con metamorfismo da fusione interrotti da strati a debole coesione da metamorfismo costruttivo. Gli strati da metamorfismo di fusione si sono mantenuti in parte per tutto l'inverno. In pieno inverno si è poi avuta una progressiva trasformazione della neve in grani da metamorfismo costruttivo fino a formare brina di profondità, prima che alla fine dell'inverno iniziasse l'umidificazione totale degli strati del manto nevoso. Una comparazione con i profili stratigrafici rilevati manualmente

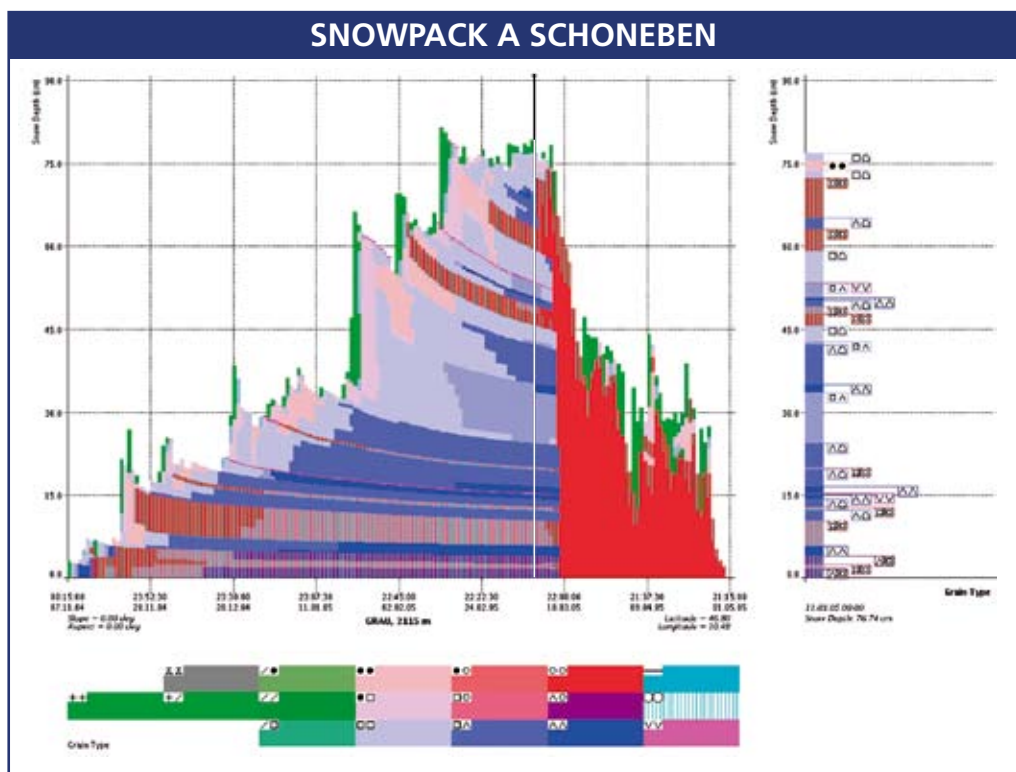


Fig. 4



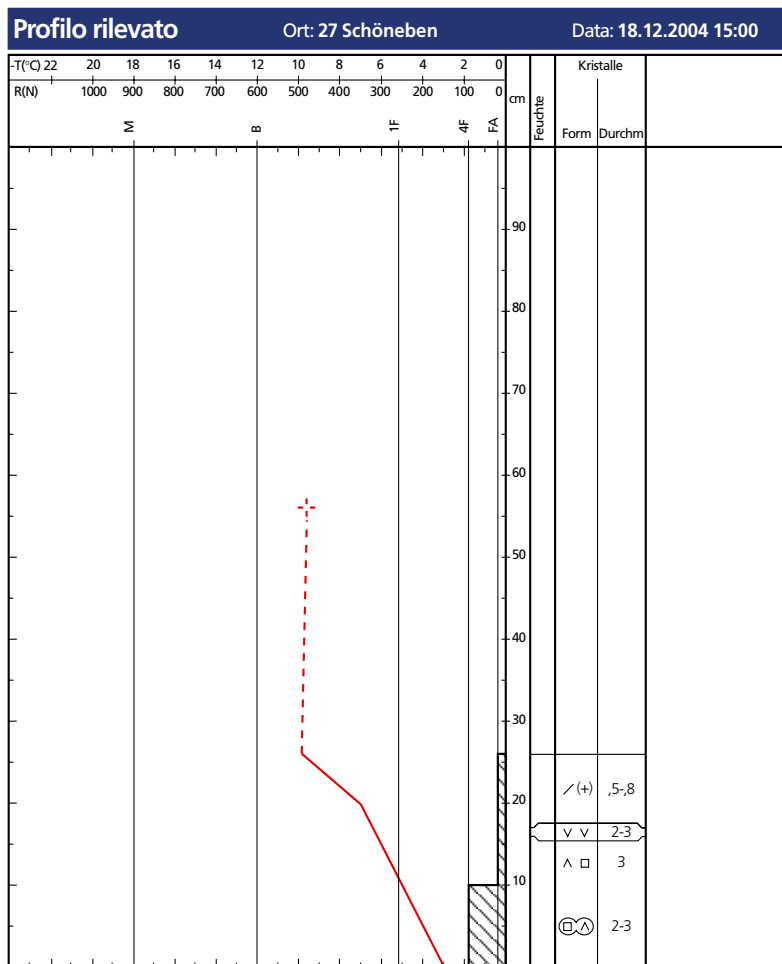
Figura 2 - Andamento dell'inverno 2004/05 in corrispondenza delle stazioni di Schöneben e di Cima Undici. Sono rappresentate: velocità del vento sulla Cima Undici; temperatura, umidità e altezza neve al suolo a Schöneben, oltre all'osservazione valanghe nella regione circostante.

