

# IDENTIFICAZIONE degli STRATI DEBOLI

## Un approccio basato sulle differenze relative per identificare potenziali strati deboli all'interno di un profilo stratigrafico

**Fabiano Monti,  
Jürg Schweizer**  
WSL Istituto Neve e Valanghe SLF,  
Davos, Svizzera  
Corr.: monti@slf.ch

Ridurre la soggettività nel processo d'interpretazione dei profili stratigrafici ed incrementare la risoluzione spaziale e temporale delle informazioni disponibili sono due delle strade attualmente percorse per migliorare l'attività di previsione valanghe. In questi ultimi anni sono stati sviluppati diversi metodi semiquantitativi (per es. il *Threshold Sum Approach*, ossia il metodo della somma delle variabili critiche) allo scopo di riuscire a valutare in modo più oggettivo i profili stratigrafici. D'altro canto, la modellazione numerica, ad esempio, tramite il modello del manto nevoso 1-D SNOWPACK, ha la capacità di fornire informazioni sulla stratigrafia del manto nevoso anche in periodi e in aree in cui l'osservazione manuale è impossibile. In questo lavoro è stato perfezionato il metodo per l'interpretazione dei profili stratigrafici basato sulla somma delle variabili critiche (TSA). Le proprietà del manto nevoso prese in esame sono le stesse di quelle considerate con il metodo TSA (dimensione dei grani, tipologia, durezza, profondità, differenza di dimensione dei grani e durezza). Ogni variabile è stata trasformata in una quantità adimensionale e standardizzata all'interno del singolo profilo stratigrafico. Si sono quindi utilizzati valori e differenze relative per la localizzazione degli strati che hanno una maggiore probabilità di essere potenziali strati deboli. Tale metodo, denominato metodo della somma delle variabili relative (*Relative Threshold Sum Approach*, RTA) è stato, in primis, testato su *dataset* costituito da 107 profili manuali, raccolti vicino alle corone di frattura di valanghe o su pendii adiacenti a valanghe innescate da sciatori. Quindi, lo si è applicato a profili simulati con il modello 1-D SNOWPACK. Le caratteristiche dei potenziali strati deboli rilevati per mezzo dei metodi RTA e TSA sono state messe a confronto con le caratteristiche degli strati deboli identificati con i test di compressione in 83 profili manuali. Infine, si è verificato se le proprietà dei potenziali strati deboli e dei lastroni identificati con il metodo RTA all'interno dei profili simulati fossero legate alla stabilità della neve reale, verificata in giorni per i quali erano disponibili numerose osservazioni in situ. In generale, il metodo RTA si è dimostrato atto a identificare in modo soddisfacente i potenziali strati deboli sia nei profili manuali sia simulati. Abbinato al classico indice di stabilità dello sciatore, fornisce una stima della stabilità. Il metodo RTA si è anche rivelato in grado di identificare i potenziali strati deboli simulati che hanno poi mostrato caratteristiche compatibili con la stabilità verificata su scala regionale. L'approccio proposto, basato sulle differenze relative, evita possibili incoerenze con le procedure di acquisizione dei dati, o ancora, differenze tra dati simulati e raccolti manualmente. Mentre il metodo RTA consente di identificare i potenziali strati deboli all'interno di un profilo stratigrafico, non fornisce però una stima assoluta della sua debolezza.



## INTRODUZIONE

Le informazioni sulla stratigrafia del manto nevoso sono essenziali per la previsione valanghe e le si considerano come i dati più importanti dopo le osservazioni dirette delle valanghe o i test di stabilità in situ (LaChapelle, 1980). L'interpretazione dei dati disponibili (p. es. profili stratigrafici) è soggettiva al punto che molti la considerano un'arte più che una scienza (Schweizer and Wiesinger, 2001). Ridurre il grado di soggettività nell'interpretazione dei profili stratigrafici riguardo all'instabilità è un obiettivo impegnativo e in questi ultimi anni sono stati proposti diversi metodi semiquantitativi.

