

*Studio di Geologia e Geotecnica
geologo dott. Stefano Piccioni*

COMUNE DI ARCO
PROVINCIA DI TRENTO

**ANALISI GEOLOGICA PER LA REDAZIONE DI STUDI DI COMPATIBILITÀ DI
SUPPORTO ALLA VARIANTE N. 15 AL PRG DI ARCO.**

**N°10.1 (MODIFICA NORMATIVA ART. 62 COMMA 4 DELLE NTA DEL PRG) LOC.
MOLETTA**

TRENTO, maggio 2021

IL RELATORE:



*Relazioni geologiche, geotecniche, nivologiche ed idrogeologiche
38121 Trento - Via della Collina, 39
tel. 0461-230170 cell. 328-4268610 e-mail: geologopiccioni@libero.it*

*Studio di Geologia e Geotecnica
geologo dott. Stefano Piccioni
38121 Trento - Via della Collina, 39
tel. 0461-230170 cell. 328-4268610 e-mail: geologopiccioni@libero.it*

COMUNE DI ARCO
PROVINCIA DI TRENTO

**ANALISI GEOLOGICA PER LA REDAZIONE DI STUDI DI COMPATIBILITÀ DI
SUPPORTO ALLA VARIANTE N. 15 AL PRG DI ARCO.**

**N°10.1 (MODIFICA NORMATIVA ART. 62 COMMA 4 DELLE NTA DEL PRG) LOC. MO-
LETTA**

INDICE	pag.
1. PREMESSA	2
2. CARTA DI SINTESI DELLA PERICOLOSITÀ	3
2.1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ	4
2.2 CONTENUTI DELLO STUDIO DI COMPATIBILITÀ E DELLA RELAZIONE TECNICA DI COMPATIBILITÀ	5
3. STUDIO DI COMPATIBILITÀ'	6
3.1 FENOMENI ATTESI	6
3.2 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ	6
3.3 MASSIMI EFFETTI PREVEDIBILI CAUSATI DAL FENOMENO	18
3.4 OPERE DI DIFESA E/O MISURE DI SICUREZZA	24
4 CONCLUSIONI	26
ALLEGATO	28

1. PREMESSA

Il presente documento intende valutare la compatibilità della proposta puntuale n. 10.1 (modifica normativa art. 62 comma 4 delle NTA del PRG) loc. Moletta del piano di variante n. 15 al PRG di Arco come previsto dalla DGP n. 1317 del 4 settembre 2020 relativa alla Carta di **sintesi** della pericolosità ed alle relative norme di attuazione; una modifica del PRG che richiede un apposito studio di compatibilità.

La penalità del sito è determinata da una pericolosità per crolli H3/H4 e pertanto è necessario, come previsto dalla norma, analizzare le condizioni di pericolo del sito e definire gli accorgimenti costruttivi di carattere strutturale, localizzativo e architettonico per la realizzazione degli interventi e quelli per la loro utilizzazione atti a tutelare l'incolumità delle persone e ridurre la vulnerabilità dei beni.



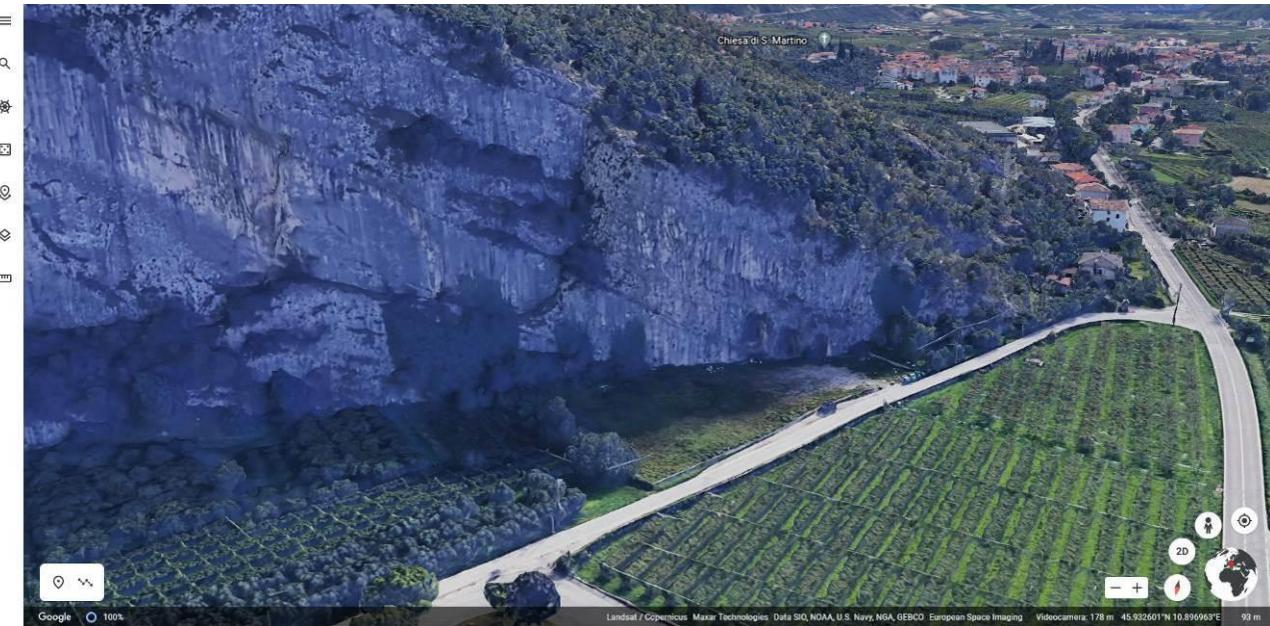


Foto 2 Area in oggetto

2. CARTA DI SINTESI DELLA PERICOLOSITÀ

La Carta di sintesi della pericolosità (DGP n. 1317 del 04/09/2020) classifica la zona oggetto di intervento come P2 (bassa gialla) P3 (media blu) e P4 (elevata rosso) per fenomeni di crollo.

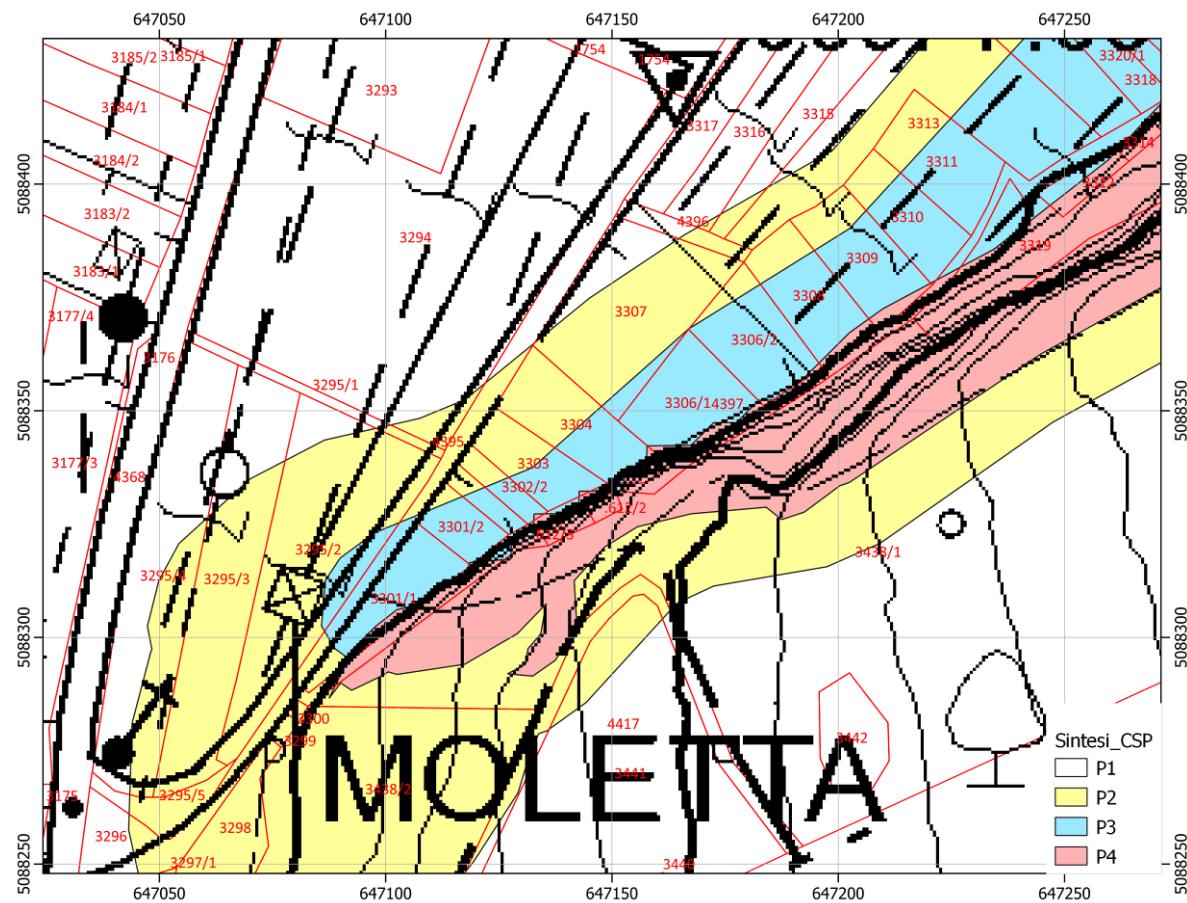
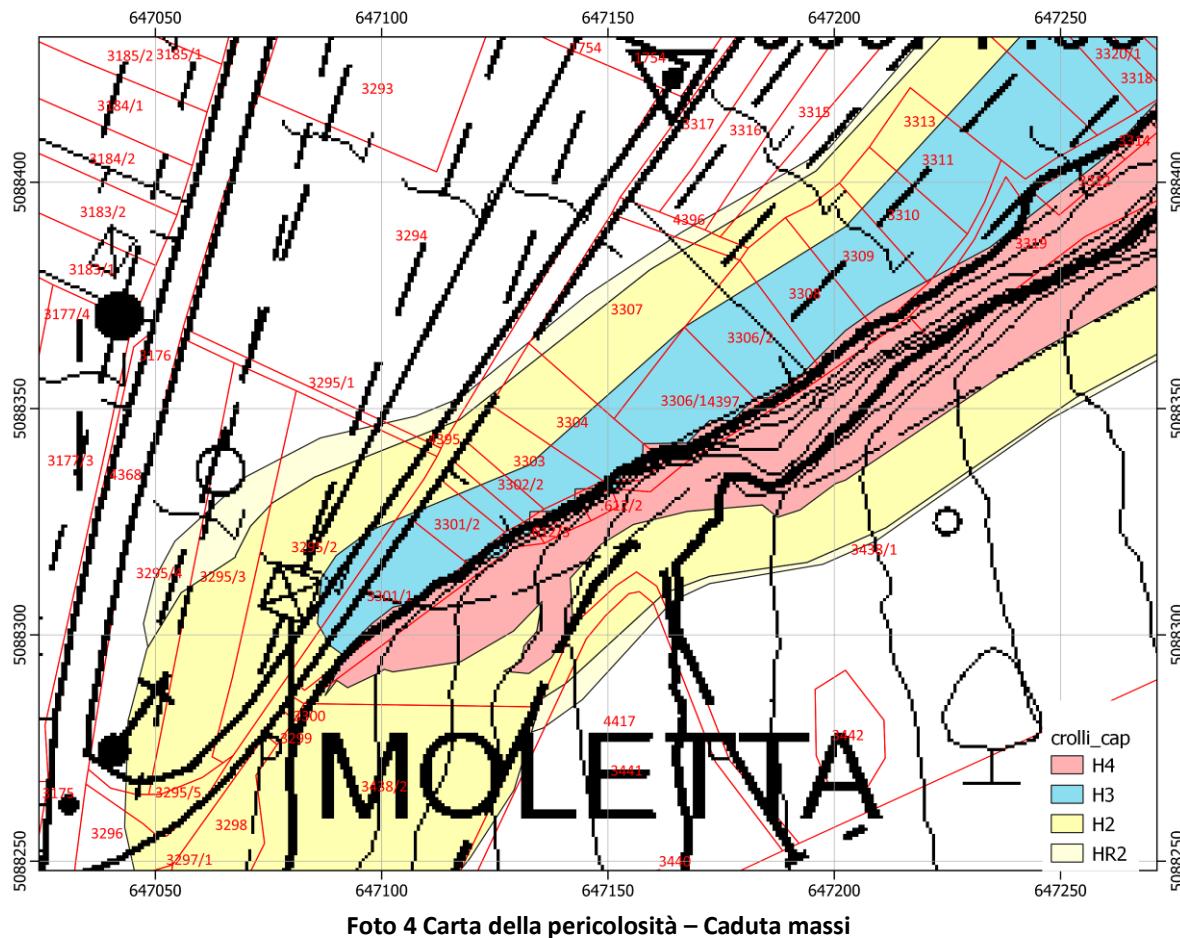


