Région Autonome Vallée d'Aoste

Regione Autonoma Valle d'Aosta

Comune di
VALTOURNENCHE
amministrazione comunale

REALIZZAZIONE DI BARRIERE FERMANEVE A PROTEZIONE DELLA STRADA DI PROMINDOZ, COMUNE DI VALTOURNENCHE



PROGETTO ESECUTIVO

PROGETTISTA INCARICATO:

Studio tecnico di ingegneria GIERREVU srl
Passage du Verger 5 - 11100 Aosta
Tel: 0165 40322 / fax 0165 40322
mail: studiogrv@fastwebnet.it
pec: gierrevu@pecvda.it

data:	scala:	codice elaborato:
02/08/2022		PE.1DC.103.NIV

Revisione	Data	Descrizione	Progettisti
REV 01	14/04/2023	Aggiornamento prezzi 2023	Ing. Fabio Inzani

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA VALLE D'AOSTA
DR. ING. GRIMOD ALBERTO
Sez. A Settori:
a) civile
b) ambientale
N° A 664

Indice

1 Introduzione 2
2 Normativa di riferimento 3
3 Descrizione generale 4
3.1 Descrizione della Strada Comunale di Promindoz 4
3.2 Descrizione del sito valanghivo 4
4 Sezione di analisi 6
4.1 Caratteristiche cliviometriche 6
4.2 Caratteristiche morfologiche 6
4.3 Copertura dei suoli 7
4.3.1 Rischio di caduta massi 8
4.4 Caratteristiche vegetazionali 9
4.5 Aspetti geologici e idrogeologici 10
4.6 Caratteristiche nivometriche 10
4.7 Caratteristiche anemometriche 14
5 Sezione di valutazione 15
5.1 Zona di distacco 15
5.2 Zona di scorrimento 15
5.3 Zona di arresto 16
5.4 Dinamica della valanga 16

1 Introduzione

La presente relazione ha lo scopo di analizzare approfonditamente le caratteristiche nivologiche e valanghive dell'area in oggetto, con particolare riguardo alla possibile interferenza di un fenomeno valanghivo con la Strada Comunale di Promindoz.

La relazione è composta dalle seguenti parti:

- Introduzione generale e descrizione del sito valanghivo, in cui si descriverà la zona di distacco, di scorrimento e di analisi;
- Sezione di analisi: in cui si analizzano le principali caratteristiche morfologiche, vegetazionali, climatologiche e nivologiche del sito;
- Sezione di valutazione: in cui si approfondirà il quadro relativo al fenomeno valanghivo e alla dinamica della valanga;
- Considerazioni generali relative alla possibile interferenza dei fenomeni valanghivi con la Strada Comunale.

Per la redazione del presente documento si è fatto riferimento alla seguente documentazione:

- Catasto valanghe Regione Autonoma Valle d'Aosta;
- Documentazione derivante dal GeoNavigatore, relativamente al rischio Valanghe (L.R. 11 – Art. 37);
- Cartografia CTR (Carta Tecnica Regionale) in scala 1:10.000;
- Foto storiche di eventi valanghivi e foto estive;
- Documento per la Definizione dei valori di progetto di parametri nivometrici standard per la prevenzione del rischio valanghivo sul territorio valdostano (agg. 08/2013) – Regione Autonoma Valle d'Aosta.

Sono stati effettuati diversi sopralluoghi in-situ da parte dell'ing. Grimod A. e del Geol. Zamparutti P. al fine di analizzare le condizioni morfologiche, geotecniche, vegetative e del sottofondo della zona di studio.
Tutti i risultati esposti si riferiscono alle attuali condizioni geomorfologiche e vegetative del sito d'indagine ed alle caratteristiche morfo-cliviometriche desunte dalla cartografia disponibile e dal rilievo effettuato. Eventuali variazioni di tali condizioni potrebbero modificare il livello di pericolosità da valanga del sito in esame e comporterebbe quindi l'aggiornamento del presente studio.

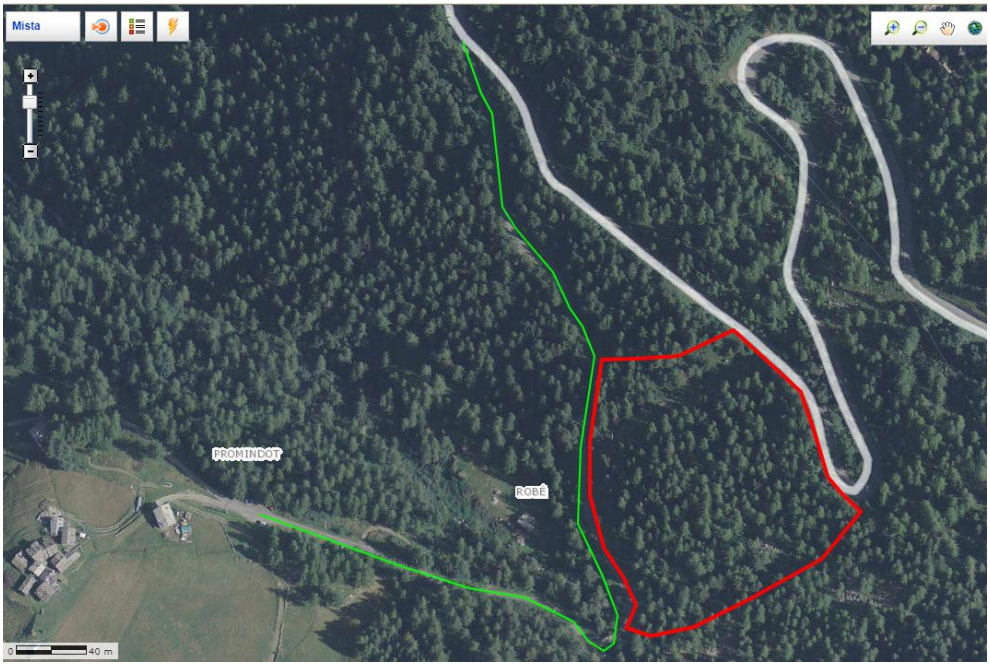
2 Normativa di riferimento

La presente relazione fa riferimento alle Direttive Svizzera per la costruzione di opere di premunizione contro le valanghe nella zona di distacco – Ufficio Federale dell'Ambiente UFAM – Direttiva tecnica: aiuto all'esecuzione, 2007.