Figura 3 - Grado di pericolo valanghe nella regione di Schöneben nell'inverno 2004/05

Figura 4 - Andamento dell'altezza della neve totale e forme dei grani nel manto nevoso nell'inverno 2004/05 nella stazione di Schöneben, calcolati tramite SNOWPACK.

sul campo nivometeorologico di Schöneben intende ora mostrare quanto realistica sia la struttura del manto nevoso calcolata dal modello numerico. Non essendo al momento ancora possibile tramite SNOWPACK rappresentare in maniera completa all'interno di un profilo granulazione, tempe-

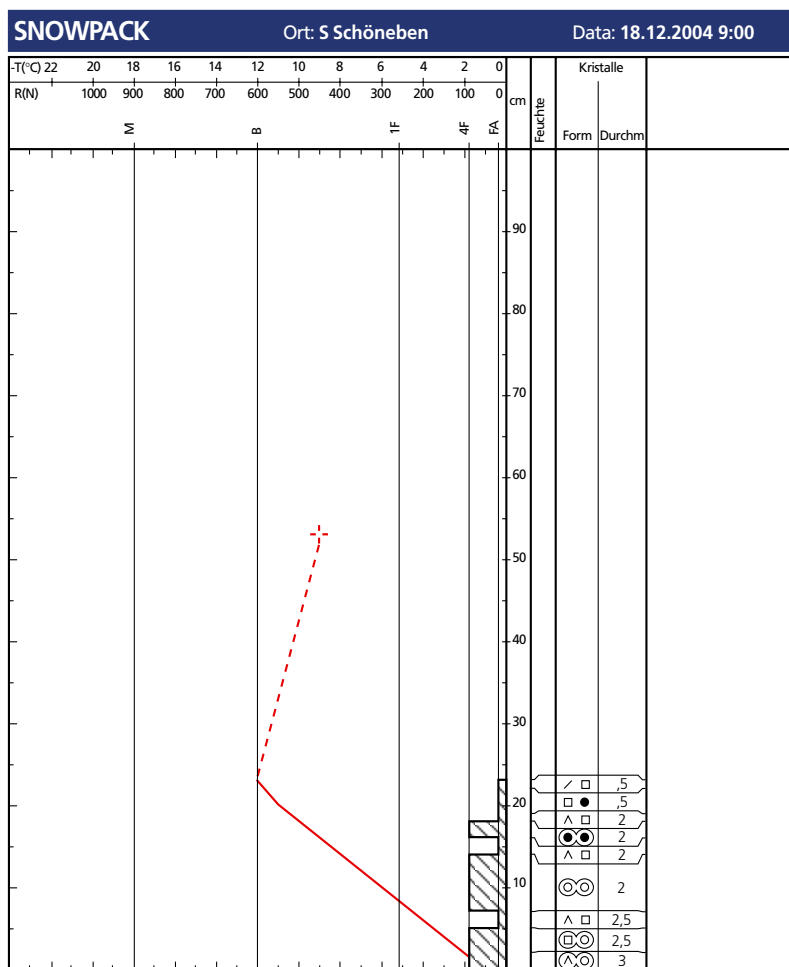
ratura, resistenza e umidità, i dati sono stati estratti da SNOWPACK e immessi in un programma per il profilo stratigrafico, come per i rilevamenti manuali. La figura 5 illustra una comparazione dei profili del 18.12.2004. In prossimità del suolo sia il modello che i rilevamenti diretti