Per esempio, il metodo della somma delle variabili critiche (TSA) presentato per la prima volta da Jamieson e Schweizer (2005) e affinato da Schweizer e Jamieson (2007) e Schweizer et al. (2008) stabilisce un procedimento obiettivo e semiquanti-

tativo per dedurre l'instabilità della neve sulla base di un profilo stratigrafico.

Il metodo TSA identifica le discontinuità strutturali legate all'instabilità meccanica analizzando gli strati di neve e le loro proprietà interfacciali.

Sono stati individuati sei parametri della neve legati all'instabilità strutturale all'interno del manto nevoso (Schweizer e Jamieson, 2003); tre di essi fanno riferimento alle proprietà interfacciali (differenza di dimensione dei grani e differenza di durezza tra due strati adiacenti, e profondità dello strato), tre rappresentano proprietà dello strato specifico (dimensione dei grani, durezza e tipologia dei grani). Il fatto che una variabile superi il rispettivo valore soglia (Tab. 1), viene considerato come indicatore di potenziale instabilità. Gli svantaggi principali del metodo TSA sono la ridotta specificità (nonostante un'elevata sensibilità) (Winkler e Schwei-

zer, 2009) e il fatto di basarsi su valori di soglia assoluti (per es. differenza dimensione dei grani in corrispondenza dell'interfaccia  $\geq 0,75$  mm). Sebbene i valori di soglia assoluti siano stati statisticamente ottimizzati utilizzando un'ampia serie di dati che includono profili rilevati in climi diversi, essi sono in parte soggettivi, essendo condizionati dalle procedure di misurazione adottate.

Inoltre, prima che il metodo TSA possa essere utilizzato per interpretare il profilo stratigrafico simulato (per es. il modello 1-D SNOWPACK) i valori di soglia assoluti devono essere modificati in modo da poter determinare i corrispondenti range critici per le caratteristiche simulate (Monti et al., 2012a). Nel caso in cui parte della parametrizzazione del modello sia affinata, (per es. stima della durezza della neve) i valori soglia TSA devono essere egualmente rettificati (Monti et al., 2012b).



Tab. 1 - Range critici delle variabili utilizzate per calcolare l'indice del TSA. Sono riportati i valori soglia utilizzati sia per i profili osservati che per quelli simulati.

VARIABILE	VALORE SOGLIA	
	Osservato	Simulato
Dimensione dei grani nello strato di rottura (mm)	$\geq 1.25$	$> 0.6$
Differenza nella dimensione dei grani (mm)	$\geq 0.75$	$\geq 40\%$
Differenza nella durezza	$\geq 1.7$	$\geq 1.7$
Durezza nello strato di rottura	$\leq 1.3$	$\leq 1.3$
Forma dei grani nello strato di rottura	persistente	persistente
Spessore del lastrone o profondità dello strato di rottura (cm)	$\leq 100$	$\leq 100$

© AINEVA

## OBIETTIVI

L'obiettivo di questo studio era definire un metodo per l'individuazione di potenziali strati deboli all'interno del manto nevoso. Abbiamo migliorato il metodo TSA trasformando ogni variabile in una quantità adimensionale, standardizzata all'interno del singolo profilo. Sono state utilizzate differenze e valori relativi per identificare la posizione degli strati che hanno una maggiore probabilità di altri di essere strati deboli. Il metodo della sommatoria delle variabili relative (RTA), rispetto al TSA, vuol essere meno sensibile alla soggettività intrinseca alle osservazioni manuali e più compatibile con i profili stratigrafici simulati ottenuti, per esempio, con il modello 1-D SNOWPACK. Abbiamo poi verificato se i potenziali strati deboli identificati all'interno dei profili simulati si potessero porre in relazione con la stabilità osservata.