3 Descrizione generale

3.1 Descrizione della Strada Comunale di Promindoz

La Strada Comunale si sviluppa per circa 560 m, dall'intersezione con la Strada Comunale per Cheneil fino al parcheggio in località Promindoz.
L'area di studio inizia a circa 200 m dal bivio con la strada per Cheneil; presenta uno sviluppo longitudinale lungo la Strada Comunale di circa 150-160 m. Lungo il versante si estende tra la strada comunale di Promindoz e il tornante della strada comunale per Cheneil, per circa 130 m.



In verde lo sviluppo della Strada Comunale; in rosso la zona di studio

3.2 Descrizione del sito valanghivo

La Strada Comunale di Promindoz corre nel settore inferiore di una zona boschiva che in un tratto di circa 80 ml presenta una zona senza alberi ad alto fusto.
Tale area ha dato origine in passato a fenomeni valanghivi che frequentemente hanno intercettato la strada stessa.
Si presume che la porzione di versante sia quindi interessato da valanghe di fondo (di "slittamento" o "scivolamento") che si verificano principalmente a fine stagione, a seguito di variazioni termiche importanti e/o grossi accumuli di neve.
Tali fenomeni valanghivi, nella gran parte dei casi, interessano l'intero spessore del manto nevoso e sono spesso capaci di mettere a nudo la copertura vegetale del versante.
Tali scivolamenti del manto nevoso, che possono interessare pressoché tutto il versante senza copertura boschiva, sono caratterizzati dal movimento di lastre di notevole dimensione che presentano spessori e volumi rilevanti.
L'area di distacco ha quindi uno sviluppo di circa 100 m e una lunghezza sul versante variabile dai 10 ai 35 m, e si trova ad una quota di circa 1880-1900 m s.l.m..

Dalle analisi del versante si può evincere che le valanghe che interessano la zona di studio hanno le seguenti caratteristiche:

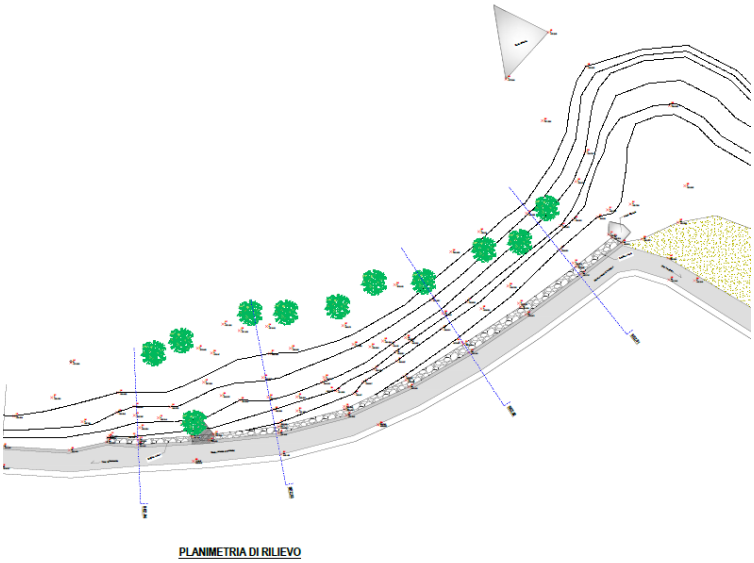
- TIPO DI DISTACCO: l'innesco è di tipo lineare e dà luogo ad una valanga che può coinvolgere l'intero versante (**valanga a lastroni**);
- POSIZIONE DELLA SUPERFICIE DI SLITTAMENTO: generalmente coinvolge l'intero spessore del manto nevoso, che viene generalmente messo a nudo a seguito del fenomeno valanghivo (**valanga di fondo**);
- FORMA DEL PERCORSO: la valanga coinvolge l'intero versante (**valanga di versante**);
- TIPO DI MOVIMENTO: il moto della valanga avviene generalmente a contatto con la superficie del terreno (**valanga radente**)
- UMIDITA DELLA NEVE: generalmente il contenuto d'acqua risulta essere abbastanza elevata (**valanga di neve umida o** bagnata);
- CAUSA DI INNESCO: l'innesco, di tipo naturale, avviene a seguito di forti variazioni di temperature/abbondanti nevicate/incremento dell'umidità del sito (**valanga spontanea**).

4 Sezione di analisi

La zona di distacco risulta semplice, di dimensioni ridotte e con caratteristiche abbastanza omogenee in termini di pendenza e caratteristiche di copertura del suolo.
La direttrice di scivolamento maggiormente esposta al pericolo valanghivo risulta essere quella di massima pendenza e si sviluppa sull'intera area di distacco, di conseguenza la Strada Comunale è assoggettata ad un rischio valanga su un lineare di circa 80 m.
Il versante ha una esposizione verso Ovest – Sud-Ovest.

4.1 Caratteristiche cliviometriche

Dal rilievo in-situ, eseguito con stazione totale e triplometro, è stato possibile definire diversi profili longitudinali della zona interessata dai fenomeni valanghivi.
Con riferimento al profilo più critico, il pendio presenta un dislivello complessivo di circa 15 m.
Lo sviluppo inclinato è di circa 20 m, con pendenze comprese tra i 35° e i 42°, con delle punte a circa 60°.