Foto 3 Carta di sintesi della Pericolosità

La penalizzazione in pratica è condizionata dal pericolo di caduta massi (figura 4).



2.1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ

2.1.1. CROLLI ROCCIOSI

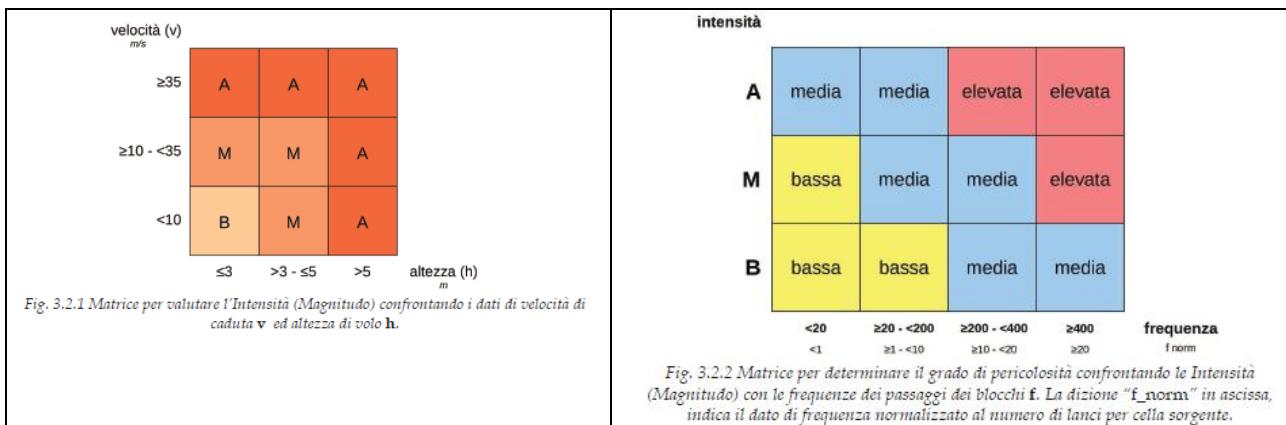
Il crollo è un fenomeno da rapido ad estremamente rapido caratteristico di pendii molto ripidi/aggrottanti.

Esso comporta il distacco di materiali di qualsiasi dimensione con spostamento in caduta libera/successione di rimbalzi/rotolamento lungo il versante.

Le grandezze utilizzate per attribuire il grado di pericolosità sono:

- H: altezza di volo delle traiettorie (m)
 - V: velocità di caduta (m/s)
 - f: frequenza di passaggio dei blocchi

A partire dal DTM vengono identificate come sorgente tutte le aree con pendenza superiore a 44°. A ciascun punto viene assegnato un volume del masso pari a 3.3 mc. Nell'analisi non si tiene conto dell'effetto di mitigazione della vegetazione.



2.2 CONTENUTI DELLO STUDIO DI COMPATIBILITÀ E DELLA RELAZIONE TECNICA DI COMPATIBILITÀ

Lo studio di compatibilità e la relazione tecnica di compatibilità, sono parte integrante e sostanziale del progetto e contemplano, in maniera pertinente e commisurata all'importanza e alle caratteristiche dell'intervento da effettuare, i seguenti elementi:

- individuazione dei fenomeni attesi distinti secondo le categorie e tipologie riportate nelle carte della pericolosità (processi fluviali, torrentizi, movimenti di versante, valanghe, ecc.);
- nel caso vi sia concomitanza di più fenomeni, dovrà essere approfondito l'ordine di importanza e relazione tra gli stessi e in particolare quale sia il fenomeno prevalente;
- analisi della pericolosità mediante la definizione dell'intensità e della probabilità di ogni tipologia di fenomeno;
- descrizione dei massimi effetti prevedibili causati dal fenomeno/i;
- definizione della vulnerabilità e dell'eventuale incremento del carico insediativo esposto a pericolo, rispetto a quanto si intende realizzare in relazione agli effetti prevedibili causati dal fenomeno/i;
- descrizione delle opere difensive di messa in sicurezza di tipo strutturale (opere paramassi, difese di sponda, paravalanghe, ecc.) e/o misure di sicurezza di tipo non strutturale (piani di evacuazione, limitazione utilizzi e accorgimenti d'uso, monitoraggi, ecc.), ivi compresa la verifica degli effetti indiretti, determinati dalle opere e misure sul contesto di riferimento;
- definizione di un cronoprogramma di esecuzione degli interventi di messa in sicurezza preordinati alla realizzazione delle opere;
- Conclusioni dello studio in ordine alla compatibilità dell'intervento e dettagliata descrizione di tutti gli elementi ai quali è subordinata tale compatibilità, finalizzata anche alla attestazione di eventuale declassamento.

3. STUDIO DI COMPATIBILITÀ'

3.1 FENOMENI ATTESI

La fascia di versante sovrastante la zona in oggetto è costituita dalla parte terminale di una bancata monoclinica che si immerge nella piana alluvionale di fondovalle. L'altezza della parete varia dai 20 metri a sud sino agli 80 metri a nord. Il lato sud della parete è verticale mentre nel lato nord un ampio diedro interrompe la continuità verticale della parete attraverso una cengia obliqua.

Una fascia fittamente stratificata con interstrati marnosi sottoescavata 13we taglia obliquamente la parete e separa un ammasso roccioso fratturato localmente molto fratturato al tetto da un ammasso fratturato poco fratturato alla base.

I depositi alla base della parete sono di tipo alluvionale ed hanno mascherato eventuali fenomeni di origine gravitativa provenienti dalla parete compreso il volume roccioso staccatosi dalla fascia di parete identificata dal diedro rappresenta una antica nicchia di distacco

In sintesi si ritiene che, come indicato nella carta della pericolosità, il principale pericolo per la zona di intervento sia il fenomeno di caduta massi sebbene di ridotta intensità considerato lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e la scarsa presenza di depositi di origine gravitativa alla base della parete stessa.

3.2 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ

3.2.1 CARATTERI GEOSTRUTTURALI

La disposizione delle bancate che costituiscono la parete è conseguenza del regime transpressivo sinistro che caratterizza l'area ed ha generato una serie di faglie dirette disposte NE-SW coincidenti con l'allineamento delle vallecole disposte immediatamente a monte della zona di studio. Procedendo dal basso verso l'alto si riconoscono (foto 5):

- OOM - CALCARE OOLITICO DI MASSONE (Pliensbachiano sup): La successione dell'unità è costituita da spessi strati (30-60 cm) e banchi fino al m di calcari oolitici a cemento spätigico (grainstone) di colorazione grigio chiara fino a biancastra. La successione è talora caratterizzata da strutture quali le stratificazioni inclinate e incrociate per lamine (cm, dm) pianoparallele, interne agli strati e banchi. Le ooliti, con oncidi e granuli rivestiti, sono generalmente predominanti rispetto ai bioclasti e spesso esclusive. Le ooliti di questa unità si differenziano chiaramente rispetto a quelle del calcare oolitico di S. Vigilio in base alle dimensioni maggiori dei granuli e alla struttura concentrica con diffusa micritizzazione dei cortici.
- OSV - OOLITE DI SAN VIGILIO (Toarciano - Aaleniano inferiore): È formato da una alternanza di calcari oolitici a Crinoidi ed encriniti oolitiche giallastre, grigie e brunicce seguite, verso l'alto, da encriniti rosse. Le ooliti sono caratterizzate da una tipica struttura radiale a volte interrotta da fini cortici micritici concentrici. Frequenti sono la laminazione e la stratificazione incrociata.