## DATI

Per valutare la capacità del metodo RTA di individuare potenziali strati deboli, abbiamo verificato se fosse in grado di distinguere tra strati di rottura e non all'interno di 107 profili stratigrafici raccolti manual-

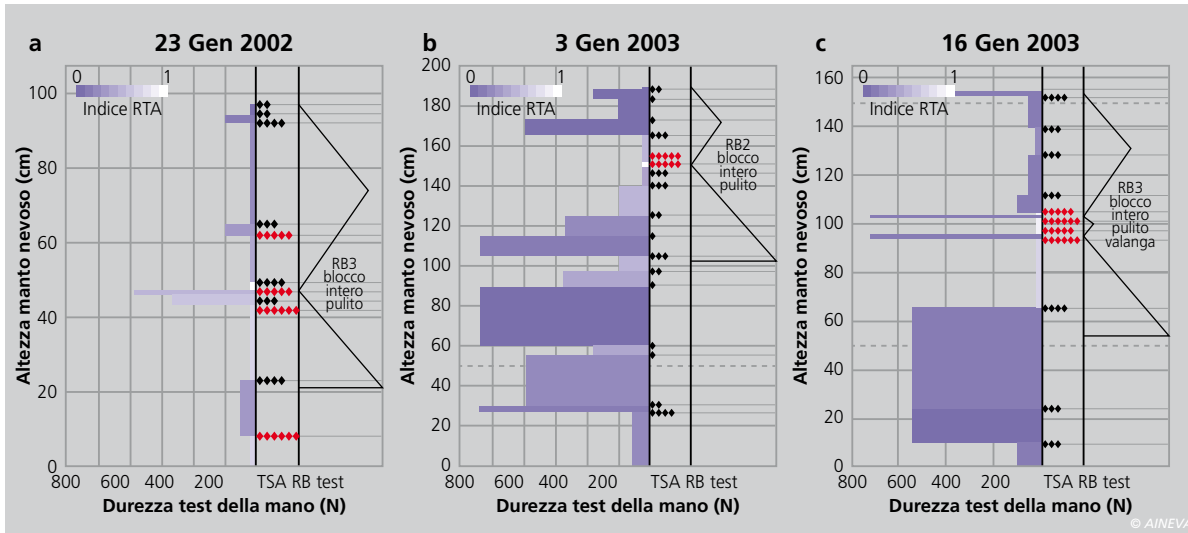


Fig. 1 - Profili stratigrafici manuali (a, b, c) associati al test del blocco di slittamento (RB test). Per ogni profilo è mostrato un profilo rilevato con il test della mano, completato con i colori associati ai valori indice forniti dal metodo della somma delle variabili relative (RTA). Viene inoltre riportato il numero di variabili nel rispettivo range critico determinato con il metodo della somma delle variabili critiche (TSA); un'interfaccia viene considerata potenzialmente instabile se 5 o 6 variabili ricadono nel rispettivo range critico (in rosso). L'indice RTA riesce a identificare potenziali strati deboli sia nei manti nevosi generalmente bene (b, c) e sia in quelli scarsamente (c) consolidati. Nel caso di profili perlopiù deboli, il metodo RTA non evidenzia diversi falsi strati potenzialmente critici, come invece avviene con il metodo TSA (a).

mente nelle immediate vicinanze delle linee di frattura di valanghe o su pendii adiacenti a valanghe innescate da sciatori. Abbiamo poi applicato il metodo RTA ai profili simulati relativi a due stazioni nivo-meteorologiche automatiche (AWS), Weissfluhjoch (2540 m s.l.m.) e Wannengrat (2440 m s.l.m.) nei pressi di Davos, Svizzera. Queste simulazioni sono state paragonate ai corrispondenti 83 profili stratigrafici osservati manualmente nelle aree di studio intorno alle due stazioni AWS dal 1999 al 2012.

I profili manuali sono affiancati da almeno un test di compressione (*compression test*, CT). In totale, sono stati individuati 180 strati di rottura mediante il test di compressione; solo per 129 di essi è stato specificato il carattere della frattura (van Herwijnen e Jamieson, 2007). In totale, 1790 strati osservati manualmente sono stati associati a 7926 strati simulati.

