

La dinamica delle valanghe: lo stato dell'arte e la ricerca

A Macugnaga, dal 14 al 17 giugno scorso, si è svolto il "Corso di dinamica delle Valanghe" organizzato congiuntamente dall' "Istituto Federale per lo studio della Neve e Delle Valanghe" di Davos (CH) e dal "Servizio Valanghe Italiano".

Il corso è stato organizzato allo scopo di informare liberi professionisti, enti locali e persone interessate alla materia sullo stato dell'arte e sugli sviluppi nel settore della dinamica delle valanghe.

La conoscenza della dinamica di una valanga è uno strumento fondamentale per lo sviluppo di efficienti metodiche di protezione contro questo pericoloso fenomeno. La crescente richiesta di informazione e di strumenti che siano in grado di affrontare in maniera sempre più sistematica e accurata la mappatura del pericolo da valanga e la progettazione degli interventi difensivi ha comportato, in questi ultimi anni, un notevole sviluppo del settore. Esperimenti su valanghe in scala reale hanno permesso l'approfondimento della fisica legata al fenomeno, inverni catastrofici hanno permesso di verificare tutte le misure di protezione e i provvedimenti organizzativi pianificati negli ultimi anni. A seguito di queste osservazioni nuove teorie e modelli di calcolo sono stati sviluppati.

Scopo di questa articolo è di dare una visione generale dello stato dell'arte, evidenziando i limiti e gli sviluppi nel settore.

Scopo di questa articolo è di dare una visione generale dello stato dell'arte, evidenziando i limiti e gli sviluppi nel settore.

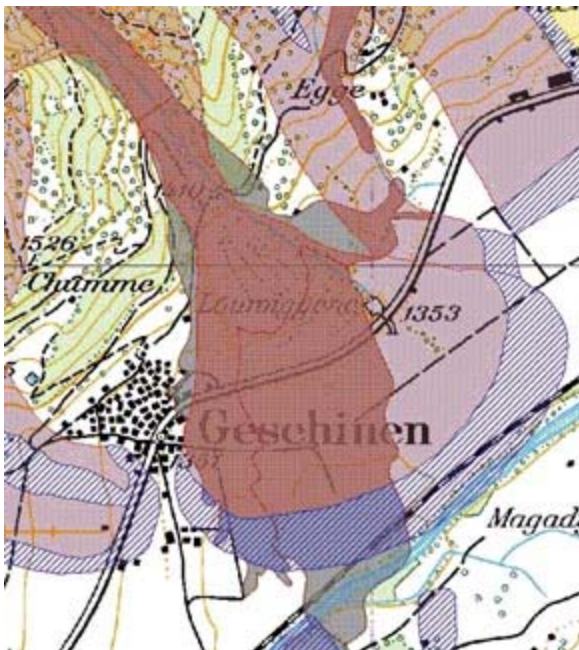


Figura 1. Geschinen 1999.

Esempio di mappa di pericolo in cui i limiti non sono stati rispettati. La valanga è rappresentata in colore grigio.

In questo caso sia la parte polverosa della valanga che la successione di più eventi consecutivi non sono stati calcolati correttamente.

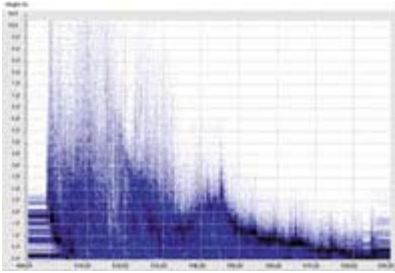


Figura 3.

FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar.

In questo grafico tridimensionale, l'ampiezza del segnale riflesso da differenti altezze all'interno del corpo della valanga (il colore rappresenta l'intensità del segnale, l'asse x l'altezza) è rappresentata in funzione del tempo (asse y).

