



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE, NATURALI
Dipartimento di Geoscienze

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA E GEOLOGIA
TECNICA**

**Modellizzazione geomeccanica della porzione nord-occidentale
dell'unità di frana del Monte Ganda-Ganderberg,
denominata "Hahnebaum mure"
(Moso in Passiria, Bolzano)**

**Geomechanical modeling of the north-western portion of
the Monte Ganda-Ganderberg landslide called "Hahnebaum mure"
(Moso in Passiria, Bolzano)**

Relatore: Prof.ssa Simonetta Cola

Correlatori: Dott. Giulia Bossi

Dott. Gianluca Marcato

Laureando Andrea Fontanari

A.A. 2013-2014

Riassunto

La tesi tratta lo studio e la modellizzazione geomeccanica del corpo di frana denominato “Hahnebaum mure”, ubicato nella porzione nord-occidentale dell’Unità di frana del Monte Ganda, in alta Val Passiria nel tratto di strada compreso tra l’abitato di Moso in Passiria (Moos in Passeier, 1007 m s.l.m.) e Corvara in Passiria (Rabenstein, 1433 m s.l.m.). La frana del Monte Ganda si manifesta come un importante e complesso fenomeno di DGPV (Deformazione Gravitativa Profonda del Versante) che interessa il versante occidentale dell’omonimo monte (Ganderberg 2330 m s.l.m.) per una superficie di ca. 3.75 km² e un dislivello superiore a 1200 m. Il fenomeno in studio è rappresentato da una frana roto-traslativa in detrito di versante che risulta attiva a partire dal 1951, anno in cui la SS44bis venne distrutta per un tratto di ca 300 metri. Scopo della tesi è stata la ricostruzione geometrica tridimensionale del corpo di frana utile a studiare il comportamento del fenomeno mediante una modellizzazione tramite il codice di calcolo tridimensionale alle differenze finite FLAC3D. L’utilizzo di un modello tridimensionale permette di comprendere la dinamica del fenomeno ed individuare le porzioni dell’ammasso soggette a deformazioni maggiori, rappresentando la base per la definizione di futuri interventi di mitigazione e protezione della strada SS44bis. Infine, sono stati proposti ed analizzati alcuni interventi di rinforzo per aumentare il grado di sicurezza della strada, unica infrastruttura presente in loco: l’analisi, eseguita mediante un modello dell’equilibrio limite, ha permesso di valutare l’efficienza di tale intervento anche in termini di aumento del grado di stabilità globale.

Abstract

The main goal of the thesis is the geomechanical modelling of the north-west portion of Monte Ganda landslide, unit also named as “Hahnebaum mure” located in the upper Passeier Valley about 40 km north from Bolzano (Trentino – Alto

Adige), between Moos in Passeier (altitude 1007 m) in the South and Rabenstein (altitude 1433 m) in the North. The main landslide unit is a large DSGDS (Deep-Seated Gravitational Slope Deformation) which extends on an area of 3.75 km² and affects the Western flank of Mount Ganderberg (altitude 2330 m) stretching for 1200 m. The portion studied is a roto-translative landslide of debris that is active since 1951, when it destroyed about 300 m of SS44bis road. Aim of the thesis is the realization of a 3D model of this landslide to perform a 3D geomechanical analysis with the 3D modelling code FLAC3D, with the approach of finite differences. The results are useful to understand the dynamic behaviour of the landslide and the location of major stressed zone, in consequence to find the right location to implement structural or non structural mitigation work to avoid impairment of the road. Finally, a reinforcement intervention is proposed to stabilize the road and a limit equilibrium analysis of the entire slope permits to evaluate the global safety factor increment of the landslide.

Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Obiettivi del lavoro e metodi utilizzati	2
1.2	Inquadramento geografico	3
2	Geologia.....	5
2.1	Inquadramento geologico	5
2.3	Idrogeologia	12
2.4	Inquadramento strutturale	13
2.6	Classificazione dei movimenti franosi	17
3	Frana del monte Ganda.....	21
3.1	Introduzione	21
3.2	Studi precedenti	22
3.3	Cronologia degli eventi	23
3.4	Descrizione della frana	25
3.5	Suddivisione del corpo frana.....	26
3.6	Fattori predisponenti	27
3.7	Classificazione della frana.....	28
3.8	Interferenze del corpo frana con il contesto naturale e l'attività umana	28
3.9	Indagini e monitoraggi	29
4	Frana denominata “Hahnebaum Mure” o del Gallo.....	33
4.1	Introduzione	33
4.2	Descrizione geometrica e classificazione del corpo frana.....	36
4.3	Descrizione del monitoraggio in atto	41

4.4 Ricostruzione geometrica del corpo frana	48
4.7 Modellizzazione geomeccanica della frana	59
4.7 Risultati dell'analisi numerica.....	66
5 Analisi del rischio e opere di mitigazione	73
5.1 Analisi del rischio di frana.....	73
5.2 Mitigazione del rischio	80
6 Conclusioni	91
Bibliografia.....	93

1 Introduzione

Il versante occidentale della cresta comprendente le cime *Hochwart* (Monte Guardia Alta) 2608 m s.l.m., *Ganderberg* (M.Ganda) 2330 m s.l.m., *Itlspitze* 2081 m s.l.m. è interessato da un esteso fenomeno di Deformazione Gravitativa Profonda del Versante (DGPV). Oltre al fenomeno generale, si possono riconoscere sul versante altre numerose tipologie di frane, più o meno attive e distribuite. A causa della presenza di più fenomeni il versante viene classificato come Unità di frana del *Ganderberg* (Monte Ganda).

La natura instabile di tale zona è documentata nel corso dei secoli da altre testimonianze a partire dal rock avalanche avvenuto nel 1401 (1404 secondo altre fonti) nel fondovalle, che causò lo sbarramento del torrente Passirio. In seguito a questo evento si originò uno sbarramento naturale di notevoli dimensioni il quale causò la formazione di un lago (denominato inizialmente *Wildsee* e successivamente *Kummersee*) lungo 1900 metri e profondo fino a 50 m. Successivamente il collasso progressivo della diga naturale causò onde di piena e flussi iperconcentrati che raggiunsero per ben 8 volte la città di Merano, posta a 25 Km di distanza, al termine della Val Passiria.

Lo svuotamento definitivo del lago avvenne nell'anno 1774 grazie all'intervento dell'uomo. Nella storia recente non si sono più verificati eventi analoghi, ma il versante ha mantenuto la sua attività, manifestando svariate tipologie di fenomeni: crolli, colate, scivolamenti rotazionali. Quest'ultimi sicuramente sono avvenuti anche in passato, ma non vi sono record storici che li testimoniano.

Negli ultimi anni l'intera zona è stata posta sotto costante monitoraggio, per mezzo di una rete GPS, inclinometri e piezometri, al fine di quantificare e caratterizzare la sua attività.

Le principali attività si sono concentrate nella porzione nord-occidentale, a monte e a valle della SS44bis del Passo Rombo, importante asse viario di collegamento a livello turistico (prettamente estivo) con la valle dell'*Otztal* (Austria).

La porzione nord occidentale dell'unità di frana risulta particolarmente attiva, secondo la documentazione attualmente in possesso, a partire dal 1951, anno in cui si verifica il collasso del versante determinando la distruzione della viabilità principale. Il fenomeno, definito *Hahnebaum mure* (Frana del Gallo), subirà parziali riattivazioni nel corso degli anni successivi, in particolare nel 1962, 1988 e 2000.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di ricostruire, sulla base dei dati a disposizione, la geometria di tale frana al fine di consentirne una sua modellizzazione geotecnica attraverso il metodo delle differenze finite. Il modello così ottenuto potrà fornire indicazioni della futura attività del corpo di frana e permettere di individuare dove eseguire eventuali opere di mitigazione volte a ridurre il rischio presente in corrispondenza della viabilità statale.

1.1 Obiettivi del lavoro e metodi utilizzati

Scopo del presente lavoro è la realizzazione del modello geometrico del corpo frana denominato *Hannebaum mure* al fine di utilizzarlo per la modellizzazione tridimensionale alle differenze finite tramite il codice FLAC3D.

La modellizzazione permetterà di risalire ai principali parametri geomeccanici del corpo di frana e fornirà un'analisi dettagliata delle tensioni e delle deformazioni presenti su di esso. La comprensione di quest'ultimi sarà la base di partenza per la progettazione di eventuali opere di mitigazione dei rischi legati a tale fenomeno d'instabilità. La scelta della modellizzazione tridimensionale è legata alla possibilità di comprendere il comportamento del versante nel suo insieme, attraverso l'utilizzo di altre tecniche di modellizzazione sarebbe altrimenti impossibile.

1.2 Inquadramento geografico

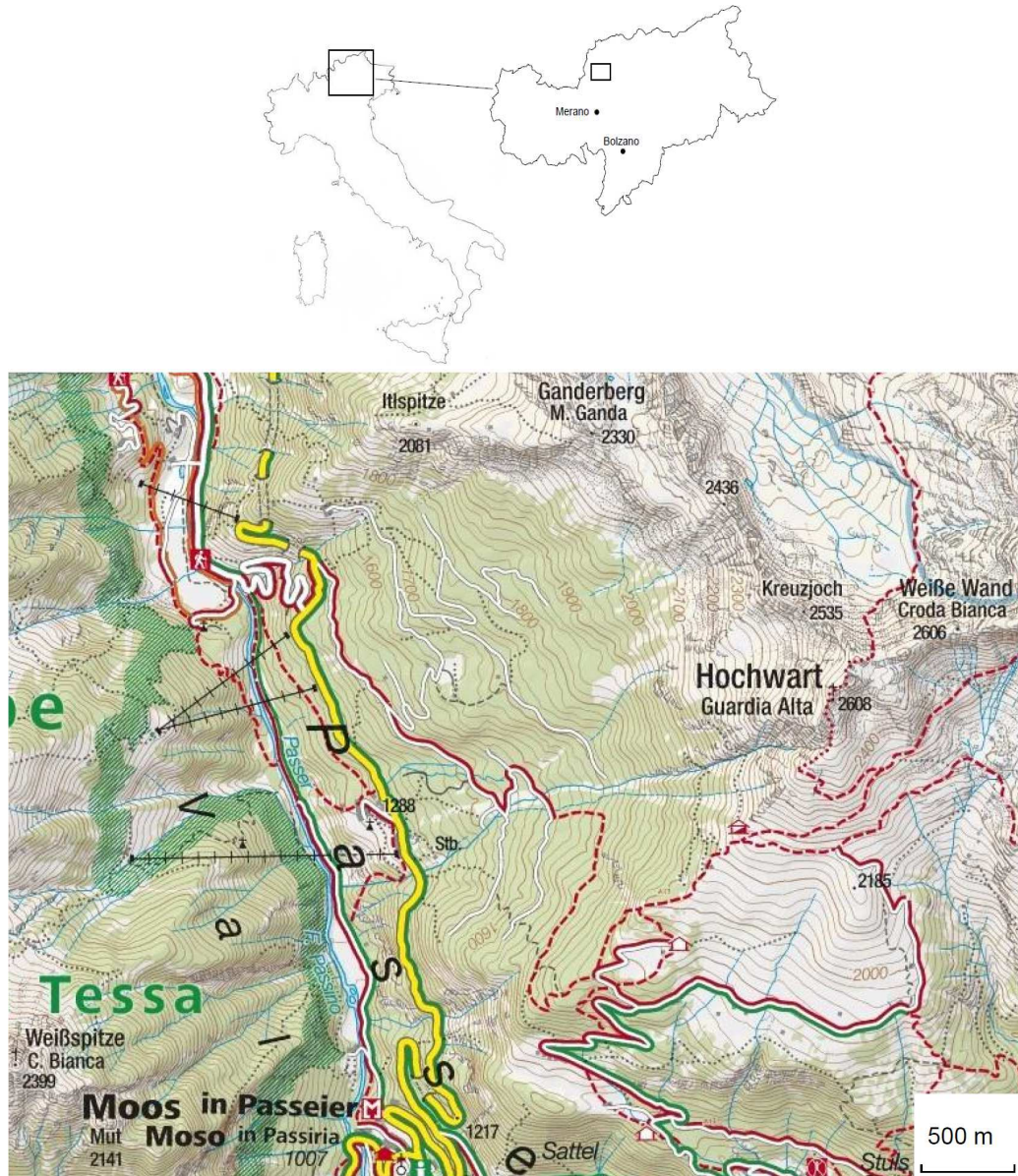


Figura 1 Inquadramento geografico con estratto della carta topografica KOMPASS

La zona di studio è situata all'interno del comune di Moso in Passiria, nella porzione settentrionale dell'omonima valle, in provincia di Bolzano (Trentino Alto-Adige, Italia).

L'unità di frana principale è delimitata ad ovest dal Torrente Passirio, ad est dalla cresta rocciosa comprendente le cime *Hochwart* (Monte Guardia Alta) 2608 m

s.l.m., *Ganderberg* (M.Ganda) 2330 m s.l.m., *Itlspitze* 2081, a sud dal rio di Valbianca (*Weissentalbach*, *Weisse Wand*), a nord dal rio di Casabella (*Gspellerbach*).

L'area di studio è attraversata interamente dalla SS44bis, orientata in direzione N-S, dalla quota 1450 a nord e 1350 a sud. I nuclei antropici più vicini sono rappresentati da Moso in Passiria, Corvara in Passiria rispettivamente a Sud e Nord dell'area, mentre all'interno si trova la piccola località di Hahnebaum. L'infrastruttura viaria SS44bis percorre interamente l'alta val Passiria e collega il paese di S.Leonardo in Passiria con il valico alpino del Passo del Rombo (2491 m s.l.m.), il quale conduce al confine con l'Austria. Tale asse viario rappresenta dal punto di vista turistico un importante via di comunicazione in quanto unico valico alpino carrabile compreso tra il passo del Brennero ad est e il passo Resia ad ovest.

2 Geologia

2.1 Inquadramento geologico

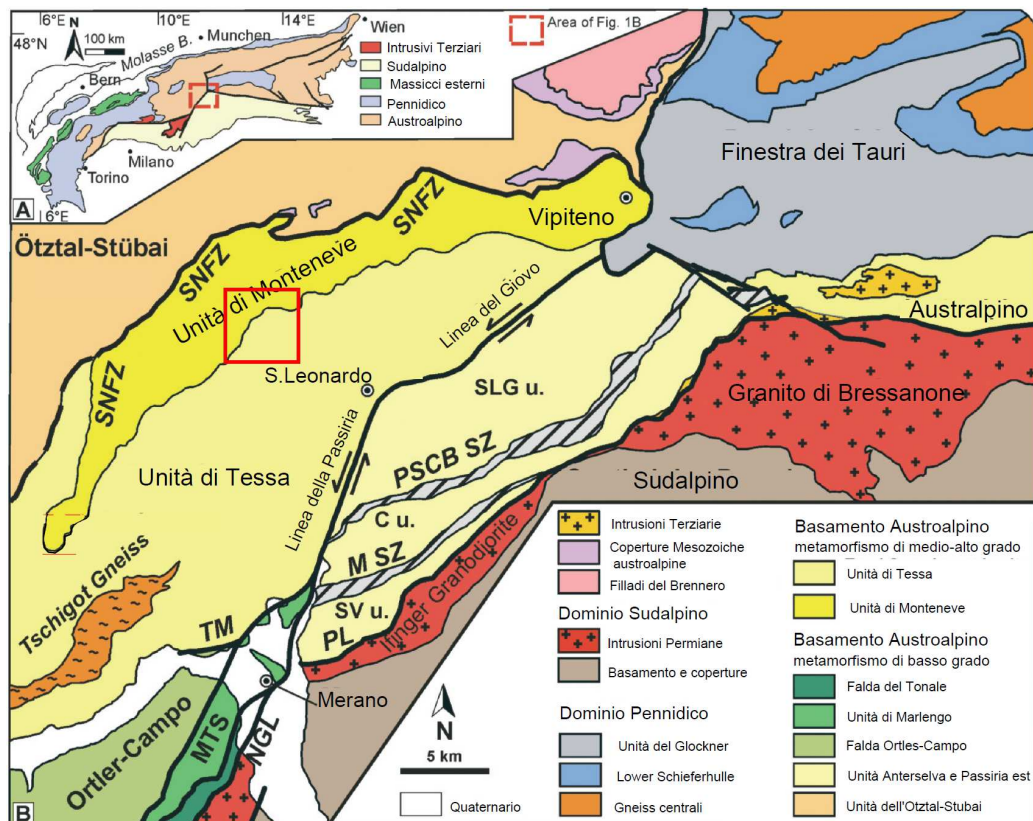


Figura 2 Schema tettonico regionale dell'area compresa fra la val Venosta e la Finestra dei Tauri.

La val Passiria è caratterizzata dall'affioramento di rocce metamorfiche appartenenti al basamento Austroalpino delle Alpi orientali. Tale basamento in seguito all'orogenesi, da quella Varisica alle fase più recenti di quella Alpina, ha subito numerose fasi di deformazione e metamorfismo, dando origine ad un complesso sistema di falde che caratterizzano la zona alpina in corrispondenza della linea Insubrica. In particolare nell'alta Val Passiria sono state individuate: la falda dell'Ötztal a nord, il complesso di Monteneve (*Schneeberg Complex*) nella porzione intermedia, mentre nella porzione meridionale, fino all'abitato di S.Leonardo ed in

corrispondenza della linea Passirio-Giovo il complesso di Tessa (*Texel Complex*, Sölva et alii, 2005) (Krenn, Kurz, Fritz, & Hoinkes, 2010).

Il complesso di Tessa mostra un'evoluzione metamorfica poliorogenetica con la dominanza della facies anfibolitica di età Alpina (Spalla, 1993; Hoinkes et alii, 1999; Sölva et alii, 2005 and ref. incl.).

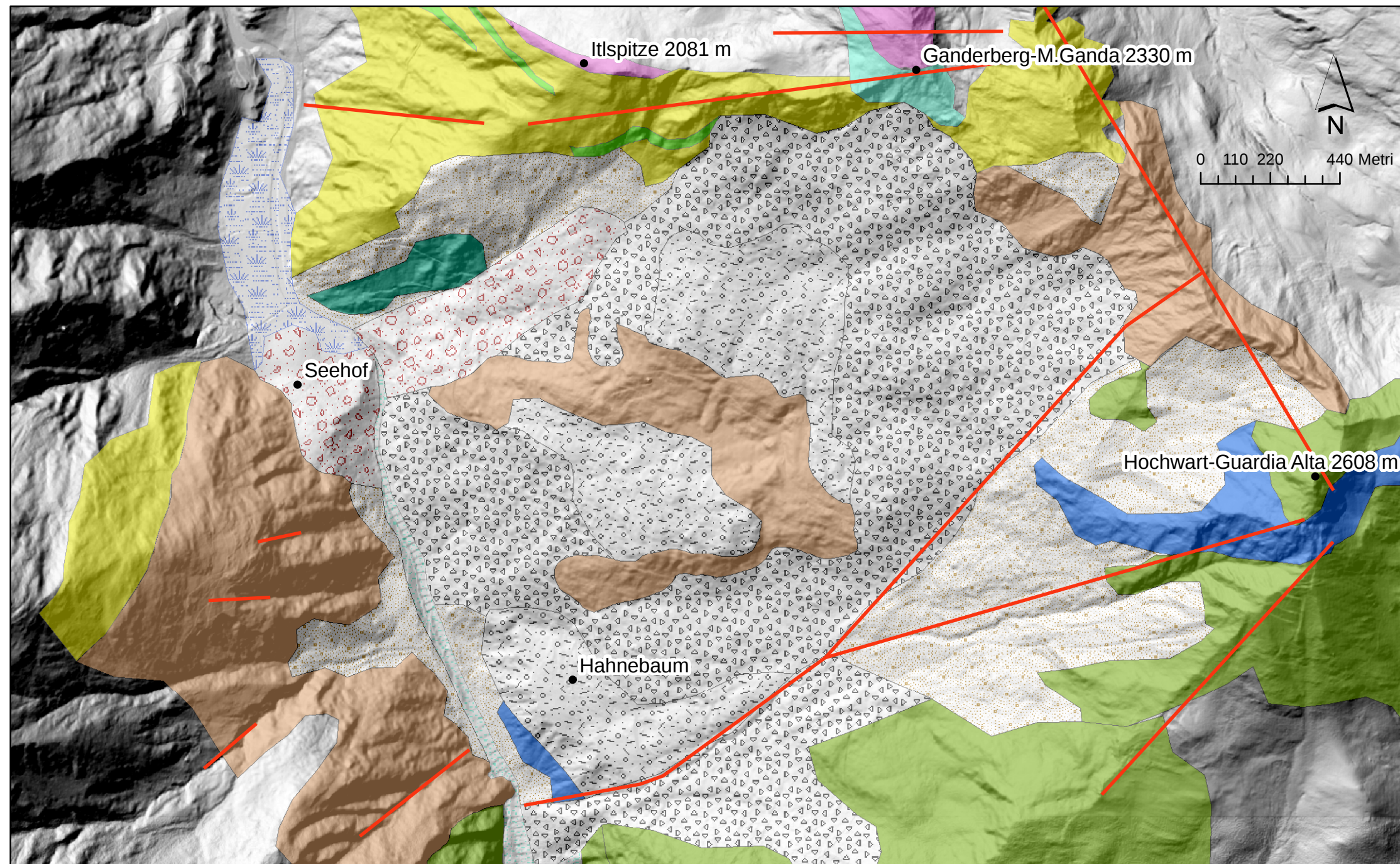
Il basamento di tale complesso è caratterizzato principalmente da micascisti a granato-staurolite-cianite, gneiss con scarsa presenza di anfiboliti e marmi. In alcune zone si riscontrano relitti di eclogiti principalmente sottoforma di boudinage con anfibolite a granato.

Il complesso di Monteneve consta prevalentemente di micascisti ricchi in quarzo con granati centimetrici, anfiboliti a granati e carbonati, calcescisti, scisti ricchi in grafite, scisti anfibolitici con cristalli centimetrici di orneblenda (*Garbenschiefer* Auct.), livelli di marmi con potenze metriche.

La transizione tra i due complessi è rappresentata dalla serie di Lasa (*Laas Serie* Hoinkes et alii, 1987), così definita in seguito alle analogie con la serie affiorante a nord dell'abitato di Lasa (Val Venosta). La transizione è rappresentata da livelli massivi di marmo con potenze anche di 150-200 m, micascisti a staurolite e granato, paragneiss e in minor parte anfiboliti. Tuttavia quest'ultima serie viene alternativamente accorpata all'unità di Tessa o di Monteneve.

L'unità di Monteneve viene tradizionalmente considerata, a differenza dell'unità di Tessa come un'unità monometamorfica, originatasi da una sequenza sedimentaria Paleozoica del dominio *Otztal-Stubai*, che ha subito solamente metamorfismo Alpino (Hoinkes et alii, 1987).

L'unità di frana del M. Ganda è situata in corrispondenza del limite tra il complesso di Monteneve e quello di Tessa, la particolare ubicazione determina un elevato grado di fratturazione delle rocce presenti nell'area in esame, favorendo di conseguenza la genesi di fenomeni d'instabilità di vario genere.



Legenda

	Deposito torrentizio		Detrito di versante		Unità di Tessa-Micascisti Argentei		Unità di Monteneve-Micascisti filladici a Granato		Unità di Monteneve-Quarziti		Faglie
	Deposito lacustre		Deposito di rock avalanche		Unità di Tessa-Paragneiss a bande		Unità di Monteneve-Micascisti filladici laminati		Unità di Monteneve-Anfiboliti		
	Deposito morenico		Detrito di versante a grossi blocchi		Unità di Tessa-Marmo		Unità di Monteneve-Marmo				

2.2 Inquadramento stratigrafico

Unità di Tessa

Paragneiss minuti a bande

Rappresenta la litologia prevalente del sistema Australpino. Caratteristica principale è la tessitura a bande, determinata dalla varietà del contenuto mineralogico al suo interno, alternando zone ad elevato contenuto di quarzo o quarzo con plagioclasio a zone a mica prevalente.

La scistosità è generalmente piana, l'alternanza di strati a varia competenza determina la formazione di strutture plicative disarmoniche.

Il litotipo affiora nella porzione meridionale del versante in destra idrografica e in corrispondenza del tratto Moso - Rio Valbianca.

Micascisti argentei di Altacroce

Trattasi di facies micascistose, occasionalmente filladiche, di colore argenteo (Greganin & Piccirillo 1969 a, b, 1972) ove è ben distinguibile la presenza di granato. La grana è generalmente minuta e la mica chiara è ben sviluppata, la biotite si presenta in lamelle isolate di dimensioni medio-grosse. Stratigraficamente superiori al Paragneiss affiorante nella porzione sommitale del versante, in corrispondenza del sinclinorio della Hochwart e nella porzione a monte della frana *Hahnebaum mure*. La litologia risulta frequentemente intervallata da bancate di marmi.

Marmi bianchi

Si trovano in corrispondenza del limite fra le due precedenti litologie, spesso sono associati ad anfiboliti. Affiorano anch'essi in corrispondenza della vetta della Guardia Alta, e nell'alveo del torrente a valle della località Hahnebaum. Alcuni autori inseriscono tale litologia nella serie di Lasa (*Laaser serie*)

Anfiboliti

Costituiscono livelli, di potenza variabile dal decimetro al metro, all'interno di Paragneiss e Micascisti. La continuità di tale litologia risulta superare anche il chilometro, per questo possono essere utilizzati come livello guida per l'assetto strutturale regionale. Si presentano con colorazione verde, mostrano un aspetto vario a seconda della composizione mineralogica.

Unità di Monteneve

Micascisti filladici

Suddivisi a loro volta in:

Micascisti filladici a granati giganti

Si presentano in bancate di modesto spessore, ma caratterizzano il complesso di Monteneve. Sono caratterizzati da superfici sericee chiare dalle quali sporgono granati idiomorfi con dimensioni fino a 1-5cm. La biotite risulta ben sviluppata e distribuita in modo irregolare, talvolta in bande, alternata con mica chiara.

Micascisti filladici laminati

Sono rappresentati da litotipi altamente micacei, fragili, fogliacei, facilmente scindibili in lastre sottili. La tessitura piano-scistosa è determinata dalla laminazione delle micropieghe coricate e compresse (Visentin, Zanettin, 1971). Affiorano nella porzione settentrionale dell'area in esame.

Micascisti filladici grigio plumbei

Costituiscono la porzione centrale del complesso di Monteneve, situato in corrispondenza del nucleo del sinclinorio omonimo. Si presentano con aspetto filladico a superfici sericee di colore grigio-plumbeo, con la presenza di micro pieghe e numerosi cristalli di granato di medie dimensioni (0.5-2mm).

Quarziti e quarziti nere

Rappresentano le litologie stratigraficamente inferiori del Complesso di Monteneve, di conseguenza si riscontrano al tetto dei micascisti argentei di Altacroce. Non si presentano in un unico livello, ma compaiono in numerose bancate intercalate ai micascisti. Si possono distinguere quarziti grigie, compatte, prevalenti nei livelli inferiori e quarziti bianche a grana grossolana sovrastanti.

Anfiboliti

Comprendono anfiboliti, gneiss anfibolitici e scisti anfibolitici, corrispondono a para-anfiboliti come giustificato dalla presenza carbonati e frequenti passaggi a marmi e calcescisti (Visentin, Zanettin, 1965). Principalmente si presentano con aspetto massiccio a grana generalmente grossa.