Infine, si sono utilizzate le simulazioni eseguite per quattro stazioni nivo-meteorologiche automatiche installate nei dintorni di Davos (Weissfluhjoch, 2540 m s.l.m., Gatschiefer 2310 m s.l.m., Hanengretjji 2450 m s.l.m., e Bärenälli 2560 m s.l.m.) allo scopo di confrontare le informazioni simulate sulla stabilità della neve con la stabilità verificata del manto nevoso regionale in un periodo di 10 giorni nel corso degli inverni 2001–2002 e 2002–2003. Per l'analisi, i profili stratigrafici manuali sono stati suddivisi in tre classi di stabilità (scarsa, discreta, buona) accorpando due coppie delle cinque

classi di stabilità proposte da Schweizer e Wiesinger (2001) (molto scarsa/scarsa e buona/molto buona).

In totale, si sono messi a confronto 33 profili simulati con le corrispondenti condizioni di stabilità regionale verificate.

## METODI

### Calcolo RTA

Proponiamo un metodo TSA riveduto per l'interpretazione del profilo stratigrafico. Le proprietà dello strato di neve considerate sono le stesse 6 variabili prese in esame con il metodo TSA (Tab. 1).

Non sono stati definiti valori soglia assoluti, ma le proprietà dello strato vengono analizzate in relazione con le proprietà del profilo disponibile. Ogni variabile è stata trasformata in una quantità adimensionale, ad esempio per la dimensione dei grani  $E$  dello strato  $i$ :

$$E_{RTA}^i = \frac{E^i - m_E}{\sigma_E} \quad (1)$$

dove,  $E_{RTA}^i$  è la dimensione relativa dei grani,  $E^i$  è la dimensione dei grani dello strato  $i$ ,  $m_E$  è la misura media dei grani facenti parte del profilo, e  $\sigma_E$  è il corrispondente scostamento standard.

Il valore di dimensione relativa dei grani è stato poi trasformato in un indice con un range compreso tra 0 e 1 ( $[E_{RTA}^{min}, E_{RTA}^{max}]$  a  $[0,1]$ ):

$$I_E^i = \frac{E_{RTA}^i - E_{RTA}^{min}}{E_{RTA}^{max} - E_{RTA}^{min}} \quad (2)$$

Il punteggio per ogni variabile di stabilità

strutturale viene assegnato al rispettivo strato di neve così come indicato per il metodo TSA in Monti et al. (2012a).

Infine, sommando le 6 variabili relative si ottiene l'indice del metodo di somma delle variabili relative (RTA) per un determinato strato  $i$ ; l'indice viene poi nuovamente trasformato in un range compreso tra 0 e 1 (Fig. 1).

### RTA applicato ai profili simulati

A differenza del metodo TSA, il metodo RTA non richiede alcuna correzione prima che possa essere applicato a caratteristiche del manto nevoso simulate. Per verificare se il metodo RTA fornisce risultati indicativi quando applicato a profili simulati, abbiamo messo a confronto gli strati di rottura individuati all'interno dei profili manuali mediante test di compressione (CT) con i potenziali strati deboli identificati dal RTA all'interno delle simulazioni. Per compiere il raffronto in modo oggettivo, gli strati deboli potenziali rilevati nei profili osservati sono stati confrontati con gli strati simulati posti approssimativamente alla stessa profondità (è stato adattato il metodo proposto da Lehning et al. (2001)). Secondo tale metodo, per prima cosa, viene azzerata la differenza di altezza tra i due profili modificando lo spessore della stratigrafia simulata; ai fini della mappatura è stato poi calcolato un range di profondità intorno al potenziale strato debole; all'interno di questo range sono stati ricercati i corrispondenti strati dei profili manuali.

Per effettuare un confronto oggettivo, gli strati potenzialmente deboli rilevati nei profili osservati sono stati correlati con gli strati presenti nelle simulazioni ad un'analoga profondità, adottando il metodo proposto da Lehning et al. (2001). In questa procedura, preliminarmente le differenze nell'altezza della neve sono state rimosse allungando o restringendo la stratigrafia calcolata; successivamente, ai fini del plottaggio, è stata calcolata una gamma di ampiezza attorno allo strato debole potenziale; entro questa gamma sono stati cercati manualmente gli strati corrispondenti. Abbiamo poi ricercato nel manto nevoso simulato i punti di debolezza rilevati mediante il metodo RTA intorno alla profondità dello strato di rottura individuato con CT. Per l'analisi abbiamo operato una distinzione tra strati caratterizzati da collasso improvviso (*sudden collapse*, SC) e rimanenti tipi di frattura (van Herwijnen e Jamieson, 2007).