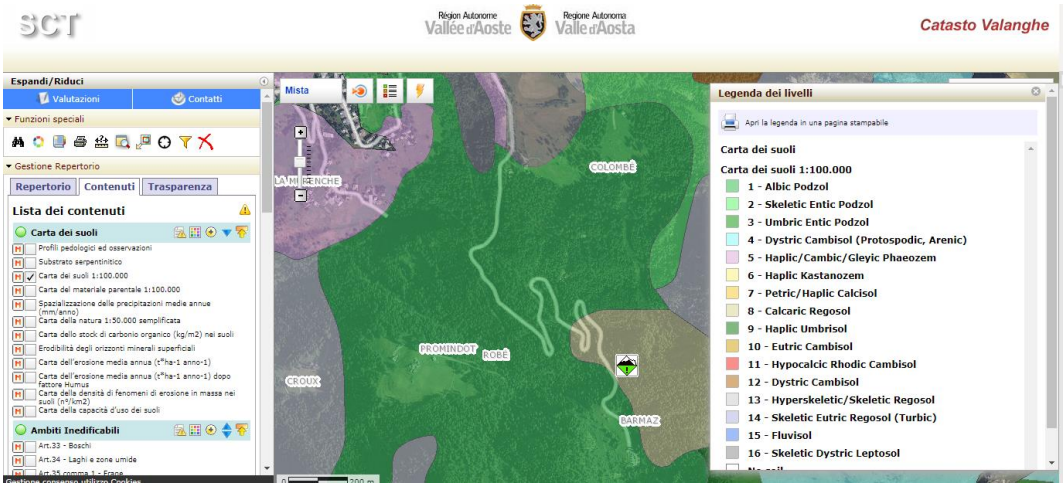
Rilievo con curva di livello

4.2 Caratteristiche morfologiche

Il versante è molto regolare, privo di avvallamenti, impluvi o corridoi di valanga che evidenzino l'esistenza di zone percorse con maggiore frequenza da valanghe. Tuttavia, si denota un "salto" a circa 3-4 m dalla testa del muro, con un incremento repentino della pendenza del versante.
A scala decametrica – pluridecametrica la morfologia definisce un profilo di massima pendenza abbastanza regolare, con pendenza progressivamente crescente dal piede alla sommità del versante.
A scala metrica – plurimetrica, il pendio appare generalmente liscio, tranne che in qualche sporadico settore dove compaiono rotture di pendenza con perimetro sub-circolare che rappresentano probabilmente le cicatrici di piccoli scivolamenti superficiali (frane corticali stabilizzate). La dimensione di tali irregolarità morfologiche non è tale da indurre rilevanti variazioni di tensione nel manto nevoso e quindi di innescare lo scivolamento valanghivo.

4.3 Copertura dei suoli

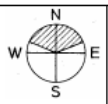
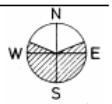
Con riferimento al GeoNavigatore regionale, la copertura prevalente del suolo risulta essere di tipo Albic Poodzol, tipico terreno che si trova sotto vegetazione subalpina o, localmente, sotto prateria alpina, soprattutto su materiali morenici o rocce acide, ma anche su rocce mafiche e serpentinitiche. Il processo che lo forma si chiama "podzolizzazione", ed è identificato da una forte eluviazione di metalli associati a sostanza organica solubile verso orizzonti profondi, che crea così orizzonti minerali di superficie poveri in nutrienti e sostanza organica, contrapposti ad orizzonti illuviali profondi con accumulo di metalli e/o complessi organo-minerali. Morfologicamente, questo suolo è uno tra i più facilmente riconoscibili, caratterizzato da una sequenza di orizzonti dal colore spiccatamente diverso.



Con riferimento alla Tabella 5 delle direttive svizzere è possibile determinare il fattore di scivolamento del pendio, considerando una esposizione ENE-S-ONO.

Fattore di scivolamento: N = 2.4 (Classe 3)

Tab. 5 > Classi di terreno e coefficienti di slittamento.

Classi di terreno	Fattore di slittamento N	
	 Esposizione ONO-N-ENE	 Esposizione ENE-S-ONO
Classe 1		
• Detrito grossolano (d* ≥ 30 cm) • Terreno abbondantemente ricoperto da blocchi di roccia di piccole e grandi dimensioni	1.2	1.3
Classe 2		
• Superfici ricoperte da cespugli di ontano ben sviluppati o da pini striscianti alti almeno 1 m • Gibbosità molto ben sviluppate (altezza superiore a 50 cm), ricoperte da cotica erbosa o piccoli arbusti • Berme provocate dal bestiame, ben pronunciate • Ciottoli grossi (d* ca. 10–30 cm)	1.6	1.8
Classe 3		
• Cotica erbosa a stelo breve, cosparsa di piccoli cespugli (erica, rododendri, mirtilli, ontani, pini striscianti,con altezza inferiore a circa 1 m) • Ciottoli di piccole dimensioni (d* ≤ 10 cm) alternati a cotica erbosa e piccoli cespugli • Gibbosità poco sviluppate (altezza inferiore a 50 cm) ricoperte di cotica erbosa liscia e piccoli cespugli • Cotica erbosa con berme provocate dal bestiame, poco pronunciate	2.0	2.4
Classe 4		
• Cotica erbosa liscia, a stelo lungo, uniforme • Lastre di roccia affioranti, lisce, con stratificazione parallela al pendio • Detrito di falda liscio, mescolato con terra • Conche paludose	2.6	3.2

d* è il diametro medio determinante dei blocchi per stabilire la rugosità del suolo.

4.3.1 Rischio di caduta massi

Sul versante si denota la presenza di alcuni affioramenti rocciosi che potrebbero dare origine, soprattutto allo scioglimento della neve, a dei piccoli fenomeni di caduta massi. La dimensione dei blocchi è dell'ordine di 30-50 cm di diametro e le energie in gioco non supereranno i 5 kJ.