Scisti calcariferi, marmi

Tale litologia rappresenta la parte inferiore del complesso di Monteneve, passando da modesti contenuti carbonatici a marmi puri, scisti anfibolitici e anfiboliti. I marmi si presentano con colorazione variabile dal bianco al roseo, dal giallastro al grigio. In quest'ultimi sono presenti venature scure che evidenziano il fitto ripiegamento subito. Tale litologia viene inserite da alcuni autori nella cosiddetta serie di Lasa (*Laaser Serie*).

2.3 Idrogeologia

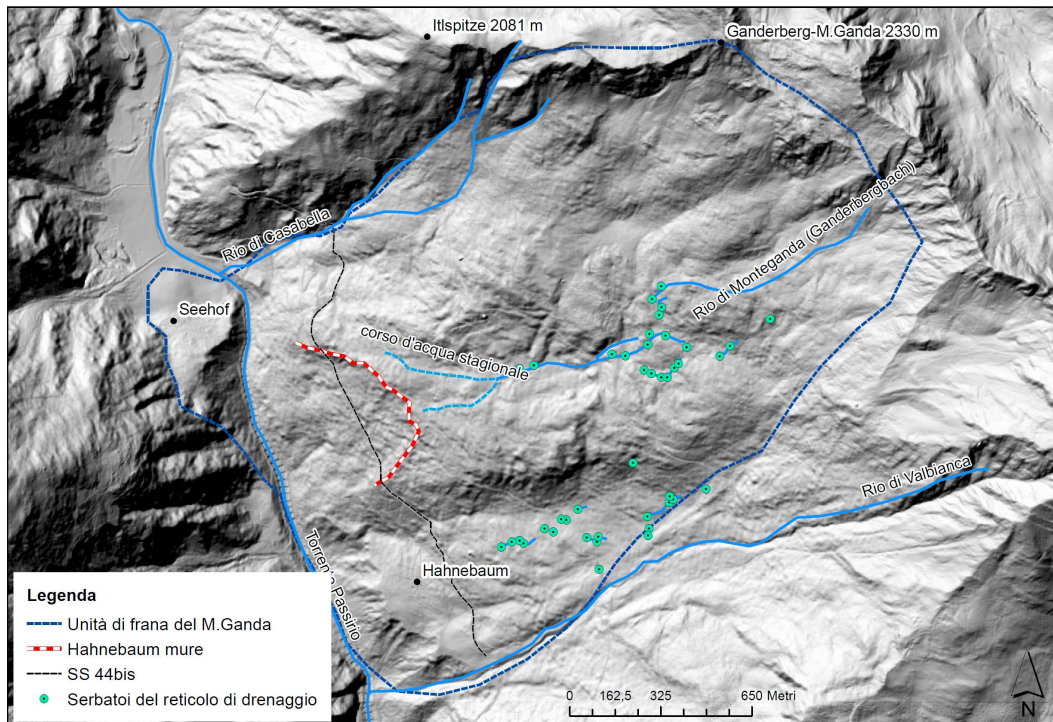


Figura 3 Reticolo idrografico con evidenziati i serbatoi appartenenti al sistema di drenaggio superficiale in atto sul versante in seguito al fenomeno franoso del 1951

L'area in studio è caratterizzata dalla presenza di un substrato di tipo scistoso-cristallino: questa formazione è in genere impermeabile, ma in questo caso è da considerare permeabile a causa dell'alto grado di fratturazione presente. Inoltre l'elevata permeabilità dei numerosi depositi detritici presenti sul versante interessato dall'unità di frana contribuisce a favorire la circolazione sotterranea delle acque nel versante.

Nell'area il reticolo idrografico risulta molto sviluppato, presenta geometrie controllate dall'assetto tettonico dell'area. Tuttavia essendo l'intero versante interessato, oltre che dal generale movimento di deformazione profonda, da fenomeni d'instabilità minori e più superficiali, il reticolo ne risulta ovviamente alterato.

Anche gli interventi antropici, volti alla sistemazione ed al ripristino delle aree in frana presenti sul versante hanno contribuito ad un generale mascheramento del reticolo idrografico.

Nell'area sono presenti numerose sorgenti caratterizzate da regimi non costanti, in stretta connessione con le precipitazioni meteoriche. Le principali sono concentrate nella porzione centrale dell'unità di frana, molte di esse risultano captate e raccolte in serbatoi superficiali. Le sorgenti di fessura presentano regimi equamente distribuiti nel corso dell'anno in quanto caratterizzate da un'alimentazione profonda proveniente dal grande e complesso bacino idrogeologico a monte.

I principali elementi idrografici presenti nella zona sono il rio Casabella lungo il limite settentrionale del versante, il rio Valbianca lungo il limite meridionale ed il rio Monteganda (*Ganderbergbach*) al centro. Quest'ultimo non presenta un percorso regolare, ma risulta interrotto in più punti, riaffiorando a valle sotto forma di sorgente. Il tratto finale, che rappresenterebbe la confluenza nel rio Passirio non è visibile, occultato dalla frana occorsa nel 1951: infatti, a seguito dell'evento il rio Monteganda nella sua parte finale è stato drenato, con opere superficiali e serbatoi di decantazione, e regimato al fine di ridurre l'apporto idrico all'ammasso in frana presente a valle (in *Figura 3* si osserva la posizione dei serbatoi appartenenti alla rete di drenaggio superficiale).

Attualmente tutti e tre gli elementi idrografici presenti sul versante vengono sfruttati per la produzione di energia elettrica, in parte anche utilizzando i serbatoi di decantazione appartenenti alla rete di drenaggio superficiale.

2.4 Inquadramento strutturale

La zona in esame fa parte delle Alpi centro orientali, ove sono presenti tre unità tettoniche fondamentali: Alpi meridionali, Austridi e Pennidi. A scala regionale i lineamenti fondamentali sono rappresentati dalla linea Insubrica, limite tra il Sud Alpino ed il dominio Autroalpino, altra struttura d'interesse regionale è la linea Passirio-Giovo che taglia la val Passiria all'altezza di S.Leonardo, quest'ultima rappresenta il limite tra il metamorfismo di età alpina e pre-alpina. Alcuni autori propongono l'interpretazione del complesso di Monteneve come una zona di taglio estensionale, denominata *Schneeberg Normal Fault Zone* (SNFZ, Sölva et alii,

2005), lungo la quale il sottostante basamento dell'unità di Tessa, contenente eclogiti di età Alpina, è stato esumato in direzione SE a partire dal Tardo Cretaceo. A livello regionale, all'interno del complesso di Monteneve sono inoltre riconoscibili 4 strutture di tipo sinforme (*Figura 4*):

- Sinclinorio principale di Monteneve
- Sinclinale dello *Seewerspitz*
- Sinclinale *Schrottner*
- Sinclinale *Lodner*

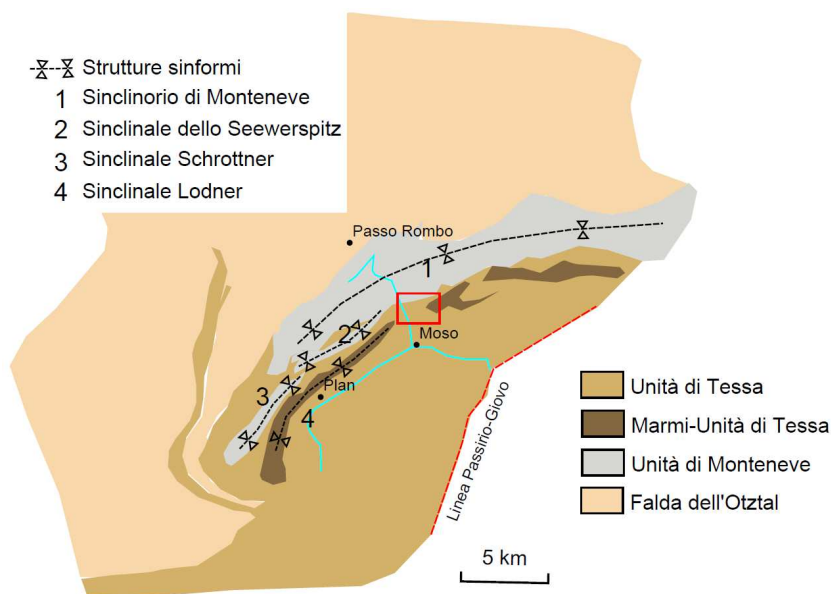


Figura 4 Ubicazione delle strutture sinformi nelle Unità di Tessa e Monteneve, tratta da Sölva et alii, 2005

Per quanto riguarda le fasi deformative che hanno portato a tale assetto strutturale, la storia del Complesso di Monteneve può essere suddivisa in 4 (Krenn et al., 2010) o 5 (Sölva et alii, 2005) fasi.

- D1: La prima fase di deformazione è definita da un movimenti di taglio WNW e viene associata all'esumazione iniziale dell'area interna al cuneo di alta pressione;
- D2: Collegata al movimento coassiale ed il risultato di un esumazione avanzata.
- D3: Associata al piegamento delle strutture pre-esistenti della fase D2 con piano assiale perpendicolare a quest'ultime. Le strutture appartenenti a questa fase

sono riscontrabili prevalentemente nella porzione meridionale dell'Unità di Monteneve (*Laaser Serie*).

- D4: E' il risultato di fasi de formative tardive, caratterizzate dal tilting di blocchi di basamento lungo una zona di faglia di epoca Oligo-Miocenica.
- D5: Introdotta da Sölva et alii (2005), riguarda la deformazione fragile avvenuta in alcune fasce cataclastiche, superfici di faglia e pseudotachiliti. La tesi è sostenuta dalla presenza di indicatori quali: foliazione secondaria e stiloliti, i quali mostrano un senso di taglio verso NW.

2.5 Geomorfologia

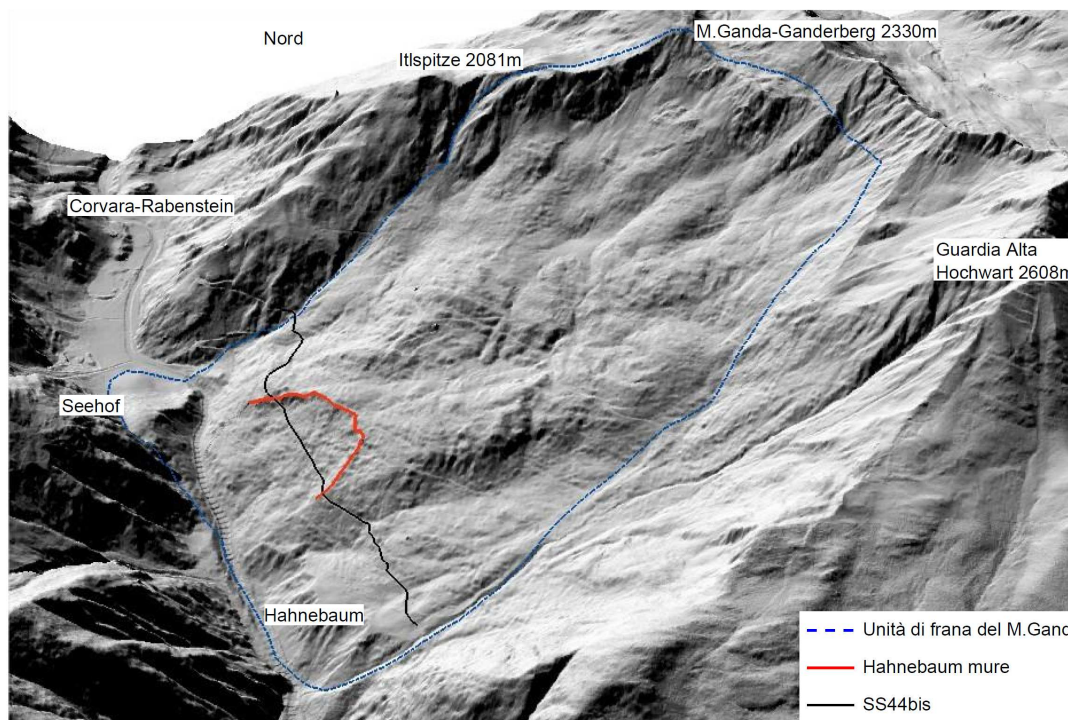


Figura 5 Elaborazione 3D del Hillshade da dati LiDAR (Provincia di Bolzano) del versante occidentale del M. Ganda-Ganderberg

L'area ove è situato il versante occidentale del M. Ganda (Figura 5) è caratterizzata da notevoli rilievi orografici, incisi da profondi e stretti solchi vallivi sulla destra idrografica del torrente Passirio. Mentre in sinistra orografica il versante si presenta meno acclive, con forme geomorfologiche di varia natura e genesi.

L'assetto geomorfologico dell'area risulta strettamente connesso alla variabilità litostratigrafica e all'assetto strutturale dell'ammasso roccioso: incisioni vallive, assi di drenaggio superficiali e sotterranei, scarpate, pareti e contropendenze risultano coincidere con le direzioni dei principali lineamenti strutturali.

La configurazione attuale dei versanti è il risultato dell'azione modellatrice dei ghiacci, dei cicli di gelo e disgelo, dei corpi idrici, di eventi valanghivi, dell'intervento antropico e soprattutto del verificarsi di fenomeni d'instabilità di varia natura.

La presenza di depositi glaciali è concentrata tra le quote 1650 e 2100 m s.l.m., tuttavia vi sono numerose tracce anche a quote inferiori a causa dei dissesti avvenuti nell'area. Lo spostamento differenziale avvenuto tra i vari settori dell'area in frana è ipotizzabile dalla differenza di quota tra i depositi distribuiti sul versante.

Caratteristica principale delle DGPV sono le contropendenze, ed è proprio in tali posizioni che si originano acquitrini e conseguentemente depositi palustri. Quest'ultimi sono stati rilevati nella porzione sommitale a quota circa 2000 m e nella porzione intermedia in corrispondenza dei masi Ganda, ove è presente un evidente depressione topografica. La maggior concentrazione di tali depositi si ha però in corrispondenza del paleoalveo del lago di sbarramento originatosi in seguito al rock avalanche del 1401-1404. (*Figura 6*)

I depositi colluviali sono molto diffusi sul versante, si presentano privi di strutture sedimentarie, eterometrici, ma con abbondanza di fine. Quest'ultima frazione proviene dall'alterazione del substrato e dei depositi più antichi. La genesi è da ricondurre all'azione di acqua di imbibizione e ruscellamento o all'azione della gravità.

I depositi maggiormente presenti sono da ricondurre a fenomeni gravitativi di versante, dal momento che quest'ultimi risultano essere i fenomeni più attivi nell'area. I processi morfogenetici responsabili della loro produzione sono vari, ma il principale risulta il crio-termoclastismo, favorito sicuramente dall'elevata fratturazione delle litologie presenti.

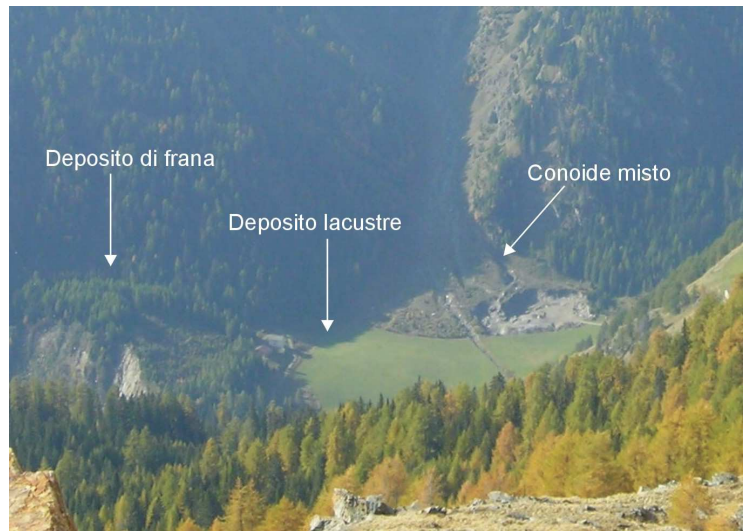


Figura 6 Nell'immagine si nota la zona pianeggiante costituita dal deposito lacustre originatosi in seguito al rock avalanche del 1401-1404, del quale se ne osserva la porzione presente sul versante orientale del Passirio.

2.6 Classificazione dei movimenti franosi

I processi geomorfologici più evidenti presenti sul versante occidentale del Monte Ganda risultano essere i fenomeni franosi.

Esistono numerosi esempi di classificazione di tali fenomeni, ma il più completo ed idoneo risulta essere quello proposto da Varnes (1978).

Tale classificazione si basa essenzialmente su:

- caratteristiche morfologiche osservabili e misurabili,
- proprietà del fenomeno,
- nomenclatura chiara e codificata.

Un fenomeno franoso secondo Varnes è “un movimento controllato dalla gravità, superficiale o profondo, rapido o lento, di materiali costituenti un versante o un intero rilievo”.

L'autore suddivide i fenomeni in base alla tipologia di movimento:

- crolli (*falls*)
- ribaltamenti (*topples*)

- scivolamenti (*slides*)
- espansioni laterali (*lateral spreads*)
- colamenti (*flows*)

Inoltre ogni tipologia viene ulteriormente suddivisa in base al materiale coinvolto, distinto in:

- roccia (*bedrock*)
- terreno sciolto (*engineering soil*)
 - detrito (*debris*)
 - terra (*earth*)

Si presenta inoltre una suddivisione in base allo stato di attività del fenomeno:

- attivo: attualmente in movimento
- riattivato: attualmente in movimento, dopo un periodo di stasi
- sospeso: stabile, ma attiva durante l'ultimo ciclo stagionale
- inattivo: non mobilitato nell'ultimo ciclo stagionale
 - stabilizzato: non più riattivabile in seguito ad intervento antropico
 - quiescente: se le cause che lo hanno originato sono ancora presenti
 - abbandonato: se le cause che hanno generato il fenomeno non sono più verificabili (e.g. spostamento naturale del letto di un torrente al piede della frana)
 - relitto: se le condizioni geomorfologiche o climatiche nelle quali il fenomeno si era generato sono mutate.

Ulteriore classificazione riguarda la distribuzione dell'attività sull'intero corpo:

- avanzante: superficie di rottura sviluppata lungo lo stesso verso del movimento in massa
- retrogressiva: superficie di rottura che si estende nel verso opposto a quello del movimento dell'intera massa
- progressiva: piano di rottura in espansione, senza precisare il verso

- confinata: scarpata visibile, ma non si individua la superficie di scivolamento al piede della frana

Infine i fenomeni franosi vengono suddivisi in base allo stile dell'attività, come diversi movimenti contribuiscano a destabilizzarla:

- complessa: visibili almeno due tipologie di movimento in sequenza
- composta: visibili almeno due tipi di movimento che possono avvenire simultaneamente anche in aree differenti
- multipla: la tipologia di movimento si ripete con allargamento della nicchia di frana

Lo studio delle cause che portano a fenomeni franosi può essere suddiviso in tre classi, fattori predisponenti, preparatori e determinanti.

Le cause predisponenti vengono rappresentate dagli elementi che predispongono una porzione di territorio alla formazione di instabilità e possono essere distinti in:

- fattori geologici: tipologie e caratteristiche dei materiali che costituiscono il versante quali stratigrafia e grado di fatturazione.
- fattori climatici: distribuzione degli afflussi meteorici e temperature
- fattori morfologici: pendenza del versante.

Nelle cause preparatorie vengono compresi tutti i fattori naturali ed antropici che unitamente ai alle cause predisponenti, portano un versante al dissesto. Tali fattori possono essere rappresentati da: lunghi periodi piovosi, ripetute azioni di gelo-disgelo, azione erosiva dovuta alla vegetazione, scioglimento dei ghiacciai, eccessivi disboscamenti, costruzione di manufatti ed infrastrutture.

Le cause determinanti sono rappresentate da eventi che alterano l'equilibrio di un versante già di per se al limite della stabilità. In tale categoria rientrano il fenomeno dell'erosione al piede, terremoti, afflussi meteorici eccezionali e opere artificiali che favoriscono la destabilizzazione quali sovraccarichi o sbancamenti.

3 Frana del monte Ganda

3.1 Introduzione

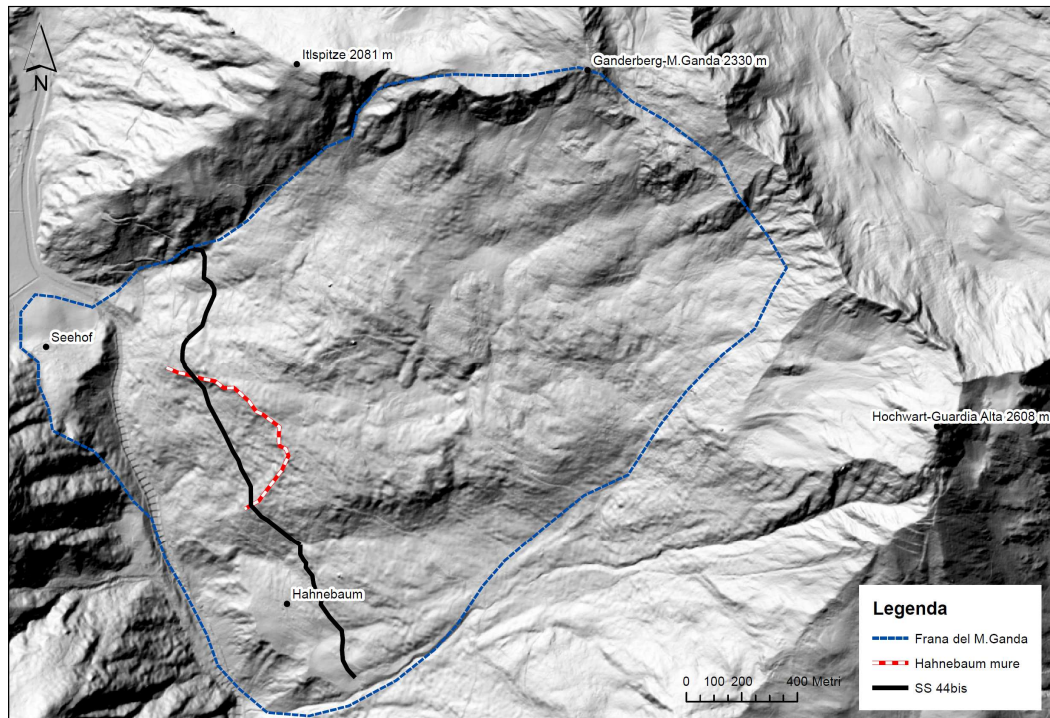


Figura 7 Perimetrazione dell'Unità di frana del M.Ganda su Hillshade da base LiDAR
(Provincia di Bolzano)

Il versante occidentale della cresta rocciosa *Hochwart* (Monte Guardia Alta) 2608 m s.l.m., *Ganderberg* (M.Ganda) 2330 m s.l.m., *Itlspitze* 2081 m s.l.m., si sviluppa con una superficie di circa 3.75 km² ed un dislivello di oltre 1200 m. L'intero versante risulta essere interessato da un'intensa attività franosa che si manifesta con fenomeni di crollo, scivolamenti rotazionali, colate detritiche. Tuttavia la principale deformazione in atto sul versante è rappresentata dal fenomeno della DGPV (Deformazione Gravitativa Profonda del Versante), tale ipotesi risulta giustificata da evidenze morfologiche ma soprattutto dai dati di spostamento ottenuti per mezzo di una rete di capisaldi GPS distribuiti sul versante.

La zona di distacco principale risulta evidente lungo tutta la cresta rocciosa e si estende per oltre 3 km tra le quote 2100 m s.l.m. e 2400 m s.l.m., in pianta la

geometria del corpo risulta irregolare, ma è riconoscibile la caratteristica forma ad arco con concavità verso SW (*Figura 7*). Il fenomeno viene delimitato a Nord dal rio Casabella, dal rio Valbianca a sud mentre ad est coincide con il letto del torrente Passirio. La pendenza del versante non risulta essere regolare, ma presenta tratti con pendenze superiori anche ai 30°, alternate a porzioni ove la pendenza si riduce fino a 10°, sono inoltre riconoscibili tratti interessati da contropendenze situati a differenti quote (1770-1810 e 1870-2100 m s.l.m.), quest'ultime forme caratteristiche nelle DGPV.

Lo spessore del detrito che ricopre il versante va da pochi metri a centinaia di metri in corrispondenza del fiume Passirio. La superficie di scivolamento principale non è osservabile, ad eccezione della porzione sommitale ove la scarpata è evidente in alcuni punti.

A causa della sua complessità, tale fenomeno è stato classificato come Unità di frana del Monte Ganda-Ganderberg (Furlanis, 2000).

Con il termine Unità di frana si fa riferimento all'associazione di più depositi di frana che interessano un versante e risultano fra loro collegati sia nello spazio che nel tempo (Pasuto et alii, 1997).

3.2 Studi precedenti

Il versante in frana pur risultando attivo già agli inizi del 1400, inizia ad essere studiato approfonditamente solamente agli inizi degli anni 2000.

I due principali studi eseguiti nel contesto sono:

- Studio Geomorfologico applicato dell'Unità di frana del Monte Ganda – Ganderberg (Moso in Passiria, Bolzano) – Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara (2000).
- Ingenieurgeologische Untersuchung des Ganderberger Talzuschubs und der Seehofer Bergsturzmasse – Institut für Geologie und Mineralogie, Friedrich Alexander Universität Erlangen, Nürnberg (2001).

Gli studi precedentemente elencati sono orientati allo studio geologico e geomorfologico di dettaglio dell'area, attraverso lo studio dei depositi, delle evidenze strutturali e morfologiche presenti e tentano inoltre di proporre eventuali ipotesi evolutive sulla dinamica del versante.

Lo studio: "Hazard assessment of a potential rock avalanche in South Tyrol, Italy: 3d modeling and risk scenarios" (2013), si è invece concentrato sulla porzione nord orientale del versante, analizzando il rischio dovuto al verificarsi di un fenomeno analogo al rock avalanche del 1401-1404.

Allo stato attuale il sito viene monitorato nell'ambito del progetto Monitor II (Progetto interregionale, finanziato da South East Europe Programme 2007-2013) con la collaborazione del CNR-IRPI e la Provincia di Bolzano.

3.3 Cronologia degli eventi

Le prime testimonianze dell'attività franosa sul versante occidentale del M.Ganda risalgono, a seconda delle fonti, al 1401 (Eisbacher & Clague, 1984, Pirocchi, 1992) o 1404 (Walcher, 1773), quando una grande frana ostruì il corso del Passirio nel tratto compreso tra il rio Casabella e Valbianca. L'accumulo del detrito determinò la formazione di un bacino dalle notevoli dimensioni (circa 1900 metri di lunghezza per 50 metri di profondità. Furlanis, 2000) denominato inizialmente *Wildsee* (lago selvaggio) e successivamente *Kummersee* (lago della tristezza) (*Figura 8 - Figura 9*). Fino alla sua scomparsa (1774) il bacino generò numerose catastrofi che coinvolsero l'intera Val Passiria raggiungendo anche la città di Merano, posta circa 30 km verso sud.