mostrano uno strato da metamorfismo da fusione, risalente a metà novembre. Nella parte superiore del manto nevoso molto sottile osservazione e modellizzazione mostrano alcune differenze. Lo strato di brina di superficie inglobata in successive nevicate rilevata dall'osservatore non è stata infatti riprodotta dal modello. Inoltre, il modello mostra alcuni strati con metamorfismo distruttivo riferiti al periodo con temperature prossime allo 0° di metà novembre. Se si considera l'analisi della resistenza, ambedue i profili devono invece venire considerati deboli.

Il 21.12.2004 nel comprensorio di Schöneben si è verificato un distacco provocato da uno sciatore fuori pista che effettuava una escursione nonostante l'esiguo spessore del manto nevoso. Su di un ripido versante in ombra lo sciatore ha provocato il distacco di un piccolo lastrone. Come

Figure 5a e 5b  
Comparazione dei  
profili stratigrafici  
del 18.12.2004  
alla stazione di  
Schöneben.





indica la figura 6, il lastrone presentava uno spessore alla zona di distacco estremamente basso e raggiungeva una lunghezza

di circa 50 m. Al momento del distacco lo sciatore stava procedendo sci ai piedi e presumibilmente nel fare una inversione ha



provocato la rottura iniziale nelle strato di neve a debole coesione vicino al terreno. Il lastrone si è inizialmente distaccato su uno strato di brina di superficie innevata per poi interessare nella parte più ripida del pendio, il manto fino al suolo. Lo sciatore non è stato travolto dalla valanga. Questa tipologia di valanga è tipica dell'inizio inverno povero di neve in Alto Adige. Data l'esiguità del manto nevoso, in pratica vi era sufficiente neve per lo sci alpinismo solamente nelle conche e nei canali. La possibilità di distacco delle valanghe era molto elevata in tali aree, ma le dimensioni delle valanghe sono rimaste limitate.

Dopo la seconda fase di precipitazioni nevose alla fine di gennaio, nella stessa zona a sud di Resia, ovvero nella frazione di Slingia, nel comune di Malles Venosta, si è verificato un altro incidente provocato da distacco di valanga (vedi figura 7a e 7b). Due sci alpinisti stavano scendendo lungo un versante ripido esposto a est, con pendenza massima attorno ai 41 gradi. Mentre una persona