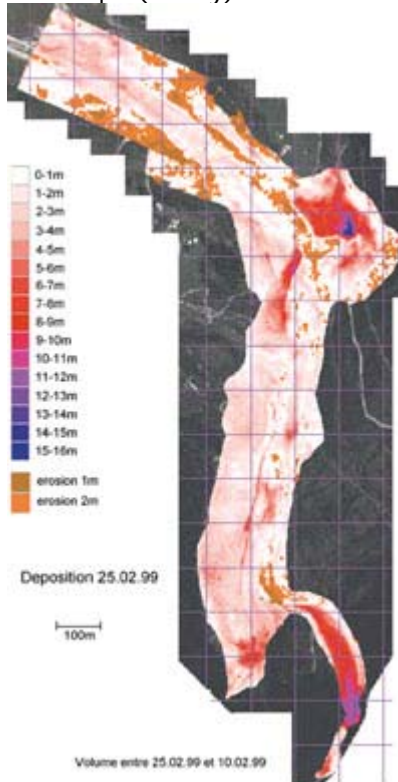


Figura 4.

Sito sperimentale Vallée de la Sionne.

La zona di deposito è stata analizzata con tecniche di fotogrammetria.

I volumi dei depositi e le aree di erosione sono rappresentati in questo grafico.

Betty Sovilla, Perry Bartelt, Massimiliano Barbolini*, Marc Christen, Urs Gruber, Margherita Maggioni, Felix Tiefenbacher, Barbara Turnbull e Walter Ammann
 Team Dinamica delle Valanghe e Simulazione Numerica
 Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe SNV
 Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed ambientale, Università di Pavia
 Via Ferrata,1 -27100 Pavia

L'inverno catastrofico 1999

Nell'inverno del 1999 il versante nord delle Alpi fu caratterizzato dalla maggior attività valanghiva registrata negli ultimi 50 anni, dopo l'inverno catastrofico del 1951. In Svizzera, nel febbraio 1999, 28 persone furono travolte da valanghe cadute in zone abitate o sulle strade; in totale 17 persone persero la vita, 11 di queste all'interno di edifici.

Alle 17 vittime delle valanghe catastrofiche si aggiunsero danni a più di 1000 abitazioni e importanti vie di comunicazione rimasero bloccate per molti giorni. Il danno prodotto durante l'inverno catastrofico del 1999 è stato valutato in 600 milioni di franchi (Wilhelm e altri, 2000; SLF, 2000; Gruber e Bartelt, 2000). Se, da un lato, questa catastrofe sarà a lungo ricordata per i gravi eventi valanghivi che la caratterizzarono, d'altro canto ha anche rappresentato una verifica di tutte le misure di protezione e i

provvedimenti organizzativi pianificati dopo l'inverno catastrofico del 1951. Un'analisi dell'efficacia di tutte le misure di protezione attuate durante l'inverno 1999 ha dimostrato che in linea generale sia le opere di difesa che la cartografia del pericolo valanghe hanno adempito al loro compito in maniera adeguata.

Infatti, malgrado dal 1951 ad oggi, il numero di edifici esposti al pericolo valanghe sia triplicato, le case distrutte o danneggiate sono state solo un terzo delle case danneggiate durante il 1951 e il numero delle vittime è stato di cinque volte minore.

Anche se la maggior parte delle valanghe sono avvenute entro i limiti definiti nelle carte di pericolo, ci sono state delle situazioni in cui questi limiti sono stati oltrepassati mettendo alla luce i punti deboli delle misure di protezione adottate in questi ultimi anni (Figura 1).

I danni maggiori sono stati creati:

(1) dalle valanghe miste la cui parte polverosa è uscita frequentemente dai limiti designati nelle mappe di pericolo,

(2) dai distacchi multipli di valanghe nello stesso sito valanghivo che hanno prodotto depositi di altezza tale da non poter più essere contenuti dalle opere di difesa passive o che hanno prodotto depositi che hanno deviato, talvolta anche direttamente nei paesi, valanghe scese successivamente e

(3) dalla non considerazione della variazione di massa di una valanga dovuta alla raccolta di neve lungo il suo percorso che ha comportato il raggiungimento di masse tali da non poter più essere contenute nelle opere di contenimento.

Una delle più grosse incertezze rimane comunque relativa alla determinazione dell'altezza della neve coinvolta nel distacco.

Durante l'inverno 1999 è stato osservato infatti, che queste altezze hanno superato notevolmente i limiti indicati dalle linee guida svizzere suggerendo la necessità di rivedere tali indicazioni (Gruber e Bartelt, 2000).