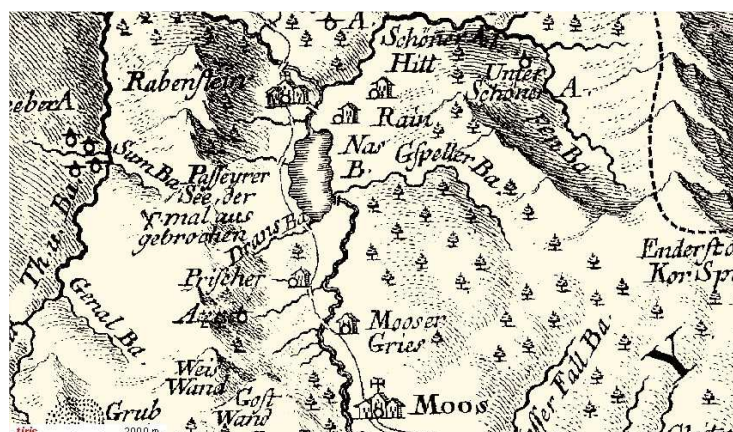


Figura 8 Estratto dell' "Atlas Tyrolensis" (1774 Peter Anich, Blasius Hueber) ove si nota la presenza del lago di sbarramento originatosi in seguito al rock avalanche del 1401-1404

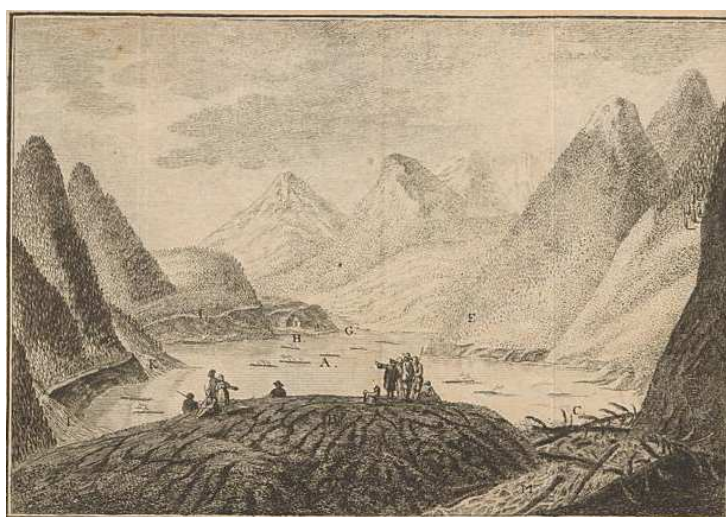


Figura 9 Il Kummersee visto dallo sbarramento naturale nell'illustrazione tratta dal testo "Nachrichten von den Eisbergen in Tyrol" Walcher J. (1773)

Gli eventi riguardarono principalmente il parziale collasso dello sbarramento ed avvennero negli anni: 1419, 1503, 1512, Maggio e Giugno 1572, 1772, 1773. In quest'ultimo anno, successivamente alla catastrofe l'Ing. Walcher fu incaricato della progettazione di un canale di scarico al fine di consentire un adeguato smaltimento delle portate eccezionali del torrente e di regolare di conseguenza l'altezza idrometrica del Kummersee. Nel 1774 ad opera realizzata, forse per errore umano o un malfunzionamento della paratoia, in 12 ore il lago si svuotò completamente ponendo fine a tali catastrofi.

Successivamente al 1774 vi fu un periodo di relativa stabilità, tuttavia il 04/06/1951 la porzione inferiore del versante fu interessata da un fenomeno di frana

(*Hannebaum-mure* o colata del Gallo) che distrusse parte dell'attuale SS.41bis. L'attività durò per ben 2 mesi, al termine dei quali la strada fu ripristinata e riaperta alla circolazione.

Tale porzione risulta essere la più attiva nel corso degli anni, subendo delle riattivazioni nel settembre del 1962 nell'agosto del 1988 e nel Novembre del 2000.

3.4 Descrizione della frana

Dal punto di vista litologico il versante è costituito da formazioni metamorfiche appartenenti al dominio Austroalpino, in particolare la zona risulta essere in concomitanza del limite tra l'Unità di Tessa a sud e l'Unità di Monteneve a nord. La transizione tra le due formazioni è rappresentata da un livello costituito prevalentemente da marmi, con potenza fino a 200 m, denominata *Laas Serie*. A queste due formazioni appartengono litologie quali micascisti, paragneiss e marmi, che tuttavia affiorano limitatamente sul versante, ma sono riconoscibili negli accumuli di frana e nei depositi che lo ricoprono.

La scistosità ha immersione prevalente da N285° a N330° con inclinazioni dai 30° ai 50°.

Il versante è sollecitato da sforzi tettonici distensivi determinati dalle faglie trascorrenti sinistra e destra che lo delimitano rispettivamente a sud ed est. Tale sforzo ha determinato la formazione di lineazioni normali, con direzione pseudoparallela al versante, immergenti ad ovest che rappresentano le superfici lungo le quali si sviluppa il principale dissesto profondo.

Le fratture di trazione riconoscibili sul pendio hanno direzione prettamente parallela ai lineamenti principali, ciò avvalorà la teoria che il generale dissesto sia strettamente correlato con il fabric strutturale.

3.5 Suddivisione del corpo frana

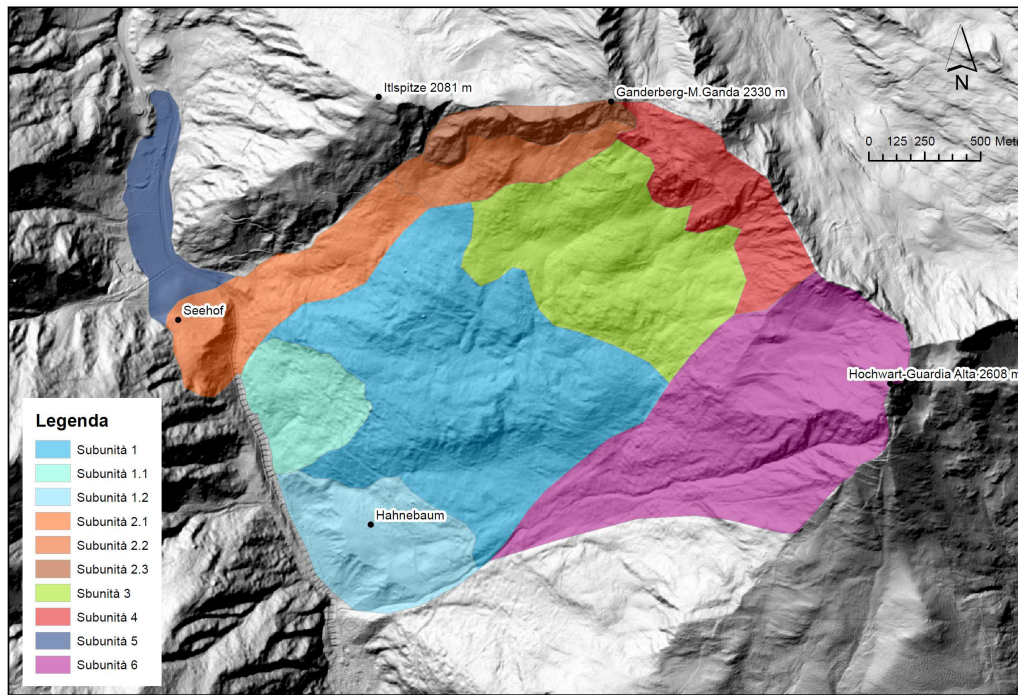


Figura 10 Suddivisione dell'Unità di frana del M. Ganda nelle sue sub-unità, Hillshade da dati LiDAR (Provincia di Bolzano), sulla base di quella realizzata da Tagliavini F. nell'ambito della "Relazione di fine progetto-Frana del Monte Ganda", 2009.

L'Unità di frana del Monte Ganda, a causa della distribuzione e della variabilità dei fenomeni che avvengono sul versante, è stata suddivisa in 4 sub-unità (Figura 10).

La prima sub-unità comprende la porzione maggiore del corpo di frana e risulta essere quella più attiva, il suo limite superiore coincide con un'estesa contropendenza in direzione N-S posta tra le quote di 1760 e 1800 m. Il limite inferiore coincide invece con il fiume Passirio. Tale porzione può essere suddivisa in 4 ulteriori settori in base a caratteristiche geomorfologiche, litologiche e morfostrutturali differenti. Le aree più attive sono quelle denominate Masi Gallo e *Hahnebaum mure*, posti nella porzione inferiore della sub-unità.

La seconda sub-unità è rappresentata dalla porzione che ha dato origine al fenomeno di *rock avalanche* del 1401-1404. Quest'ultima è collocata nella porzione settentrionale del versante ed è delimitata a nord dal rio Casabella, a est dalla cima del M. Ganda ed a ovest dal rio Passirio. Anche questa porzione può essere

ulteriormente suddivisa in base alla tipologia di depositi e fenomeni presenti. Si riconoscono in particolare da monte verso valle: la parete che ha dato origine al fenomeno originario del *rock avalanche*, una zona di detrito di crollo attiva e la porzione di accumulo della frana del 1401-1404.

La terza sub-unità è posta a monte della sub-unità 1 ed è rappresentata da una fascia di detrito a composizione variabile originatasi per crolli dalle pareti sovrastanti che hanno mascherato la morfologia originaria.

La quarta sub-unità rappresenta la porzione sommitale del versante ove è possibile osservare lo sdoppiamento della cresta generatosi in seguito al fenomeno di DGPV. Al suo interno si distinguono coronamento e scarpata principale, ove è presente un'estesa fascia detritica che oblitera l'originale superficie di scivolamento.

Al di fuori del corpo di frana principale si sono individuate due ulteriori sub-unità.

La quinta è situata nel fondovalle, in corrispondenza della località *Seehof* e comprende i depositi lacustri del bacino originatosi a causa del fenomeno del 1401-1404, tali depositi risultano in parte mascherati da detriti di origine gravitativa.

Infine la sesta comprende la porzione di versante al di sotto della cima *Hochwart*, non interessata dalla deformazione, ma che, per caratteristiche litologiche e strutturali, potrebbe attivarsi in modo analogo in futuro.

3.6 Fattori predisponenti

L'instabilità generale del versante del Monte Ganda è dovuta principalmente al suo assetto geologico. Fattore molto importante risulta essere l'integrità dell'ammasso roccioso, caratterizzato da un'elevata fatturazione, dovuta al particolare assetto strutturale presente nell'area (zona di taglio estensiva). Tale condizione determina la genesi della maggior parte dei fenomeni d'instabilità che interessano il versante, ad eccezione delle colate detritiche dovute essenzialmente all'elevata pendenza ed alle piogge eccezionali. Altri fattori sono rappresentati dal crioclastismo, l'erosione al piede ad opera del torrente Passirio e le condizioni climatiche dell'area. Altro

aspetto che potrebbe aver contribuito alla genesi del fenomeno è il detensionamento dei versanti dovuto al ritiro glaciale, fenomeno molto diffuso nelle valli alpine.

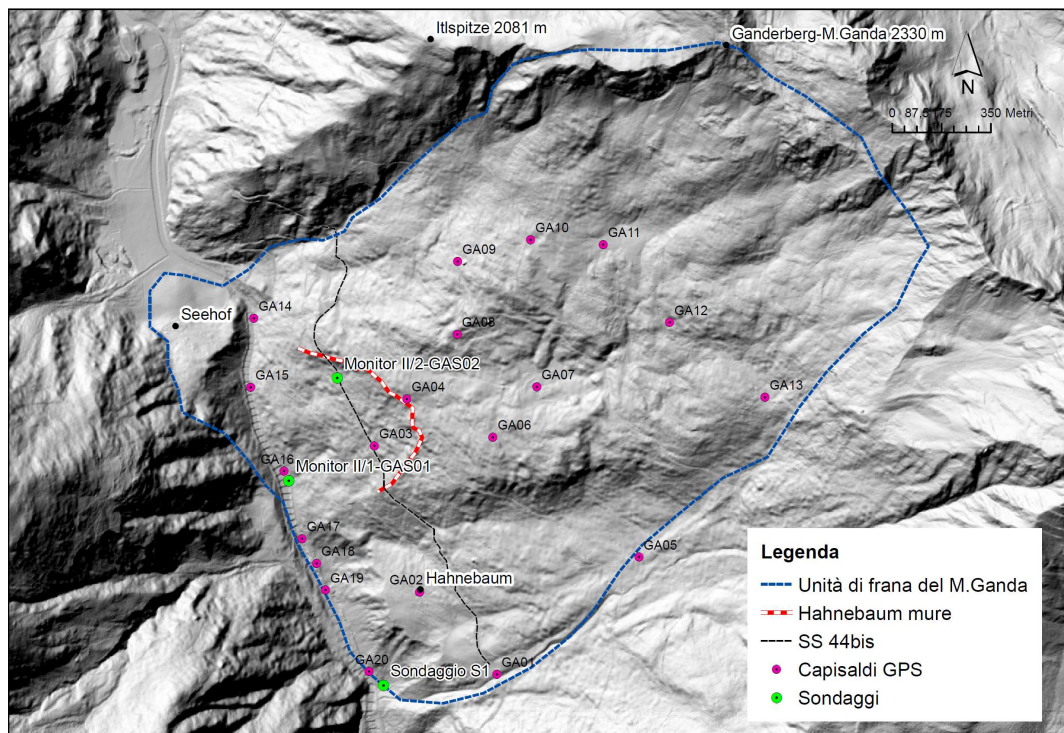
3.7 Classificazione della frana

Il fenomeno principale attivo nell'area, che influenza direttamente i dissesti locali del versante, è legato ad una deformazione profonda che interessa il substrato scistoso caratterizzato da un'intensa fratturazione dovuta al locale assetto strutturale dell'area. Il piano di scivolamento principale su cui è attivo il fenomeno non è stato individuato, tuttavia le morfostrutture ed i dati di spostamento ottenuti dai capisaldi GPS confermano il fenomeno della DGPV.

3.8 Interferenze del corpo frana con il contesto naturale e l'attività umana

Il fenomeno della DGPV in sé non rappresenta un rischio effettivo per l'attività antropica, al contrario risultano i fenomeni ad essa collegata. Il rischio principale è concentrato lungo la viabilità statale del Passo Rombo (SS44bis), quest'ultima potrebbe essere interessata da fenomeni anche intensi come si è verificato in passato relativamente alla porzione nord-occidentale denominata *Hannebaum mure*. Altro rischio potrebbe essere rappresentato dalla riattivazione della frana che ha dato origine allo sbarramento del torrente Passirio, infatti nella porzione di coronamento di tale frana è presente un volume di roccia isolato da numerose discontinuità rispetto alla cresta principale dal volume di 800000 m³. Anche la località di Hannebaum e il relativo tratto di viabilità statale sono potenzialmente a rischio in seguito alla presenza di una block-slide destabilizzata dal torrente Passirio che determina un'intensa erosione al piede di tale massa.

3.9 Indagini e monitoraggi



L'area è stata oggetto di numerose indagini dal punto di vista geologico, geomorfologico, strutturale che hanno permesso di identificare i vari fenomeni attivi. Sono stati eseguiti tre carotaggi con profondità di 38 m (MonitorII/2), 51.5 m (MonitorII/1) e 151.5m (S1) che hanno permesso di individuare il substrato roccioso e quantificare l'entità della copertura detritica (*Figura 11*). All'interno del sondaggio MonitorII/1 è stato installato un inclinometro denominato GAS01, mentre nel sondaggio MonitorII/2 si è installato inizialmente un inclinometro verticale su tutta la profondità e successivamente uno fisso (entrambi denominati GAS02) alla profondità di 9.5 m, in tale sondaggio è stato inoltre installato un piezometro. Oltre a tale strumentazione è stata materializzata a partire da ottobre 2007 una rete di 20 capisaldi GPS (*Figura 11*) ed uno di riferimento (Master) posizionato in prossimità dell'abitato di Corvara (*Rabenstein*), all'esterno del versante in frana in un'area considerata stabile e non affetta da deformazioni.

Grazie a tale rete GPS viene quantificato lo spostamento relativo e la direzione del versante ad intervalli periodici (*Figura 12*), attualmente sono state effettuate dieci campagne di misura compresa quella di riferimento (*Tabella 1*).

Misura	Data
0	30-31 ottobre 2007
1	8 luglio 2008
2	10 settembre 2008
3	8 giugno 2010
4	13 ottobre 2010
5	20 aprile 2011
6	22 settembre 2011
7	26 giugno 2012
8	18-19 giugno 2013
9	30-31 ottobre 2013

Tabella 1 Campagne di misura della rete GPS materializzata sul versante occidentale del M.Ganda

Nella porzione sommitale dell'area, al fine di monitorare eventuali spostamenti del blocco instabile che potrebbe portare alla formazione di un rock avalanche, si sono installati 6 estensimetri/fissurometri ad alta risoluzione (10-20 cm di fs), ed un estensimetro di lunghezza pari a 45 metri e fs di 4 m.

Tali strumentazioni permettono di monitorare l'andamento generale della DGPV e localmente dei singoli fenomeni attivi sul versante. Sul versante a quota 2100, è stato posizionato un pluviometro che tuttavia ha registrato fino alla data dell'agosto 2012.

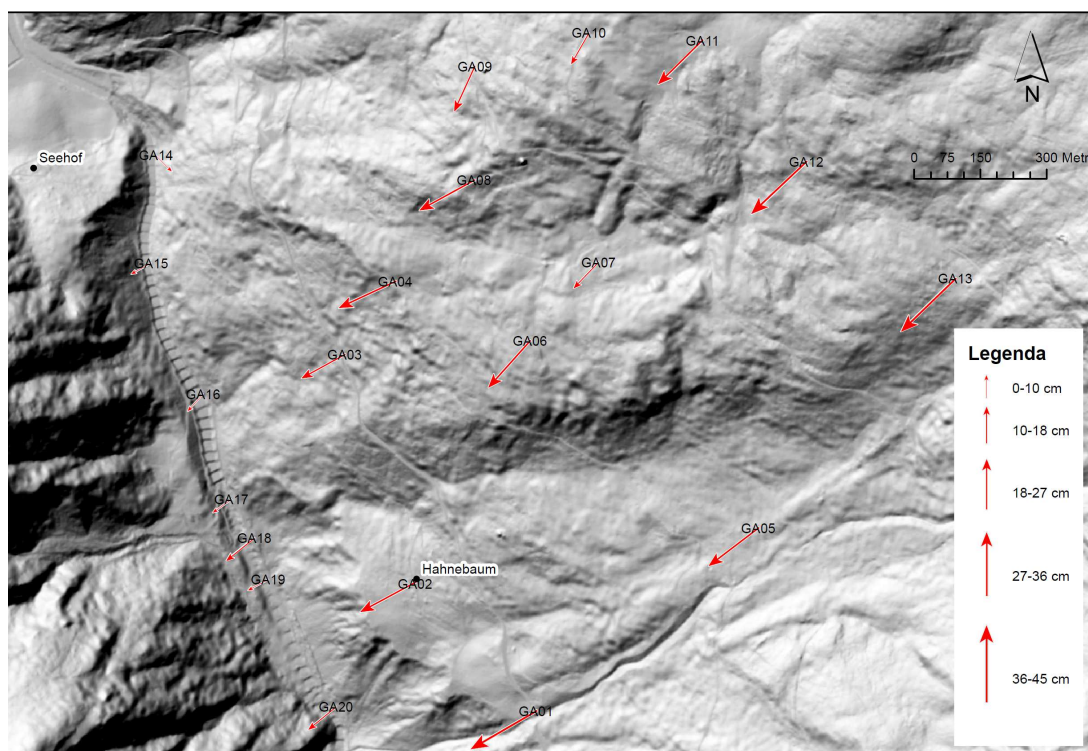


Figura 12 Spostamenti nel periodo 2007-2013 dei capisaldi GPS materializzati sul versante dell'Unità di frana del M. Ganda, Hillshade da dati LiDAR (Provincia di Bolzano)

Sul versante è stata inoltre effettuata un'indagine del microtremore ambientale a stazione singola, quest'ultima realizzata per mezzo di 63 acquisizioni (*Figura 13*).

La velocità delle onde di taglio V_s è legata alla rigidità o modulo di rigidezza al taglio μ dei terreni tramite la formula: $\mu = \rho V_s^2$, dove ρ è la densità. Poiché la densità dei suoli varia relativamente poco con la profondità (almeno nelle prime decine di metri), dalla formula si evince che i valori di V_s sono i primi indicatori della rigidità di un terreno. Inoltre la possibilità di misurare le frequenze di risonanza dei terreni da un'ulteriore indicazione sui moduli elastici dei suoli.

Dall'analisi dei dati raccolti si è riusciti a stimare la profondità del *bedrock* sismico della DGPV, posto a circa 40 m di profondità.

Il *bedrock* sismico in questo caso è rappresentato dal contatto tra il colluvium che ricopre la DGPV, composto da materiali detritici a diverso grado di disaggregazione, e la porzione rocciosa ancora intatta della grande frana, che si presume si deformi lungo una fascia plastica in roccia.

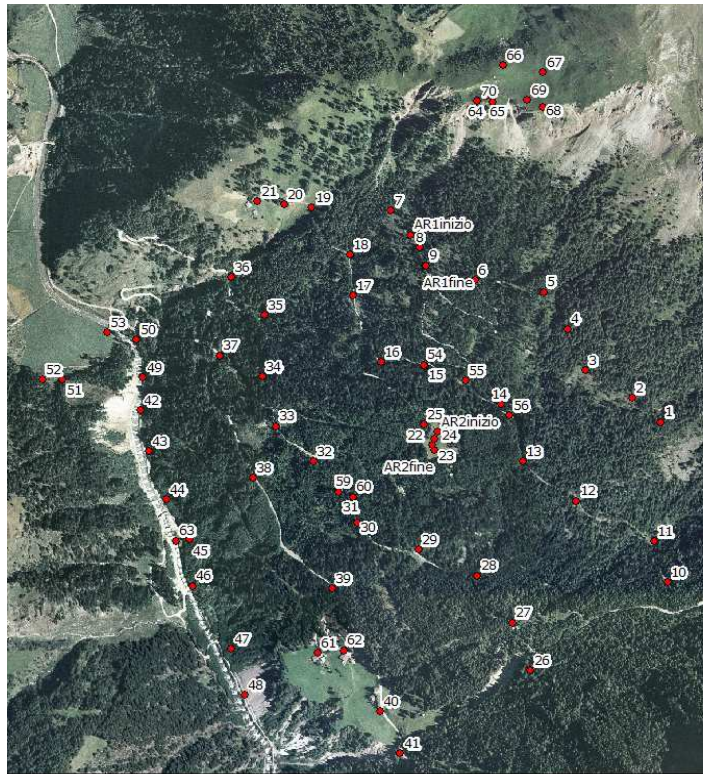


Figura 13 Punti di acquisizione per le prove relative al microtremore ambientale

4 Frana denominata “Hahnebaum Mure” o del Gallo



Figura 14 Panoramica della frana "Hahnebaum mure" scattata dal versante in destra idrografica del torrente Passirio

4.1 Introduzione

Il fenomeno si localizza nella porzione nord-occidentale dell'unità di frana, la denominazione *Hahnebaum mure* (Figura 14) è stato introdotto in seguito all'evento verificatosi nel giugno del 1951, il quale ha interessato la SS44bis per una lunghezza di 300 metri ed il volume mobilizzato fu stimato in circa 300 mila m³. In quell'occasione il tracciato della strada esistente scese di circa 40 m, così che successivamente fu realizzato un nuovo tracciato più a monte. Il corpo frana è delimitato ad est dalla strada forestale *Gspell* ed ad ovest dall'alveo del torrente Passirio.

Nel 1951 il fenomeno si è manifestato come colata detritica ed all'epoca le cause determinanti furono annoverate ad infiltrazioni d'acqua e l'eccessivo disboscamento dell'area. Al fine di eseguire una sistemazione della zona interessata dalla frana venne realizzato a monte un reticolo di drenaggio, fu effettuato un rimboschimento

ad ontani e furono messi in posto muri di sostegno a massi ciclopici in corrispondenza della nuova viabilità.

Nonostante le opere di mitigazione l'attività di tale fenomeno si è continuata a manifestare nel corso degli anni con manifestazioni più o meno intense negli anni 1962 (*Figura 15*), 1988 (*Figura 16*), fino all'evento più recente occorso nel novembre del 2000 (*Figura 17*). La riattivazione del fenomeno comportò il manifestarsi di alcune evidenti fratture sul manto stradale a partire dal giorno 10/11/2000, fino al giorno 15/11/2000 le deformazioni si assestarono nell'ordine di qualche cm/giorno. Nei giorni successivi gli spostamenti aumentarono a 10-20 cm/giorno con un picco registrato di 30 cm in 12 ore a cui seguì il collasso della sede stradale (*Figura 18*).



Figura 15 Particolare dei danni subiti dalla viabilità SS44bis in occasione dell'evento del 1962



Figura 16 Danni subiti dalla viabilità SS44bis in occasione dell'evento del 1988



Figura 17 Danni occorsi alla sede stradale in corrispondenza dell'evento di riattivazione, 14 novembre 2000



Figura 18 Collasso della sede stradale della SS44bis, avvenuto in seguito alla riattivazione del fenomeno, 20 novembre 2000

4.2 Descrizione geometrica e classificazione del corpo frana

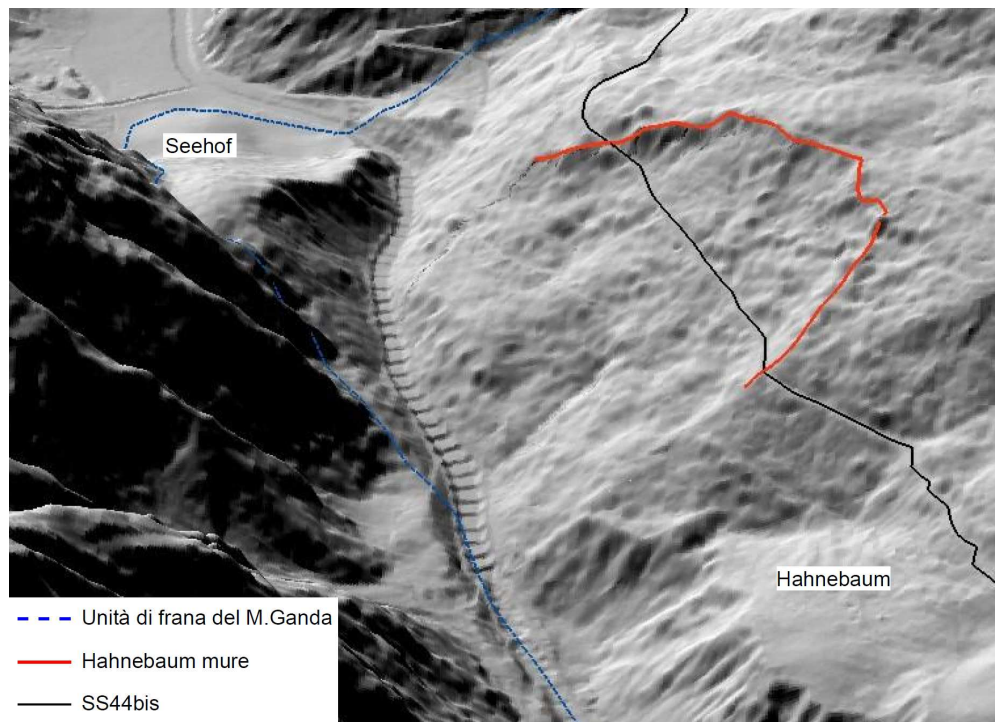


Figura 19 Elaborazione 3D del Hillshade da dati LiDAR (Provincia di Bolzano) della frana Hahnebaum mure

L'area interessata (Figura 19) dal fenomeno è stata stimata in ca. 230000 m², si sviluppa su un dislivello massimo, nella porzione centrale di circa 300 m ed una pendenza media del versante di circa 31°, ma localmente si riscontrano pendenze superiori anche a 45° (Figura 20) come nella zona di coronamento e nella porzione basale, dove il Passirio ha messo in atto un importante processo erosivo. Il volume totale della massa instabile è stato stimato in circa 3 milioni di m³, quest'ultimo è stato calcolato per mezzo del tool *Cut and Fill* dell'estensione *3D Analyst* di ArcGis tramite il confronto tra i DEM del rilievo da dati LiDAR e il DEM della superficie di scivolamento ottenuto secondo il metodo dettagliato nel paragrafo 4.4.