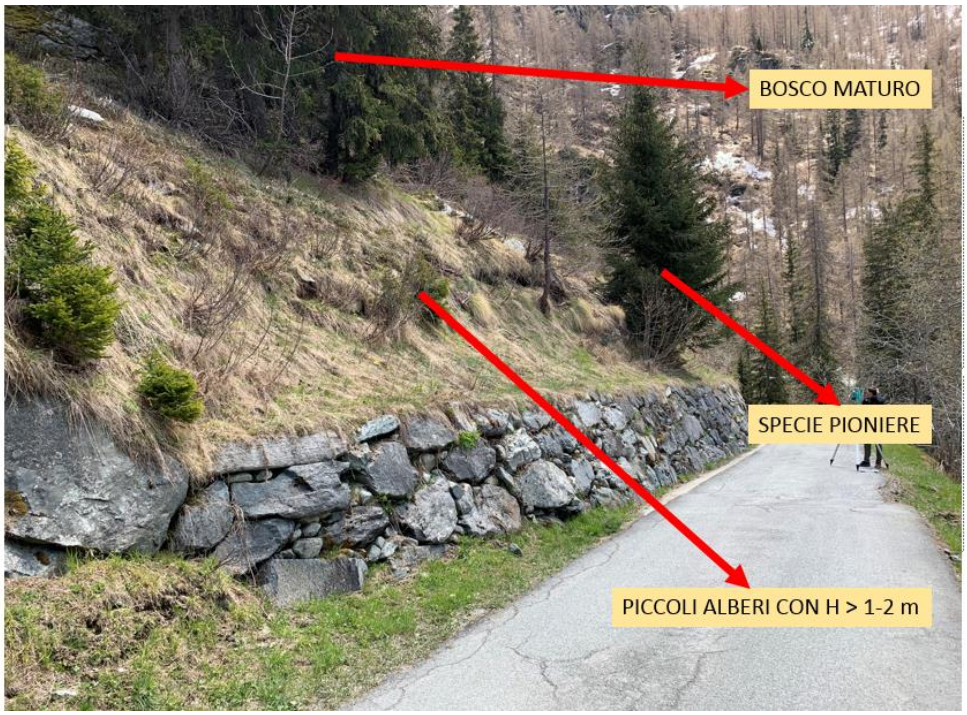




4.4 Caratteristiche vegetazionali

Ad eccezione di qualche settore dove si denotano piccoli affioramenti rocciosi e sporadiche chiazze detritiche, il pendio oggetto di studio è coperto da un bosco di conifere, fatto salvo per la zona di distacco/scivolamento che è caratterizzata da una copertura vegetale composta da arbusti (es. rododendri) e vegetazione Il tappeto è continuo nella metà inferiore nel pendio, interrotto da qualche sporadica chiazza detritica, o da rocce sub-affioranti, in quello superiore.
Da un'analisi dendrologica speditiva si denotano le seguenti caratteristiche degli alberi presenti in-situ:

- Zona superiore: larici e abeti di altezza superiore a 5-10m, che risultano essere maturi → si stima un'età superiore a 25-50 anni;
- Zona di distacco/scivolamento: piccoli larici con altezza inferiore a 1.0 m → si stima un'età inferiore a 1-2 anni;
- Zona di accumulo: alcune zone limitate alla presenza di pochi alberi (gruppi di 1-3 alberi), con specie pioniere di altezza di 3-5 m → da cui si stima un'età 10-25 anni.









Considerando la tipologia di suolo di copertura e le caratteristiche della vegetazione, in accordo alla Direttiva Svizzera si può definire la tangente dell'angolo di attrito tra terreno e neve, che viene definito pari a:

tangente dell'angolo di attrito suolo-terreno: tan φ = 0.60

in quanto si considera un terreno rugoso.

4.5 Aspetti geologici e idrogeologici

Si faccia riferimento alla Relazione Geologica (elaborato 102.GEOL).

4.6 Caratteristiche nivometriche

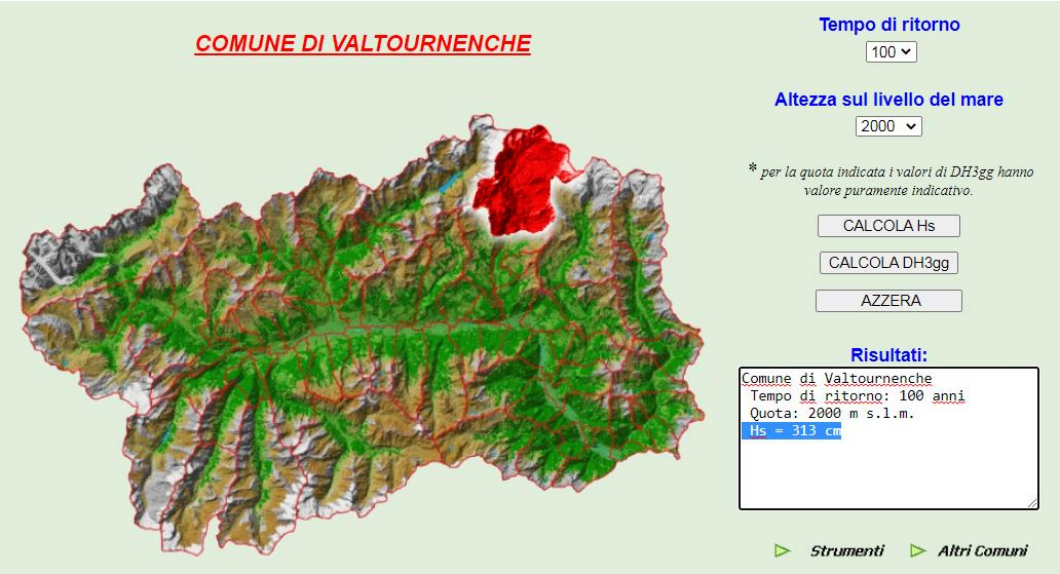
I dati nivometrici sono stati reperiti dal sito della Regione Autonoma Valle d'Aosta, che permette di definire i valori di progetto standard per la prevenzione del rischio valanghivo sul tutto il territorio valdostano.
(https://www.regione.vda.it/territorio/territorio/parametrinivometrici/COMUNI/jump_comuni.htm).
Si fa quindi riferimento a:

- Comune di Valtournenche;
- Quota di 2000 m slm (a favore di sicurezza);
- Tempo di ritorno di 100 anni.