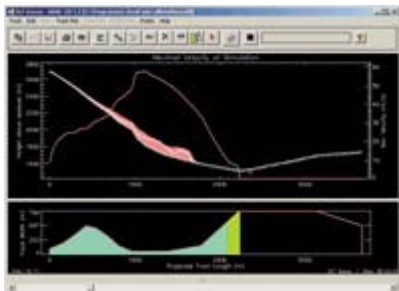


Figura 5. AVAL- 1D: esempio di simulazione.

La figura mostra le velocità e le dimensioni della valanga di Albristhor (cantone Bernese, Svizzera).

Nel sottostante riquadro le indicazioni per la mappatura del pericolo: in verde scuro la zona in cui la pressione è maggiore di 30kPa (la zona rossa della normativa elvetica) in verde chiaro la zona in cui la pressione è minore di 30 kPa (zona blu).

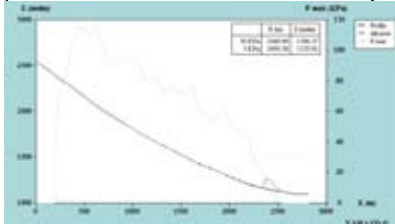


Figura 6.

Esempio di simulazione della dinamica di una valanga con il modello VARA1D; nella figura sono mostrati la distribuzione finale del deposito e l'involuppo delle pressioni di impatto lungo il pendio (in particolare sono indicate le posizioni dove sono raggiunte le soglie di pressione pari a 5 e 30 kPa).

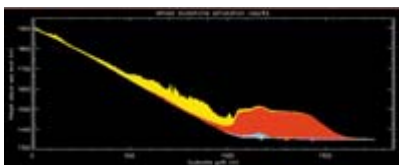


Figura 7. Simulazione di una valanga di tipo misto con il modello MXA-1d.

Sono distinguibili: la parte polverosa (in rosso), la parte polverosa stagnante, non dotata di energia traslazionale e quindi senza potere distruttivo (in giallo), la parte densa e il manto nevoso lungo il percorso (in blu).

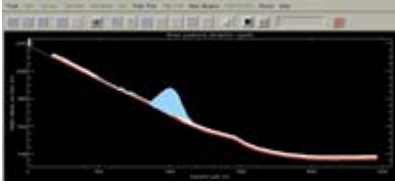


Figura 8.

Simulazione con raccolta di neve lungo il percorso.

I colori rosso e bianco rappresentano due strati nevosi aventi differenti caratteristiche di resistenza.

I siti sperimentali. Vallée de la Sionne

I modelli numerici che simulano il moto delle valanghe dense e delle valanghe polverose sono utilizzati per determinare le massime distanze di arresto, le velocità, le altezze di flusso e le pressioni. Questi calcoli risultano tanto più precisi quanto più accurata è la descrizione dei processi fisici reali che avvengono all'interno di una valanga. Allo stato attuale, questi processi sono descritti in maniera estremamente semplificata dato che la conoscenza della dinamica reale di una valanga contiene ancora molti punti oscuri. In particolare esistono ancora molti quesiti relativi alle valanghe polverose, per esempio sulla formazione della componente polverosa e sulla distribuzione delle velocità e delle intensità relative alla stessa o, un altro esempio, non è ben chiaro come una valanga possa variare la sua massa raccogliendo o depositando massa lungo il suo percorso.

Le caratteristiche dinamiche delle valanghe sono state studiate negli anni presso i centri sperimentali valanghe di tutto il mondo. Malgrado questo notevole impegno non si hanno ancora a disposizione informazioni sufficienti per caratterizzare in modo univoco questo complicato fenomeno.

Attualmente in Europa esistono 4 siti sperimentali: Vallée de la Sionne (Svizzera), Monte Pizzac (Italia), Col di Lautaret (Francia), Ryggfonn (Norvegia) ed alcuni siti di minori dimensioni (Ammann, 1999; Issler ed. 1999, Somnavilla e altri, 1997; Somnavilla e Sovilla, 1998). Dal 1995, presso il sito sperimentale Vallée de la Sionne, (Cantone Vallese, CH) grandi valanghe a scala reale vengono studiate allo scopo di migliorarne la conoscenza fisica. I dati che vengono raccolti riguardano le caratteristiche di movimento della valanga quali: (1) le velocità del fronte valanghivo raccolte con l'ausilio di video riprese, (2) le distribuzioni di velocità di tutta la massa in movimento utilizzando la tecnica radar, (3) le altezze della massa in movimento. Vengono raccolte anche informazioni che riguardano le caratteristiche interne della valanga quali: (1) profili di velocità sulla verticale, (2) profili di pressione e (3) profili di densità. In aggiunta a queste misure di tipo dinamico vengono raccolti, a seguito dell'evento, anche molti dati relativi alle caratteristiche della neve e delle masse movimentate dalla valanga; a questo scopo vengono utilizzate tecniche di tipo manuale e tecniche di fotogrammetria.