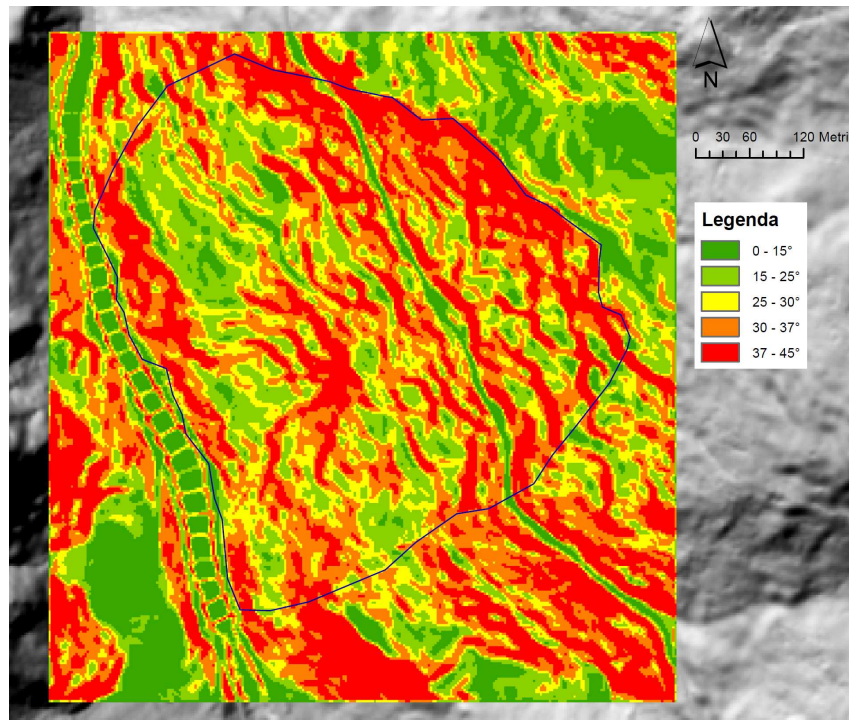


Figura 20 Carta delle pendenze relative alla porzione in frana dell'Hahnebaum mure, ottenuta tramite il software ArcGis sulla base dei dati LiDAR della Provincia di Bolzano

La geometria della frana è di facile individuazione osservando l'elaborazione Hillshade del DTM ottenuto da rilievi LiDAR effettuati sul territorio della Provincia di Bolzano tra il 2004 ed il 2005 (*Figura 21*). Da tale elaborato è possibile individuare precisamente il coronamento del corpo frana caratterizzato dalla forma ad arco tipica delle frane roto-traslative in detrito.

Si notano molto bene anche il fianco sinistro e destro evidenziati inoltre dal'andamento della viabilità che ne asseconda la morfologia. Il della piede della frana non presenta il caratteristico accumulo in quanto il fiume ha in parte eroso tale porzione. Dall'elaborazione delle pendenze ottenuta tramite l'estensione *Spatial Analyst* di ArcGis si possono notare sul corpo frana numerose scarpate minori evidenziate dalla maggior pendenza.

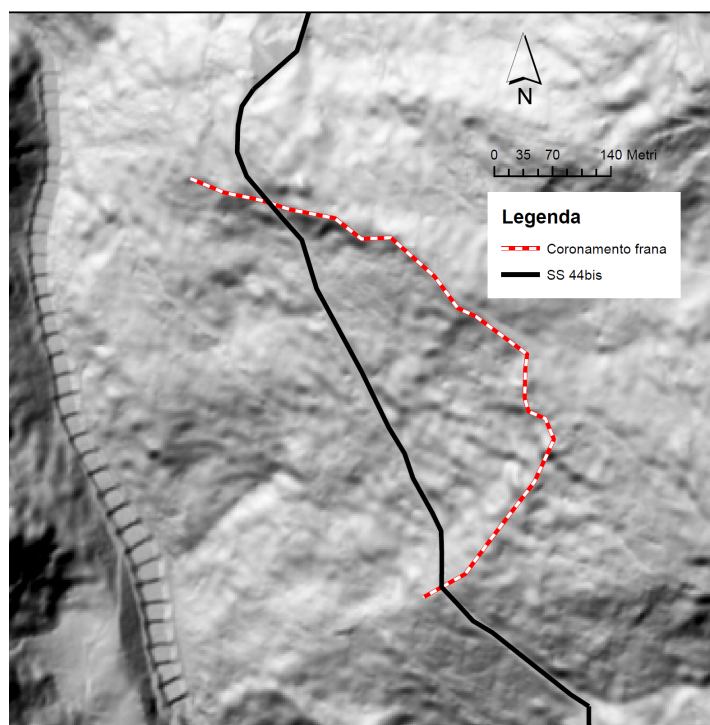


Figura 21 Hillshade da dati LiDAR con evidenziato il coronamento della frana Hahnebaum mure e il tracciato della SS44bis

Il corpo frana risulta costituito da deposito di versante rimaneggiato, frammisto residui morenici che determinano la presenza di matrice fine. La granulometria è assai varia, generalmente da blocchi spigolosi centimetrici o decimetri circondati da matrice fine (Figura 232-Figura 23), tuttavia non è rara la presenza di grossi massi anche dalle dimensioni nell'ordine del metro.



Figura 23-23 Particolari del deposito costituente la frana Hahnebaum mure

Il substrato, in alcune porzioni del versante risulta sub affiorante, tuttavia tale porzione risulta essere molto disgregata a causa dell'azione esercitata da agenti meteorici (crioclastismo, ruscellamento di acque superficiali, etc...) e biologici (azione disgregante esercitata dall'apparato radicale delle piante). Ma la causa principale è l'assetto geologico-strutturale del versante, infatti quest'ultimo si trova in corrispondenza del limite tra due unità litologiche, in corrispondenza di importanti strutture sinclinali, originatesi in successive fasi deformative.

Lo spessore del detrito è stato accertato solamente in corrispondenza dei due sondaggi (ubicati in *Figura 11*): MonitorII/1, posto alla base del corpo di frana in corrispondenza del fondovalle ove scorre il torrente Passirio realizzato con profondità di 51.5 m, MonitorII/2 posto lungo la viabilità nella porzione nord-occidentale del corpo frana che ha raggiunto la profondità di 38 m. Per quanto riguarda il sondaggio MonitorII/2, come è possibile notare dalla stratigrafia in *Figura 24*, il detrito presenta uno spessore di 10.8 m, seguito da una porzione di roccia disgregata fino alla profondità di 13.7 m, oltre i quali si riscontra il substrato roccioso prevalentemente compatto, litologicamente costituito da micascisti argentei, con la presenza di una presunta zona di taglio alla profondità di 24.1 m. In corrispondenza del limite tra detrito e substrato disgregato è stato rinvenuto uno strato dello spessore di 0.2 m con la presenza di elementi di origine organica, che datati attraverso il metodo del radiocarbonio ha mostrato un'età risalente a 2800 anni a.C. Il sondaggio presente lungo il letto del torrente non ha invece raggiunto il substrato, ed ha mostrato l'alternanza di depositi di versante, depositi alluvionali e depositi d'alveo fino alla profondità di 51.5 m.

Il deposito di versante è caratterizzato da detrito subangolare con percentuale variabile di limo e sabbia o grossi blocchi di roccia. I depositi alluvionali, sono costituiti da sabbie, ghiaie e limo. La profondità del substrato in corrispondenza dell'alveo del Passirio è deducibile dalla stratigrafia ottenuta dal sondaggio S1, eseguito anch'esso nell'alveo, ma circa 500 m a sud del Monitor II/1. Il sondaggio S1 ha raggiunto la profondità di 151.5 m, riscontrando la presenza del substrato roccioso costituito da paragneiss a 57.55 m. Grazie a queste informazioni è stato possibile realizzare un ipotetica sezione geologica visibile in *Figura 25*.

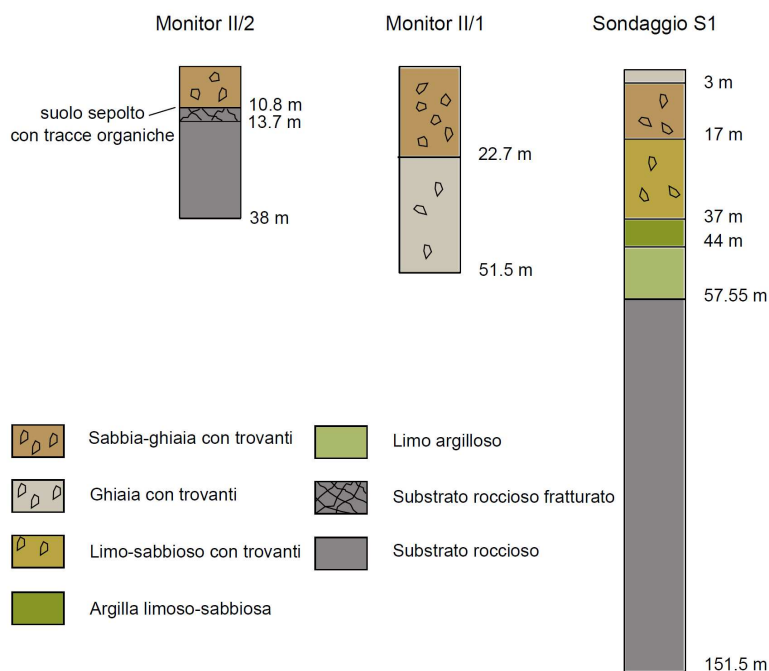


Figura 24 Stratigrafie dei sondaggi eseguiti sul versante occidentale del Monte Ganda ubicati secondo Figura 11

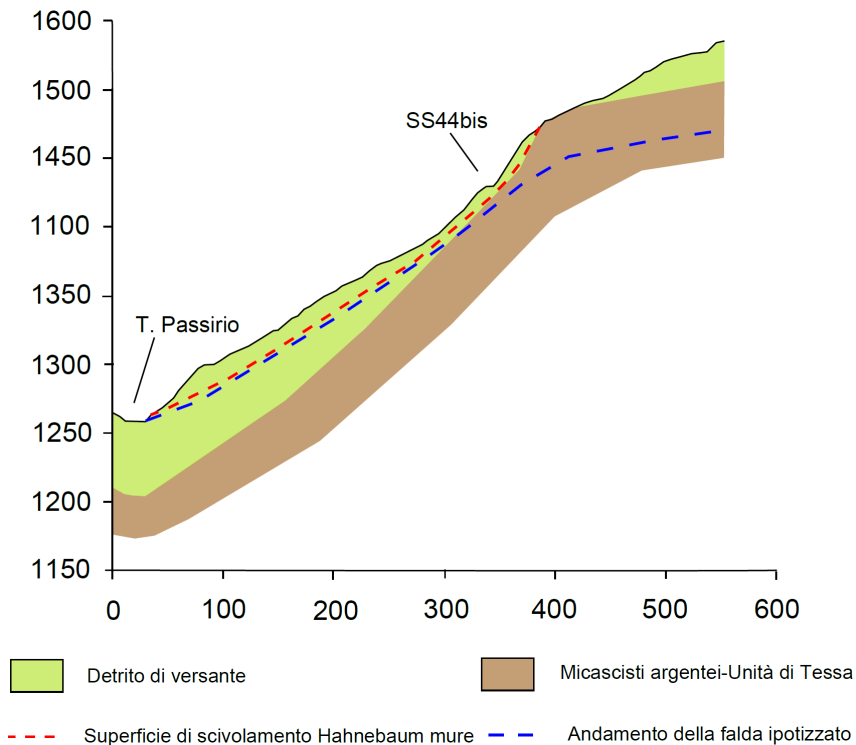


Figura 25 Sezione geologica realizzata in corrispondenza della sezione 2 di Figura 32 ove si può osservare l'andamento teorico del substrato roccioso e della falda

Nel sondaggio Monitor II/2 si nota che la roccia presente a partire da 10.8 m, per uno spessore di circa 3m, risulta essere molto fratturata, da ciò si può dedurre che esista al di sotto del detrito di versante interessato dal fenomeno franoso, uno spessore di roccia disgregata che potrebbe contribuire alla genesi del fenomeno. Tale ipotesi era già stata avanzata all'epoca del primo collasso del 1951, si era ipotizzata infatti la presenza di uno spessore di roccia alterata interessata del fenomeno dell'incurvatura dei piani di scistosità.

I dati del piezometro posto nel foro Monitor II/2 escludono l'interferenza della falda con la massa in frana in corrispondenza di tale punto. Tuttavia il piezometro non trovandosi nella porzione centrale del corpo di frana, ma nel suo limite settentrionale ove lo spessore del corpo è inferiore, la falda potrebbe invece interessare la porzione centrale in quanto lo spessore in tale posizione raggiunge anche i 25 m.

4.3 Descrizione del monitoraggio in atto

Nel contesto del monitoraggio in atto sull'Unità di frana del Monte Ganda, all'interno della porzione in studio sono presenti:

- un caposaldo GPS, ubicato poco a monte della strada statale nella porzione sud orientale dell'area in frana denominato GA03;
- un inclinometro installato all'interno del foro di sondaggio GAS02 della profondità di 38 metri. All'interno del medesimo foro è anche posizionato un piezometro. L'inclinometro è attivo a partire da maggio 2012 ed ha permesso di individuare l'ipotetica superficie di scivolamento alla profondità di 9,5 metri (*Figura 29*).
- nella porzione basale del corpo frana, in corrispondenza del rio Passirio è stato eseguito un ulteriore sondaggio per una profondità di 51.5 m. Anche in tale foro è stato inserito un inclinometro che tuttavia non ha mostrato la presenza di superfici di scivolamento.

Nell'arco di 6 anni di monitoraggio (ottobre 2007-ottobre 2013), è stato possibile effettuare 9 letture del caposaldo GPS GA03, l'unico presente sul corpo frana, ottenendo un andamento temporale degli spostamenti superficiali dell'ammasso in frana (*Tabella 2 e Figura 26*).

giorno	Nord	Est	Altezza	N_rel	E_rel	H_rel	2D disp
30-31/10/2007	5190937.49	664915.2069	1459.731	0	0	0	0
08/07/2008	5190937.549	664915.2250	1459.841	0.0592	0.0181	0.1094	6.190517
10/09/2008	5190937.492	664915.2178	1459.694	0.0018	0.0109	-0.0373	1.104762
08/06/2010	5190937.427	664915.0923	1459.582	-0.0627	-0.1146	-0.1496	13.06310
13/10/2010	5190937.413	664915.0311	1459.621	-0.0765	-0.1758	-0.1106	19.17235
20/04/2011	5190937.392	664915.0375	1459.628	-0.0975	-0.1694	-0.1031	19.54549
22/09/2011	5190937.400	664915.0152	1459.593	-0.0895	-0.1917	-0.1382	21.15636
26/06/2012	5190937.286	664915.0740	1459.653	-0.2034	-0.1329	-0.0783	24.29691
30/10/2013	5190937.375	664914.9978	1459.562	-0.1149	-0.2091	-0.1689	23.85892

Tabella 2 Spostamenti del caposaldo GPS GA03 nell'arco di 9 letture distribuite in 6 anni

I dati hanno permesso inoltre di valutare la direzione del vettore di movimento del corpo in frana. Il vettore può essere rappresentato in 2D o 3D, tuttavia il dato più affidabile è rappresentato da quello 2D in quanto nelle strumentazioni GPS l'errore lungo la direzione z risulta essere maggiore rispetto a quello relativo alle direzioni x ed y. Osservando gli spostamenti del caposaldo nel corso degli anni si può notare come la direzione di spostamento non sia costante. Infatti come si evince dal *Figura 26* quest'ultima subisce variazioni anche nell'ordine di 100° dal trend medio, ciò accade ad esempio nella direzione di spostamento della misura eseguita in data 26 giugno 2012. Quest'ultima variazione potrebbe essere dovuta ad una cattiva ricezione del dispositivo GPS, analogo osservazione può essere fatta per il dato relativo al 18 giugno 2013 in *Figura 27*.

Dall'osservazione delle varie letture si evince che l'andamento medio si assesta su di una direzione pari a 241°N , rilevata nell'ambito dell'ultima lettura effettuata in data 30/10/2013.

Altra anomalia osservabile sul grafico riguarda le prime due letture che di fatto sembrano arretrare rispetto alla posizione originaria. L'apparente arretramento potrebbe però essere dovuto ad un fenomeno di *back tilting* dovuto al movimento

del corpo di frana, il medesimo comportamento è stato osservato nel caposaldo GA04 (*Figura 27*), tuttavia esterno al corpo frana.

Il movimento apparente potrebbe essere strettamente legato alla posizione dei due capisaldi, infatti è noto che in prossimità di fratture legate a scarpate di frane rotazionali o colamento i valori di deformazione possono seguire un andamento inverso come è esemplificato in *Figura 28*.

Il fenomeno è notoriamente osservabile solo per deformazioni limitate cioè fin quando la deformazione non è in grado di compensare l'arretramento del vertice posto sul pilastrino. In entrambi i casi si evince che nelle letture successive il trend si è invertito, manifestando spostamenti concordi con il movimento dell'ammasso in frana.

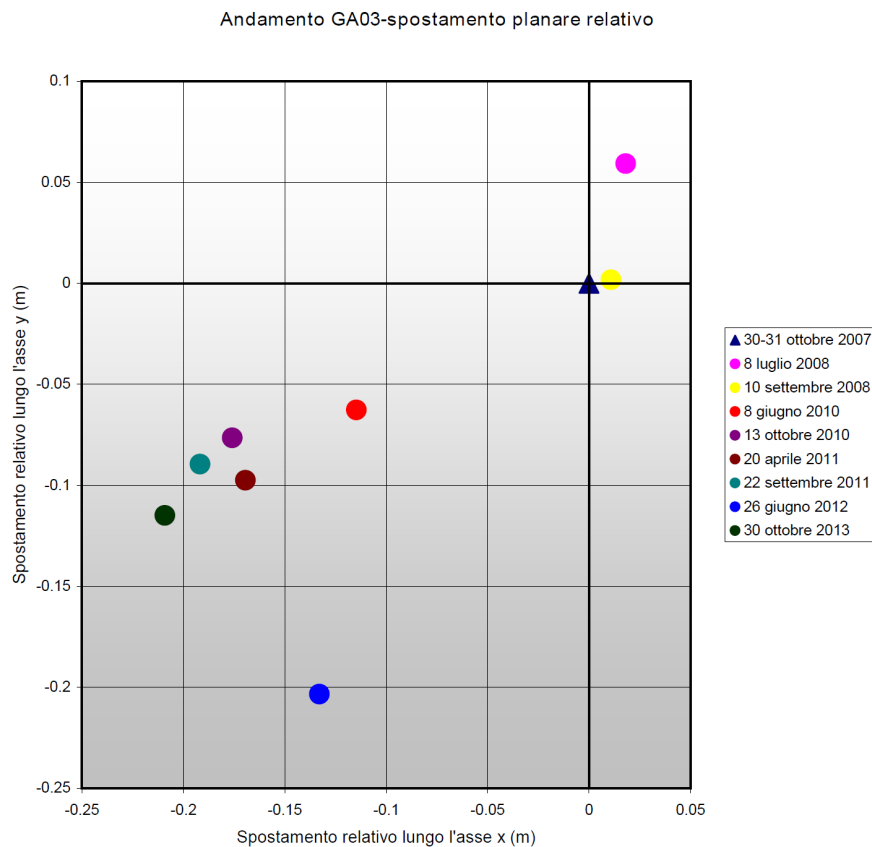


Figura 26 Andamento planimetrico del caposaldo GPS GA03 nell'arco di 9 letture distribuite in 6 anni

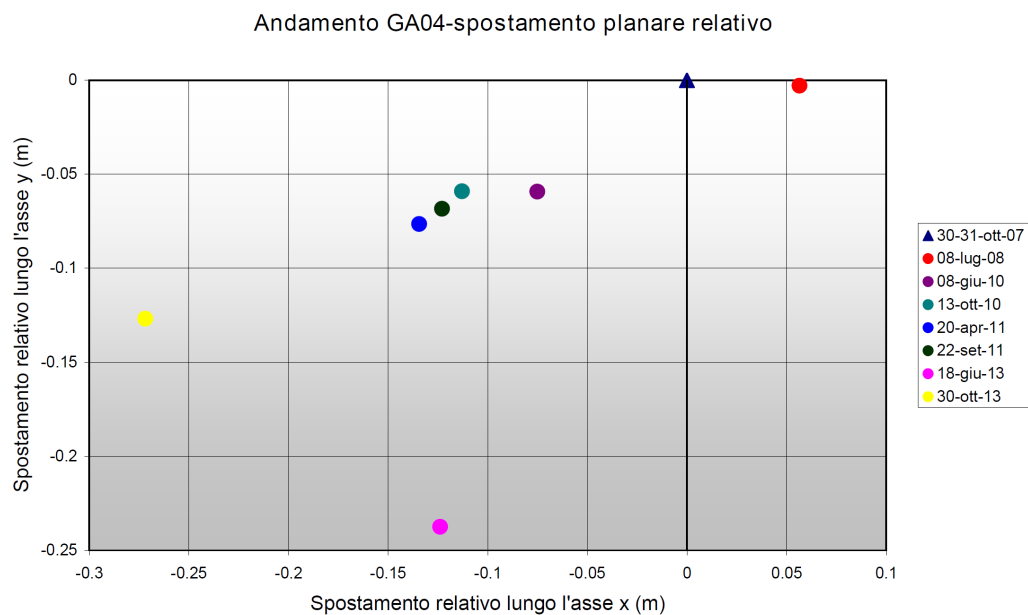


Figura 27 Andamento dello spostamento planare relativo del caposaldo GA04 nel corso di 8 misurazioni nell'intervallo di 6 anni

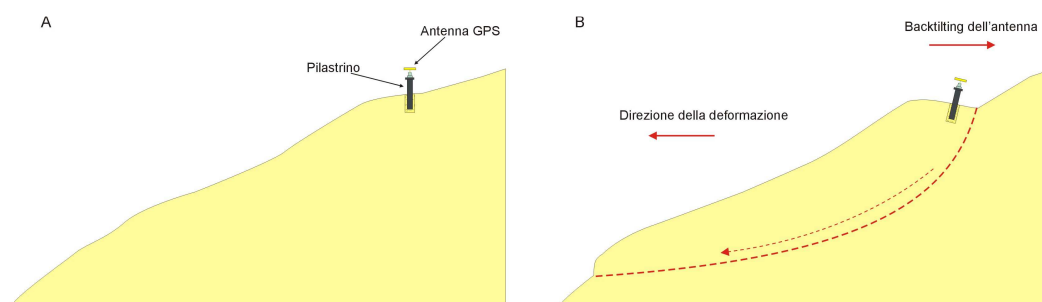


Figura 28 Influenze del fenomeno del backtilting sui capisaldi GPS GA04-GA03

L'inclinometro fisso in foro posto alla profondità di 9.5 metri, registra le variazioni angolari rispetto alla verticale ad intervalli orari nelle direzioni x ed y, orientate rispettivamente a 240°N (asse x) e 150°N (asse y). Lo strumento è attivo da maggio 2012. Analizzando i dati relativi all'asse x (Figura 30) si possono osservare principalmente due trend deformazionali, il primo, ad un rate minore, da maggio 2012 fino a novembre 2012, successivamente, pur rimanendo costante l'aumento di deformazione, si osserva un incremento del rate.

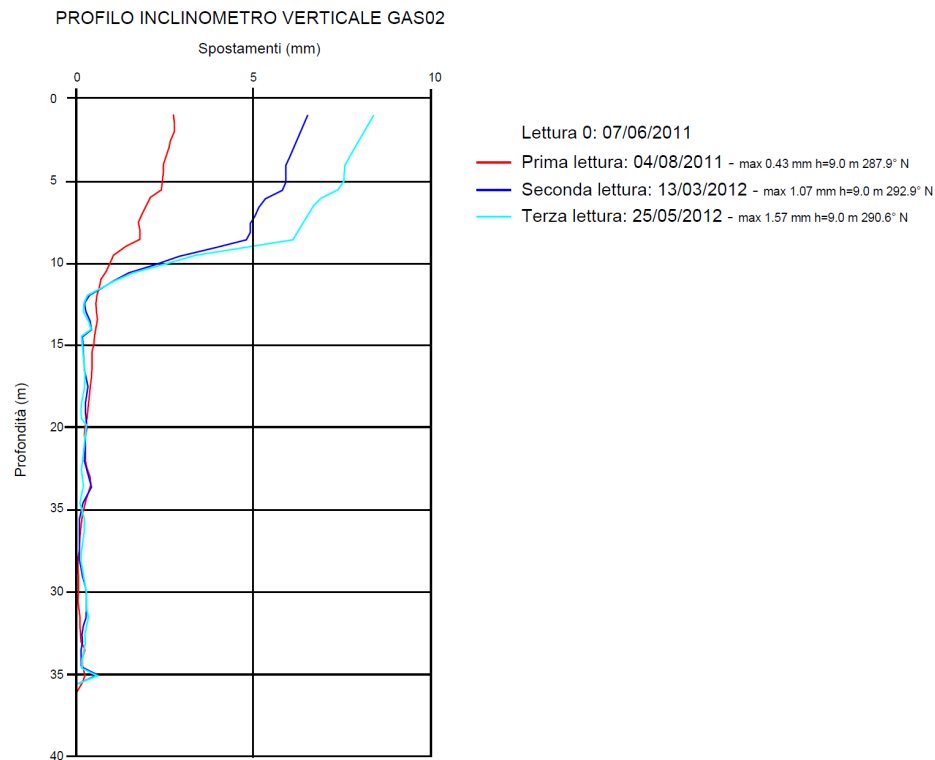


Figura 29 Spostamenti rilevati dall'inclinometro verticale GAS02 durante il periodo giugno 2011 - maggio 2012

Tali osservazioni valgono anche per i dati relativi all'asse y, dove però si osservano due ulteriori variazioni nel periodo successivo a novembre 2012, infatti tra aprile 2013 e giugno 2013 si verifica una temporanea diminuzione della velocità di deformazione, analogamente, ma per un periodo più breve avviene tra la prima e la terza decade di novembre 2013. Gli spostamenti registrati sono tuttavia di piccola entità, dal momento che da maggio 2012 a febbraio 2014 si sono registrati variazioni angolari pari a circa 0.22° per l'asse x e 0.14° per quanto riguarda l'asse y, che convertiti in mm corrispondono a circa 3.8 mm (asse x) e 2.4 mm (asse y). Osservando l'andamento della falda (GWL) si osserva che vi è una certa corrispondenza tra il suo aumento e la diminuzione del rate lungo l'asse y, tuttavia trattandosi di variazioni molto basse la correlazione non è attribuibile con certezza.