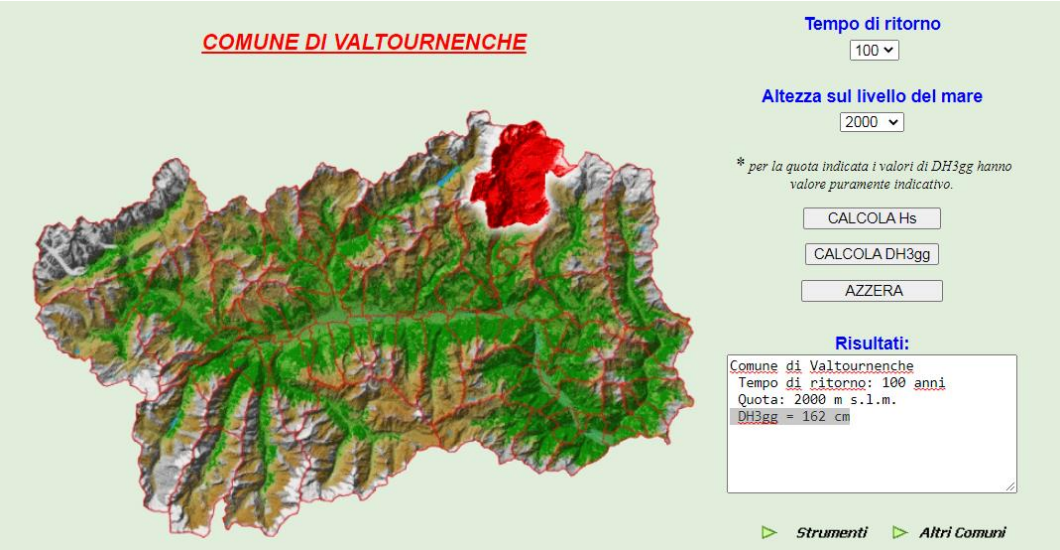
Si calcola quindi:

- ➔ Hs: altezza del manto nevoso = 313 cm;
- ➔ DH3gg: incremento di altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi = 162 cm.

I valori di progetto di Hs e DH3gg forniti dall'applicativo sono il risultato dell'elaborazione statistica di dati nivometrici misurati in campi neve e stazioni di rilevamento di tipo automatico ed hanno pertanto caratteristiche analoghe agli stessi, ovvero sono rappresentativi di valori idealmente misurati sulla verticale a partire da una superficie di riferimento orizzontale.



Calcolo della Hs



Calcolo del DH3gg

A questo punto, conoscendo la pendenza media del versante (42°) e del pendio in corrispondenza del punto di installazione delle opere (35°) è possibile calcolare l'altezza utile di progetto delle opere fermaneve (Dk).
Conformemente alle indicazioni fornite dalle Direttive per la costruzione delle opere di premunizione contro le valanghe nella zona di distacco (2007), nel seguito richiamate più semplicemente come Direttive, il tool di supporto online sviluppato dalla Regione VdA per il calcolo dell'altezza utile di un'opera di ritenuta, indicata con Dk e rappresentativa della distanza misurata perpendicolarmente al pendio tra il bordo superiore della superficie di appoggio offerta dall'opera ed il terreno, utilizza la seguente relazione (vedi Art.16 e Art.20 delle Direttive):

$$Dk = Hk \cdot cos(\theta)$$

dove:

- θ è la pendenza media del versante su cui si devono realizzare le opere di ritenuta;
- Hk è l'altezza dell'opera, definita come la distanza misurata verticalmente tra il bordo superiore della superficie di appoggio offerta dall'opera e il terreno (vedi Art.18 delle Direttive). Ai sensi dell'Art.19 delle Direttive il valore minimo ammissibile per Hk deve corrispondere a quello all'altezza estrema della neve prevedibile sul posto:
-

$$Hk \geq Hestr$$

Da cui segue che:

$$Dk \geq Hestr \cdot cos(\theta)$$

L'altezza estrema Hestr è definita (Art.15 delle Direttive) come il valore massimo prevedibile dell'altezza massima della neve su un arco di diversi anni sul posto dell'opera da costruire. Il calcolo dell'altezza estrema della neve da tenere in considerazione sul posto delle opere, Hestr, è effettuabile a partire dalla media delle altezze estreme della neve, $\overline{Hestr}$, mediante il procedimento di cui all'Art.17 delle Direttive.

La media dell'altezza estrema della neve $\overline{Hestr}$ relativa ad una data quota e per un fissato tempo di ritorno (che nelle Direttive è fissato pari a cento anni, vedi Art.17) corrisponde alla variabile nivometrica Hs, fornita direttamente dall'applicativo per la zona, la quota (z) ed il tempo di ritorno (T) di interesse.