Malgrado il grande impegno, allo stato attuale i dati raccolti sono ancora frammentari, talvolta difficilmente interpretabili, e in particolare mancano informazioni relative agli eventi con tempi di ritorno elevati (eventi catastrofici).

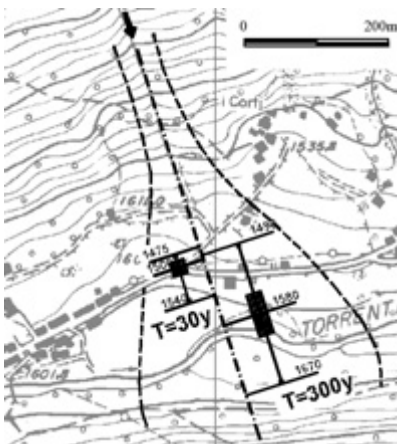


Figura 10:

Zona di arresto del sito Solco, ValMalenco.

Per i due casi $T=30$ anni e $T=300$ anni sono indicati lungo il profilo longitudinale del pendio valori medi e fasce di confidenza al 95% per le distanze di arresto.

I valori sono espressi in metri misurati lungo il pendio a partire dal punto più alto di distacco.

I rettangoli hanno una lunghezza pari ad una deviazione standard. Le linee tratteggiate indicano la possibile espansione laterale del deposito, e sono state determinate sulla base di sopralluoghi "in situ".



Figura 11.

Jacobshorn (Davos): Potenziali aree di distacco automaticamente definite in base a regole generali basate sulle caratteristiche topografiche del terreno.

I dati sperimentali

Velocità

La velocità è uno dei parametri dinamici più rappresentativi di una valanga. Esistono diverse tecniche sperimentali che permettono di determinare diversi tipi di velocità. Presso il sito sperimentale Vallée de la Sionne vengono utilizzate le seguenti tecniche:

1. le velocità del fronte di una valanga vengono determinate con l'ausilio di tecniche video. (registrazione video di una valanga ed elaborazione delle immagini)
2. gli spettri di velocità determinati con Doppler radar permettono di ottenere una visione globale delle velocità raggiunte da una valanga. Non solo le velocità del fronte ma anche velocità appartenenti ad altre zone della valanga vengono registrate. L'output è rappresentato da uno spettro di velocità da cui possono essere ricavati i valori massimi raggiunti lungo il percorso. (Le massime velocità di una valanga non sono necessariamente localizzate al fronte). Profili puntuali di velocità vengono determinati con l'utilizzo di sensori ottici o con coppie di radar FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) (Figura 3). Coppie di questi strumenti posti a distanze ravvicinate registrano lo stesso segnale. Tecniche di cross-correlazione permettono di stabilire il tempo impiegato dalla valanga per percorrere la distanza tra le coppie di sensori e quindi di determinare la velocità. La tecnica applicata a diversi punti della valanga, in direzione perpendicolare al moto, permette di ricostruire i profili verticali di velocità.

Nel 1999, durante un evento catastrofico questi strumenti hanno potuto registrare le velocità della valanga: in alcuni punti del percorso le velocità hanno raggiunto i 300 km h-1.

Pressione

Nella zona di deposito diversi tipi di ostacoli artificiali, anche in scala reale, sono stati dotati di sensori di pressione capaci di resistere a decine di tonnellate di pressione. Nel 1999, durante un evento di dimensioni catastrofiche, i sensori, prima di essere distrutti dal forte impatto, hanno misurato pressioni di circa 100 tm-2. In figura 2 è raffigurata una delle strutture costruite in questo sito sperimentale. Un pilone alto 20 m, dotato di sensori di pressione lungo tutta l'altezza, permette di determinare le forze d'impatto non solo nella parte densa della valanga ma anche nella parte polverosa.