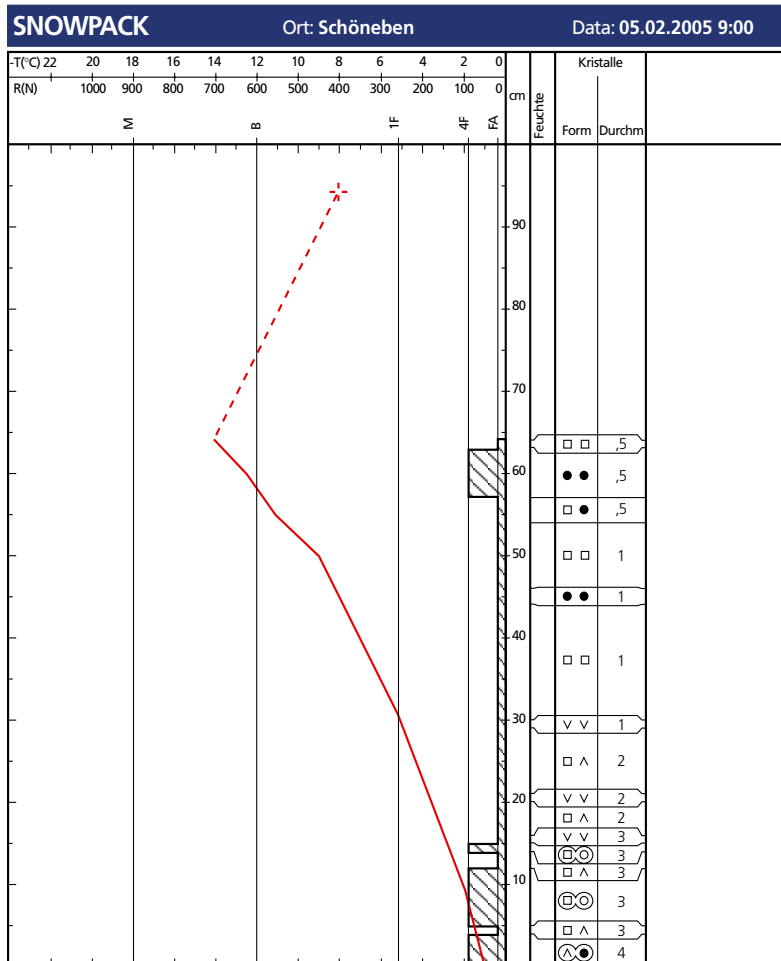
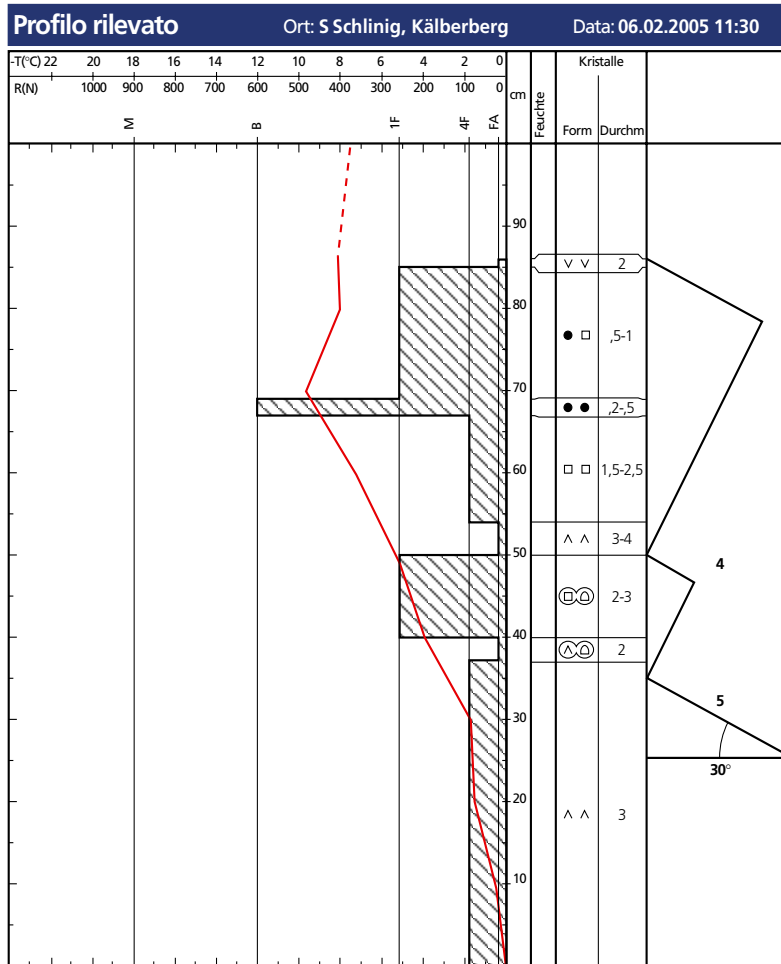
Colonna a sinistra dall'alto

Figura 6 - Foto del distacco nella zona di Resia il 21.12.2004.

Figure 7a e 7b  
Foto della zona di distacco della valanga presso la frazione Slingia il 05.02.2005.



Figure 8a e 8b  
 Comparazione dei  
 profili stratigrafici  
 del 06-05.02.2005  
 alla stazione di  
 Schöneben.



era ferma, un'altra provocava al di sopra di essa il distacco di un lastrone. Il lastrone si staccava dalla parte superiore del pendio, a 2170 metri s.l.m., in una zona di neve compattata dal vento. Tutte e due le persone venivano trascinate dalla valanga, una di esse rimaneva parzialmente travolta e leggermente ferita.