$$\overline{Hestr}(T;z) = Hs(T;z)$$

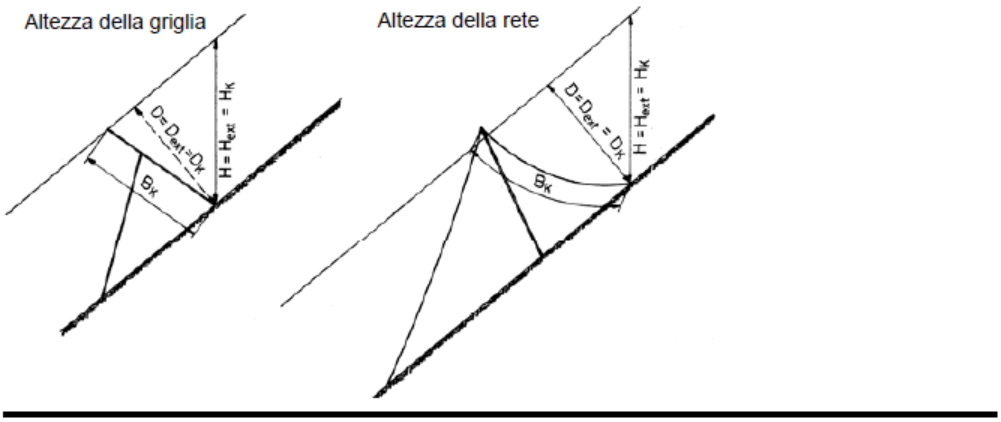
Il corretto calcolo di Hestr a partire dai valori stimati di $\overline{Hestr}$ (ovvero di **Hs**) richiede l'effettuazione di osservazioni dell'altezza del manto nevoso nei posti in cui si dovranno realizzare le opere, da effettuarsi mediante campagne di misura possibilmente realizzate sull'arco di diversi anni (vedi Art.17 delle Direttive). Qualora tali campagne sperimentali non risultassero attuabili, sarà cura del progettista proporre, in relazione alle specifiche caratteristiche morfologiche, meteorologiche e nivometriche del sito oggetto di intervento, la correzione che dal valore stimato di $\overline{Hestr}$ consente di passare al valore di Hestr. A tal proposito si segnala che il tool online per la stima dell'altezza utile di un'opera di ritenuta Dk contenuto nell'applicativo utilizza le seguenti ipotesi di calcolo:

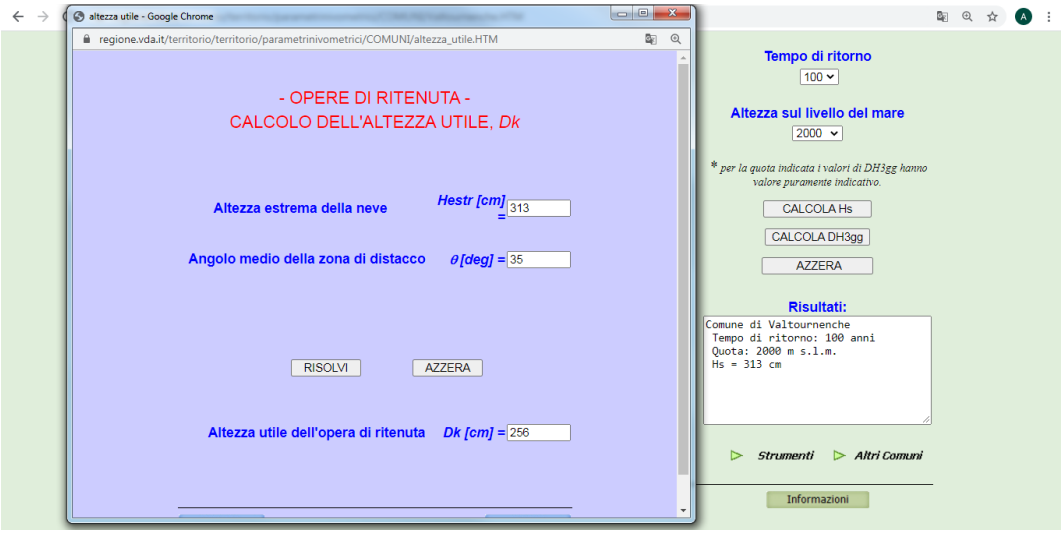
a) valore di Hk pari al minimo ammissibile ($Hk = Hestr, Dk = Hestr \cdot cos(\theta)$);

b) valore dell'altezza estrema sul posto dell'opera da costruire coincidente con quello medio delle altezze estreme della neve ($Hestr = \overline{Hestr}$), ipotesi quest'ultima che – fatte salve zone di distacco soggette a sovraccarichi di natura eolica – si ritiene conduca generalmente ad un dimensionamento cautelativo delle opere di ritenuta (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2013).

Considerando un'inclinazione media del pendio in corrispondenza delle opere fermaneve pari a $\psi = 35°$, si definisce il Dk:

Fig. 12 > Altezza della griglia e della rete.



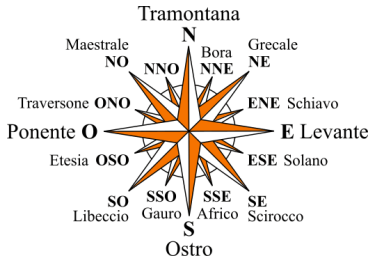


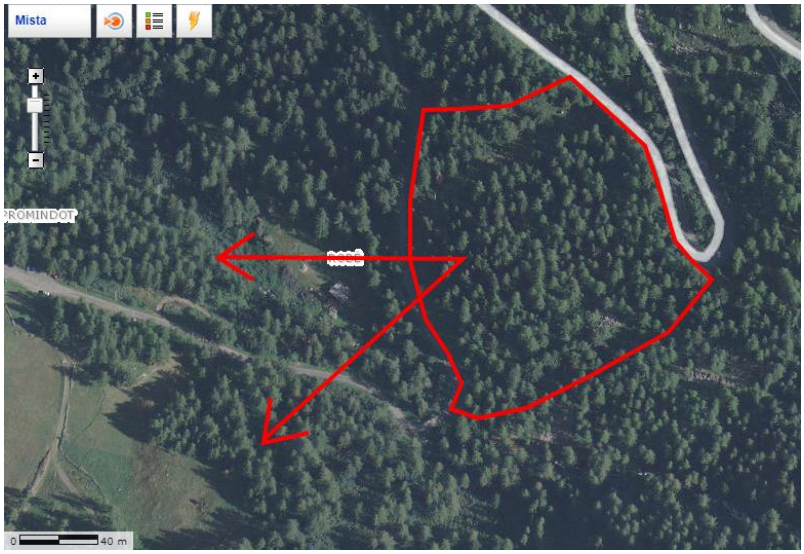
Calcolo del Dk

Altezza utile delle strutture di protezione: Dk = 256 cm

4.7 Caratteristiche anemometriche

Il versante in oggetto è esposto a O-SO. Tuttavia, data la copertura boschiva ad alto fusto, la zona di studio non è soggetta a venti particolarmente intensi che possano creare accumuli legati al vento e/o cornici.