#### Stima della stabilità sulla base di un manto nevoso simulato

Il metodo RTA, sia se applicato a profili manuali che simulati, non fornisce una

stima della stabilità del manto nevoso, ma individua soltanto gli strati all'interno di un profilo che sono da considerarsi potenzialmente deboli da un punto di vista strutturale. Nel modello di simulazione numerica del manto nevoso SNOWPACK, sono già implementati alcuni parametri meccanici o strutturali atti alla localizzazione di potenziali strati deboli e alla valutazione della loro resistenza (p.es. Durand et al. 1999; Lehning et al., 2004). Uno degli indici di stabilità forniti dal modello è l'indice di stabilità dello sciatore SK38, proposto da Föhn (1987) e rifinito da Jamieson and Johnston (1998). Tutti gli strati aventi un indice RTA superiore a 0,8 sono stati selezionati come potenziali strati deboli e si è quindi valutata la loro stabilità utilizzando il valore corrispondente di SK38. Abbiamo dunque classificato come potenzialmente instabili tutti gli strati con valore SK38 inferiore a 1 (Fig. 2).

## RISULTATI

Abbiamo voluto verificare se l'indice RTA fosse in grado di distinguere, all'interno di profili manuali eseguiti su pendii in-

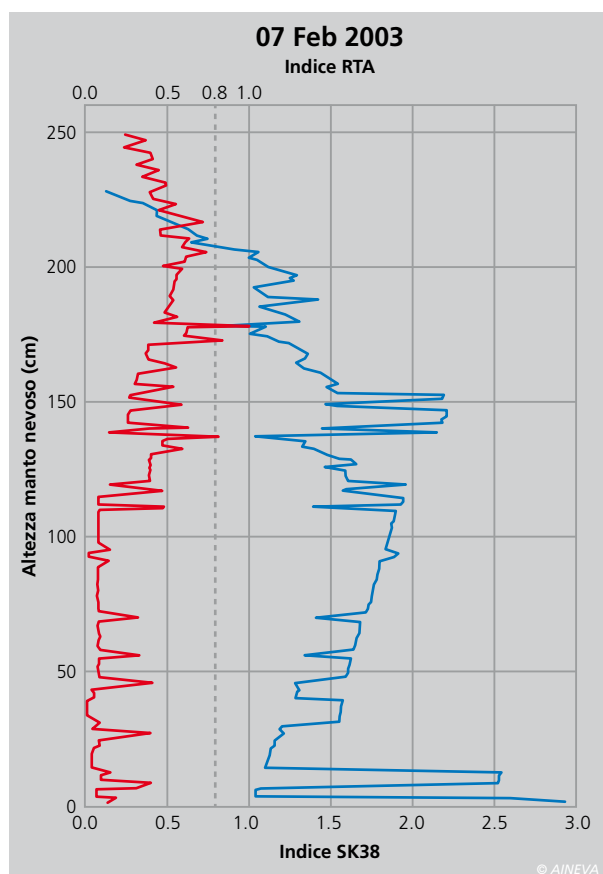
stabili, gli strati di rottura (n = 138) dagli altri strati (Fig. 3).

Il metodo RTA ha mostrato maggiore efficacia del metodo TSA nel discriminare tra strati di rottura e non. Ponendo 0,8 come valore soglia, RTA ha evidenziato una sensibilità di 0,85 ed una specificità di 0,89 (rispettivamente 0,67 e 0,86 per il metodo TSA).

Per verificare se il metodo RTA possa essere applicato in modo appropriato al manto nevoso simulato, per ogni strato di rottura individuato in un profilo manuale con il CT (n=180), si è ricercato un corrispondente potenziale strato debole nel profilo simulato. Ancora una volta il metodo RTA ha mostrato di saper distinguere tra strati di rottura e non (Fig. 4).