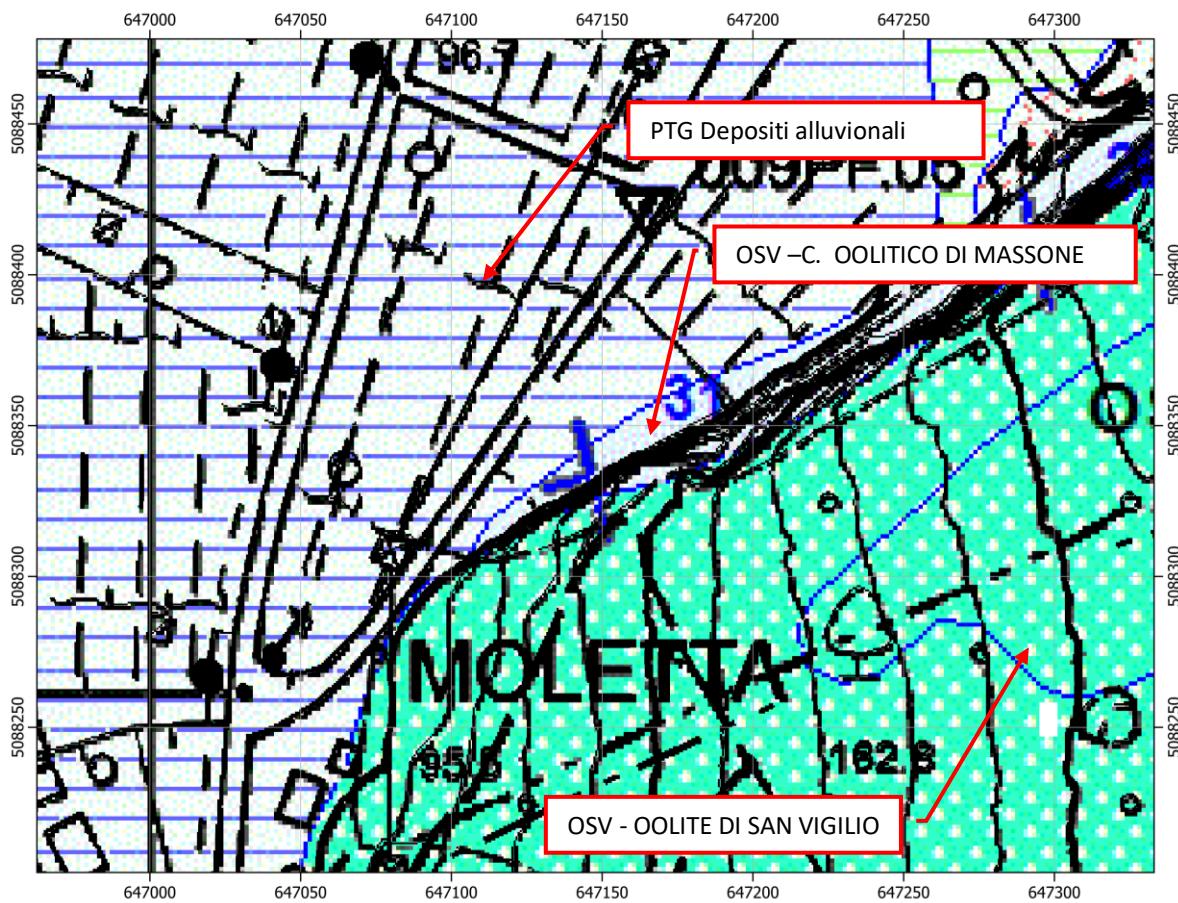


Figura 1 Carta Geologia – WebGis P.A.T.

Osservando la panoramica della parete (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) si distinguono, in termini di grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, 2 fasce che, procedendo dall'alto verso il basso, manifestano le seguenti caratteristiche:

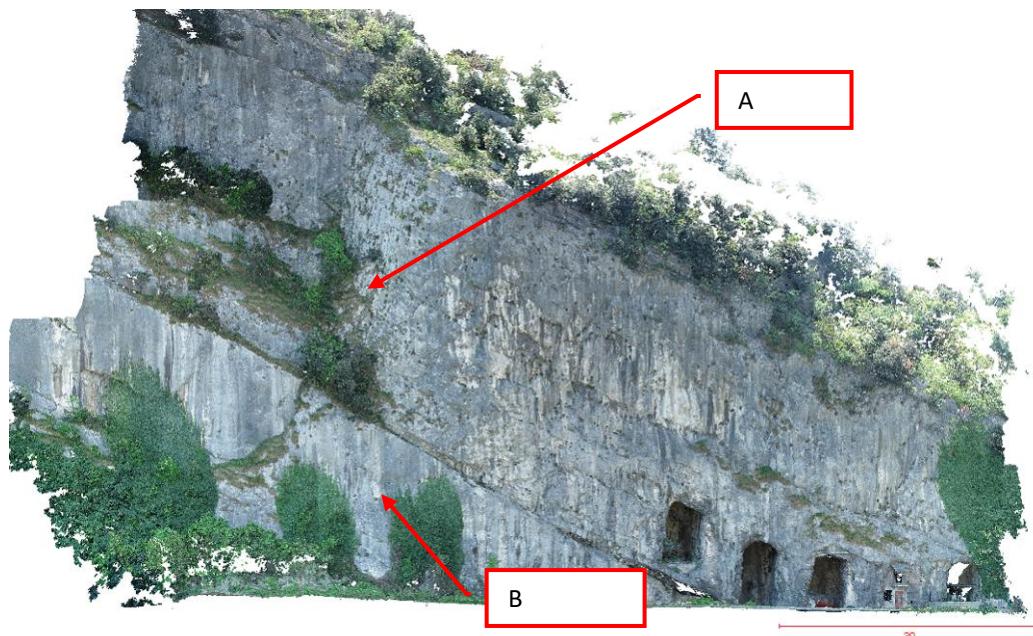


Figura 2 Panoramica della parete sovrastante l'area

- A. Bancate stratificate. E' rappresentativa delle bancate con stratificazione decimetrica/metrica al tetto dell'interstrato marnoso che taglia obliquamente la parete. I volumi unitati possono essere considerevoli. Particolarmente sconnessi sono alcuni volumi rocciosi posti lungo il ciglio della parete, in particolar modo lungo il ciglio dell'antica nicchia di distacco. In parete i volumi unitari sono contenuti ed inferiori al metro cubo. E' in questa fascia che sono presenti i 3 fori di origine antropici.
- B. Orizzonte molto fratturato e degradato che corrisponde alla fascia sottoescavata che separa la fascia A dalla B.
- C. Fascia di base con bancate calcare poco fratturate. L'ammasso roccioso ha un aspetto massivo poco fratturato con un profilo verticale regolare. In superficie sono presenti concrezioni carbonatiche che tendono a sigillare le fratture presenti. La possibilità che avvengano distacchi di porzioni rocciose è contenuta.

3.2.2 RILIEVO GEOSTRUTTURALE

Il contesto geologico strutturale in cui si inserisce l'area di studio ha fortemente condizionato la morfologia dell'area e guidato le modalità di arretramento dei fronti rocciosi presenti, dove con arretramento si intendono tutta una serie di movimenti di origine gravitativa che nel caso specifico sono principalmente rappresentati dai fenomeni di crollo.

La zona di studio è la parte terminale di una monoclinata che poco più a nord presenta ampie falde detritiche al piede delle pareti.

Le spinte di origine tettonica creano all'interno dell'ammasso roccioso una serie di fratture, raggruppate in famiglie omogeneità di orientamento, che possono portare all'isolamento di volumi rocciosi unitari la cui dimensione è proporzionale alla spaziatura delle fratture stesse.

Le caratteristiche del litotipo unite alle modalità di orientazione di tali piani in relazione al fronte della parete determinano le condizioni di innesto per il distacco di una porzione rocciosa.

Allo scopo di valutare le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso, si è proceduto all'analisi statistico-strutturale delle discontinuità più significative in termini di continuità e/o di frequenza, secondo i suggerimenti metodologici della Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (1979) e dall'Associazione Geotecnica Italiana (1992).

Il rilievo geostrutturale ha comportato l'esecuzione di più stazioni geomeccaniche che hanno portato alla definizione del dominio strutturale rappresentativo di ciascuna zona oggetto di intervento. Il rilievo in situ è stato integrato dal rilievo geomeccanico della nuvola di punti 3D, ottenuta mediante ricostruzione aerofotogrammetria delle immagini da drone con Metashape Agisoft®, ed analizzata con Cloud Compare utilizzando l'algoritmo Compass2.0¹.

¹ Thiele, S. T., Grose, L., Samsu, A., Micklithwaite, S., Vollgger, S. A., and Cruden, A. R.: Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data, Solid Earth Discuss., <https://doi.org/10.5194/se-2017-83>, in review, 2017