4.8 Caratteristiche del manto nevoso

Il manto nevoso che generalmente è interessato dai fenomeni valanghivi può essere caratterizzato da neve umida, ciò che contiene acqua al suo interno e una temperatura prossima allo 0°C. Le valanghe si generano a seguito di un rialzo termico che nella gran parte dei casi avviene nei periodi primaverili.
La neve può quindi essere caratterizzata da una densità relativamente elevata:

Densità della neve: ρ = 300-320 kg/m3

5 Sezione di valutazione

Con riferimento alle considerazioni effettuate nel capitolo precedente, il sito valanghivo è caratterizzato da una zona di distacco che fondamentalmente coincide anche con la zona di scorrimento, ed una zona di arresto che si identifica sulla Strada Comunale.



5.1 Zona di distacco

È individuabile subito al di sotto del milite del bosco maturo.
Essa presenta le seguenti caratteristiche:

- Inclinazione media: circa 35-40°;
- Quota di distacco: circa 1900 m s.l.m.;
- Fronte di distacco: circa 100 m;
- Spessore del fronte instabile: 3.13 m (Hs);
- Tipo di neve: neve primaverile generalmente umida;
- Tipo di valanga: di fondo per scivolamento di lastroni che interessano tutto lo strato nevoso;
- Cinematismo di rottura: fessurazione per trazione (bocche di balena) o percolazione di acqua tra terreno e manto nevoso;
- Rugosità superficie: relativamente bassa (valori del coefficiente di slittamento N medio-alto).

5.2 Zona di scorrimento

È individuabile nella zona tra il limite inferiore del bosco e la testa del muro della strada comunale, essa coincide con la zona di distacco. In corrispondenza della zona di scorrimento la valanga inizia il suo moto verso valle (per effetto della gravità) ed acquista velocità ed energia. Durante lo scivolamento le lastre si frantumano creando dei grumi che possono avere diametri importanti di qualche decimetro. Inoltre, per effetto dell'attrito delle lastre sulla copertura nevosa presente, durante il suo moto, la valanga, asporta parte del manto nevoso depositandolo lungo il suo percorso.

Ponderata la limitata lunghezza della zona di distacco, la valanga è caratterizzata da velocità ed energie relativamente basse.
Tale zona presenta le seguenti caratteristiche:

- Inclinazione media: circa 35-40°, con una diminuzione della pendenza in corrispondenza del muro, e con un salto di pendenza repentino a metà versante (al di sotto del limite dei rododendri);
- Quota di scorrimento: da circa 1900 a 1880 m s.l.m.;
- Cinematismo di scivolamento: movimento lento;
- Substrato: erba, rododendri, piccoli alberi su un pendio abbastanza regolare.

5.3 Zona di arresto

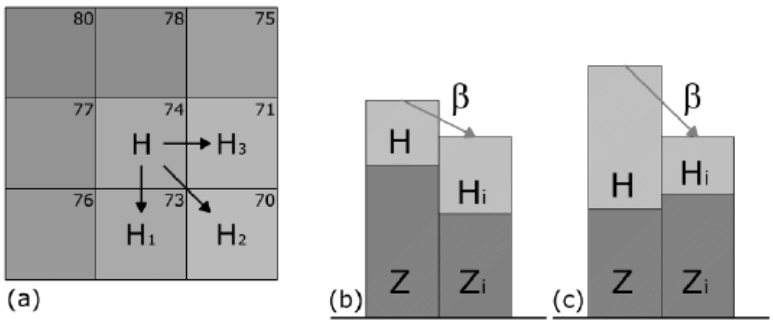
È individuabile in corrispondenza della strada comunale. In casi di eventi eccezionali, la valanga potrebbe oltrepassare la strada.
Tale zona presenta le seguenti caratteristiche:

- Inclinazione media: 0°;
- Quota di arresto: circa 1880 m s.l.m. (min);
- Cinematismo di arresto: accumulo per riduzione repentina di velocità; pressioni medio-alte;
- Substrato: asfalto;
- Tipo id deposito: blocchi di neve umida di piccole/medie dimensioni.

5.4 Dinamica della valanga

Un'analisi speditiva per evidenziare i percorsi principali di scorrimento della valanga e per avere una valutazione su base morfologica e statistica delle aree potenzialmente interessate dallo scivolamento e dall'arresto delle masse nevose (in condizioni "estreme") è stata realizzata sulla base dell'esperienza del tecnico incaricato.
Considerando che la zona di studio è molto ridotta, e che la lunghezza della zona di scorrimento non supera i 25-30 m di lunghezza, non è stata realizzata alcuna modellazione numerica, in quanto i software, per valanghe cosi piccole potrebbero restituire dei risultati poco affidabili.

Solitamente, per identificare tutte le zone che possono essere interessate dallo scorrimento di masse nevose lo scrivente utilizza un algoritmo di espansione (flow-routing algorithm), che, una volta identificata un'area di distacco, spande il materiale su essa presente in funzione della morfologia del territorio. Per le valanghe di neve esiste un flow-routing algorithm che permette lo spargimento del materiale presente su una cella in tutte quelle circostanti a quota inferiore. Tale algoritmo permette anche l'espansione su più celle; in questo caso il materiale viene suddiviso in funzione della pendenza come mostrato nella seguente equazione.