Prendendo in esame gli strati deboli identificati tramite CT caratterizzati da tutte le tipologie di frattura e utilizzando 0,8 come valore soglia per l'indice RTA, i metodi RTA e TSA hanno evidenziato un grado di sensibilità analogo (POD=0,48); migliori risultati si sono ottenuti quando si sono presi in esame solo gli strati deboli con tipologia di frattura SC (n=15): sensibilità per RTA 0,73 e 0,8 per TSA;

Fig. 2 - Profili RTA e SK38. Gli strati con valore dell'indice RTA superiore a 0,8 (linea rossa) sono stati classificati come potenzialmente instabili (in questo caso 3 strati, a 178 cm, 172 cm e 137 cm). La stabilità di questi strati è stata poi valutata in base all'indice SK38 (linea azzurra). In questo caso, lo strato a 178 cm presenta un valore SK38 inferiore a 1 ed è classificato come instabile.



specificità 0,89 per RTA e 0,86 per TSA. Infine, si sono messi a confronto i risultati di stabilità del modello SNOWPACK, ottenuti dall'abbinata RTA e SK38, con la stabilità regionale osservata (verificata) (n=33). Su 12 casi associati a stabilità regionale classificata come "scarsa", 11 sono stati correttamente previsti dal modello. 9 su 10 casi di stabilità regionale classificata come "discreta" sono invece stati classificati come "scarsa" dal modello. Infine, il modello ha classificato correttamente come "buona" la stabilità in 8 casi su 11.

## CONCLUSIONI

Abbiamo proposto una versione perfezionata del metodo TSA per l'interpretazione del profilo stratigrafico.

Tale metodo, chiamato della somma delle variabili relative (RTA), ha evidenziato di saper distinguere efficacemente, all'interno di un determinato profilo manuale, tra gli strati deboli e non.

Il metodo RTA consente di identificare potenziali strati deboli all'interno di un profilo, ma non fornisce una stima assoluta della loro debolezza.

Il miglioramento rispetto al metodo della somma delle variabili critiche (TSA) è evidente, in particolare in termini di accresciuta specificità.

L'approccio RTA si può applicare alla stratigrafia simulata del manto nevoso (per es. modello SNOWPACK) senza la necessità di ulteriori tarature. I risultati ottenuti con il manto nevoso simulato sono comparabili a quelli che si ottengono con il TSA, ma con il vantaggio di non utilizzare valori soglia assoluti (da ricorreggere nel caso di futuri miglioramenti del modello). L'accoppiamento del metodo RTA all'indice di stabilità dello sciatore (SK38) è stato utilizzato per fornire una stima della stabilità. Pur con un limitato numero di profili di stabilità osservati, le classi di stabilità "scarsa" e "discreta" sono state differenziate in modo appropriato dalla classe di stabilità "buona".

I risultati sono incoraggianti e mostrano che il manto nevoso simulato può essere utilizzato per derivare la stabilità della neve.

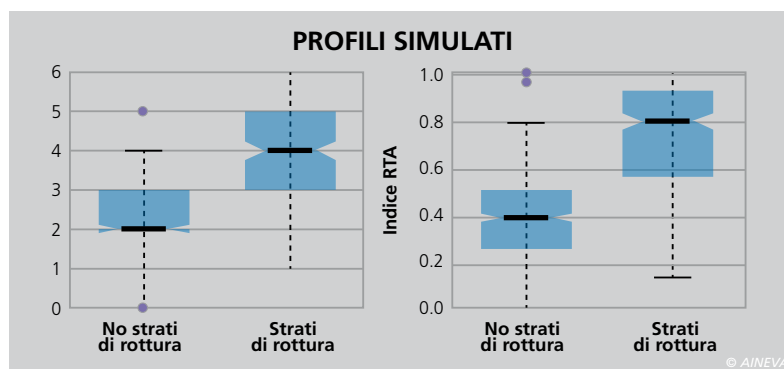
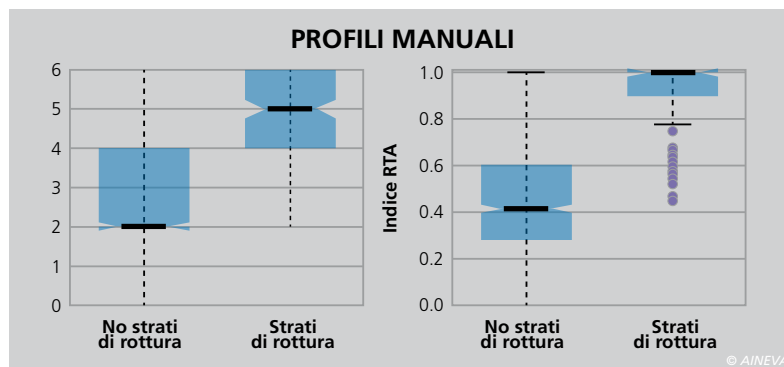