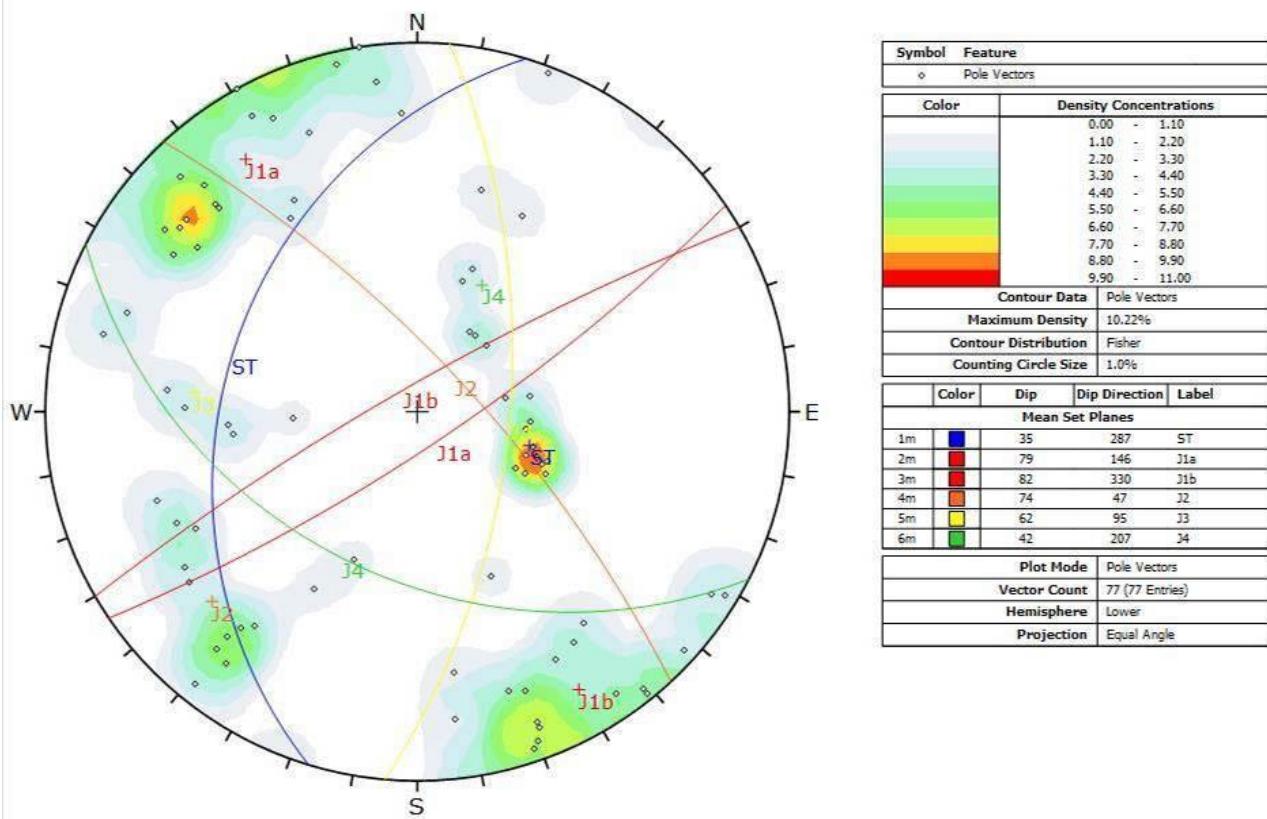


Figura 3 Proiezione stereografica rappresentativa

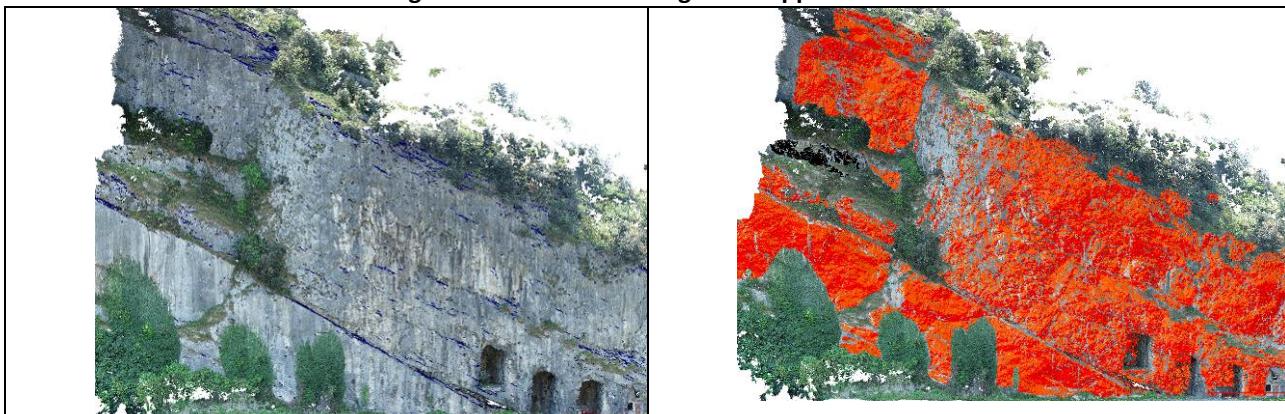


Figura 4 Distribuzione sistema S e J1a/b su nuvola di punti 3D dell'intera parete

Di seguito, per le diverse fasce, si riportano alcune porzioni significative dove viene messa a confronto la nuvola di punti 3D con i principali sistemi rilevati.

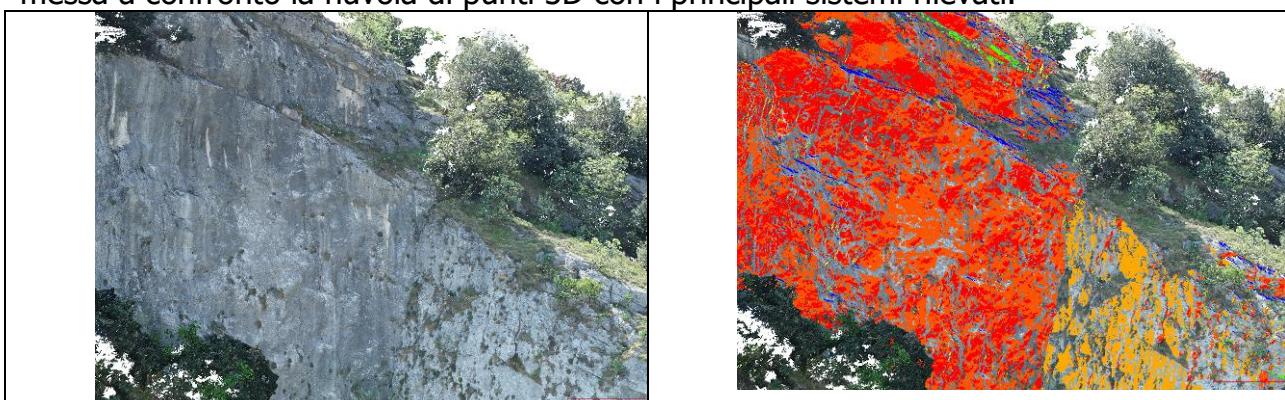


Figura 5 Porzione A1

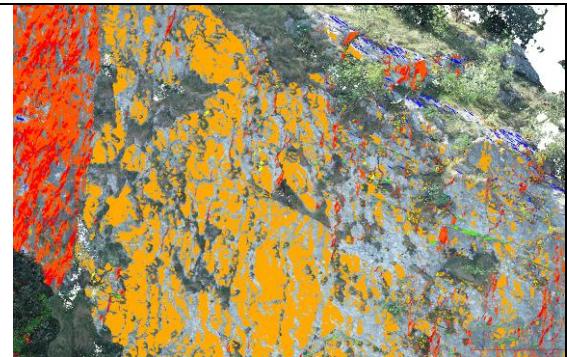


Figura 6 Porzione A2

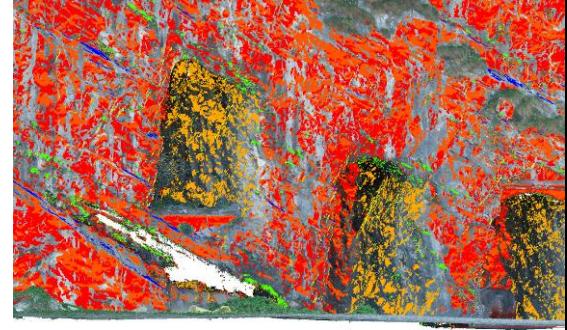


Figura 7 Porzione A3

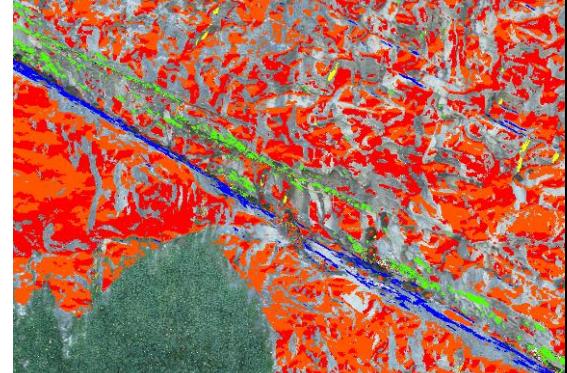


Figura 8 Porzione B1

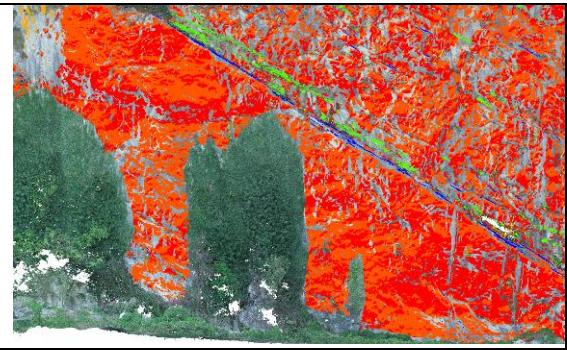


Figura 9 Porzione C1

3.2.3 QUALITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO (GSI)

Dall'analisi dei valori di spaziatura delle discontinuità vengono individuati i valori del grado di suddivisione dell'ammasso (J_v) ed il volume del blocco (V_b) e valutato la qualità dell'ammasso roccioso attraverso il Geological Strength Index (G.S.I.) di Hoek nella formulazione di Caii et alii.

Il grado di suddivisione dell'ammasso roccioso (Jv) che si lega alle dimensioni del blocco unitario (Vb) è definibile in base alla forma (14) e alla tipologia (15) dei blocchi che caratterizzano l'ammasso roccioso.

Il volume unitario del blocco roccioso, Vb, è determinato dalla spaziatura e dall'orientazione dei giunti, dal numero di set di giunti e dalla persistenza degli stessi. Le dimensioni del volume unitario sono espressione della densità dei giunti e nel caso di almeno 3 giunti persistenti può essere calcolato con l'espressione

$$V_b = \frac{s_1 \cdot s_2 \cdot s_3}{\sin \cdot \gamma_1 \cdot \sin \cdot \gamma_2 \sin \cdot \gamma_3}$$

dove: s_i e γ_i sono rispettivamente la spaziatura tra i giunti e l'angolo tra i giunti stessi.

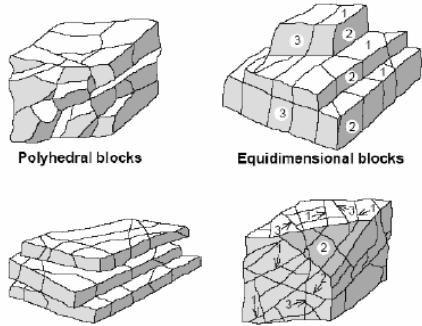


Figura 14 Forma dei blocchi (Dearman W.R., 1991)

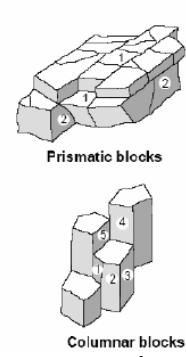


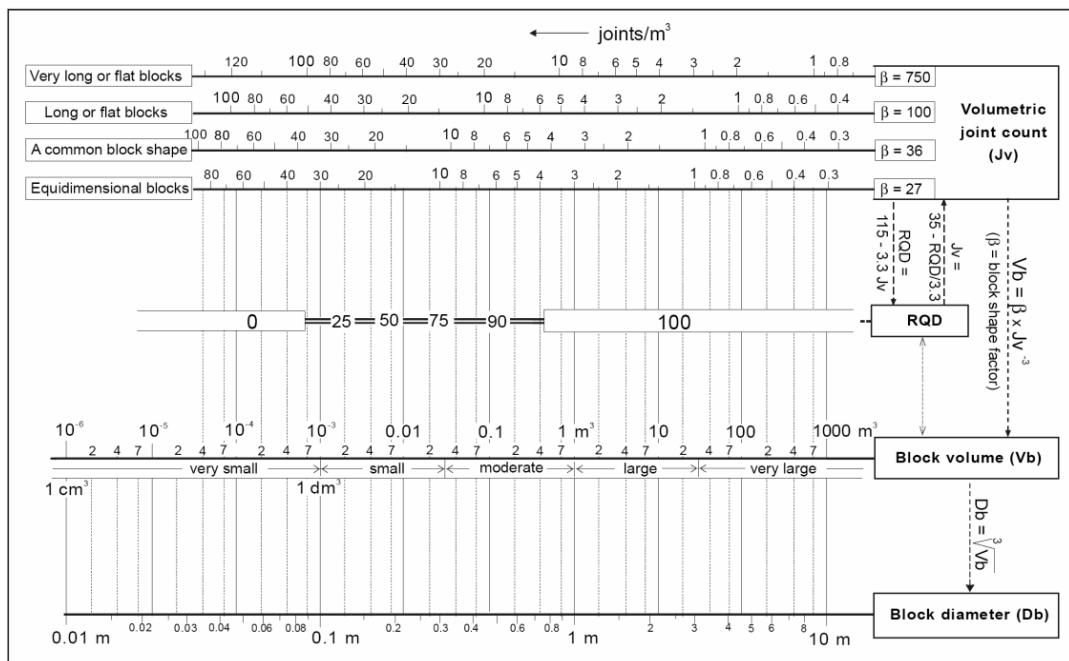
Figura 15 Tipologia dei blocchi (Palmström A., 1995)

Nella

Tabella 1 sono messi in relazione forma e dimensioni dei blocchi e frequenza delle discontinuità

Tabella 1 Relazione tra forma/dimensione dei blocchi e frequenza delle discontinuità²

² Palmström A. (2001) - Measurement and characterization of rock mass jointing. In "In-situ characterization of rocks". Sharma V.M. and Saxena K.R. eds., A.A. Balkema, pp. 49-97.