Le figure 8a e 8b mostrano un confronto tra il profilo rilevato in corrispondenza del punto di distacco della valanga con il profilo stratigrafico calcolato tramite SNOWPACK a Schöneben il giorno del verificarsi del distacco. Il profilo della frattura evidenzia come la valanga si sia distaccata in corrispondenza dello strato fragile dei cristalli a calice (brina di profondità), trascinando tuttavia con sé tutto il manto nevoso. Ambedue i profili mostrano nella loro parte superiore la neve fresca in metamorfismo da isoterma con granulazione piccola e rotondeggiante, anche se l'elevato gradiente termico ha già indotto un avvio del metamorfismo da gradiente. La parte inferiore del manto nevoso è costituita prevalentemente da cristalli di neve in metamorfismo costruttivo e cristalli a calice. Le forme da fusione presenti nei due profili si distinguono chiaramente per la loro posizione precisa. Entrambi i profili mostrano la situazione tipica di questo inverno con un manto nevoso a debole stratificazione.

Nell'analisi dei due modelli va tenuto presente che un profilo di versante viene messo a confronto con un profilo su terreno pianeggiante. E qui nella modellizzazione del manto nevoso tramite modello computerizzato emerge un ulteriore problema. Nel territorio alpino le condizioni meteorologiche locali variano infatti molto rapidamente, e non è quindi possibile trasferire su

terreno in pendenza i risultati ottenuti su terreno pianeggiante. Ad esempio, uno strato di brina di superficie che in un luogo pianeggiante e al riparo dal vento si mantiene per diversi giorni fino al sopraggiungere della precipitazione nevosa successiva, in corrispondenza di un versante soleggiato può sciogliersi nuovamente durante il giorno.

Il presente articolo ha consentito di presentare solamente una piccola parte dei raffronti tra profili osservati e modellizzati nell'inverno 2004/05. Nel complesso si può comunque affermare che i modelli del manto nevoso come SNOWPACK offrono una buona possibilità di acquisire informazioni oggettive circa lo stato del manto nevoso dai dati delle stazioni meteorologiche automatiche. In linea di massima, fenomeni caratteristici come la formazione di brina di superficie, il metamorfismo costruttivo e distruttivo e l'umidificazione totale degli strati del manto nevoso vengono descritti correttamente dal modello. I problemi legati alla traduzione di queste informazioni puntuali in un'indicazione precisa circa la stabilità del manto nevoso e il conseguente pericolo di valanghe non sono tuttavia ancora sufficientemente risolti. Attualmente, non è infatti ancora possibile definire con quale sovraccarico uno strato debole provochi un distacco di valanga. Vi è quindi necessità di compiere ulteriori sforzi per riuscire a ricavare dal modello previsioni deterministiche in merito alla stabilità del manto nevoso e, conseguentemente, al pericolo di valanghe. Anche l'indice di trasporto eolico calcolato dal modello che oltre alla velocità del vento tiene in considerazione anche lo stato del manto nevoso, non ha ancora dato dei risultati utilizzabili.



Parallelamente alla fase di test dello SNOWPACK da parte di diversi servizi valanghe, lo SNOWPACK dell'SLF procede nel suo sviluppo. Particolari sforzi sono in atto per dare una interpretazione dei profili simulati dal punto di vista del pericolo valanghe. Così è stato sviluppato un indice di stabilità, che assieme alla forma dei cristalli dei singoli strati, pone attenzione anche a repentine variazioni nella stratificazione e con ciò da una chiara interpretazione della posizioni di eventuali strati deboli. Inoltre, nell'inverno 2005/06, verranno condotti operativamente simulazioni su pendii che potrebbero smorzare una parte dei problemi sopra esposti. A lungo termine la simulazione all'SLF avverrà tridimensionalmente, potendo così considerare anche la variabilità spaziale.

L'obiettivo a lungo termine è di offrire, con la modellazione del manto nevoso, un utile strumento alla previsione delle valanghe.



## Bibliografia

- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R.L., Russi, T., Stöckli, U., Zimmerli, M., 1999: Snowpack Model Calculations for Avalanche Warning based upon a new Network of Weather and Snow Stations, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 30, 145-157.
- Lehning, M., C. Fierz, B. Brown, and B. Jamieson: 2004, "Modelling instability for the snow cover Model SNOWPACK". *Ann. Glac.* 38, 331-338
- Lehning, M., I. Völksch, D. Gustafsson, T. A. Nguyen, M. Stähli, and M. Zappa: 2005, "ALPINE3D: A detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology". *Hydrol. Processes*; in press.