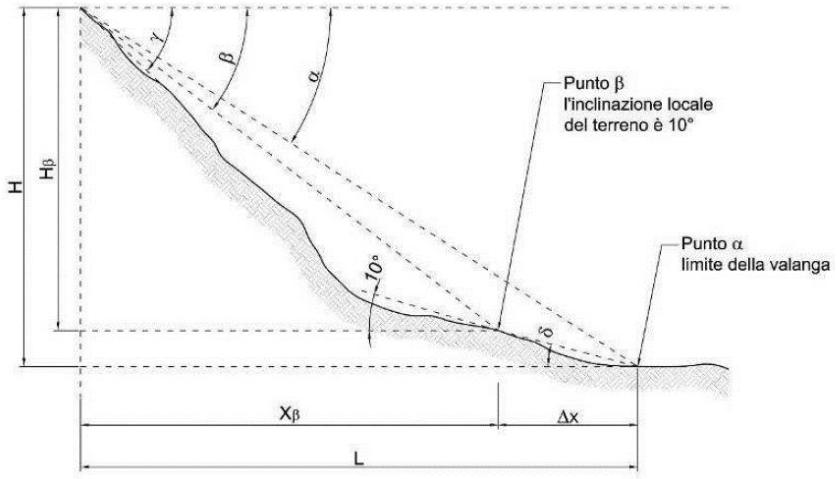
Schema di funzionamento del flow-routing algorithm utilizzato.

$$H_i = H \frac{\tan\beta \cdot L_i}{\sum_{i=1}^{k} \tan\beta \cdot L_i}$$

Dove:

- Hi è la frazione di materiale che viene trasferito alla cella i-esima,
- H è il materiale sulla cella di partenza,
- β è la pendenza tra la cella iniziale e quelle adiacenti,
- Li è un fattore di peso basato sulle caratteristiche geometriche (0.5 per le direzioni cardinali e 0.354 per quelle diagonali)
- k è il numero totale di celle ad una quota inferiore.

Al fine di rappresentare al meglio il comportamento di una valanga di neve la pendenza β viene calcolata rispetto all'altezza del suolo sommata della neve su di esso depositata. Questo accorgimento permette di considerare eventuali ostacoli e di superare piccoli tratti in contropendenza. Si evidenzia che il metodo proposto non è fisicamente basato, pertanto gli effetti dell'energia cinetica sono trascurati, così come la possibilità di muoversi in salita delle masse che si muovono a velocità sostenute.
È necessario sottolineare che il metodo utilizzato non tiene in alcuna considerazione le caratteristiche meccaniche e reologiche dell'ammasso in movimento, ma si limita a fornire un'indicazione sulle traiettorie preferenziali che esso può assumere nel corso del suo movimento. Per questo motivo, le quantità presenti sulle celle non vanno interpretate come effettive quantità di neve, ma piuttosto come probabilità che questa sia parte del processo di scorrimento.
I flow-routing algorithms forniscono un'indicazione del percorso della valanga, ma non danno alcuna indicazione della distanza di arresto. Per questo è necessario introdurre un parametro di confinamento. Il parametro geometrico utilizzato nel presente studio per misurare la distanza di arresto di una valanga è l'angolo "α", nel seguito denominato anche "angolo di arresto" e definito come l'angolo formato con l'orizzontale dalla congiungente il punto più alto di distacco con il punto più a valle raggiunto dal deposito (vedi figura seguente). La definizione dell'angolo di arresto è effettuata lungo il profilo principale di scorrimento della valanga.



Principali parametri utilizzati nell'algoritmo.

La stima della distanza di arresto estrema di una valanga su di un sito valanghivo privo di documentazione storica, o con documentazione storica ritenuta carente o inadeguata, si basa sui risultati di un'analisi statistica di dati di distanze di arresto estreme relative ad eventi storici documentati.
Gli eventi campione sono difficilmente riconducibili ad uno specifico tempo di ritorno, in quanto relativi a valanghe verificatesi in differenti contesti e con periodicità di accadimento intrinsecamente differenti. In ogni caso trattasi del massimo evento conosciuto, e pertanto appare ragionevole ritenere tali eventi di natura "estrema", con un tempo di ritorno indicativo mediamente compreso tra i 50 ad i 100 anni.
L'obiettivo dell'analisi statistica condotta è stato la verifica della dipendenza dell'angolo di arresto (α) dai parametri topografici propri del sito valanghivo presi in esame. A tal proposito si evidenzia come hanno dimostrato un'influenza sul valore dell'angolo di arresto α sia la pendenza media della zona di distacco (γ) sia, seppure in misura minore, la quota massima di distacco (Zmax).
L'analisi statistica condotta fornisce una stima della distanza massima percorribile dalla valanga lungo il profilo principale di scorrimento, misurata attraverso l'angolo di arresto. Tale distanza è stata accoppiata al modulo di espansione basato sul flow routing algorithm, introducendo all'interno dello stesso un controllo sull'angolo α_i di ogni i-esima cella:

$$\text{se } \alpha i < \alpha \rightarrow Vi = 0$$

dove:

- Vi è la frazione di volume che viene trasferita alla cella i-esima,
- α è l'angolo di massima espansione della valanga:

$$\alpha = 10.533 + 0.555 \cdot \gamma - 0.0015 \cdot Z_{\max}$$

- γ è la pendenza media della zona di distacco
- Zmax è la quota massima di distacco (Zmax)
- αi è definito dall'equazione:

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{H_i}{L_i}\right)$$

- Hi è il dislivello tra la cella a quota maggiore dell'area di distacco
- Li è la distanza planimetrica tra la cella a quota maggiore dell'area di distacco e quella considerata.

Se il valore di α di una determinata cella risulta essere minore del valore di riferimento, tale cella non viene pertanto considerata come interessata dallo scorrimento. L'area interessata dalla valanga risulta infine essere individuata dall'insieme di tutte le celle "bagnate" dal "flow routing algorithm".