Fig. 3 - Indice RTA e TSA per strati di rottura e non, identificati con il test del blocco. Le due distribuzioni si sono rivelate statisticamente diverse (U-test Mann-Whitney non parametrico  $p < 0,001$ ). I riquadri includono lo scarto interquartile dal primo al terzo quartile con una linea orizzontale che evidenzia la mediana. Le tacche in corrispondenza della mediana denotano l'intervallo di confidenza ( $p < 0,05$ ). I "baffi" evidenziano il range dei valori osservati che cadono in 1,5 volte sopra e sotto lo scarto interquartile.

Fig. 4 - Indici RTA e TSA per strati simulati di rottura e non, corrispondenti agli strati deboli individuati nei profili manuali mediante test di compressione (CT). Le differenze osservate tra le distribuzioni sono state giudicate statisticamente significative (test U,  $p < 0,001$ ).

## Bibliografia

- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérindol, L. and Martin, E., 1999. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 45(151): 469-484.
- Föhn, P.M.B., 1987. The stability index and various triggering mechanisms. In: B. Salm and H. Gubler (Editors), Symposium at Davos 1986 - Avalanche Formation, Movement and Effects, IAHS Publ., 162. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, Oxfordshire, U.K., pp. 195-214.
- Jamieson, J.B. and Johnston, C.D., 1998. Refinements to the stability index for skier-triggered dry slab avalanches. *Ann. Glaciol.*, 26: 296-302.
- Jamieson, J.B. and Schweizer, J., 2005. Using a checklist to assess manual snow profiles. *Avalanche News*, 72: 57-61.
- LaChapelle, E.R., 1980. The fundamental process in conventional avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 26 (94): 75-84.
- Lehning, M., Fierz, C., Brown, R.L. and Jamieson, J.B., 2004. Modeling instability for the snow cover model SNOWPACK. *Annals of Glaciology*, 38: 331-338.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R.L., Rusi, T., Stöckli, U. and Zimmerli, M., 1999. Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 30(1-3): 145-157.
- Lehning, M., Fierz, C. and Lundy, C., 2001. An objective snow profile comparison method and its application to SNOWPACK. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33(2-3): 253-261.
- Monti, F., Cagnati, A., Valt, M. and Schweizer, J., 2012a. A new method for visualizing snow stability profiles. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 78: 64-72.
- Monti, F., Schweizer, J., and Fierz, C., 2012b. Weak layer detection in simulated snow stratigraphy. *Proceedings International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska state, USA*, pp. 16-21 September 2012: 92-97.
- Schweizer, J. and Jamieson, J.B., 2007. A threshold sum approach to stability evaluation of manual snow profiles. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 47(1-2): 50-59.
- Schweizer, J. and Jamieson, J.B., 2003. Snowpack properties for snow profile analysis. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 37 (3): 233-241.
- Schweizer, J. and Wiesinger, T., 2001. Snow profile interpretation for stability evaluation. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33(2-3): 179-188.
- Schweizer, J., McCammon, I., Jamieson, J.B., 2008. Snowpack observations and fracture concepts for skier-triggering of dry-snow slab avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 51(2-3): 112-121
- Van Herwijnen, A. and Jamieson, J.B., 2007. Fracture character in compression tests. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 47(1-2): 60-68.
- Winkler, K. and Schweizer, J., 2009. Comparison of snow stability tests: Extended column test, rutschblock test and compression test. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 59(2-3): 217-226