Altezza di flusso

A Vallée de la Sionne, tre coppie di radar FMCW (frequency modulated continuous wave radar) sono distribuite lungo il percorso. I radar sono sepolti nel terreno e direzionati verticalmente verso il cielo. I radar registrano il passaggio della valanga (Figura 3) dando informazioni relativamente alle altezze e alla distribuzione della massa. Registrano anche le variazioni del manto nevoso che li ricopre fornendo fondamentali informazioni per lo studio del bilancio di massa. In particolare in basso a sinistra in figura 3 è visibile l'impatto tra il manto nevoso e la valanga. Tutto il manto nevoso, alto circa 2.5 m, è stato eroso.

Il bilancio di massa

Le teorie di calcolo di dinamica delle valanghe e conseguentemente i modelli matematici attualmente utilizzati assumono che la massa della valanga si mantenga costante lungo tutto il percorso, partendo dall'ipotesi che i fenomeni di erosione del manto nevoso, investito dalla massa in movimento, siano trascurabili e che la massa della valanga corrisponda alla massa che parte dalla zona di distacco. In realtà, l'osservazione del tracciato dopo il passaggio di una valanga mostra tracce evidenti di erosione, talvolta fino al terreno e allo stesso tempo depositi locali o continui sono distribuiti lungo tutto il tracciato. A seguito di queste osservazioni, sono state sviluppate nuove tecniche sperimentali che permettono di determinare l'evoluzione della massa della valanga lungo il suo percorso. Presso il sito sperimentale Monte Pizzac, in Italia, questo tipo di analisi ha dimostrato che la massa di una valanga non si mantiene

costante e che la massima massa raggiunta dalla valanga lungo il percorso può essere anche nove volte più grande della massa al distacco (Sovilla e altri, 2001; Sovilla e Bartelt, 200?, Sovilla e Gruber, 200?). Una tale variazione ha ovviamente una grossa influenza sulla dinamica della valanga e per questa ragione le nuove teorie di calcolo cercano di includere anche questo fenomeno fisico. Allo scopo di determinare fenomeni di erosione e deposito vengono utilizzate diverse tecniche. Presso il sito sperimentale Vallée de la Sionne, tecniche di fotogrammetria permettono di calcolare i volumi dei depositi e i volumi dell'area di distacco (Vallet e altri, 2001) (Figura 4). Misure manuali permettono di associare a questi volumi una densità e di calcolare quindi le masse. Rilievi manuali permettono inoltre di osservare le variazioni nella stratigrafia del manto nevoso.

I programmi numerici: i nuovi modelli

I dati sperimentali, le conoscenze che derivano l'aver vissuto un inverno catastrofico come il 1999, le nuove possibilità di calcolo date dall'evoluzione delle tecnologie informatiche hanno permesso, in questi ultimi anni lo sviluppo di nuove teorie di calcolo e di nuovi modelli di simulazione.

I modelli dinamici utilizzati per la descrizione del moto valanghivo si rifanno a due principali approcci; l'approccio puntuale che schematizza il moto di una valanga con il moto del suo centro di massa e i modelli continui che invece simulano la valanga utilizzando le equazioni che governano il moto dei fluidi incomprimibili. Il modello di Voellmy-Salm, ufficialmente utilizzato in Svizzera quale complemento di calcolo per la stesura delle mappe di pericolo, rappresenta uno dei primi tentativi di simulare la dinamica della valanga in maniera semplificata (Voellmy, 1955; Salm e altri, 1990). Tipico esempio di modello a centro di massa, il modello di Voellmy-Salm introduce una serie di approssimazioni tra le quali: percorso della valanga rappresentato da tre tratti a pendenza costante, dinamica della valanga descritta unicamente dal suo centro di massa, i.e. unicamente un dato di altezza e velocità per tutta la valanga, la pre-impostazione dell'inizio della zona di deposito etc.

I modelli continui

Con l'avvento di nuove tecnologie informatiche e con la sempre maggior richiesta di modelli matematici in grado di affrontare in maniera sempre più sistematica e accurata la mappatura del pericolo da valanga e la progettazione degli interventi difensivi sono stati messi a punto, in questi ultimi anni, nuovi modelli che utilizzano un approccio continuo di tipo "idraulico" per la simulazione della dinamica degli scorrimenti nevosi, ed equazioni simili a quelle comunemente applicate per la simulazione delle correnti idrauliche a pelo libero. L'applicazione di tali modelli consente un dettaglio ed un livello di informazioni di gran lunga superiore sia rispetto ai modelli di tipo statistico-topografico (Lied e Bakkehoi, 1980; McClung e Lied, 1987) che rispetto agli originali modelli di dinamica a "centro di massa" (Voellmy, 1955; Perla et al., 1980).