La qualità intrinseca dell'ammasso roccioso è valutata attraverso la determinazione del Geological Strength Index (G.S.I.) di Hoek. Vista la tipologia dello studio, al fine di consentire un'adeguata quantificazione dei parametri di ingresso del diagramma per la determinazione del G.S.I. si è seguito l'approccio di Cai (2004). Nello specifico i parametri quantitativi d'ingresso per la determinazione del G.S.I. sono il Volume Unitario dei Blocchi rocciosi (V_b) ed il Joint Condition Factor (J_C); anche parametri base per la determinazione dell'indice RMi di Palmström. Il Joint Condition Factor (J_C) è definito dalla rugosità e dall'alterazione della superficie dei giunti e dal tipo di riempimento:

$$J_C = \frac{J_w \cdot J_s}{J_A}$$

dove: J_w è l'ondulazione ad ampia scala (in metri da 1 a 10 metri); J_s è la rugosità a piccola scala (in centimetri da 1 a 20 cm) e J_A è il fattore di alterazione del giunto.

Tabella 2 Termini per descrivere l'ondulazione ad ampia scala (J_w)

Waviness terms	Undulation	Rating for waviness J_w
Interlocking (large-scale)		3
Stepped		2.5
Large undulation	> 3%	2
Small to moderate undulation	0.3–3%	1.5
Planar	< 0.3%	1

Diagramma di undulazione ad ampia scala (J_w):

Diagramma di undulazione ad ampia scala (J_w) che mostra una curva ondulata con la larghezza dell'onda (D) e l'ampiezza dell'onda (a). La formula per il rating è $J_w = a/D$. La leggenda indica che D è la lunghezza tra le ampiezze massime.

Tabella 3 Termini per descrivere la rugosità a piccola scala (J_s)

Smoothness terms	Description	Rating for smoothness J_S
Very rough	Near vertical steps and ridges occur with interlocking effect on the joint surface	3
Rough	Some ridge and side-angle are evident; asperities are clearly visible; discontinuity surface feels very abrasive (rougher than sandpaper grade 30)	2
Slightly rough	Asperities on the discontinuity surfaces are distinguishable and can be felt (like sandpaper grade 30–300)	1.5
Smooth	Surface appear smooth and feels so to touch (smoother than sandpaper grade 300)	1
Polished	Visual evidence of polishing exists. This is often seen in coating of chlorite and specially talc	0.75
Slickensided	Polished and striated surface that results from sliding along a fault surface or other movement surface	0.6–1.5

Tabella 4 Joint alteration factor (J_A)

	Term	Description	J_A
Rock wall contact	<i>Clear joints</i>	Softening, impermeable filling (quartz, epidote, etc.)	0.75
	Healed or “welded” joints (unweathered)	No coating or filling on joint surface, except for staining	1
	Fresh rock walls (unweathered)	The joint surface exhibits one class higher alteration than the rock	2
	Alteration of joint wall: slightly to moderately weathered	The joint surface exhibits two classes higher alteration than the rock	4
	Alteration of joint wall: highly weathered		
	<i>Coating or thin filling</i>		
Filled joints with partial or no contact between the rock wall surfaces	Sand, silt, calcite, etc.	Coating of frictional material without clay	3
	Clay, chlorite, talc, etc.	Coating of softening and cohesive minerals	4
	Sand, silt, calcite, etc.	Filling of frictional material without clay	4
	Compacted clay materials	“Hard” filling of softening and cohesive materials	6
	Soft clay materials	Medium to low over-consolidation of filling	8
	Swelling clay materials	Filling material exhibits swelling properties	8–12

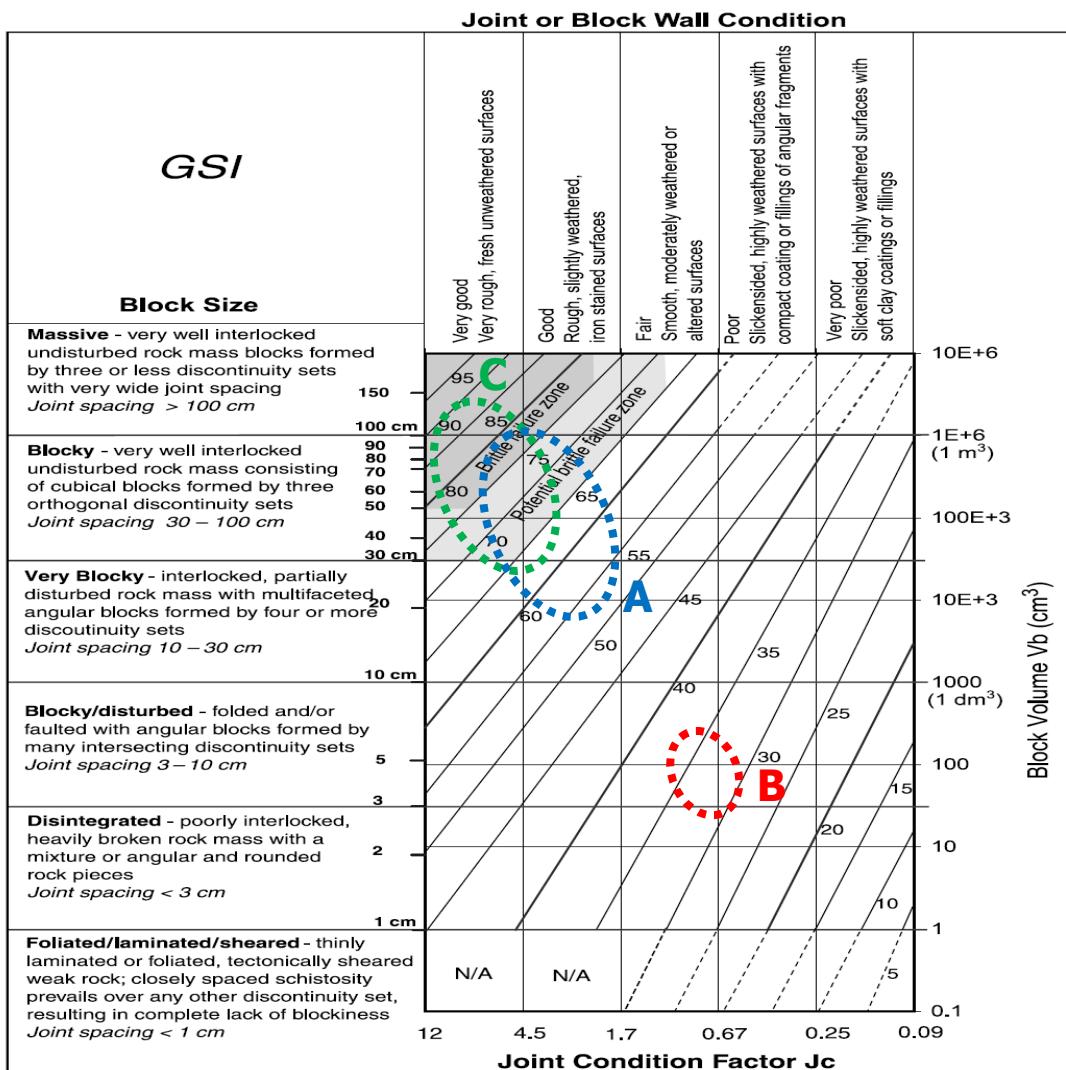


Figura 10 Classificazione ammasso roccioso: Geological Strength Index (GSI) - Cai M. & alii. (2004)

3.2.4 ANALISI CINEMATICA

In corrispondenza delle fasce più compatte, dove l'ammasso roccioso è assimilabile ad un mezzo discontinuo ovvero un mezzo in cui la resistenza al taglio è così elevata che i sedimenti sotto la sola forza di gravità sono possibili solo se le discontinuità preesistenti permettono il movimento di blocchi discreti richiede un'analisi cinematica.

Quando ci sono più sistemi di discontinuità che si intersecano, l'analisi dei movimenti possibili (modello cinematico) permette di prevedere il più probabile modo di cedimento del pendio. È comunemente accettato che sedimenti di blocchi avvengano secondo uno o più dei tre seguenti modi (figura 17):

- scivolamento su un piano (*plan failure*);
- scivolamento di un cuneo (*wedge failure*);
- ribaltamento (*toppling*), che può essere distinto in *flexural toppling* (c_1) e *direct toppling* (c_2)

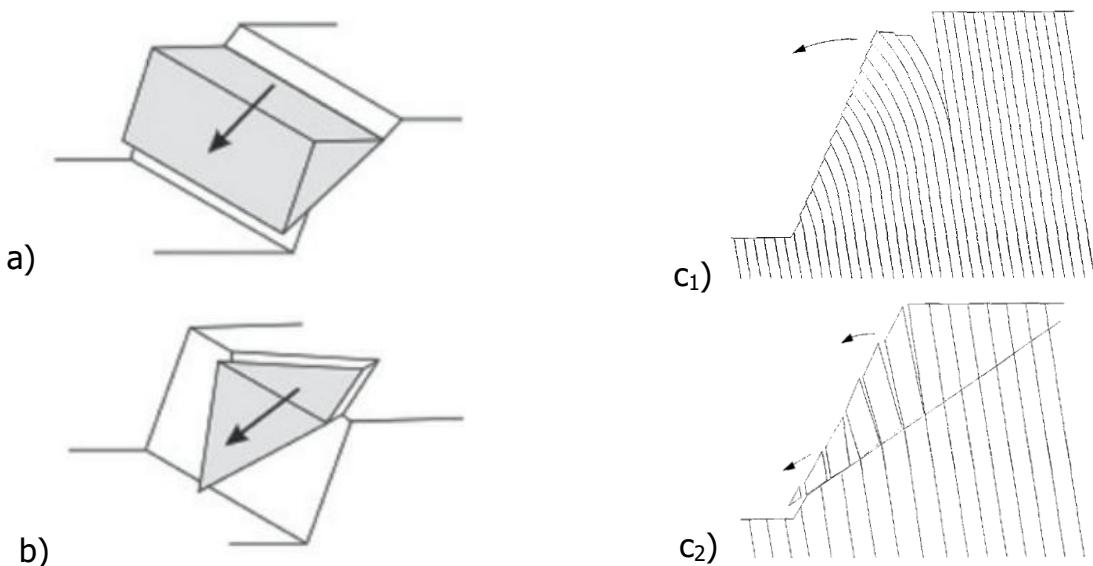


Figura 17 Principali meccanismi di cedimento (cinematismi)

Uno dei metodi più usati per valutare la stabilità di un pendio tramite proiezioni stereografiche è il cosiddetto **Test di Markland**, che consente di stabilire, considerando solo la geometria del pendio e delle discontinuità e l'angolo di resistenza a taglio lungo i giunti, la possibilità che avvengano i cinematismi sopra descritti.