Figura 30 Andamento della variazione angolare dell'inclinometro GA02 nelle direzioni x ed y e della quota piezometrica all'interno del foro Monitor II/2 nel periodo maggio 2012-febbraio 2014

L'andamento della falda misurata dal piezometro posto nel medesimo foro, risulta oscillare tra -17.5 e -19.5 m dal piano campagna. Osservando parallelamente i dati dell'inclinometro e quelli relativi alle oscillazioni del livello di falda non si evince una corrispondenza diretta tra l'innalzamento e l'aumento delle deformazioni, ad eccezione della risalita iniziale della falda al di sopra dei 18.5 m. Tale affermazione è affetta però da limiti in quanto trattandosi di dati puntuali, non si può comprendere il reale andamento della tavola d'acqua, che in altre posizioni del corpo frana potrebbe essere più superficiale. Di conseguenza nelle posizioni centrali la falda, considerando il suo andamento costante e l'ipotetica superficie di scivolamento trovata, causerebbe un effetto destabilizzante inducendo deformazioni maggiori. La falda risulta comunque alta rispetto alla sua vicinanza con il Rio Passirio, ciò potrebbe essere legato ad una ricarica costante proveniente dalla coltre detritica al di sopra della DGPV. Infatti per la geometria di tale fenomeno è frequente che venga a crearsi un serbatoio ipogeo all'interno delle rocce disgregate che ne compongono i primi 40 m.

Osservando i dati relativi all'andamento della tavola d'acqua e quelli di pioggia (Figura 31), disponibili solamente per l'anno 2012, si può tuttavia affermare che non vi sia uno scambio diretto tra pioggia efficace e acqua di circolazione profonda. Ciò è probabilmente dovuto alla complessità del bacino a monte ove la presenza della DGPV, determina il probabile immagazzinamento di notevoli volumi d'acqua, ad esempio in corrispondenza delle depressioni caratteristiche di tale fenomeno.



Figura 31 Andamento della quota piezometrica (traccia verde) nel sondaggio Monitor II/2 e della pioggia oraria (barre blu) nell'intervallo giugno-settembre 2012

4.4 Ricostruzione geometrica del corpo frana

Punto di partenza della modellizzazione è stato l'individuazione dell'ipotetica superficie di scivolamento. Ciò è stato ottenuto grazie al dato fornito dall'inclinometro, che mostra una netta differenza nell'entità degli spostamenti in corrispondenza della profondità di 9,5 metri (*Figura 29*). La ricostruzione dell'intera superficie è stata effettuata inizialmente su sette sezioni, ubicate secondo *Figura 32*, ove si sono riportate le morfostrutture ricavate dalla bibliografia e riconosciute sull'elaborazione Hillshade di dati LiDAR (*Figura 33*).

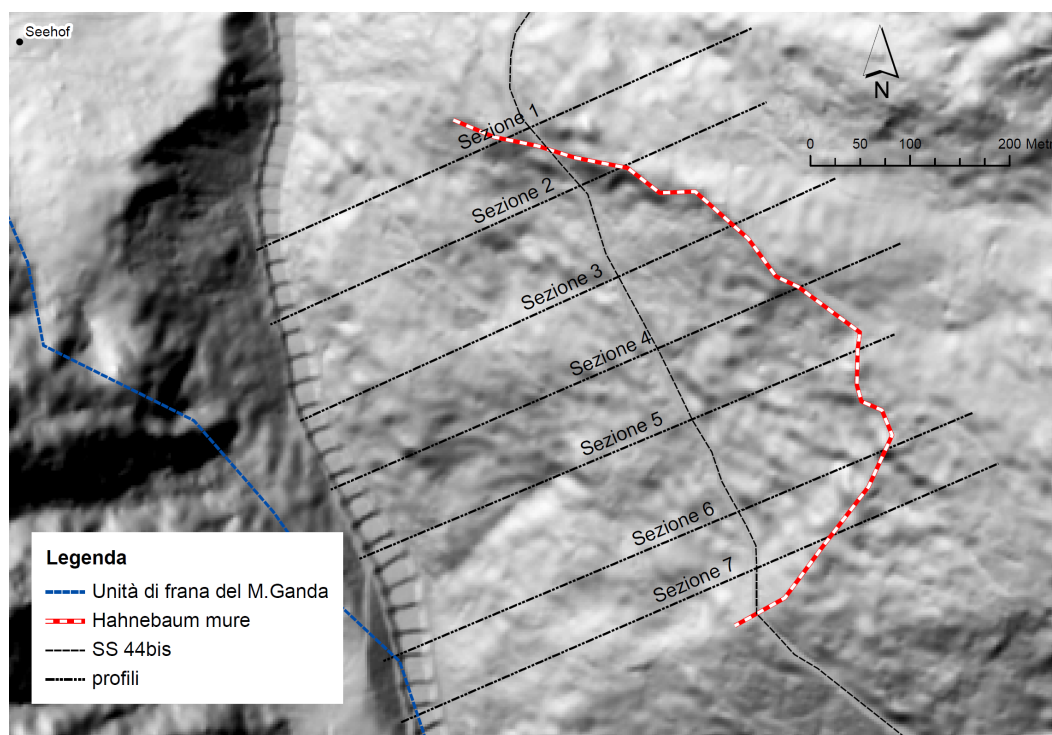


Figura 32 Ubicazione delle sezioni utilizzate per la ricostruzione geometrica della superficie di scivolamento

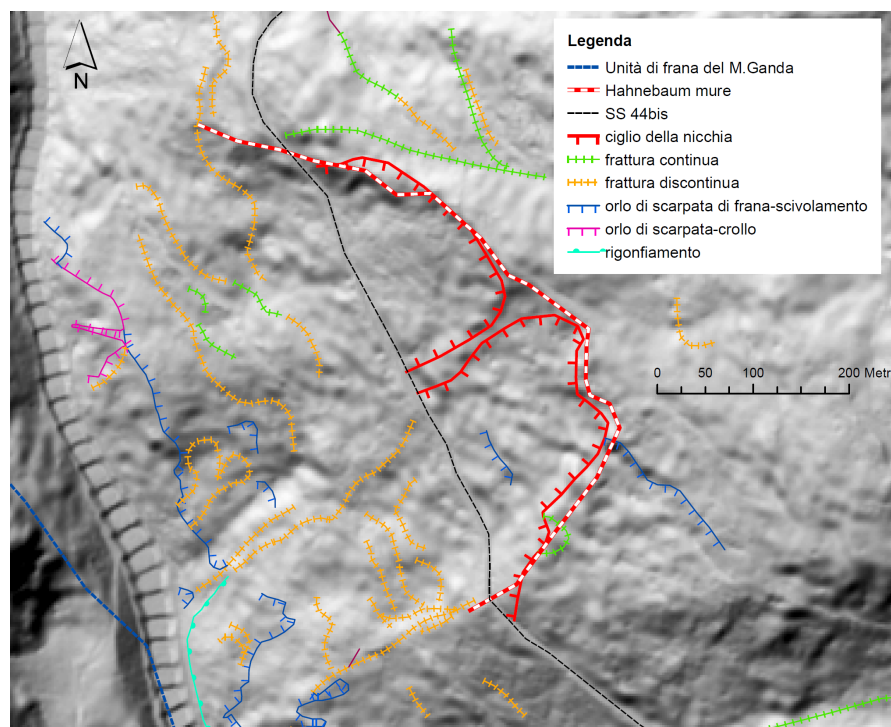


Figura 33 Morfostrutture ricavate da bibliografia e dall'Hillshade su base LiDAR (BZ)

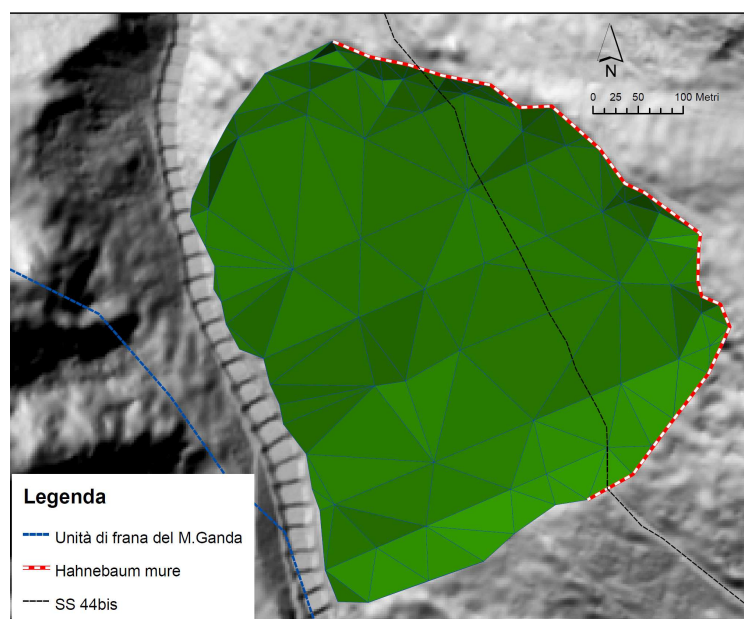


Figura 34 In verde si osserva la superficie del file TIN relativo alla superficie di scivolamento ottenuto dall'interpolazione delle sezioni

Dalle sezioni si è poi realizzata, per mezzo dell'estensione *3D Analyst* di ArcGis, una superficie TIN interpolata (Figura 34). La superficie è stata in parte corretta al fine di limitare intersezioni con la superficie del rilievo che si verificavano in alcune

zone a causa della presenza di depressioni tra le varie sezioni che l'interpolazione non ha potuto perciò rilevare (*Figura 35*).

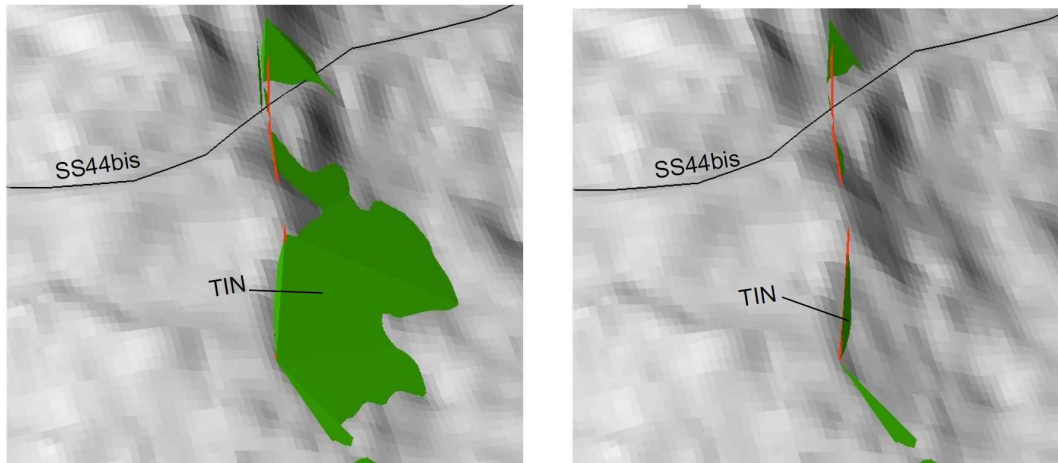


Figura 35 A destra si nota l'intersezione della superficie TIN con il rilievo da base LiDAR, a destra la superficie TIN è stata corretta

Il TIN della superficie di scivolamento è stato poi convertito in un file DEM con dimensione delle celle di 2,5 metri, analogamente al DEM del rilievo LiDAR. Si è creato poi un nuovo file *raster* dell'area sostituendo le celle del terreno originario con quelle relative alla superficie di scivolamento (*Figura 36*). In *Figura 37* si può osservare lo spessore del corpo di frana ricavato dalla sottrazione del file raster relativo all'andamento del versante (ottenuto da dati LiDAR) e la superficie di scivolamento. L'elaborato è stata ottenuto tramite l'estensione *Spatial Analyst* di ArcGis ed in particolare il tool *Raster Calculator*.

Infine si è estratta per entrambi i file raster solamente la porzione in prossimità della frana, rappresentata da una superficie rettangolare di 700 m per 750 m. Al fine di semplificare la superficie si è eseguita un ricampionatura di entrambi i file *raster* con celle quadrate di 25 m e 10 m.

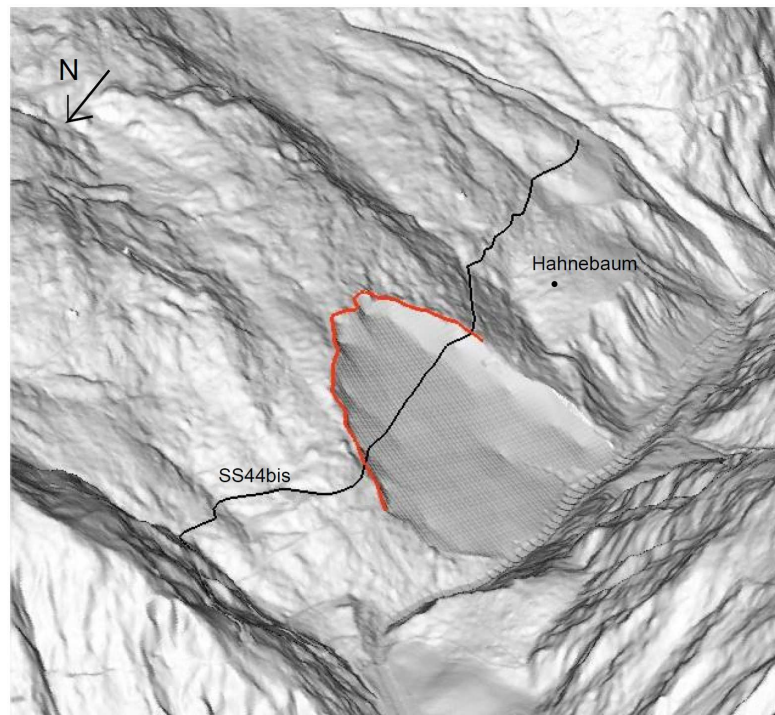


Figura 36 Visuale 3D da Nord della frana Hahnebaum mure con la superficie di scivolamento ricostruita dall'interpolazione delle sezioni di partenza

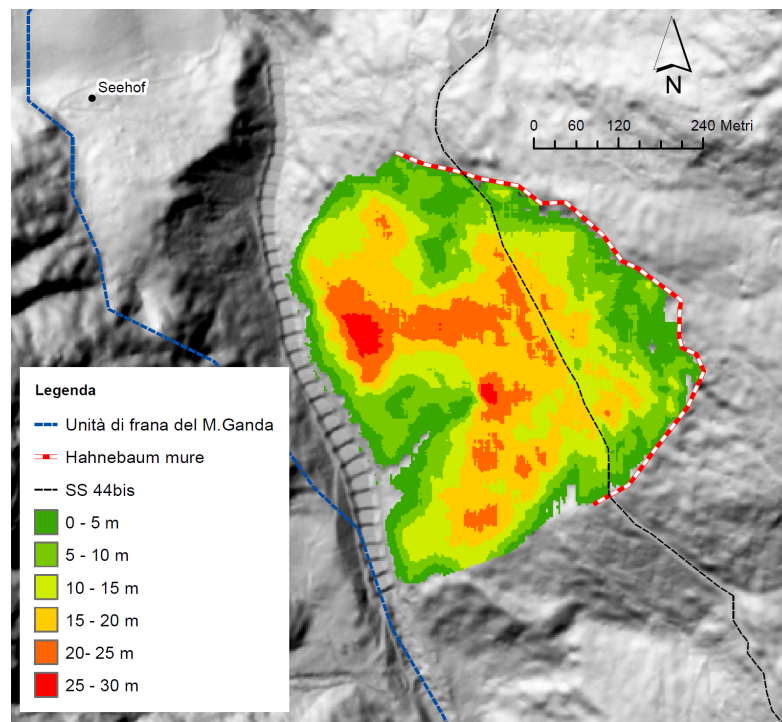


Figura 37 Spessore del corpo di frana ottenuto con il software ArcGis tramite sottrazione dei raster relativi al rilievo su base LiDAR e quello relativo alla superficie di scivolamento

4.5 Implementazione del modello geometrico in FLAC3D

Ai fini della modellizzazione del corpo frana, si è dovuto convertire il modello geometrico, ottenuto con il software ArcGIS, in un formato leggibile al codice di calcolo alle differenze finite.

Inizialmente si sono convertiti i file *raster* in formato ASCII, in modo da poter trattare al meglio i dati delle due superfici.

Si è poi creato uno script in linguaggio Matlab in grado di confrontare i file raster relativi al rilievo e alla superficie di scivolamento ed eliminare le incongruenze nelle zone esterne al corpo frana. Quest'ultime sono generate da differenze nell'interpolazione tra i due file *raster* (rilievo e superficie di scivolamento), che pur utilizzando i medesimi dati di partenza producevano valori discordi ed errori nell'implementazione del modello all'interno del codice.

Il programma FLAC3D non permette l'inserimento diretto di superfici tridimensionali complesse, ma permette di utilizzare un linguaggio di programmazione interno definito FISH. Esso consente l'utilizzo di nuove variabili e funzioni garantendo all'utente un elevato grado di libertà nella realizzazione del modello.

Utilizzando nuovamente uno script nel linguaggio Matlab, sulla base di quello utilizzato in analoghe simulazioni, si è creato un file con formattazione in grado di essere letto dal linguaggio FISH. Di fatto le superfici a differenza del file ASCII (*Figura 38 a*), ove le superfici sono formattate secondo righe, le stesse vengono suddivise in stendimenti, quindi su colonne, orientati lungo l'asse y, corrispondente con l'allineamento sud-nord. Il file si presenta quindi come una sequenza di dati organizzati secondo il seguente schema (*Figura 38 b*): sulla prima riga troviamo la posizione sull'asse x (direzione ovest-est) che sarà assegnata a tutto lo stendimento. Nella seconda riga dopo il comando che permette di immagazzinare all'interno del codice i dati (*table*) si riporta il numero progressivo dello stendimento, la posizione sull'asse y (direzione nord-sud) e la posizione sull'asse z orientato verso l'alto. Una

```

1302.17 1294.15 1287.13
1357 1366.29 1374.9 138.
1456.43 1461.96 1467.02
1511.54 1516.27 1519.31
1576.43 1583.38 1588.7
1299.16 1291.15 1284.67
1355.97 1363.33 1372.16
1455.76 1460.58 1464.1
;
; X= 0
TABLE 76 0 1252.71
TABLE 76 10 1250.89
TABLE 76 20 1246.30
TABLE 76 30 1239.88
TABLE 76 40 1232.07
TABLE 76 50 1224.43
TABLE 76 60 1221.03
TABLE 76 70 1219.59
TABLE 76 80 1218.11
TABLE 76 90 1216.38
TABLE 76 100 1214.50
TABLE 76 110 1212.65
TABLE 76 120 1211.81
TABLE 76 130 1211.13
TABLE 76 140 1209.07

```

Dal momento che si è scelto di inserire preventivamente nel modello la superficie di scivolamento, sono stati generati due file, il primo relativo alla superficie di scivolamento ed il secondo relativo al rilievo. Al fine di evitare la sovrapposizione nella memorizzazione dei dati per la costruzione del modello geometrico si è dovuta assegnare una numerazione progressiva alle tabelle, per cui quelle relative alla superficie di scivolamento vengono rappresentate da numeri che vanno dallo 0 a 75, mentre il rilievo parte dalla progressiva 76 ed arriva alla 150.

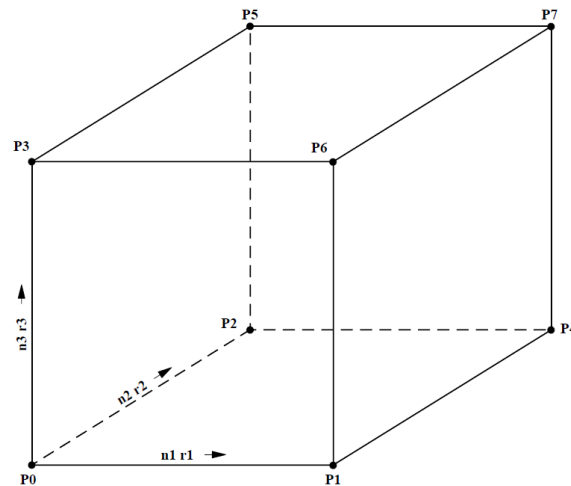


Figura 39 Elemento tridimensionale base per la costruzione della griglia del modello

Nella porzione inferiore del modello, i vertici della faccia superiore (P3-P6-P5-P7 in Figura 39), quella rappresentata dalla superficie di scivolamento, sono descritti dai dati contenuti nel file generato dallo script TOPO1, mentre la faccia inferiore presenta valori costanti, in quanto rappresenta il limite inferiore del modello, nel nostro caso imposto alla quota di 1100 m. Si otterrà perciò un modello tridimensionale costituito da una porzione centrale concava (Figura 40 a) Il codice presente nel file TOPO2 è leggermente differente in quanto gli elementi che genera (*brick*) sono definiti per quanto riguarda la faccia superiore dalle tabelle relative alla superficie topografica e la faccia inferiore viene invece descritta dai dati relativi alla superficie di scivolamento, in modo da garantire una perfetta corrispondenza tra porzione superiore ed inferiore (Figura 40 b).

All'interno di tali script viene inoltre assegnata ad ogni elemento tridimensionale (*brick*) l'appartenenza al corpo frana od alla massa stabile. La distinzione viene effettuata per mezzo del comando *range*, il quale consentirà nella fase di modellizzazione la differente parametrizzazione delle due entità (in Figura 41 a-b, sono riportate delle sezioni del modello dove si osserva la distinzione tra il corpo di frana e la zona non interessata dal fenomeno). Per mezzo di un ciclo *if-then-else* che effettua un confronto tra i dati relativi al rilievo ed alla superficie di scivolamento si ottiene l'esclusione della porzione di sovrapposizione tra le due superfici in modo da isolare il corpo della frana dal resto del modello. Durante la risoluzione del

modello si è presentato un problema legato alla dimensione verticale delle celle del corpo di frana, infatti alcune di esse presentavano spessori insufficienti alla risoluzione, specialmente nella porzione marginale del corpo di frana, dove per l'appunto gli spessori sono inferiori, per ovviare a tale problema si è aumentata tutta la superficie topografica di un'altezza minima standard.

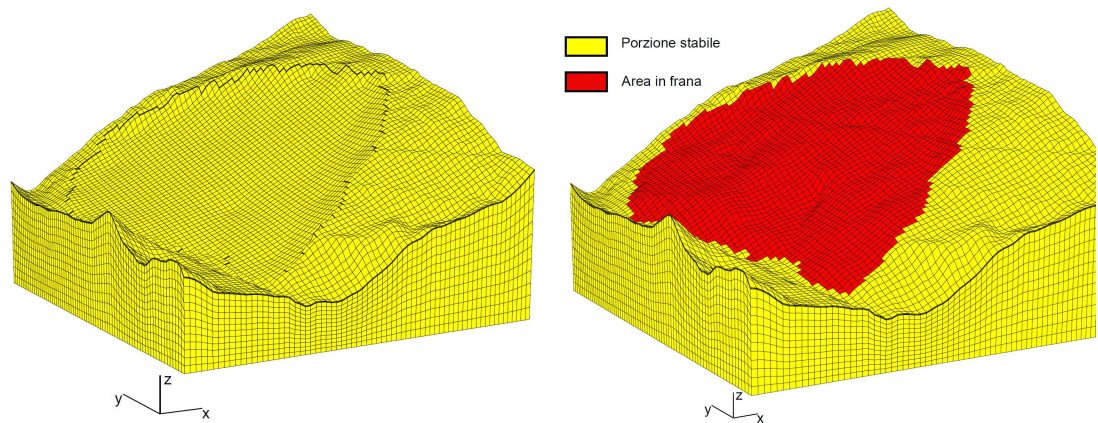


Figura 40 a-b Modello tridimensionale della frana all'interno del codice FLAC3D con elementi 10x10m; a. a sinistra si può notare come al centro vi sia la superficie di scivolamento, rappresentata da un'evidente concavità; b. a destra si osserva la presenza del corpo frana (in rosso) posto al di sopra della superficie di base (in giallo)

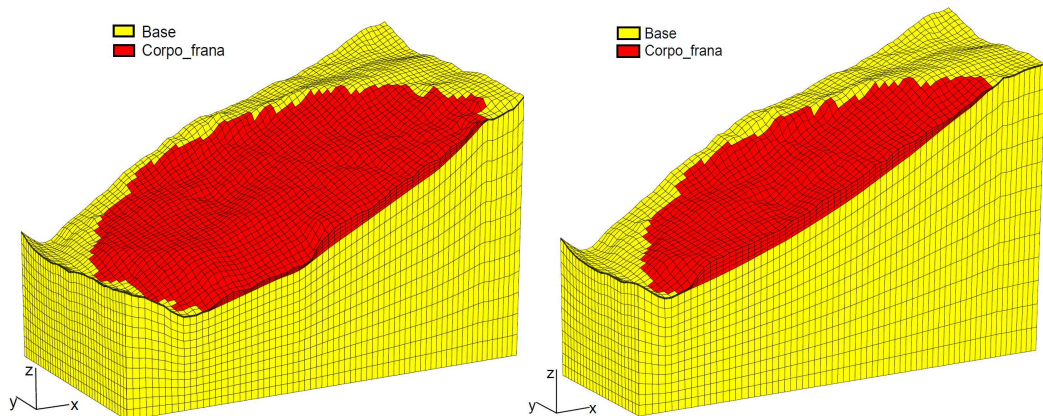


Figura 41 a-b Sezioni del Modello tridimensionale della frana all'interno del codice FLAC3D con elementi 10x10m; a. sezione eseguita a $y=350$; b. sezione eseguita a $y=500$.

4.6 Metodo delle differenze finite-FLAC3D

Il metodo alle differenze finite (FDM o *Finite Difference Method*) consiste in una tecnica numerica indirizzata a trovare soluzioni di equazioni differenziali. Il metodo permette perciò di trasformare un problema differenziale in uno algebrico approssimato.

Nell'FDM le equazioni algebriche vengono scritte direttamente in termini di variabili di campo definite nei nodi della griglia. In pratica ogni derivata appartenente all'insieme delle equazioni che governano il fenomeno viene sostituita con una espressione algebrica scritta in funzione delle variabili del fenomeno valutate in corrispondenza di punti discreti dello spazio. La funzione soluzione viene calcolata solo in punti discreti, posti di solito al centro degli elementi della griglia, e rappresenta l'andamento medio del campo entro un'intera cella. Inoltre, l'FDM utilizza un criterio numerico di approssimazione della soluzione di tipo esplicito che elimina, quindi, la fase di assemblaggio della matrice di rigidità globale.

FLAC3D (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) è un programma sviluppato secondo l'approccio FDM applicato in tre dimensioni. Esso è in grado di simulare il comportamento di strutture geotecniche tridimensionali costituite da vari materiali porosi quali terre, rocce od altri. Quest'ultimi vengono rappresentati da elementi poliedrici all'interno di una griglia tridimensionale, adattata appositamente per rappresentare la forma dell'oggetto che si vuole modellizzare.

Ogni elemento si comporta secondo delle leggi di sforzo/deformazione lineari o non lineari in base alle forze applicate od ai limiti della modellizzazione.

Il materiale può cedere o fluire, la griglia deformarsi e traslare con il materiale da cui è rappresentata.

Lo schema di calcolo Lagrangiano esplicito e la tecnica di zonizzazione mista, utilizzata dal software permettono di descrivere geometrie con presenza di diversi materiali e di modellizzare la rottura plastica e il corrispondente flusso plastico.