Il modello AVAL-1d sviluppato presso l'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos (Figura.5) (Bartelt et al., 1999; Christen e altri, 2001; Sartoris and Bartelt, 2000; Issler, 1998) e il modello VARA, sviluppato presso il dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università degli studi di Pavia (Figura. 6) (Natale et al., 1994; Nettuno, 1996; Barbolini, 1998; 1999) sono due esempi di questa tipologia. Questo tipo di modelli è in grado di descrivere la dinamica della valanga, in modo continuo, dalla zona di distacco alla zona di deposito. In particolare AVAL-1D è in grado di calcolare distanze di arresto, altezze di flusso e pressioni sia per valanghe dense che per valanghe polverose. In questo tipo di modelli la topografia del percorso della valanga può essere letta direttamente dalle mappe digitali e molte delle semplificazioni presenti nei modelli a centro di massa sono in questo caso risolte. In particolare le simulazioni forniscono: (1) distanze di arresto e distribuzione della massa nella zona di deposito e lungo la zona di scorrimento, (2) animazione della valanga che può essere visualizzata in moto lungo il suo percorso, (3) grafici corrispondenti all'evoluzione della velocità/altezza di flusso e pressione in punti definiti dall'utente lungo il percorso.

I modelli misti

Le valange possono essere classificate in accordo con due casi limite: le valanghe dense, dove la dinamica delle particelle di ghiaccio che la compongono dominano il moto e il ruolo dell'aria interstiziale è insignificante e le valanghe polverose, la dinamica delle quali è dominata dalle turbolenze dell'aria piuttosto che dalle particelle di ghiaccio sospese nella stessa. Fino ad ora i modelli sono stati rivolti alla modellizzazione di uno o dell'altro caso separatamente.

In realtà, possono frequentemente essere osservate valanghe in cui la parte polverosa si sviluppa da un cuore denso e le due fasi coesistono mentre la valanga muove verso valle.

In questi casi in cui la valanga possiede due fasi distinte: densa e polverosa, la valanga viene definita di tipo misto.

Allo scopo di simulare valanghe reali, presso l'Istituto di ricerca di Davos, le attenzioni sono rivolte alla modellazione del comportamento di una valanga mista. Nel nuovo modello MXA-1d (Figura 7) tra i diversi aspetti attualmente analizzati vogliamo ricordare: i processi di scambio di massa tra la parte densa e la

parte polverosa, l'inglobamento dell'aria nella parte polverosa, la raccolta della neve lungo il percorso da parte della parte densa e la dinamica delle componenti densa e polverosa.

I modelli a variazione di massa

A seguito delle osservazioni sperimentali che dimostrano che la variazione di massa di una valanga influisce in maniera fondamentale sulla dinamica della stessa (altezze di flusso e dei depositi sottostimate e influenza sulle velocità e pressioni), presso l'Istituto di ricerca di Davos sono state sviluppate nuove teorie di calcolo e modelli per l'applicazione pratica in grado di considerare l'erosione e il deposito di neve lungo il percorso della valanga (Figura 8).

In questi modelli è possibile definire, quale input, il manto nevoso lungo il percorso che può essere caratterizzato da diversi strati aventi diverse caratteristiche fisiche. Equazioni di bilancio di massa e conservazione della quantità di moto applicate all'interfaccia tra la valanga e il manto nevoso, permettono di quantificare l'erosione sulla base di specifiche grandezze dinamiche.