Il metodo identifica graficamente le "discontinuità critiche", cioè le discontinuità che rappresentano potenziali piani di instabilità, separandole da quelle che non influiscono direttamente sulla stabilità del pendio.

Le verifiche di stabilità cinematiche sono state condotte utilizzando il software Dips © della Rocscience considerando un angolo di attrito di base, corrispondente a superfici delle discontinuità prive di asperità ($JRC=0$), pari a 30° .

Data la conformazione morfologica del sito si è eseguita una analisi di sensitività cinematica su una dip direction, per ciascuno dei 3 cinematismi sopra riportati.

L'elaborazione ha permesso di ottenere per quale dip direction, ovvero direzione del fronte lungo la massima pendenza, ci fosse la maggior probabilità di movimento di volumi rocciosi dal punto di vista cinematico (figura 18).

Ne deriva che l'orientazione media della parete è maggiormente critica per lo scivolamento planare e lo scivolamento a cuneo come testimonia l'antico scivolamento sul lato nord; quest'ultimo risulta critico anche per dip direction comprese tra 70 e 90° ovvero coincidenti con il sistema J2. Considerato che il fronte principale è verticale, leggermente strapiombante, come testimonia il giunto J1 suddiviso appunto in a e b, il flexural toppling è più probabile lungo il fronte stesso e sul fianco del diedro guidato dal sistema J2. Similmente anche il dicrot toppling è maggiormente probabile dove il fronte è guidato dal sistema J2 e lungo al dip direction 220 - 260° ovvero all'interno delle cavità antropiche presenti.

I risultati di tale analisi individuano per quale orientazione dei giunti ci sono le condizioni predisponenti il cinematismo ma la precaria stabilità di un volume roccioso è condi-

zionata non solo dall'orientazione dei fronti/giunti ma anche da tutta una serie di elementi come: le caratteristiche geomeccaniche di ciascun giunto, lo stato dell'ammasso roccioso nel suo complesso, la presenza di fasce alterate e/o intensamente fratturate, emergenze idriche e la presenza di vegetazione che può fungere da elemento stabilizzante fintanto che le radici non raggiungono dimensioni tali da disarticolare volumi rocciosi già suddivisi da un reticolo di fratturazione esistente.

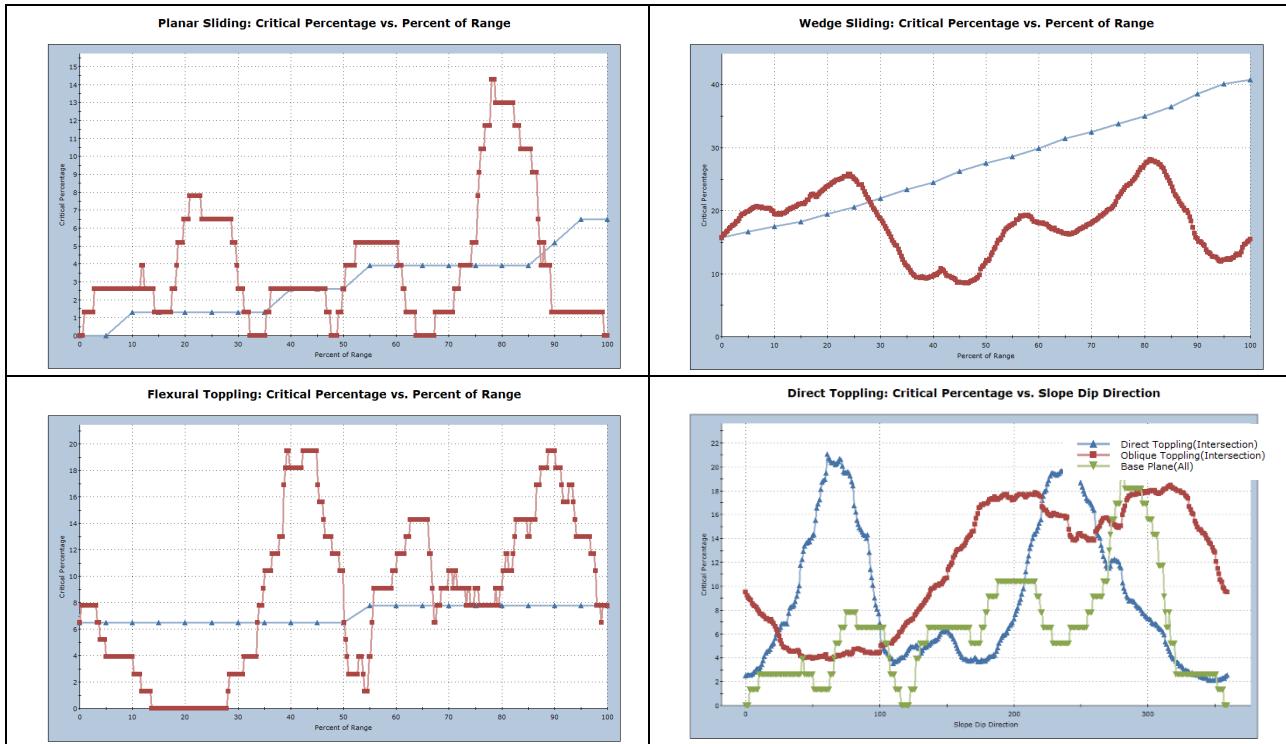


Figura 11 Test cinematico per i diversi cinematici e per un orientazione del fronte da 0 a 360° (dip Direction)

3.2.5 TIPOLOGIE DI INSTABILITÀ

Lungo le pareti sovrastanti la zona di intervento si riconoscono 3 diverse tipologie di instabilità, caratterizzate da differenti cinematici possibili e da differenti geometrie dei volumi rocciosi il cui meccanismo di collasso è schematicamente rappresentato dalla Figura 19:

- **Conci mobilizzabili per scivolamento a cuneo (wedge slide)**, sono determinati dallo scivolamento di blocchi lungo la linea di intersezione tra due piani. Quando lo scivolamento avviene principalmente lungo i sistemi S e J4 si ha scivolamento planare in senso stretto. E' il cinematismo più diffuso. I volumi isolati sono inferiori al metro cubo, ad eccezione di alcuni volumi lastriformi presenti lungo il ciglio della parete.
- **Elementi lastriformi** mobilizzabili per *column collapse* o *column/block toppling*; solidi lastriformi di varie dimensioni definiti dai sistemi J1a/b e J2 e suddivisi in varia misura dai piani di strato. La rottura può avvenire per ribaltamento qualora la stratificazione particolarmente ravvicinata favorisca la rottura per compressione dei livelli di base ed il progressivo arretramento del profilo e/o per scivolamento lungo il piano di appoggio. Il meccanismo è diffuso e l'altezza dei solidi è variabile e generalmente inferiore ai 3 metri.

- **Volumi aggettanti mobilizzabili per rottura della porzione strapiombante (overhang failure);** E' rappresentativo dalla fascia B dove orizzonti più competenti continui ed aggettanti sono isolati per successivo franamento delle porzioni fratturate e/o meno competenti sottostanti. I volumi rocciosi, considerato lo stato di fratturazione della roccia sono inferiori a 0,5 m³.

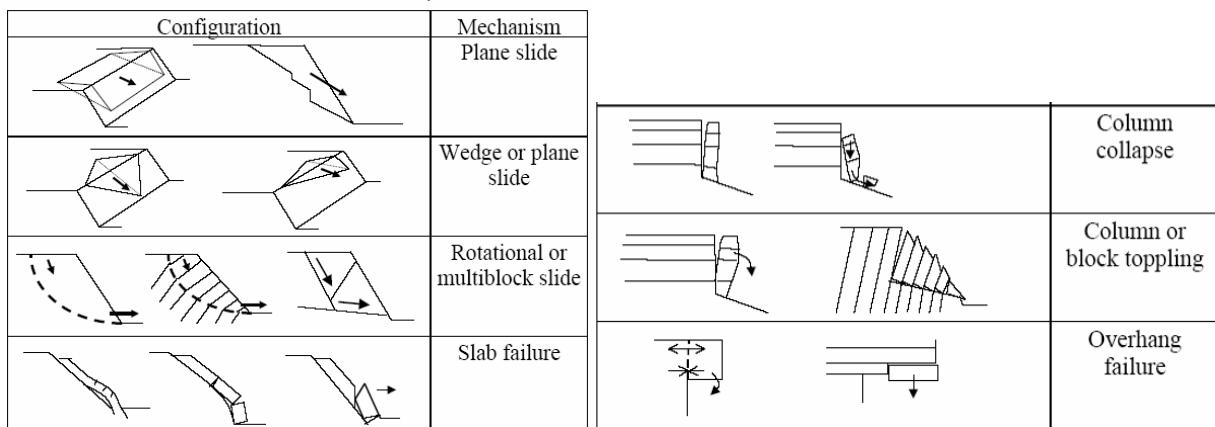


Figura19 Tipici meccanismi di collasso usati per identificare ammassi rocciosi potenzialmente instabili

3.2.6 PROBABILITÀ DI ACCADIMENTO DEL FENOMENO

La **probabilità di accadimento dei crolli in roccia** può essere definita come la "probabilità che un certo punto dello spazio sia interessato (colpito, attraversato) da un evento di caduta massi caratterizzato da una certa intensità in un certo intervallo di tempo". La pericolosità è funzione della probabilità di innesco (legata alla suscettibilità alla rottura dei versanti in roccia) e della probabilità di propagazione (funzione delle caratteristiche del moto dei blocchi), a loro volta dipendenti dall'intensità del fenomeno.

Una stima della frequenza degli eventi di crolli in roccia, e conseguentemente dei tempi di ritorno degli stessi, si basa sull'acquisizione degli eventi pregressi e sul rilievo di quegli elementi geologico - geomorfologici di origine gravitativa correlabili ad eventi di crollo. Stabilire intensità e frequenza degli eventi risulta fondamentale nella valutazione della pericolosità / rischio di caduta massi, sebbene entrambi questi aspetti siano tanto importanti quanto difficili da valutare.