Rispetto ad altri codici alle differenze finite FLAC3D si distingue essenzialmente per i seguenti motivi:

- utilizza lo schema di discretizzazione mista (*mixed discretization*) per meglio modellizzare le rotture ed i flussi plastici. A differenza della maggior parte dei codici che utilizzano lo schema di integrazione ridotta (*reduced integration*).
- utilizza la versione completa delle equazioni della dinamica, anche con modelli essenzialmente statici, e ciò permette di monitorare processi fisicamente instabili senza problemi a livello numerico.
- utilizza uno schema di soluzione esplicito (a differenza del tradizionale schema implicito). Lo schema può gestire arbitrariamente non linearità delle leggi di sforzo e deformazione.

Inoltre non è più necessario memorizzare matrici con la conseguente possibilità di modellizzare più elementi con un minor utilizzo di memoria ed una simulazione a grandi deformazioni richiederà più tempo di una con piccole deformazioni, in quanto non è più necessario l'aggiornamento delle matrici.

Vi sono comunque delle limitazioni:

- simulazioni lineari saranno più lente con FLAC3D rispetto ad altri codici, di conseguenza il codice risulta maggiormente performante per contesti di non linearità e grandi deformazioni o in situazioni dove possono verificarsi instabilità fisiche.
- l'errore di approssimazione è controllato con minor efficienza

I risultati della modellizzazione derivano in parte da un particolare modello matematico e dall'altra da una specifica implementazione numerica.

Descrizione del modello matematico

Nel FLAC3D è implementata una soluzione numerica esplicita delle equazioni di stato del mezzo poroso (equazioni di continuità del mezzo continuo poroso, equazioni di conservazione del momento e della quantità del momento, equazione di conservazione dell'energia per il fluido) accoppiate con leggi costitutive idonee a studiare la relazione tensioni-deformazioni per i terreni e le rocce in funzione delle tensioni efficaci o totali e a definire il flusso dell'acqua nel mezzo poroso.

Le espressioni matematiche che ne derivano sono funzioni di variabili meccaniche (stato tensionale efficace e totale, pressione dell'acqua interstiziale) e cinematiche (spostamenti, deformazioni, velocità). La soluzione numerica è individuata per geometrie e condizioni di carico particolari assegnate attraverso le condizioni iniziali e le condizioni al contorno costanti o variabili nel tempo.

Formulazione numerica

Il metodo di risoluzione in FLAC3D è caratterizzato dai seguenti tre approcci:

- Approccio alle differenze finite, derivate del primo ordine nel tempo e nello spazio delle variabili vengono approssimate da variazioni lineari alle differenze su intervalli finiti di spazio e tempo.
- Approccio discreto di modellizzazione, il mezzo continuo viene sostituito da un mezzo discreto equivalente nel quale tutte le forze coinvolte (applicate e di interazione) vengono concentrate ai nodi di una griglia tridimensionale utilizzata per rappresentare il mezzo;
- Approccio di soluzione dinamica, i termini inerziali nell'equazione del moto vengono utilizzati come strumenti numerici per raggiungere lo stato di equilibrio del sistema.

Le leggi del moto del continuo, grazie a questi approcci, vengono trasformate nella forma discreta della legge di Newton in corrispondenza dei nodi. Il sistema risultante viene risolto numericamente, come già spiegato precedentemente, utilizzando un approccio esplicito alle differenze finite nel tempo.

Le derivate spaziali utilizzate nella derivata del mezzo equivalente appaiono nella definizione di rate di deformazione in termini di velocità. Allo scopo di definire variazioni di velocità e corrispondenti intervalli spaziali, il mezzo viene discretizzato in elementi poliedrici a tasso di deformazione costante con i vertici rappresentati dai nodi della griglia menzionata precedentemente.

L'unità di calcolo fondamentale del codice viene definita *step*, durante il quale vengono risolte le equazioni del moto assumendo costanti le tensioni e le forze in tutti i punti ed ottenendo i valori corrispondenti delle velocità e degli spostamenti. Tali valori vengono successivamente inseriti nelle equazioni dei legami costitutivi

per i diversi materiali in cui si assumono fissi i valori delle velocità e da cui si ottengono i valori aggiornati di tensione. Il ciclo si ripete finché non si giunge alla convergenza.

Sebbene si voglia giungere a una soluzione statica dei problemi, la ricerca della soluzione avviene in FLAC3D in termini incrementali come successione di fasi temporali di durata finita (*step*) per mezzo della risoluzione delle equazioni della dinamica. Ciò avviene per assicurare che lo schema sia stabile anche quando il sistema fisico modellato è instabile. Nella realtà parte dell'energia di deformazione viene convertita in energia cinetica e quando tale energia raggiunge un valore costante si è giunti all'equilibrio statico o dinamico in condizioni di flusso plastico sotto l'azione dei carichi applicati. In pratica l'utente può controllare continuamente il valore della forza sbilanciata (*unbalanced force*) e può considerare raggiunta la convergenza quando il valore di tale forza si riduce a una percentuale trascurabile del valore iniziale, che nel nostro caso sarà fissata a circa 1%.

4.7 Modellizzazione geomeccanica della frana

Il programma di calcolo FLAC3D si basa principalmente sulla definizione di istruzioni da riga di comando, di conseguenza la procedura di modellizzazione viene compilata all'interno di un file che poi viene eseguito dal codice. La modellizzazione procede in due fasi, nella prima si genera la griglia tridimensionale, si definiscono i limiti della modellizzazione e si assegnano dei parametri, appositamente elevati in modo da permettere al modello di confinarsi. Nella seconda fase vengono azzerati sforzi, deformazioni e velocità risultanti dalla prima fase e si assegnano dei nuovi parametri del corpo di frana, ottenuti da prove di laboratorio o da bibliografia, ricalcolando poi il modello.

La scelta della metodologia di analisi numerica tridimensionale è stata dettata dalla necessità di analizzare globalmente la situazione dinamica dell'area in studio, che a causa della sua complessità, non sarebbe stata modellizzata efficacemente con metodi di analisi tradizionali.

La prima fase della modellizzazione consiste, come già affermato precedentemente, nel riprodurre le condizioni di stato iniziale del sistema, definendo in modo opportuno le condizioni al contorno, in modo da poter procedere successivamente all'analisi vera e propria. Le condizioni al contorno vengono definite per mezzo del comando *fix*, quest'ultimo di fatto impedisce al modello di deformarsi in corrispondenza del tratto e della direzione assegnata. Nel nostro caso sono state vincolate le deformazioni:

- in corrispondenza dei limiti del modello;
- in corrispondenza della base posta alla quota costante di 1100 m;
- lungo le facce nord, est, sud ed ovest.

Per quanto riguarda il modello costitutivo, in FLAC3D è possibile utilizzarne vari: per il caso di studio in esame si è adottato il modello plastico di Mohr-Coulomb, che ipotizza comportamento elastico a piccole deformazioni e flusso plastico oltre un certo limite dello sforzo di taglio, limite definito in funzione dello stato tensionale secondo la legge di Mohr-Coulomb. In presenza di diversi terreni (stratigrafia eterogenea) è necessario assegnare parametri specifici per la legge elasto-plastica per ogni porzione rappresentati da:

- ρ densità espressa in kN/m^3 , la densità viene utilizzata nel calcolo delle forze gravitazionali agenti sull'elemento di volume;
- φ angolo di attrito interno espresso in gradi;
- c' coesione espressa in Pa;
- K modulo elastico di compressibilità volumetrica espresso (*Bulk modulus*) espresso in Pa. Esso rappresenta la rigidità che lega gli incrementi della tensione media o di confinamento ($d\sigma$) agli incrementi di deformazione volumetrica attraverso una relazione del tipo:

$$K = \frac{d\sigma}{d\epsilon_v}$$

dove $d\epsilon_v = \Delta V/V_0$ che rappresenta la deformazione volumetrica

- G modulo di elasticità tangenziale espresso in Pa, rappresenta la rigidità del materiale che lega gli incrementi dello sforzo di taglio ($d\tau$) agli incrementi di deformazione angolare attraverso una relazione del tipo:

$$G = \frac{d\tau}{d\gamma}$$

dove γ è la deformazione angolare.

Molte volte le caratteristiche meccaniche di un materiale vengono descritte mediante il modulo di Young E ed il coefficiente di Poisson ν . Per un materiale elastico-lineare i valori di K e G sono facilmente calcolabili per mezzo delle seguenti relazioni riportate da tutti i testi di meccanica:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

La modellizzazione è stata strutturata secondo due fasi di principali.

La prima fase consiste nel caricare virtualmente il modello al fine di sviluppare le tensioni dovute alla gravità. Ciò è stato possibile assegnando parametri elastici e plastici dei materiali molto alti in modo da escludere possibili deformazioni plastiche nella fase di assegnazione dello stato tensionale iniziale.

In particolare si sono utilizzati i seguenti parametri:

MATERIALE	ρ (kN/m ³)	K (Pa)	G (Pa)	ϕ (°)	c' (Pa)
Corpo frana	25.00	2.00E10	1E10	45	1E7
Materiale non in frana (Base)	25.00	2.00E10	1E10	45	1E7

Tabella 3 Parametri utilizzati nella prima fase di modellizzazione

Nella modellizzazione si è esclusa la presenza d'acqua, in quanto i dati del piezometro posto nel foro di sondaggio Monitor II/2 (*Figura 30*) non mostrano un livello di falda (oscillante tra 17.5 m e 19.5 m dal p.c.) sufficientemente elevato da interessare la superficie di scivolamento, posta a 9.5 m da p.c..

Con questa fase di simulazione si è ottenuta, dopo 10000 step di calcolo, la distribuzione degli sforzi legata al peso proprio del terreno: in *Figura 42* è riportata a titolo di esempio la distribuzione 3D della tensione verticale totale.

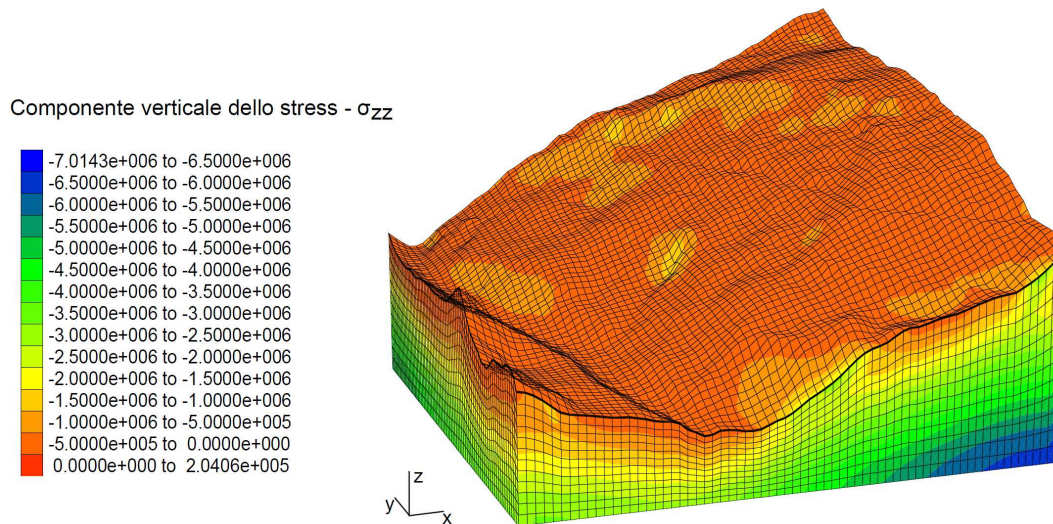


Figura 42 Componente verticale della tensione efficace alla fine dell'assegnazione dello stato iniziale con il modello a maglia 10x10m

Ottenendo un andamento della visibile In *Figura 43* è mostrato l'andamento della *Unbalanced force* al procedere degli *step* di calcolo, forza che, come già affermato nel capitolo precedente, corrisponde al parametro di riferimento per l'attendibilità del modello.

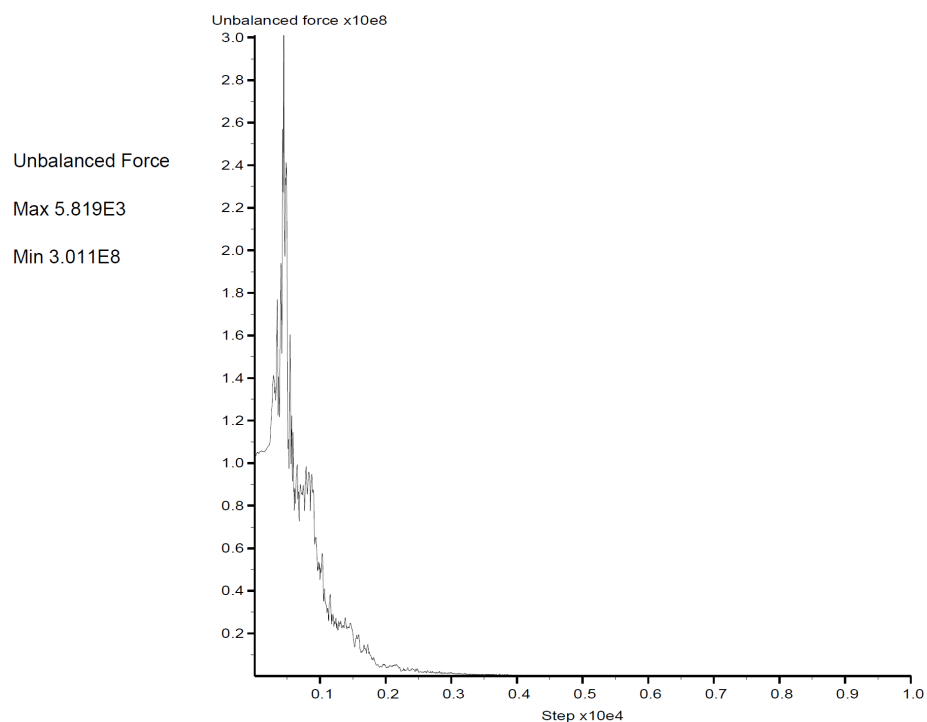


Figura 43 Andamento della Unbalanced force durante i 10000 step della prima fase di modellizzazione

Nella fase successiva di studio vero e proprio del pendio sono stati azzerati gli spostamenti e le deformazioni non reali degli elementi, e sono stati modificati i parametri relativi al corpo di frana riportandoli a valori realistici.

MATERIALE	ρ (kN/m ³)	K (Pa)	G (Pa)	ϕ (°)	c' (Pa)
Corpo frana	20.00	6.00E7	3E7	36	0
Materiale non in frana (Base)	25.00	2.00E10	1E10	45	1E7

Tabella 4 Parametri utilizzati nella seconda fase di modellizzazione

Si è interrotta la modellizzazione dopo 1000 step di calcolo, in quanto si riteneva raggiunta una convergenza sufficiente sulla base dei valori di *Unbalanced force* ottenuti (Figura 44). Procedendo con i calcoli si è infatti notata l'assenza della variazione del valore di *Unbalanced force*.

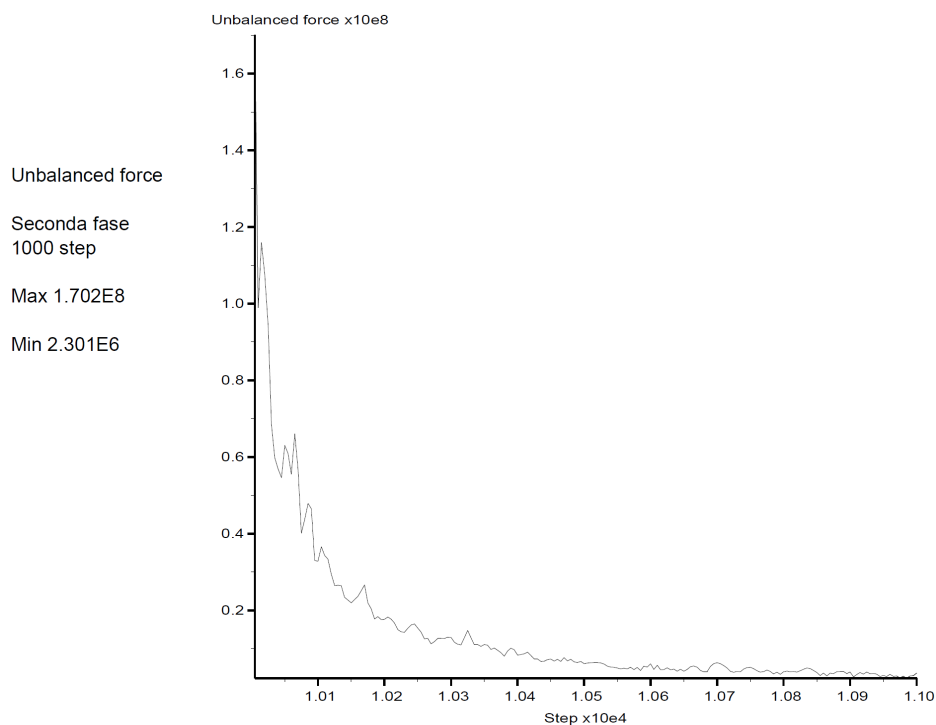


Figura 44 Andamento della Unbalanced force durante i 1000 step della seconda fase di modellizzazione

La seconda fase è stata utilizzata al fine di calibrare i parametri geotecnici reali dell'ammasso, procedendo secondo la procedura *trial and error*, modificando progressivamente in parametri (Figura 45) e confrontando i valori ottenuti dall'analisi numerica con i dati forniti dal monitoraggio in atto. Dal momento che la modellizzazione è stata sviluppata partendo dal presupposto di semplificare la geometria del fenomeno dividendo il pendio in due porzioni con proprietà diverse separate dalla superficie di scivolamento nota a priori, le deformazioni vengono di conseguenza riscontrate solamente all'interno dell'ammasso in frana e non nella porzione sottostante la superficie di scivolamento.

E' importante sottolineare al riguardo che i programmi di calcolo numerico assumono una valenza predittiva solo quando il grado di accuratezza dei dati in ingresso è molto elevato. In ambito geotecnico, a differenza di altri campi dell'ingegneria, le informazioni relative alle condizioni iniziali di sforzo, alle condizioni al contorno (stato iniziale tensionale e deformativo, presenza di acque in moto o in pressione), alla struttura e alle proprietà dei materiali coinvolti, possono

essere conosciute solo in modo parziale e dunque non sempre è possibile ottenere un modello perfettamente aderente alla realtà. I metodi numerici costituiscono quindi degli strumenti non tanto di verifica e previsione quanto di comprensione qualitativa, capaci di suggerire al progettista una linea di tendenza nel comportamento di un sistema. In mancanza di dati certi in entrata il programma di calcolo deve essere utilizzato per studiare il fenomeno unicamente sotto un punto di vista qualitativo. Solo una volta stimata la capacità interpretativa del modello, e valutati quali siano i fattori che maggiormente influenzano il fenomeno, sarà possibile servirsi criticamente del modello numerico per la progettazione vera e propria.

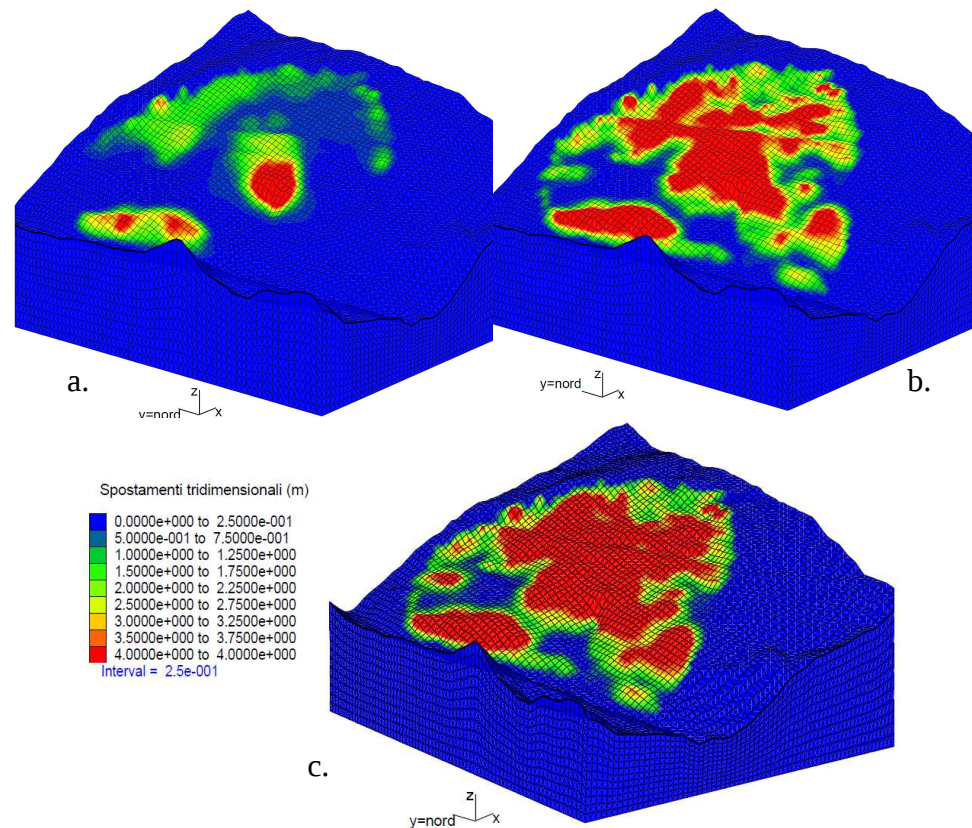


Figura 45 Entità degli spostamenti del corpo di frana con maglie 10x10m durante la fase di calibrazione del modello mediante variazione dei parametri c e ϕ : a. $c = 5$ kPa, $\phi = 34^\circ$; b. $c = 0$ kPa, $\phi = 33^\circ$; c. $c = 0$ kPa, $\phi = 30^\circ$

4.7 Risultati dell'analisi numerica

L'impiego del codice FLAC3D ha permesso di visualizzare i cinematismi accaduti e in atto in funzione delle caratteristiche geometriche fisiche e meccaniche.

L'analisi è stata eseguita sia con il modello discreto a maglie di 25x25 m, sia con il modello a maglie 10x10 m. La seconda analisi si è dimostrata adeguata alle esigenze, in quanto permette di distinguere egregiamente anche la porzione di strada che attraversa il corpo di frana.

Dall'analisi del modello si sono ottenute delle rappresentazioni grafiche che mostrano chiaramente dove si localizzino le aree soggette a maggior deformazione. Osservando la distribuzione degli spostamenti dei nodi delle maglie si può notare come determinate zone risultino soggette a elevate deformazioni (*Figura 46*) rispetto ad altre. Si possono notare infatti tre zone ove gli spostamenti sono ingenti, contraddistinte dalle lettere a, b, c.

Evidente è inoltre il fatto che ad eccezione della zona contraddistinta dalla lettera c, la porzione inferiore della frana risulta più stabile. La porzione superiore, al di sopra della SS44bis mostra invece degli spostamenti generalizzati, localizzati prevalentemente lungo il coronamento, ma con picchi in zone ben delimitate.

La strada risulta interessata da notevoli deformazioni, specialmente in corrispondenza delle due zone contraddistinte dalle lettere a e b.

La porzione evidenziata dalla lettera c, che si trova in prossimità all'alveo del Passirio e dove subisce l'azione erosiva del corso d'acqua, presenta pendenze maggiori e di conseguenza è maggiormente suscettibile a stati di deformazioni accentuati.

E' bene sottolineare che i valori calcolati dal modello non sono tuttavia da considerarsi effettivi in quanto il codice di calcolo non raggiungendo l'equilibrio delle forze e la convergenza dell'algoritmo, come invece accade quando il sistema è stabile e lontano dalla rottura, fornisce in stato plastico spostamenti non reali. Il dato quindi ha una valenza solo qualitativa e non quantitativa.

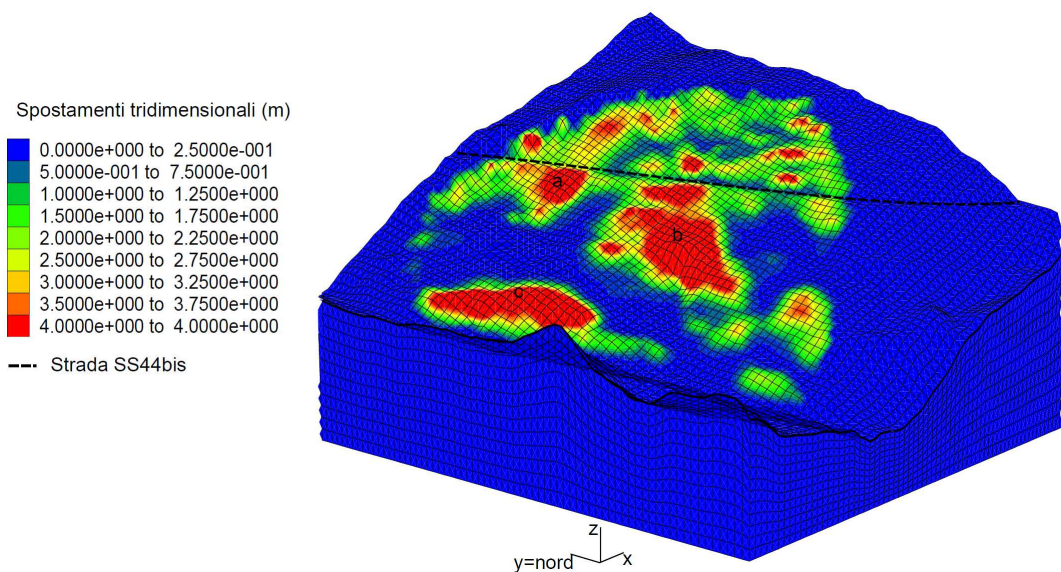


Figura 46 Entità degli spostamenti del corpo di frana con maglie 10x10m

Si deve anche notare che le zone a maggior deformazione individuate dall'analisi potrebbero tuttavia trattarsi di porzioni del corpo frana a differenti caratteristiche geomeccaniche perché possibile che lì siano presenti terreni costituiti, ad esempio, da una maggior percentuale di blocchi di roccia o da una minor frazione fina.

Ne è un esempio la porzione contraddistinta dalla lettera b in *Figura 46*, ove si osserva una zona ad elevata pendenza.

Per studiare in modo più efficiente il versante sarebbe necessario avere una caratterizzazione più dettagliata dei materiali presenti, cosa non sempre economicamente possibile. Ciò accade a causa della semplificazione effettuata, in sede di realizzazione del modello geometrico, nella definizione dei materiali presenti all'interno del corpo frana.

Si può inoltre osservare come le zone soggette a spostamenti maggiori sono quelle ove si collocano anche le massime deformazioni al taglio (*Figura 47*).

Analizzando una sezione est-ovest eseguita parallelamente alla posizione dell'inclinometro GAS02 si può notare come la deformazione sia prevalentemente superficiale *Figura 48*, influenzando in minor entità la porzione in corrispondenza della superficie di scivolamento. Tale tipologia di movimento risulta semplificata in quanto nella definizione del modello si è semplificata la geometria del versante, distinguendo il corpo in frana da quello sottostante non dal punto di vista geologico,

ma rispetto al comportamento osservato nel profilo inclinometrico visibile in *Figura 29*.