Le incertezze nei modelli di calcolo

E' ben noto come nel contesto delle applicazioni modellistiche finalizzate alla perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga forti incertezze caratterizzano sia la stima delle condizioni di distacco delle valanghe di progetto (area ed altezza di distacco per un evento con fissato tempo di ritorno), che la scelta dei parametri di resistenza da utilizzare per le simulazioni (si veda ad es. Barbolini et al., 2000); queste incertezze sono altresì fortemente influenzanti i risultati. Sono state pertanto recentemente avviate ricerche finalizzate alla definizione di criteri e metodi che consentano di considerare in modo esplicito le incertezze nella definizione delle variabili di ingresso dei modelli di dinamica, e di quantificarne in maniera sistematica ed oggettiva gli effetti nei risultati. E' stata proposta a tal fine la possibilità di utilizzare un approccio di tipo Monte Carlo per la mappatura del pericolo di valanga (Barbolini e Savi, 2001a-b), combinando un approccio deterministico per la modellazione della dinamica delle valanghe con criteri di tipo statistico per la valutazione delle condizioni di distacco e dei parametri modellistici (Figura 9). Mediante tale approccio è possibile caratterizzare statisticamente i risultati per diversi scenari di simulazione e quantificare le incertezze nelle mappe di pericolosità, definendo i limiti di confidenza nella stima delle variabili di mappatura (Figura 10).

Presso l'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos l'attenzione nello studio delle incertezze è volta soprattutto alle condizioni di distacco della valanga, che sono molto difficili da individuare mediante osservazioni su campo.

L'idea di base è di trovare regole generali per la definizione delle potenziali aree di distacco e quindi di ricavare la distribuzione di probabilità per l'area di distacco da utilizzare poi nel metodo di Monte Carlo per la mappatura del pericolo da valanga. A tal fine viene presa in considerazione la regione di Davos per la quale è disponibile un catasto valanghe per un periodo di circa 40 anni. Si analizza dettagliatamente la topografia del terreno (caratteristiche come la pendenza, la curvatura etc.) allo scopo di ricavare regole generali per la delineazione delle potenziali aree di distacco (Figura 11). Le aree così definite vengono poi caratterizzate in base a parametri topografici significativi quali: pendenza, esposizione, distanza dalle creste etc. Un'analisi statistica applicata alle aree di distacco degli eventi valanghivi avvenuti in passato permette quindi di definire una probabilità per l'area di distacco legata ai parametri topografici del terreno. Questa procedura risulta essere un valido aiuto per gli esperti nell'elaborazione delle mappe di pericolo da valanga per regioni in cui non si hanno dati riguardanti eventi passati.

Conclusioni

L'evoluzione della conoscenza della dinamica delle valanghe permetterà, entro pochi anni di fornire ai liberi professionisti nuovi e più precisi metodi e strumenti di calcolo per la pianificazione territoriale. In particolare le attenzioni sono centrate nello sviluppo di nuovi modelli per la simulazione di valanghe di tipo misto (polverose/dense) che permettano di considerare la variazione di massa di una valanga. Contemporaneamente le forti incertezze che caratterizzano tutti i parametri di input dei modelli, ossia: la stima delle condizioni di distacco delle valanghe di progetto e la scelta dei parametri di resistenza da utilizzare per le simulazioni saranno investigate allo scopo di individuare leggi oggettive che ne permettano la definizione.

Ringraziamenti

Vogliamo ringraziare cordialmente l'Ing. Agostino Guarienti e il SVI-CAI per il fondamentale contributo nell'organizzazione del corso di dinamica delle valanghe tenutosi a Macugnaga dal 14-17 giugno 2001, i relatori il cui contributo è risultato fondamentale per la buona riuscita del corso e gli attivissimi partecipanti.

Bibliografia

- Ammann, W.J. 1999. A new Swiss test-site for avalanche experiments in the Vallée de la Sionne/Valais. Cold Regions Science and Technology, 30, 3-11.
- Barbolini, M. 1998. "VARA one- and two-dimensional models". In: A Survey of computational models for snow avalanche motion. Edited by C. Harbitz. NGI Report No. 581220-1. (anche Deliverable D3 of the 4th