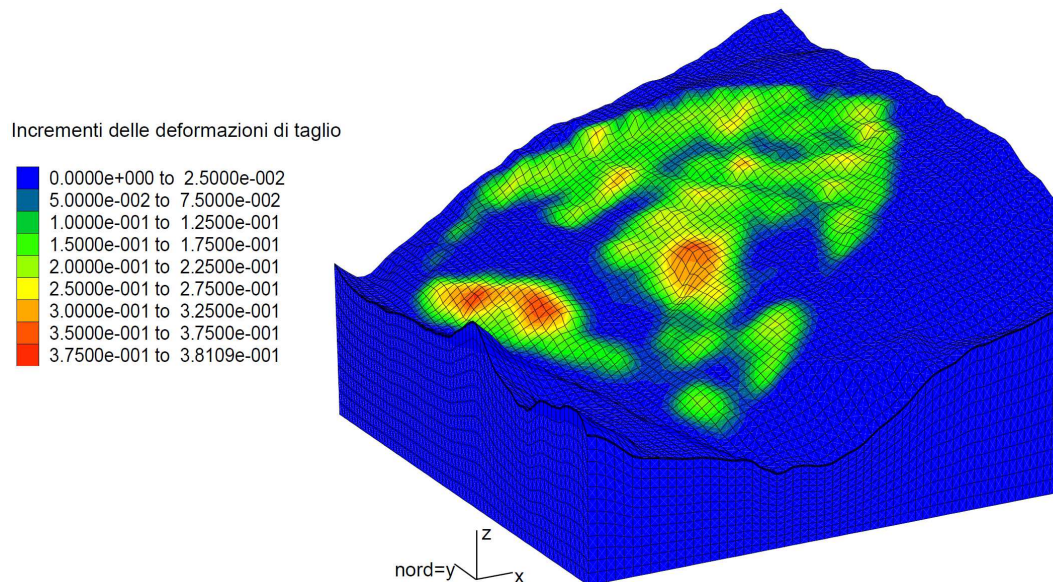


Figura 47 Deformazioni al taglio generate nel corpo di frana nel modello 10x10m

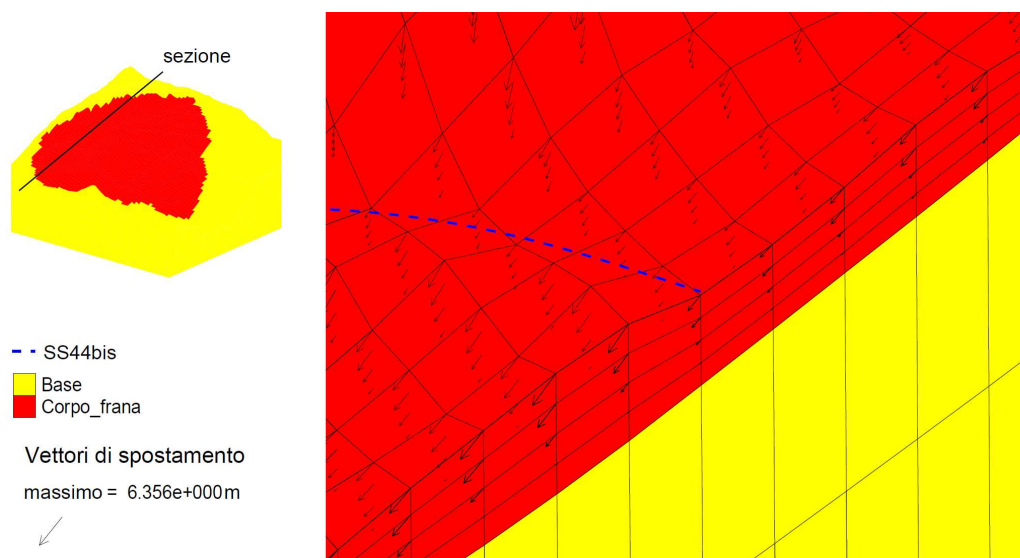


Figura 48 Vettori di spostamento sulla sezione est-ovest in corrispondenza dell'inclinometro GAS02. L'entità degli spostamenti risulta essere indicativa.

4.8 Confronto con i dati ottenuti dal monitoraggio

Come già descritto in precedenza nell'area in studio è presente un monitoraggio continuo, tramite rete di capisaldi GPS, un inclinometro fisso in foro e un piezometro.

La posizione corrispondente al caposaldo GA03 nel modello è individuata in prossimità del nodo della griglia 82802. Estrapolando i dati relativi allo spostamento lungo gli x ed y, che nel modello rappresentano rispettivamente l'Est ed il Nord, si è calcolata la direzione di movimento (*Tabella 5*) che risulta compatibile con quella evidenziata dal trend del caposaldo GA03 (*Tabella 6*). Dal momento che l'intero versante risulta essere in movimento in seguito al fenomeno della DGPV, la direzione di spostamento del caposaldo GPS ne risulta certamente influenzata.

x_disp (m)(est)	y_disp (m)(nord)	id 82802	Quota (m)
-0.499	-0.243		1411.2
0.555	spostamento 2D (m)		
direzione vettore		244.044	gradi

Tabella 5 Calcolo della direzione di spostamento per il punto griglia 82802

x_disp (m)est	y_disp (m) nord	GA03-09	al 30/10/2013
-0.2091	-0.1149		
0.2385	spostamento 2D (m)		
direzione vettore		241.2113	gradi

Tabella 6 Calcolo della direzione di spostamento per il caposaldo GPS GA03

L'entità degli spostamenti assoluti ottenuti dalla modellizzazione non è tuttavia paragonabile con quella registrata dalla rete GPS, in quanto la variabile tempo nel modello non è reale, ma legata a *step* di calcolo. Tuttavia l'entità della deformazione può essere utilizzata come parametro per comprendere ove andranno a localizzarsi i fenomeni di maggior intensità e la loro distribuzione all'interno del corpo di frana.

L'inclinometro GAS02 è ubicato nel foro di sondaggio MonitorII/2 posto nella porzione nord-orientale dell'area in frana. Come si evince in *Figura 29*, ove sono riportate 3 differenti letture, la superficie di scivolamento è ben individuata alla profondità di 9.5 metri. A tale profondità infatti si osserva un brusco aumento delle deformazioni rilevate dall'inclinometro.

Anche in questo caso si è cercato di individuare il punto nel modello ubicato nella posizione analoga all'inclinometro. Una volta individuato il nodo, in questo caso contraddistinto dal numero 78698, si sono estrapolati i dati di spostamento lungo le direzioni x ed y e si è calcolato lo spostamento nel piano orizzontale. Analogamente si è fatto per tutti i nodi posti sulla medesima verticale (caratterizzati da medesime coordinate x ed y), ottenendo così il profilo verticale degli spostamenti orizzontali fino alla profondità di 40 m (*Figura 49*). Si può osservare come tipologia di movimento risulti concorde, almeno per quanto riguarda la prima lettura di *Figura 29*, anche se l'entità degli spostamenti non risulta paragonabile a causa delle caratteristiche della modellazione.

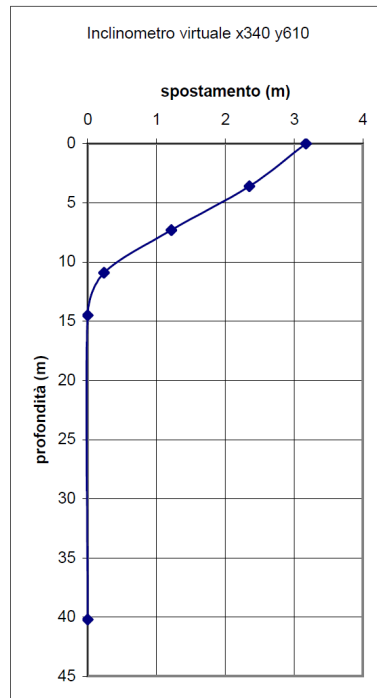


Figura 49 Andamento degli spostamenti planari lungo la verticale del nodo della griglia tridimensionale n.78698, ubicato in posizione analoga all'inclinometro GA02

Per quanto riguarda la direzione del vettore di spostamento, nell'inclinometro verticale risulta essere di circa 280°N (Figura 50), mentre nel modello si assesta a circa 243°N (Tabella 7).

x_disp (m)est	y_disp (m) nord	id 78698	
-2.816	-1.46		
3.172	spostamento 2D (m)		
direzione vettore		242.59	gradi

Tabella 7 Calcolo della direzione di spostamento per il punto griglia 78698

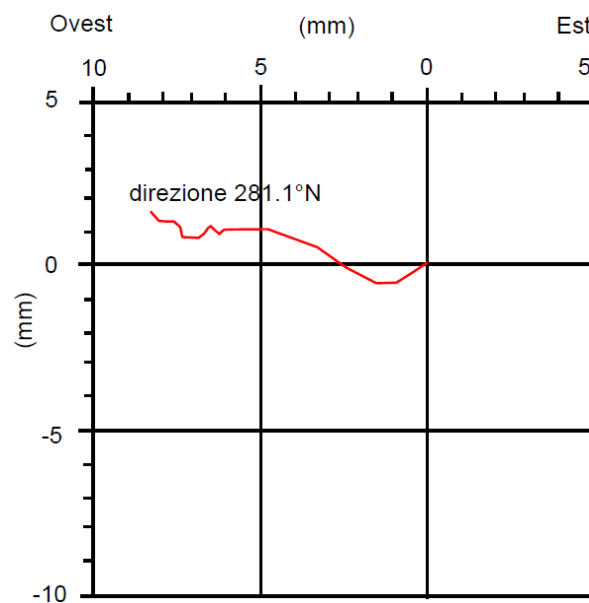


Figura 50 Andamento dello spostamento planare dell'inclinometro fisso GAS02 posto a 9.5 m di profondità nel foro di sondaggio Monitor II/2

5 Analisi del rischio e opere di mitigazione

5.1 Analisi del rischio di frana

La valutazione del rischio è un aspetto fondamentale per la realizzazione di opere ed infrastrutture oltre che per la gestione del territorio.

Nel concetto stesso di rischio sono presenti diverse componenti:

- l'evento
- la probabilità che tale evento si verifichi
- il contesto ambientale
- gli elementi coinvolti dall'evento

Parlando di rischio si rimanda alla definizione data dall'UNESCO, che fin dal 1976 ha promosso la costituzione di una "Commissione Frane" che attualmente è gestita nella Commissione delle Società Geotecniche Internazionali per il censimento mondiale dei fenomeni franosi. Oltre alla definizione di rischio totale, di seguito si riportano le definizioni fornite sempre dal *World Landslide Inventory* di elementi di rischio, vulnerabilità, e rischio specifico.

- *Pericolosità (Hazard = H)*: è la probabilità che un dato fenomeno di instabilità (potenzialmente distruttivo) si verifichi in un determinato intervallo di tempo ed in una certa area. È espressa in una scala percentuale tra 0% (nessuna probabilità di accadimento) e 100% (certezza dell'accadimento).
- *Elementi a rischio (Element at risk = E)*: è l'insieme degli elementi a rischio all'interno dell'area esposta all'evento, costituito dalle categorie di soggetti distinte per caratteristiche intrinseche (popolazione, proprietà, attività economiche, ecc.). Gli elementi a rischio si quantificano in termini relativi (valore economico) o assoluti (numero di persone, di edifici, di strade, ecc.), comunque raggruppandoli per grado di omogeneità.

- *Vulnerabilità* (*Vulnerability* = V): è il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno di instabilità di una data intensità. È espressa da una scala percentuale tra 0% (nessuna perdita) e 100% (perdita totale).
- *Rischio totale* (*Risk* = RT): è il numero di perdite (vite umane, edifici, strade, attività economiche, ecc.) conseguenti ad un particolare fenomeno naturale. È ottenuto dal prodotto della pericolosità per la vulnerabilità per gli elementi a rischio ($R=H \times V \times E$).
- *Rischio specifico* (*Specific Risk* = RS): è il grado di perdita atteso per una singola categoria di elementi a rischio in conseguenza di un particolare fenomeno naturale di data intensità. È espresso dal prodotto tra pericolosità e vulnerabilità e può variare tra 0 e 100% ($RS=H \times V$).

Come appare evidente, la determinazione del rischio totale è un'operazione abbastanza complessa, effettuabile in via teorica, ma di difficile realizzazione. In particolare le maggiori difficoltà si incontrano in relazione a:

Determinazione della pericolosità

In essa è racchiuso l'elemento di probabilità temporale che l'evento si verifichi. Rispetto altre discipline in cui si analizza il rischio collegato a fenomeni naturali (idrologia, meteorologia, valutazione dei terremoti, ecc.), la previsione della pericolosità di un evento franoso risulta estremamente difficile da valutare. In casi semplici (colate o franamenti superficiali diffusi) il calcolo della probabilità temporale con cui si possa verificare un evento franoso è legato spesso all'interazione tra la distribuzione temporale delle precipitazioni, la loro intensità e la conseguente risposta geomeccanica dell'area in potenziale dissesto e non ultimo dalla sismicità della zona. La pericolosità H è quindi strettamente connessa al periodo di ritorno T , che esprime l'intervallo di tempo che mediamente intercorre tra due eventi. Statisticamente è possibile analizzare l'andamento e l'intensità delle precipitazioni, ma risulta alquanto complesso tenere conto, in maniera sistematica, di parametri come la litologia, l'acclività, l'assetto strutturale, le caratteristiche geomeccaniche, lo spessore della coltre, la profondità della superficie di

scivolamento e la permeabilità. A questi vanno aggiunti altri fattori antropici (scavi, costruzione di rilevati o applicazione di carichi, disboscamenti) e non (sismi, azioni erosive). Le difficoltà aumentano ancora qualora non si tratti di aree già mobilitate ma di eventi di neoformazione. La valutazione completa della pericolosità richiede quindi i seguenti passi:

- previsione spaziale: dove entro una determinata area un dato periodo di tempo si può verificare una frana;
- previsione temporale: quando presumibilmente si verificherà il movimento ed una previsione tipologica (tipo frana);
- previsione dell'intensità: previsione della velocità, delle dimensioni o dell'energia del fenomeno franoso;
- previsione dell'evoluzione: distanza di propagazione, limiti di retrogressione o espansione laterale.

Determinazione degli elementi di rischio

Tale attività presuppone una conoscenza approfondita ed aggiornata degli elementi antropici sull'area di analisi, la cui presenza determina l'insorgenza del rischio. Spesso il grado di approfondimento della conoscenza del territorio non è tale da consentire una schedatura puntuale delle situazioni a rischio esistenti, anche a causa del mancato aggiornamento delle basi cartografiche.

Determinazione della vulnerabilità degli elementi a rischio

Essa dipende fondamentalmente dalla tipologia di evento e dalla sua intensità, che è funzione della velocità e della massa mobilitata: in questo caso bisognerebbe procedere per opportune semplificazioni.

Riconoscimento della tipologia del fenomeno

È frequente la difficoltà interpretativa nel riconoscimento di una tipologia di evento ed è necessario assicurare una lettura omogenea e armonizzata dei fenomeni franosi.

Pericolosità (H)

La pericolosità nell'area in esame è influenzata direttamente dalla velocità del fenomeno. Trattandosi generalmente di movimenti lenti, nell'ordine di cm all'anno, la pericolosità risulta ridotta. Tuttavia come dimostra la serie storica, il fenomeno presenta delle accelerazioni dal punto di vista deformativo, in tali frangenti la pericolosità indubbiamente ne risente. Tali fasi di maggior entità non si verificano in modo repentino, ma presentano segnali preliminari, uno su tutti la deformazione del manto stradale. Strumento fondamentale per valutare la pericolosità del fenomeno è anche il monitoraggio in atto sul corpo frana, infatti le misure inclinometriche registrate ad intervalli orari rappresentano un ottimo strumento previsionale, in quanto indicativi dello stato deformativo agente nel corpo di frana.

Gli scenari di rischio individuati sono di conseguenza 3:

- 1 riattivazione dell'intera superficie delle frana come avvenne nell'evento del 1951;
- 2 riattivazione di porzioni ridotte del versante in frana, come verificatosi nel 1962, 1988 e 2000;
- 3 deformazioni costanti del versante nell'ordine di cm all'anno, fenomeno tuttora attivo e costante, ciò porta a considerare una frequenza teorica pari a 1.

Considerando una serie storica di 100 anni si possono calcolare le probabilità di accadimento dei vari fenomeni (H):

Scenario	N° di eventi	Frequenza eventi/anno
1	1	$1/100 = 0.01$
2	3	$3/100 = 0.03$
3	continui	assimilabile a 1

Tabella 8 Valutazione della probabilità di accadimento degli scenari possibili sul versante in frana

Elementi a rischio (E)

Il corpo di frana interessa principalmente zone boscate disabitate. Elementi di maggior interesse sono rappresentati dalla strada statale 44bis del Passo Rombo, alcune strade forestali, la rete elettrica a valle della strada statale e l'alveo del torrente Passirio ove sono posizionate le grandi briglie atte a ridurre l'erosione al piede del versante in frana. Tuttavia il danneggiamento di tali opere e l'ostruzione del letto del Passirio risulta un evento dalla bassa probabilità di accadimento. Infatti nella porzione più bassa il versante presenta numerose zone a pendenza minore ove la massa in frana verrebbe rallentata. Eccezione risulta essere la porzione settentrionale del versante in corrispondenza del torrente (contraddistinta dalla lettera c in *Figura 46*), tale zona se riattivata potrebbe comportare effettivamente l'ostruzione del torrente.

Il calcolo del valore degli elementi esposti a rischio (E) è basato sull'assegnazione di un valore di importanza, su una scala da 0 a 4, per ogni differente ambito d'impatto

- strutturale: comprende i danni alle strutture;
- sociale: considera i danni alle persone;
- economico: considera i danni economici in seguito all'interruzione di un servizio;
- ambientale: considera il danneggiamento del patrimonio ambientale.

Elemento a rischio	Strutturale	Sociale	Economico	Ambientale
Patrimonio boschivo	1	1	1	3
Viabilità	4	1	4	1
Rete elettrica	1	0	2	1
Torrente Passirio	1	0	2	3

Tabella 9 Valutazione dell'impatto sugli elementi a rischio relativamente allo scenario di riattivazione della frana principale

Elemento a rischio	Strutturale	Sociale	Economico	Ambientale
Patrimonio boschivo	1	1	1	2
Viabilità	3	1	3	1
Rete elettrica	1	0	2	1
Torrente Passirio	1	0	2	2

Tabella 10 Valutazione dell'impatto sugli elementi a rischio relativamente allo scenario di riattivazione parziale della frana principale

Elemento a rischio	Strutturale	Sociale	Economico	Ambientale
Patrimonio boschivo	0	0	0	0
Viabilità	1	0	1	0
Rete elettrica	1	0	1	0
Torrente Passirio	0	0	0	0

Tabella 11 Valutazione dell'impatto sugli elementi a rischio relativamente allo scenario 3, di deformazione costante

Vulnerabilità (V)

La vulnerabilità degli elementi esposti a rischio risulta essere varia: elevata per quanto riguarda la strada statale, media per quanto riguarda le opere presenti nell'alveo del Passirio e bassa per le strade forestali. L'elevata vulnerabilità dell'infrastruttura è dovuta principalmente alla sua importanza a livello economico, in quanto unico collegamento con la parte alta della valle e di conseguenza con il confine Austriaco, anche se quest'ultimo risulta essere accessibile solamente nel periodo estivo a causa dell'elevata pericolosità dell'ultimo tratto dovuta all'azione valanghiva.

Il calcolo della vulnerabilità (V) si è basato sull'individuazione di 4 classi associate al grado di danneggiamento subito negli ambiti introdotti nel calcolo del valore degli elementi a rischio. Il valore 1 corrisponde a perdita totale.

	Strutturale	Sociale	Economico	Ambientale
Vulnerabilità	1	0.5	0.75	1

Tabella 12 Calcolo della vulnerabilità suddivisa in ambiti per lo scenario di riattivazione del fenomeno principale

	Strutturale	Sociale	Economico	Ambientale
Vulnerabilità	0.75	0.25	0.5	0.5

Tabella 13 Calcolo della vulnerabilità suddivisa in ambiti per lo scenario di riattivazione parziale del fenomeno principale

	Strutturale	Sociale	Economico	Ambientale
Vulnerabilità	0.25	0	0.25	0

Tabella 14 Calcolo della vulnerabilità suddivisa in ambiti per lo scenario 3, di deformazione costante

Rischio (R)

Calcolo del valore di rischio relativo ai tre possibili scenari secondo la formula:

$$R = E \times V \times H$$

E = Valore degli elementi esposti a rischio

V = Vulnerabilità degli elementi esposti a rischio

H = Frequenza di accadimento del fenomeno

Elemento a rischio	R. strutturale	R. sociale	R. economico	R. ambientale
Patrimonio boschivo	0.01	0.005	0.0075	0.03
Viabilità	0.04	0.005	0.03	0.01
Rete elettrica	0.01	0	0.015	0.01
Torrente Passirio	0.01	0	0.015	0.03

Tabella 15 Valori di rischio calcolati per lo scenario di riattivazione del fenomeno principale

Elemento a rischio	R. strutturale	R. sociale	R. economico	R. ambientale
Patrimonio boschivo	0.0225	0.0075	0.015	0.03
Viabilità	0.0675	0.0075	0.045	0.015
Rete elettrica	0.0225	0	0.03	0.015
Torrente Passirio	0.0225	0	0.03	0.03

Tabella 16 Valori di rischio calcolati per lo scenario di riattivazione parziale del fenomeno principale

Elemento a rischio	R. strutturale	R. sociale	R. economico	R. ambientale
Patrimonio boschivo	0	0	0	0
Viabilità	0.25	0	0.25	0
Rete elettrica	0.25	0	0.25	0
Torrente Passirio	0	0	0	0

Tabella 17 Valori di rischio calcolati per lo scenario di riattivazione parziale del fenomeno principale

Ne emerge che il rischio maggiore è rappresentato dal danneggiamento della viabilità e della rete elettrica dovuto al fenomeno di deformazione costante. Di conseguenza gli interventi saranno volti principalmente alla riduzione di quest'ultimo.

5.2 Mitigazione del rischio

L'elevata estensione del fenomeno e la difficoltà nell'operare sul versante interessato non permettono la realizzazione di opere di sistemazione del versante in frana. Si deve perciò ripiegare sulla riduzione del rischio delle porzioni ad elevata vulnerabilità, in questo caso la strada statale 44bis. Fin dall'epoca del primo evento nel 1951, si sono messe in atto misure di protezione della viabilità, un esempio sono i muri costituiti da massi ciclopici edificati sul versante a monte della strada. Nonostante ciò i cedimenti non si sono arrestati, ma rimangono costanti nel tempo, obbligando così l'amministrazione a continui interventi di manutenzione del tratto interessato.

La soluzione in parte già adottata, ma che risulta essere assai efficace e di costo contenuto è il monitoraggio continuo delle deformazione all'interno del corpo di frana. Ciò è possibile grazie alla rete di capisaldi GPS, ma soprattutto all'inclinometro fisso GAS02 posto nel foro MonitorII/2. Grazie a quest'ultimo strumento è possibile ottenere informazioni su base oraria delle deformazioni in atto, riuscendo così a constatare eventuali accelerazioni del fenomeno.

Al fine di ridurre ulteriormente i cedimenti della sede stradale, la soluzione percorribile ed economicamente possibile è rappresentata dall' ancoraggio della

sede stradale al substrato roccioso sottostante. Tale scopo può essere raggiunto realizzando a valle del tracciato un'opera muraria con barre e micropali ammorsati nel substrato roccioso sottostante, la struttura opererà di conseguenza in modo passivo sul terreno in frana (*Figura 51*). Di fatto si tratterebbe di posizionare delle serie di rinforzi con lunghezza sufficiente ad ancorarsi nel substrato roccioso o nello strato al di sotto della superficie di scivolamento.

La lunghezza di questi elementi è quindi variabile in base alla posizione della superficie di scivolamento, che secondo il modello si troverebbe ad una profondità variabile compresa tra 0 e 20 m rispetto la sede stradale (*Figura 37*). Tali elementi strutturali dovrebbero essere posizionati in corrispondenza delle zone ove la sede stradale, in base ai risultati della modellizzazione risulta maggiormente vulnerabile ma in genere, per semplicità, si preferisce distribuirli con passo regolare, eventualmente allungandoli ed accorciandoli in funzione della profondità della superficie di scivolamento.



Figura 51 Particolare di un'opera di sostegno con ancoraggio nel substrato

Esternamente i rinforzi sono collegati per mezzo di rivestimento rigido (muri in cemento armato) o leggero (reti elettrosaldate o reti a doppia/tripla torsione) o anche semplici piastre singole. Se si progettano interventi attivi (cioè interventi che vengono posti in opera e messi in tensione con una forza calcolata preventivamente

allo scopo di stabilizzare il versante) la testa degli ancoraggi deve essere ispezionabile (*Figura 51*). Se invece la funzione stabilizzante sarà garantita dalla forza di trazione della struttura originatasi in seguito alla spinta esercitata dal versante in frana nella direzione contraria (interventi di tipo passivo perché attivati dal movimento del versante) le teste potranno anche essere ricoperte. Gli elementi strutturali dovranno essere poi collegati per mezzo di muri in cemento armato. Le opere potranno anche risultare interrate in quanto la funzione stabilizzante sarà garantita dalla forza di trazione della struttura originatasi in seguito alla spinta esercitata dal versante in frana nella direzione contraria.



Figura 52 Esempio di utilizzo della tecnica del soil nailing per la stabilizzazione di una scarpata

Alternativa meno dispendiosa dal punto di vista economico può essere quella di realizzare la chiodatura del terreno nella porzione sottostante la viabilità tramite l'utilizzo della tecnologia del “soil nailing” (*Figura 52*). Tale tecnica si basa sulla messa in posto di ancoraggi passivi infissi nel terreno ed un paramento flessibile che può essere rappresentato da rete paramassi o geogriglia abbinate a reti elettrosaldate o *spritz beton*. Gli ancoraggi possono essere installati in posto secondo varie modalità: recentemente la più utilizzata, grazie alla sua versatilità e velocità realizzativa, è quella definita “*Self-Drilling Soil Nails*” o chiodo autopercorante. Quest'ultima si basa sull'utilizzo di chiodi a sezione cava muniti in testa di utensile di scavo (*bit*) a perdere, inseriti nel terreno con la tecnica della

rotopercussione. Durante la fase di inserimento, all'interno della sezione cava viene iniettata della boiacca che fuoriesce a fondo foro attraverso alcuni ugelli presenti nell'utensile di scavo che funge sia da fluido di spurgo che sostegno del foro. Generalmente i chiodi presentano lunghezze di 3 m, ma possono essere facilmente uniti per raggiungere lunghezze superiori anche a 20-30 m. La testa del chiodo viene bloccata da una piastra di ripartizione, che permette l'ancoraggio al rivestimento esterno (costituito da reti elettrosaldate o geogriglie o piastra) e da un dado di serraggio. Nel caso si realizzi la copertura con spritz beton dovranno essere previsti opportuni sistemi di drenaggio, atti a smaltire le possibili acque di circolazione vadosa presenti a tergo della struttura. Le barre vengono posizionate a distanze ridotte e con lunghezze tali da raggiungere la superficie di scivolamento del fenomeno. La funzione dei chiodi è quella di aumentare la resistenza al taglio del terreno sfruttando la resistenza a trazione, generata dal chiodo ancorato nella porzione di terreno stabile.

Analisi di stabilità

Al fine di valutare gli effetti del *soil nailing* a valle della strada statale si è realizzata l'analisi di stabilità in corrispondenza della sezione 2.

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco o in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio complicata. Inoltre è molto difficile definire una legge costitutiva di validità generale, dal momento che i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni in quanto materiali anisotropi, ed inoltre il loro comportamento non

dipende solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle sopraelencate difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

- si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesivi (c) ed relativi all'angolo d'attrito (ϕ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di Mohr-Coulomb;
- in alcuni casi vengono soddisfatte solo in parete le equazioni di equilibrio.