- EU Framework Project SAME: Snow Avalanche Mapping and Warning Systems in Europe. Ed. by European Community).
- Barbolini, M. 1999: "Dense snow avalanches: computational models, hazard mapping and related uncertainties". Tesi di Dottorato, Università di Pavia, Relatore Prof. Luigi Natale.
- Barbolini, M., Gruber, U., Keyloch, C., Naaim, M. and Savi, F. (2000). "Application and evaluation of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites". *Cold Regions Science and Technology*, 31(2), 133-149.
- Barbolini M., Savi F. 2001a. "Estimate of uncertainties in avalanche hazard mapping" *Annals of Glaciology*, n. 32, pp 299-305.
- Barbolini, M., Savi, F. 2001b. Perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanghe con metodologia di tipo Monte Carlo. *Neve e Valanghe* n. 43, pp 32-41.
- Bartelt, P., B. Salm and U. Gruber. 1999. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. *J. Glaciol.*, 45, 242-254.
- Christen, M., P. Bartelt, U. Gruber and D. Issler. 2001. AVAL-1D: An Avalanche Dynamics Program for the Practice. *Ann. Glaciol.*, 32. In press.
- Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF), 2000. Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Davos, Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung. 588 S
- Gruber, U. and P. Bartelt. 2000. Study of the 1999 avalanches in the Obergoms valley, Switzerland, with respect to avalanche hazard mapping. *Proceeding of the International Snow Science Workshop (ISSW)*, Big Sky, Montana.
- Issler, D. 1998. Modelling of snow entrainment and deposition in powder-snow avalanches. *Ann. Glaciol.*, 26. 253-258.
- Issler, D. ed. 1999. European Avalanche Test Sites. Overview and Analysis in View of Co-ordinated Experiments. *Eidg. Inst. Schnee-und Lawinenforsch. Mitt.* 59.
- Lied K. and Bakkehøi S. (1980). "Empirical Calculations of Snow Avalanche Run-Out Distance Based on Topographic Parameters". *Journal of Glaciology*, Vol. 26, No. 94, 165-177.
- McClung, D.M. and Lied, K.: 1987, Statistical and Geometrical Definition of Snow Avalanche Runout, *Cold Regions Science and Technology*, 13, 107-119.
- Natale L., Nettuno L., and Savi F.: 1994, Numerical simulation of snow dense avalanche: an hydraulic approach, In Hamza, M.H. (eds), *Proceedings of 24th International Conference on Modelling and Simulations, MS'94, 2-4 May, Pittsburgh, Pennsylvania*. Anaheim, International Association of Science and Technology Development (IASTED) ACTA PRESS, 233-236.
- Nettuno L., (1996): "La modellazione delle valanghe di neve densa: aspetti modellistici e sperimentali". PhD Thesis, University of Pavia.
- Perla, R., T. T. Cheng and D. M. McClung. 1980. A two-parameter model of snow-avalanche motion. *J. Glaciol.*, 26(94),197-207.
- Salm, B., A. Burkard and H. Gubler. 1990. Berechnung von Fließlawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. *Eidg. Inst. Schnee und Lawinenvorsch. Mitt.* 47.
- Sartoris, G. and P. Bartelt. 2000. Upwinded Finite Difference Schemes for Dense Snow Avalanche Modeling. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32, 799-821
- Savage, S. B. and K. Hutter. 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.*, 199,177-215.
- Sommavilla, F. and B. Sovilla. 1998. The avalanche monitoring system of Mount Pizac. In Hestnes, E., ed. *25 Years of Snow Avalanche Research*, Voss, 12-16 May 1998. *Proceedings*. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, 268-273. (NGI Publication 203.)
- Sommavilla, F., B. Sovilla and A. Tomaselli. 1997. Il sistema di monitoraggio per l'acquisizione dei parametri dinamici delle valanghe. *Neve e Valanghe*, 31, 6-17.
- Sovilla, B. and Bartelt. 200?. Observations and modelling of snow avalanche entrainment. *Nat. Hazards*. Submitted paper.
- Sovilla, B., F. Sommavilla and A. Tomaselli. 2001. Measurements of mass balance in dense snow avalanche events. *Ann. Glaciol.*, 32. 230-236.
- Sovilla, B. and U. Gruber. 200?. Avalanche winter 1999. The importance of the snow entrainment in catastrophic avalanches. *Data of Glaciological Studies*. Submitted paper.
- Vallet, J., U. Gruber and F. Dufour. 2001. Photogrammetric avalanche volume measurements at Vallée de la Sionne. *Ann. Glaciol.*, 32. 141-146.
- Voellmy A. (1955). "Über die Zerstörungskraft von Lawinen", *Schweiz. Bauzeitung* No. 73, 159-165, 212-217, 246-249, 280-285.
- Wilhelm, C., Bründl, M., Wiesinger, T. and Ammann, W. 2000. The avalanche winter 1999 in Switzerland - An overview. *Proceeding of the International Snow Science Workshop (ISSW)*, Big Sky, Montana.