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, nel nostro caso rappresentato dal pendio e dalla superficie di scivolamento imposta; da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni di taglio (τ) e confrontate con la resistenza disponibile (τ_f), valutate secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza definito da: $F = \tau_f / \tau$.

Le verifiche sono state effettuate con il software SLIDE, utilizzando i seguenti parametri:

MATERIALE	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c' (Pa)
Corpo frana	20.00	36	0
Materiale non in frana	25.00	45	1E7

Tabella 18 Parametri utilizzati nelle verifiche di stabilità

Nelle verifiche si è considerata la semplificazione di imporre a priori la superficie di scivolamento, quella ricostruita grazie ai dati inclinometrici forniti dalla strumentazione GAS02. Si è ottenuto così il fattore di sicurezza iniziale in riferimento alla specifica superficie di scivolamento (*Figura 53*).

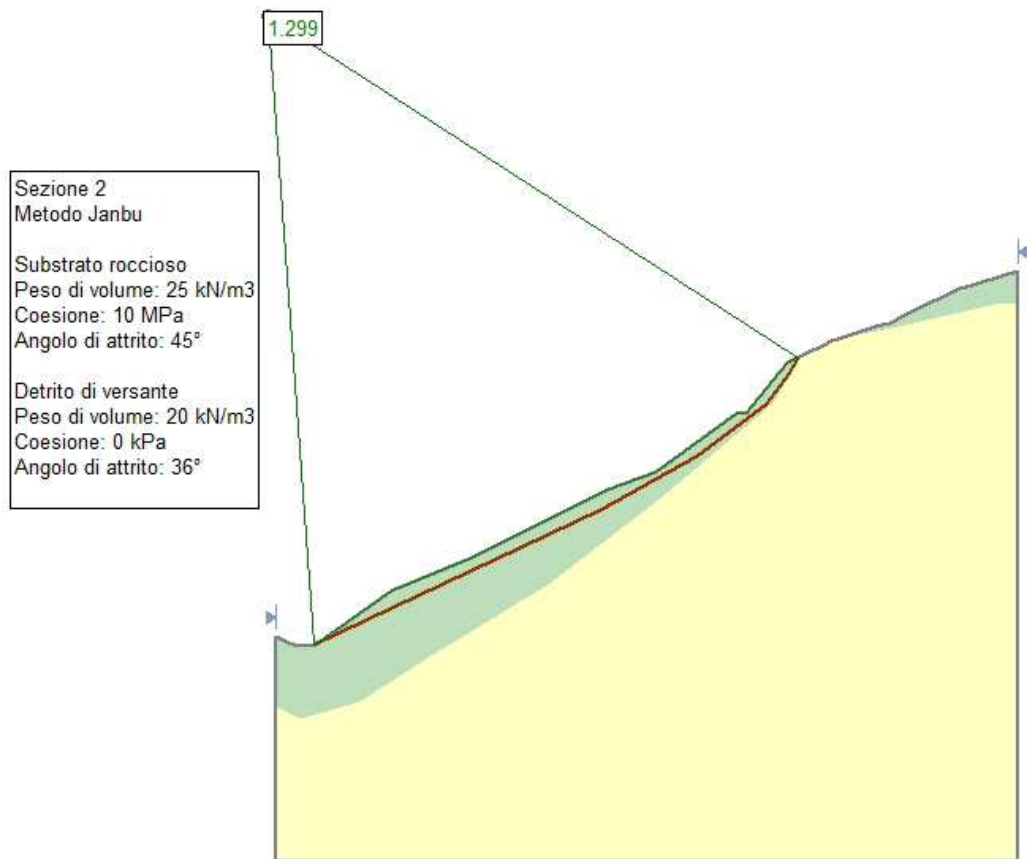


Figura 53 Verifica del fattore di sicurezza della superficie di scivolamento imposta e con parametri originari

Successivamente si è ridotto il parametro dell'angolo di attrito al fine di simulare il collasso della sezione, che avviene quando il fattore di sicurezza della superficie imposta scende al di sotto del valore 1. Si è trovato così il valore di angolo di attrito limite, rappresentato da 29° (Figura 54).

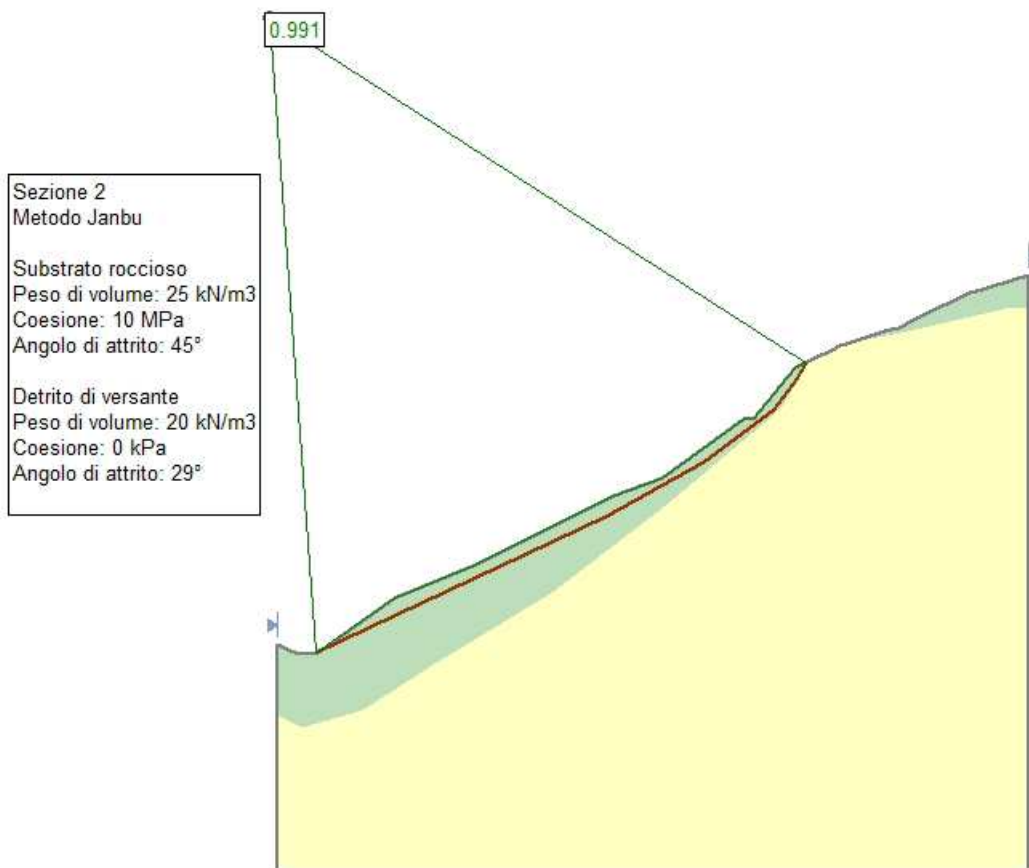


Figura 54 Analisi di stabilità eseguita sulla sezione 2 imponendo la superficie di scivolamento con valore dell'angolo di attrito limite

Si sono successivamente inseriti degli elementi strutturali assimilabili ai chiodi utilizzati nel *soil nailing* al fine di tentare di evitare il collasso del pendio, ed in particolare della viabilità.

Nel software SLIDE il *soil nailing* è riproducibile per mezzo dell'elemento *grouted tieback* con il parametro di aderenza (*bond lenght*) pari al 100%, ed i seguenti parametri:

Spaziatura dei chiodi		Resistenza a trazione del chiodo	Resistenza della piastra di testa del chiodo	Forza di aderenza chiodo-terreno
orizzontale	verticale			
1.5 m	1 m	500 kN	500 kN	40 kN/m

Tabella 19 Parametri utilizzati per il *soil nailing* nelle verifiche di stabilità

I parametri relativi alle resistenze sono stati ottenuti da specifiche tecniche del materiale fornite dai produttori dei chiodi utilizzati per la realizzazione di *soil nailing*.

Il parametro della forza di aderenza chiodo terreno viene calcolato con la seguente formula.

$$T_p = \pi \cdot d \cdot g_s$$

Con:

T_p = forza di resistenza allo sfilamento del chiodo (kN/m);

d = diametro del foro (m) dipendente dal tipo di testa di perforazione utilizzata nella messa in posto del chiodo. Per il caso in esame si è scelto di utilizzare chiodi R38 che comportano l'esecuzione di un foro di 0.09 m di diametro;

g_s = forza di interfaccia tra chiodo e terreno (kN/m²), caratteristica in base a tipo di terreno o litologia e tecnica di messa in posto del chiodo, tale dato è stato ricavata da bibliografia (Elias & Juran, 1991). In particolare il dato relativo a rocce metamorfiche alterate viene stimato in 150 kN/m².

Il diagramma degli sforzi lungo l'asse del chiodo corrisponde al schema in *Figura 55*, dove:

x = lunghezza del chiodo oltre la superficie di scivolamento

y = lunghezza del chiodo prima della superficie di scivolamento

R_f = resistenza della piastra posta sulla testa del chiodo

R_t = resistenza a trazione del chiodo

T_p = resistenza del chiodo allo sfilamento

La resistenza di ogni chiodo dipende dalla posizione della superficie di scivolamento ed è data da:

$$F = \min(T_p \cdot x; R_t; R_f + T_p \cdot y)$$

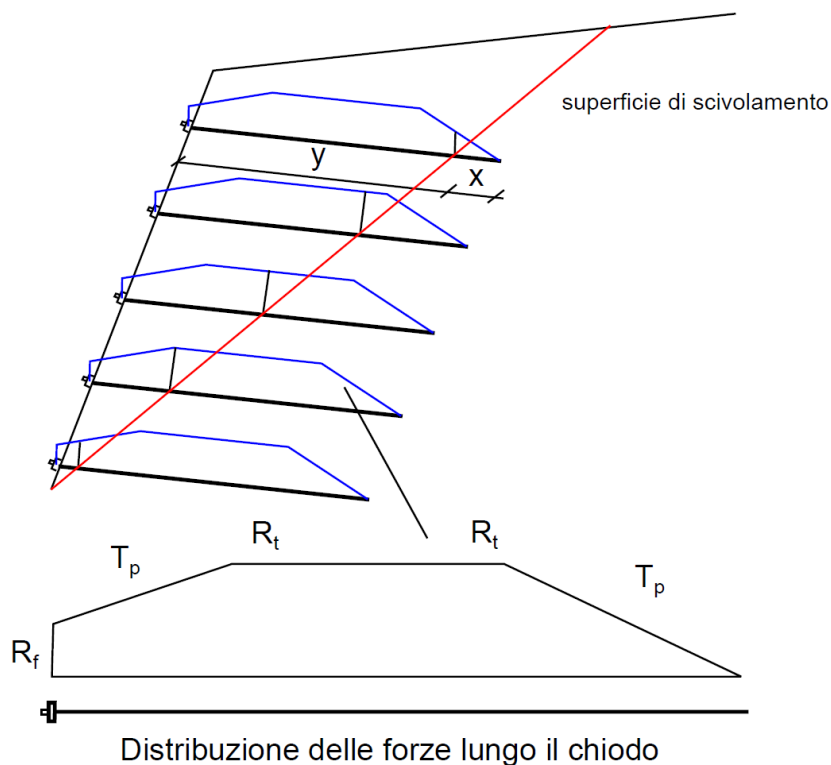


Figura 55 Schema di realizzazione del soil nailing e relativo diagramma di resistenza lungo l'asse del chiodo; x = lunghezza del chiodo oltre la superficie di scivolamento; y = lunghezza del chiodo prima della superficie di scivolamento; R_f = resistenza della piastra posta sulla testa del chiodo; R_t = resistenza a trazione del chiodo; T_p = resistenza del chiodo allo sfilamento

L'introduzione di 4 chiodi in serie posti a valle della strada SS44bis, distanziati verticalmente di 1 m e infissi nel terreno per una lunghezza di 20m, sufficiente a raggiungere il substrato roccioso, determina, come si può notare in *Figura 56*, un aumento limitato del fattore di sicurezza: il coefficiente di sicurezza sale infatti a 1.023. Anche se di poco superiore ad 1, con tale configurazione viene comunque impedito il collasso della viabilità che è l'obiettivo principale dell'intervento proposto.

Questo modesto incremento è condizionato dal fatto che la frana è molto grande ed evidentemente questi rinforzi offrono un contributo stabilizzante molto modesto se valutato per l'intero versante. Ma, come già detto, il loro obiettivo è la salvaguardia della strada, che risulta così stabilizzata.

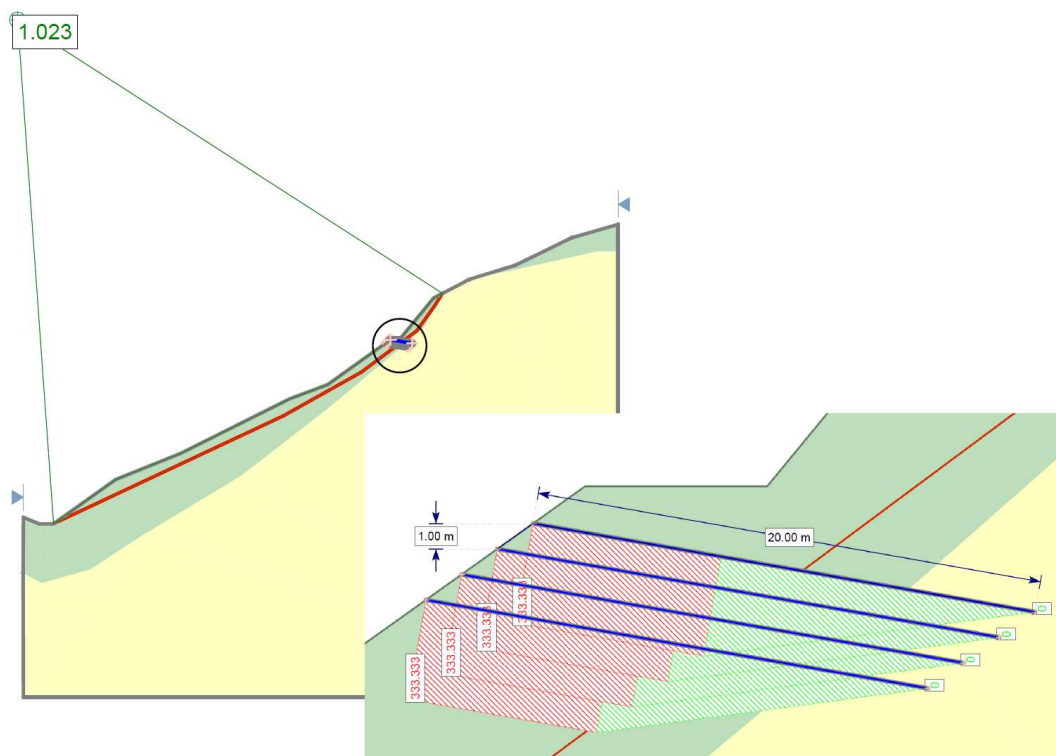


Figura 56 Verifica di stabilità sulla sezione 2 con l'introduzione del soil nailing

Come si può osservare in *Figura 56*, la lunghezza dei chiodi non è ancora ottimale in quanto l'intersezione tra superficie di scivolamento e diagramma della trazione nei chiodi si trova nel tratto crescente del diagramma stesso. Si potrebbe allungare ancora in chiodi di qualche metro al fine di far rientrare il punto di intersezione nel tratto di massima trazione dei chiodi: tale scelta è compatibile con le lunghezze possibili di tali chiodi.

D'altra parte, avendo a disposizione pochi dati sulla reale stratigrafia del versante e sulla resistenza delle formazioni presenti, in questo contesto si è preferito non eseguire ulteriori analisi.

Si ritiene importante consigliare l'esecuzione di alcune prove prima di procedere alla progettazione definitiva di questi interventi. In particolare sarà necessario e possibile eseguire:

- altri sondaggi lungo la strada con l'installazione di ulteriori strumenti di monitoraggio;

- prove geosismiche o geotermiche lungo la strada per individuare con maggior precisione la posizione del substrato roccioso e dell'eventuale falda;
- prove di progetto con l'esecuzione di uno o più ancoraggi di prova per valutare l'effettiva resistenza offerta dai chiodi ancorati in queste formazioni.

Infine è evidente che si possono formare superfici critiche. Si è eseguita un'altra analisi per valutare il fattore di sicurezza di una superficie di scivolamento posta a valle delle opere di mitigazione (*Figura 57*) e verificare se le opere non determinino la formazione di instabilità nel settore di valle. Come si evidenzia in figura il fattore di stabilità per una superficie tutta ubicata al di sotto delle opere di rinforzo assume un valore superiore e questo dimostra che le opere sono certamente migliorative per il versante.

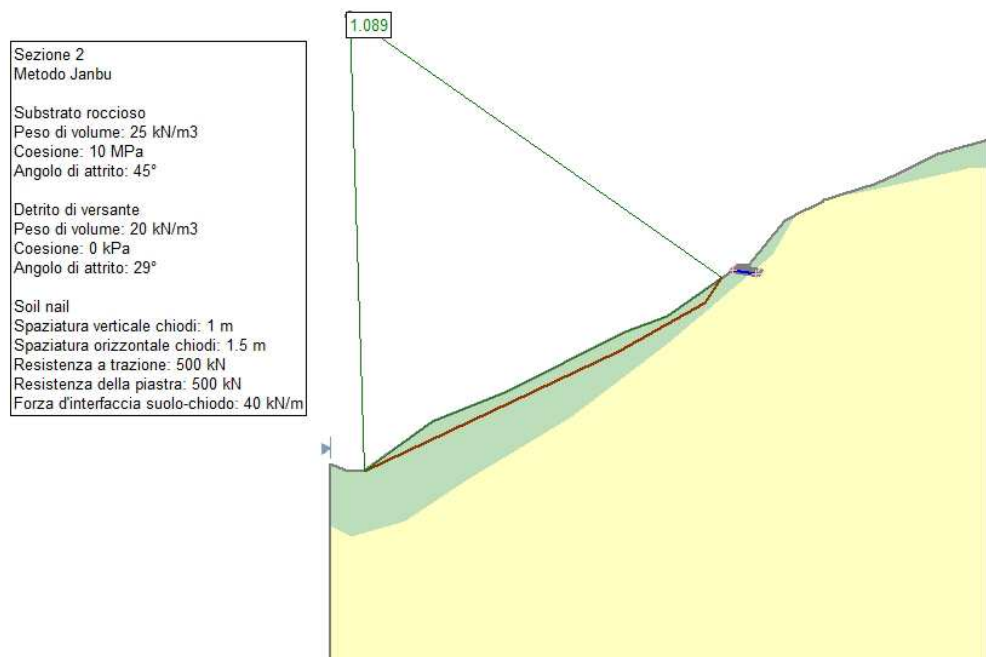


Figura 57 Analisi di stabilità della sezione 2 individuando una potenziale superficie di scivolamento a valle delle opere di mitigazione

6 Conclusioni

Analizzando i risultati del presente lavoro in associazione ai dati raccolti dalla bibliografia, si può sintetizzare quanto segue.

La porzione di frana in studio è riconducibile ad un movimento roto-traslativo che avviene in detrito a granulometria variabile, con l'abbondante presenza di blocchi anche di notevole dimensione. La modellizzazione tridimensionale del versante interessato dal dissesto ha permesso di comprendere le dinamiche deformative del fenomeno ed individuare le aree soggette a maggior intensità. Tuttavia il modello è stato realizzato assumendo notevoli semplificazioni rispetto all'assetto geologico effettivamente presente. Ciò è stato imposto dalla scarsità dei dati in possesso, mancanza legata principalmente alla difficoltà nel reperire informazioni a causa della morfologia del versante. Le uniche zone ove è stato possibile eseguire sondaggi in profondità sono infatti lungo la strada SS44bis e la forestale di servizio alle briglie poste nel letto del Passirio. In questo modello non è stata considerata l'influenza della falda, infatti l'unico piezometro nell'area in esame indica oscillazioni della falda ben al di sotto della superficie di scivolamento. La posizione marginale del piezometro non può tuttavia assicurare che l'oscillazione della falda non influenzi le dinamiche del movimento franoso. Sarà quindi opportuno realizzare un nuovo sondaggio in posizione centrale, al fine di comprendere al meglio la geometria, l'assetto del corpo di frana e le sue interazioni con la falda.

Il dettaglio raggiunto nell'analisi permette tuttavia di identificare delle zone di maggior criticità, ove dovranno essere realizzate delle opere di mitigazione. Dal momento che il rischio maggiore risulta essere quello relativo all'interruzione della viabilità, le opere dovranno interessare principalmente tale infrastruttura. In particolare le opere di mitigazione individuate sono rappresentate da:

- una struttura in cemento armato ancorata con micropali verticali ed ancoraggi al substrato presente a profondità variabili entro 25 metri e collegata strutturalmente al cordolo della viabilità;

- stabilizzazione del versante immediatamente a valle della strada per mezzo della tecnica del *soil nailing*;
- proseguimento del monitoraggio delle deformazioni attive sul versante con capisaldi GPS e inclinometri fissi in foro.

Le verifiche di stabilità eseguite su di una sezione tipo del versante hanno permesso di constatare che gli interventi di mitigazione tramite l'utilizzo del *soil nailing* risultano sufficienti ad evitare il collasso della viabilità. In fase progettuale dovranno tuttavia essere eseguite delle indagini al fine di ottenere maggiori informazioni in merito alla posizione del substrato roccioso e della falda per mezzo di altri sondaggi ed eventuali prove geosismiche o geoelettriche. Sarà inoltre opportuno effettuare prove di progetto al fine di valutare l'effettiva resistenza offerta dai chiodi nella litologia presente in zona.

Bibliografia

Agliardi, F., Zanchi, A.M., & Crosta, G. (2009). Tectonic vs. gravitational morphostructures in the central Eastern Alps (Italy): Constraints on the recent evolution of the mountain range. *Tectonophysics*, 479(1-2), 250-270.

Amatruda G., Castelli M., Hurlimann M., Ledesma A., Morelli M., Piana F., Pirulli M., Poisel R., Polino R., Prat P., Preh A., Roth W., Scavia C., Tentschert E.H.,(2004). Capitolo 6. “The Oselitzenbach landslide”, In: Identification and Mitigation of Large Landslides in Europe: Advances in Risk assessment, Bonnard Ch.; Forlati F.; Scavia C. Editors, A.A. Balkema Publishers (GBR), pp. 44, 2004, pagine da 137 a 180.

Aringoli D., Calista M. , Gentili B. ,Pambianchi G., Sciarra N. (2008). Geomorphological features and 3D modelling of Montelparo mass movement (Central Italy).

Borgatti L., Corsini A., Marcato G., Zabuski L. (2008). “Appraise the structural mitigation of landslide risk via numerical modelling: a case study from the northern Apennines (Italy)”, «GEORISK», 2008, 2(3), pp. 141 - 160

Bossi G., Frigerio S., Mantovani M., Schenato L., Pasuto A., Marcato G (2013). ‘Hazard assessment of a potential rock avalanche in South Tyrol, Italy: 3d modeling and risk scenarios’ In: R. Genevois & A. Prestininzi (Eds) *Italian Journal Of Engineering Geology And Environment – Book Series (6)*, International Conference on Vajont 1963-2013 – Thoughts and analyses after 50 years since the catastrophic landslide, Sapienza Università Editrice, 2013, pp. 221-227.

Bossi G., Mantovani M., Marcato G., Pasuto A., Mair V., Nössing L., & Stefani M. (2012) - The Ganderberg landslide (South Tyrol, Italy): Residual hazard assessment and risk scenarios. Proc. of the 11th Int. and 2nd North American Symp. on Landslides and Engineered Slopes. Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding, Banff, Canada, 763-768.

„Carta geologica d'Italia“, Blatt 013 Meran mit Erläuterungen, Maßstab 1:50.000, herausgegeben von Servizio Geologico d'Italia, Organo Cartografico dello Stato in Zusammenarbeit mit Autonome Provinz Südtirol, Amt für Geologie und Baustoffprüfung;

„Carta geologica d'Italia“, Blatt 04 „Meran“, Maßstab 1:100.000, herausgegeben von Servizio Geologico d'Italia, organo cartografico dello stato.

Cretella E. Mataloni G. Pasculli A. Sciarra N. (2006). Valutazione della stabilità spondale di un tratto in forte erosione del fiume Vomano (TE) mediante analisi 3D alle differenze finite.

Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996). Landslide Types and Processes. In Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, US National Research Council, Turner, A.K. and Schuster, R.L. (editors). Special Report 247, Washington, DC 1996, Chapter 3, pp. 36-75.

Egger Hannes (2001). Ingenieurgeologische Untersuchung des Ganderberger Talzuschubs und der Seehofer Bergsturzmasse Schneeberg-Laas-Komplex (Ötztal Decke) / Südtirol.

Elias, V. and Juran, I. (1991). "Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations," Publication FHWA-RD-89-198, Federal Highway Administration, Washington D.C.

Furlanis S. (2000). Studio Geomorfologico applicato dell'Unità di frana del Monte Ganda – Ganderberg (Moso in Passiria, Bolzano) – Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara.

GEO5-geotechnical software suite (2013), User's Guide, Fine Ltd.

Krenn, K., Kurz, W., Fritz, H., & Hoinkes, G. (2010). Eoalpine tectonics of the Eastern Alps: implications from the evolution of monometamorphic Austroalpine units (Schneeberg and Radenthein Complex). *Swiss Journal of Geosciences* , 471–491.

Hoinkes G., Koller F., Rantitsch G., Dachs E., Hock V., Neubauer F. & Schuster R. (1999). Alpine metamorphism of the Eastern Alps. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., 79, 155-181.

Hong Shen, Herbert Klapperich, Syed Muntazir Abbas, Abdelazim Ibrahim (2012). Slope stability analysis based on the integration of GIS and numerical simulation

ITASCA (1997). FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Version 2.0 User's Manual, Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN, USA.

Martinis F. (2001). Analisi della metodologia di scavo di una galleria sottomarina Il chai wan – kwun tong tunnel (hong kong – cina)

ROCSCIENCE (2004). SLIDE Version 5.0 User's Manual, Rocscience Inc, Toronto, Ontario, Canada.

Sciarra, N.& Pasculli, A.& Calista, M. (2006), "The large Ancona landslide studies revisited including stochastic spatial variability of mechanical parameters", Proceedings of the 10th IAEG Congress, Geol. Soc. of London Paper n. 807.

Sölva H., Grasemann B., Thöni M., Thiede R. & Habler G. (2005). The Schneeberg Normal Fault Zone: Normal faulting associated with Cretaceous SE-directed extrusion in the Eastern Alps (Italy/Austria). *Tectonophysics*, 401 (3-4), 143-166.

Spalla m.i. (1993). Microstructural control on the P-T path construction in the metapelite of the Austroalpine crust (Texel Gruppe, Eastern Alps). *Schw. Min. Petrogr. Mitt.*, 81, 197-212.

Tagliavini F., Mantovani M., Marcato G., Pasuto A., Silvano S., (2009). Relazione di fine progetto: Frana del Monte Ganda, unpublished report for the Autonomous Province of Bolzano in the framework of the Interreg project “Monitor”

Walcher J. (1773). Nachrichten von den Eisbergen in Tyrol

Zanchetta, S. (2010). The Texel-Schneeberg boundary in the Pfossen valley (Merano, NE Italy): geological-structural map and explanatory notes. *Italian Journal of Geosciences* 129 , 395-407.