3.2.7 FASCIA DI PARETE – ZONA SORGENTE

La propensione al distacco dei blocchi viene valutata individuando seguenti elementi di instabilità:

1. fratture aperte con evidenze di attività associate a cinematicismi possibili;
2. blocchi ruotati;
3. zone intensamente fratturate;
4. superfici non alterate che testimoniano recenti distacchi.
5. emergenze di acqua alla base dei blocchi

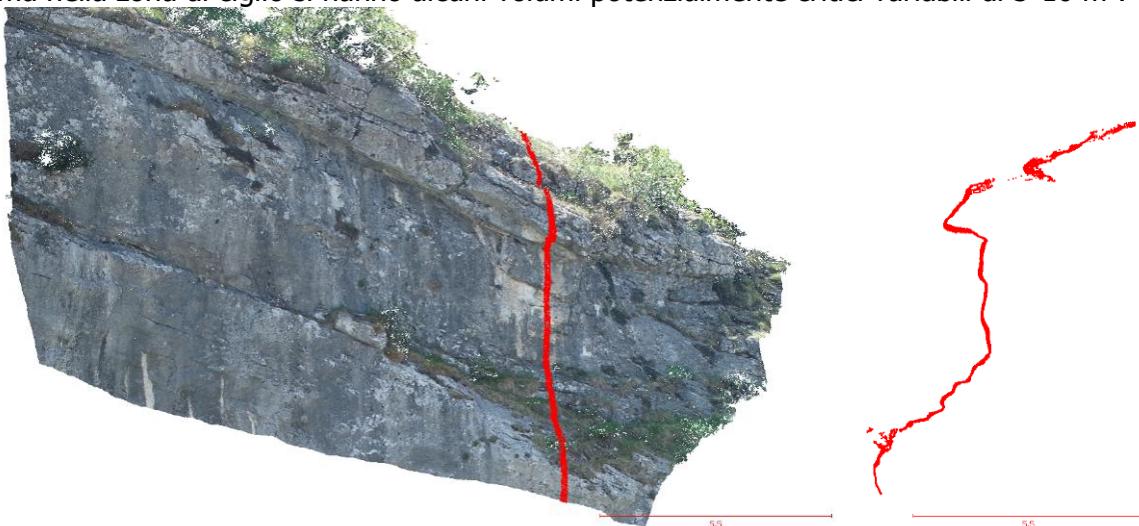
Dove con un solo elemento di instabilità si ha una propensione al distacco bassa e con 5 elementi la propensione al distacco è alta. I risultati delle valutazioni per ciascuna fascia sono sintetizzati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Tabella 5 Propensione al distacco media

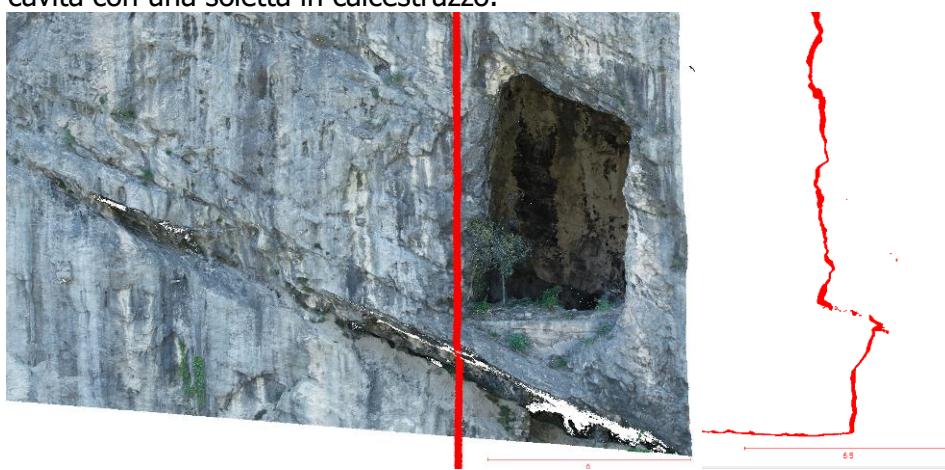
FASCIA	Propensione al distacco
A	Bassa
B	Alta
C	Bassa

I volumi potenzialmente critici risultano mediamente contenuti ad eccezione di alcune porzioni che richiedono interventi specifici

- A. Nella fascia A l'ammasso è poco fratturato con volumi generalmente inferiori al metro cubo ma nella zona di ciglio si hanno alcuni volumi potenzialmente critici variabili di 5-10 m³.



- B. La fascia B è molto fratturata e degradata ed in progressiva erosione. I volumi unitari sono contenuti ed inferiori a 0.5 m³. In corrispondenza del cavità antropica sottoriportata risulta particolarmente sottoescavata e ciò ha probabilmente richiesto il rinforzo della base della cavità con una soletta in calcestruzzo.



- C. La fascia è poco fratturata e suddivisa da piani ad alta persistenza.

3.2.8 FASCIA DI VERSANTE AI PIEDI DALLA PARETE

Alla base della parete il terreno subpianeggiante è il residuo di attività antropiche che negli anni si sono susseguite nell'area. Attualmente non si rileva la presenza di una falda detritica che non si rileva nemmeno nei terreni immediatamente confinanti a nord della zona di studio.

Durante i rilievi non si è rilevata la presenza di blocchi significati al piede della parete.

3.2.9 DEFINIZIONE DEL VOLUME DI PROGETTO

Valutato lo stato della parete si ritiene necessario intervenire con reti di contenimento lungo il ciglio della parte al fine di limitare il volume di progetto da considerare nelle simulazioni di caduta massi.

Sulla base delle valutazioni geomeccanico-strutturali si ritiene che il volume del blocco di progetto sia pari a 0.5-1m³.

3.3 MASSIMI EFFETTI PREVEDIBILI CAUSATI DAL FENOMENO

Al fine di limitare, per quanto possibile, le problematiche legate all'incertezza del fenomeno si sono effettuate delle simulazioni probabilistiche ed analisi statistiche in grado di meglio adattarsi all'incertezza del fenomeno stesso.

Nello studio si è scelto di combinare approccio tridimensionale e bidimensionale nella valutazione della suscettibilità/pericolosità da crollo. L'approccio tridimensionale consente di valutare, per una data zona sorgente, il grado di dispersione delle traiettorie lungo il versante in oggetto, evidenziando in modo più chiaro la massima distanza di espandimento e le fasce entro cui tendono a convogliarsi i percorsi di caduta. Nella fase successiva viene effettuata una valutazione sito-specifica dei percorsi di caduta, in termini di energia cinetica ed altezza di rimbalzo, attraverso simulazioni bidimensionali lungo le traiettorie più significative ottenute con la modellazione tridimensionale. I codici di calcolo utilizzati sono:

- **Rockyfor3D** (Dorren L.K.A., 2012. Rockyfor3D (v.5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model): modello tridimensionale che determina le traiettorie di caduta di singoli blocchi di roccia.
- **RocFall 8.0** for statistical analysis of rockfalls, software commercializzato da Rocscience Inc. di Toronto (Canada): permette di effettuare simulazioni di caduta massi su base statistica in 2D; nel caso in esame, attraverso la simulazione 3D, si sono individuate 4 traiettorie significative e per ciascuna traiettoria si sono analizzati 1.000 eventi di caduta.

3.3.1 SIMULAZIONE DI CADUTA MASSI 3D - ROCKYFOR3D

Rockyfor3D simula le traiettorie di caduta massi come dati vettoriali 3D attraverso il calcolo classico di moti parabolici attraverso l'aria ed il rimbalzo lungo la superficie topografica e se richiesto contro gli alberi. Il rotolamento è rappresentato da sequenze di rimbalzi molto vicini, mentre lo scivolamento di blocchi non è modellato.

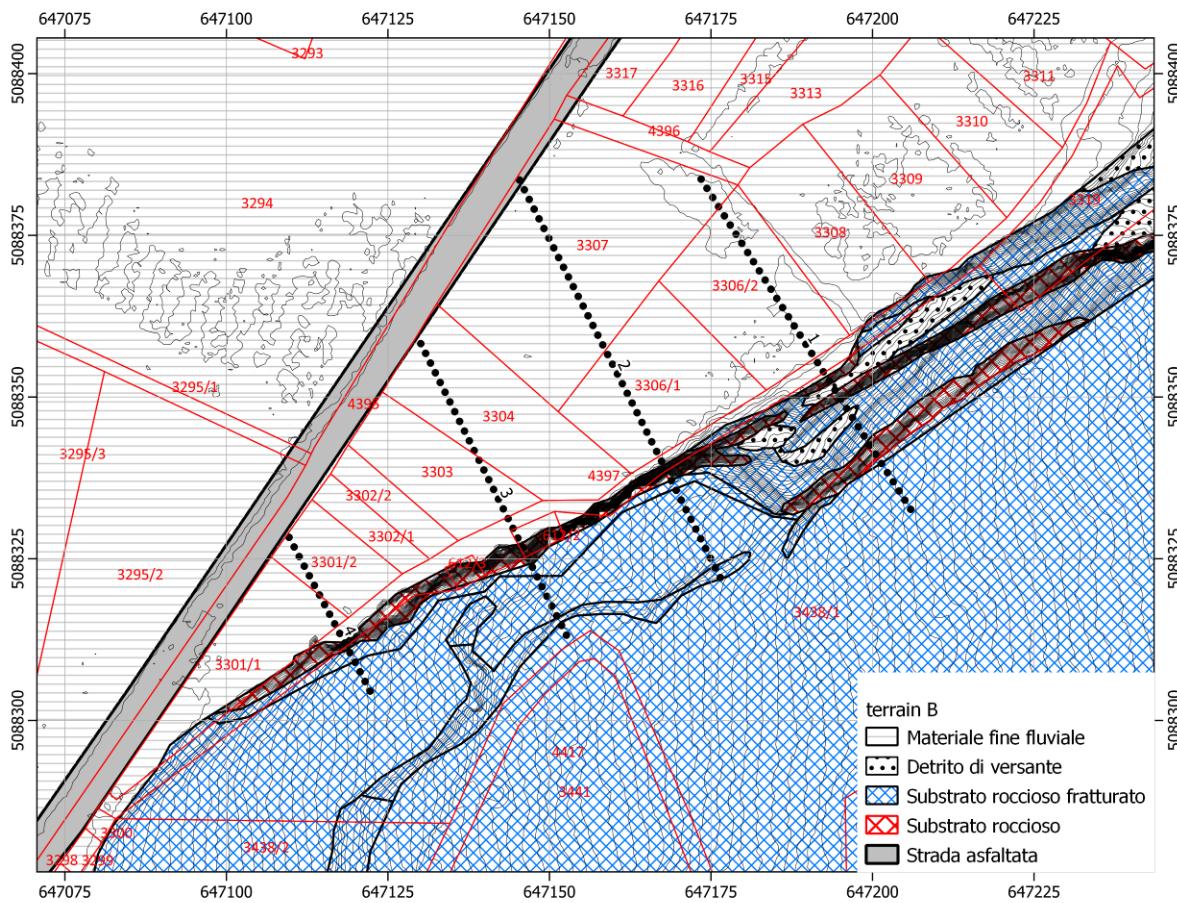
3.3.1.1 Dati di ingresso

La simulazione richiede la predisposizione delle 10 mappe raster in formato ASCII (se non si effettua la simulazione con la vegetazione), di analoga estensione e risoluzione, di seguito elencate:

- **dem.asc**: raster del modello digitale che descrive la morfologia del terreno;
- **rockdensity.asc**: raster che riporta la densità dell'ammasso roccioso in corrispondenza della cella/celle sorgente che nello specifico è pari a 2500 kg/m^3 ;
- **d1.asc d2.asc d3.asc**: raster che riporta, sempre in corrispondenza della cella sorgente, le dimensioni del blocco. Nello specifico le dimensioni variano con lo scenario analizzato:
 - Scenario A:
 - **d1: 2.0 m – d2: 1.2 m – d3: 0.8m**
 - **Vol. min 0.6 m³ - Vol. medio 1.3 m³ - Vol. Max. 1.5 m³**
- **blshape.asc**: raster che definisce la forma del blocco e nello specifico si assume come parallelepipedo.
- **rg70.asc rg20.asc rg10.asc**: raster che definiscono la rugosità della superficie topografica. Il pendio viene suddiviso in poligoni omogenei, dove ciascun poligono rappresenta la rugosità della superficie, espressa in termini di dimensioni del materiale che ricopre la superficie stessa dedotte guardando il versante dall'alto verso il basso, e rappresentata da 3 classi di probabilità di dimensioni del materiale indicate rg70, rg20 e rg10. Ciascuna classe è rappresentata da un raster che corrisponde all'altezza di un ostacolo rappresentativo (MOH) in metri che un masso può incontrare, rispettivamente nel 70%, 20% e 10% dei casi, nella fase di rimbalzo all'interno del poligono identificato.
- **Soiltype.asc**: raster che rappresenta l'elasticità del sottosuolo. È possibile scegliere tra le seguenti 8 tipologie di suolo che sono direttamente collegate a specifici valori di Rn (Tabella 6 Tipi di suolo da Rockyfor3D e relativi valori di Rn). La mappa è riportata nell'allegato C.

Tabella 6 Tipi di suolo da Rockyfor3D e relativi valori di Rn

Tipo di suolo	Descrizione generale del suolo	R _n valori medi	R _n intervallo di valori
0	Fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	0	0
1	Materiale fine (spessore $> \sim 100 \text{ cm}$)	0,23	0,21 - 0,25
2	Materiale fine fluviale (spessore $< \sim 100 \text{ cm}$) o sabbia/ghiaia mista	0,28	0,25 - 0,31
3	Detrito di falda ($\varnothing < \sim 10 \text{ cm}$); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali	0,33	0,30 - 0,36
4	Detrito di versante ($\varnothing > \sim 10 \text{ cm}$); o suolo compatto con grandi massi	0,38	0,34 - 0,42
5	Substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica	0,43	0,39 - 0,47
6	Substrato roccioso	0,53	0,48 - 0,58
7	Strade asfaltate	0,35	0,32 - 0,39



L'interfaccia grafica che elabora le mappe raster sopracitate richiede l'inserimento dei seguenti valori:

- **numero di simulazioni:** rappresenta il numero di massi lanciati da ciascuna cella sorgente: 20 per un totale di 7240 lanci
- **variazione percentuale del volume del masso:** $\pm 50\%$.
- addizionale **altezza di caduta iniziale:** nello specifico si è scelto un valore di 0,5 metri.

La risoluzione scelta è pari a 2 metri, come suggeriscono gli stessi sviluppatori del codice di calcolo.

3.3.1.2 Raster di output

I raster di output sono:

- *E_95.asc.* intervallo di confidenza pari al 95%;
- *Ph_95.asc.*: intervallo di confidenza pari al 95%;
- *Nr_passages.asc.* numero di blocchi passati in ogni cella;
- *Nr_deposited.asc.*: numero di blocchi fermati in ogni cella. Questa mappa è una fonte eccellente per delineare le zone di arresto di una caduta massi su un'area di studio come base per una mappa di pericolosità;

3.3.1.3 Elaborazioni ottenute

Di seguito sono riportate le elaborazioni ottenute:

Figura 12 Numero di passaggi

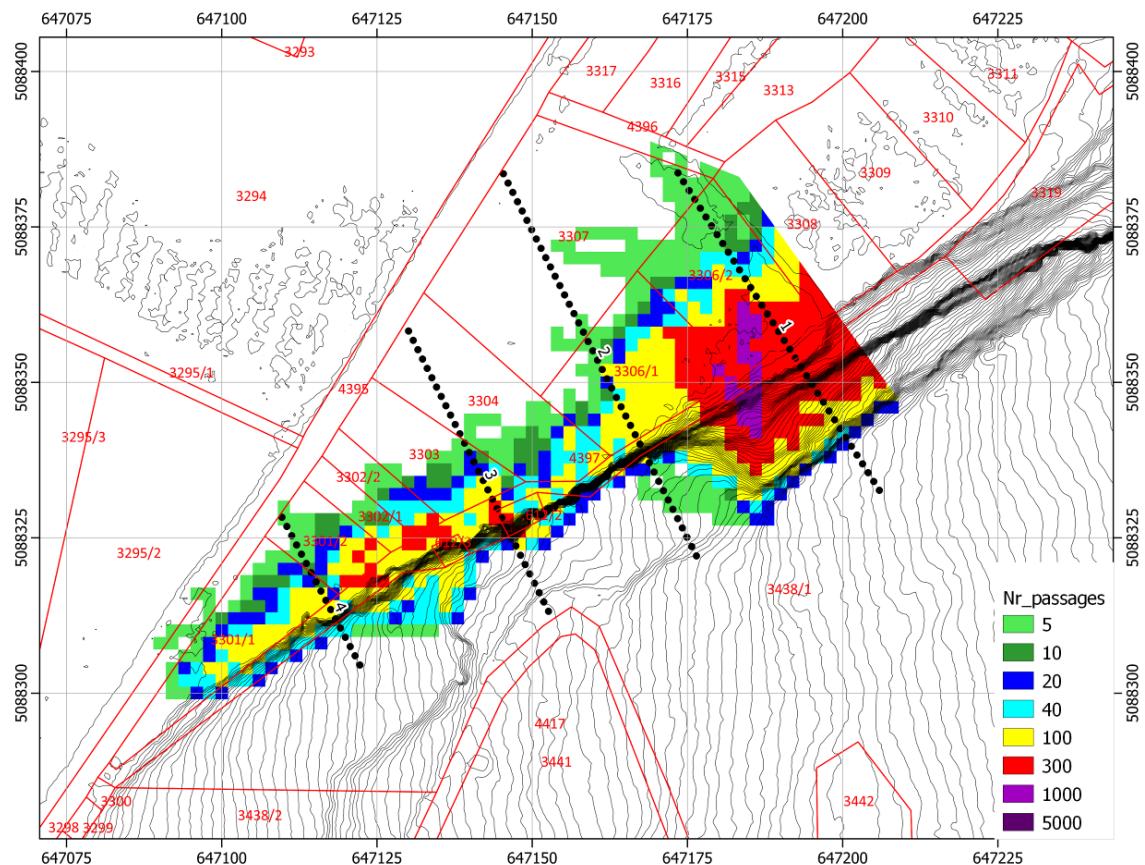


Figura 13 numero di blocchi fermati in ogni cella

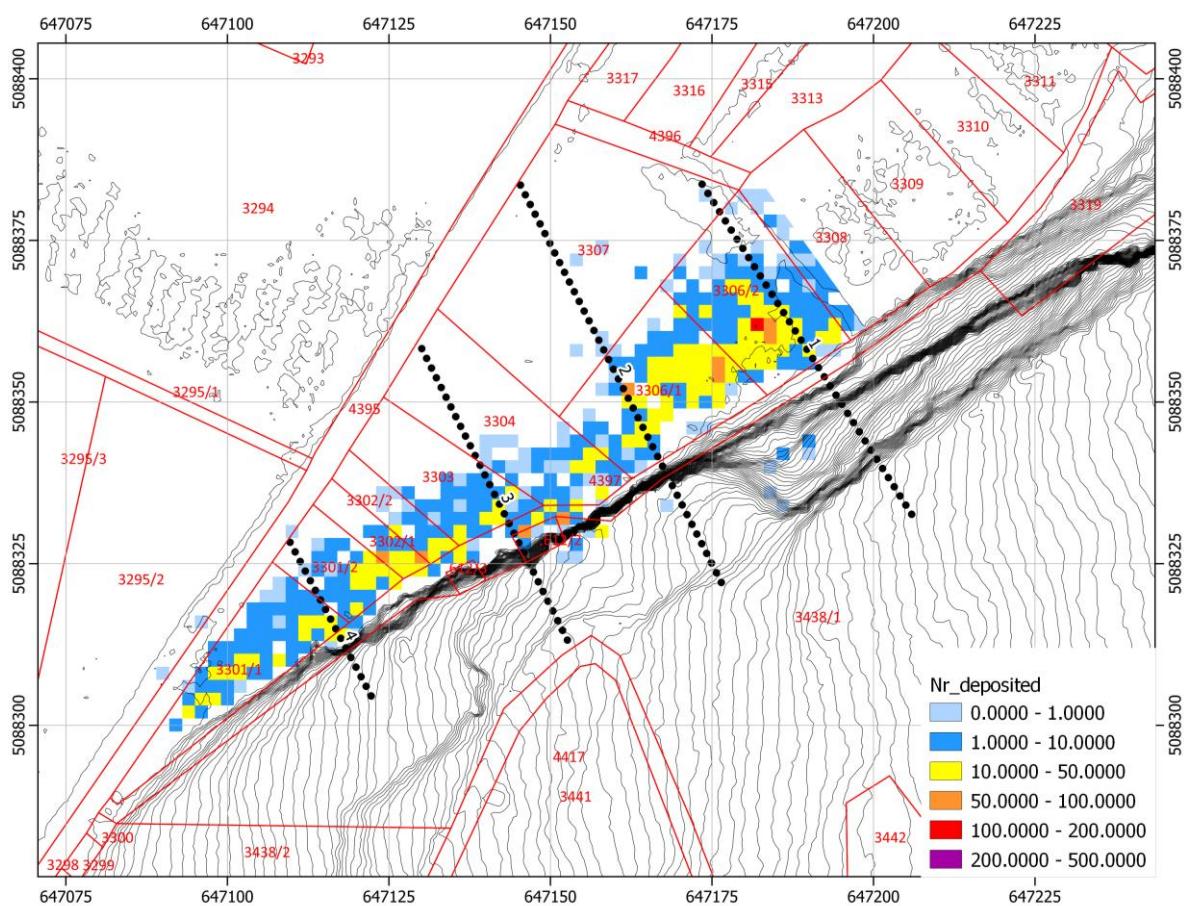


Figura 14 Energia cinetica in kJ al 95percentile

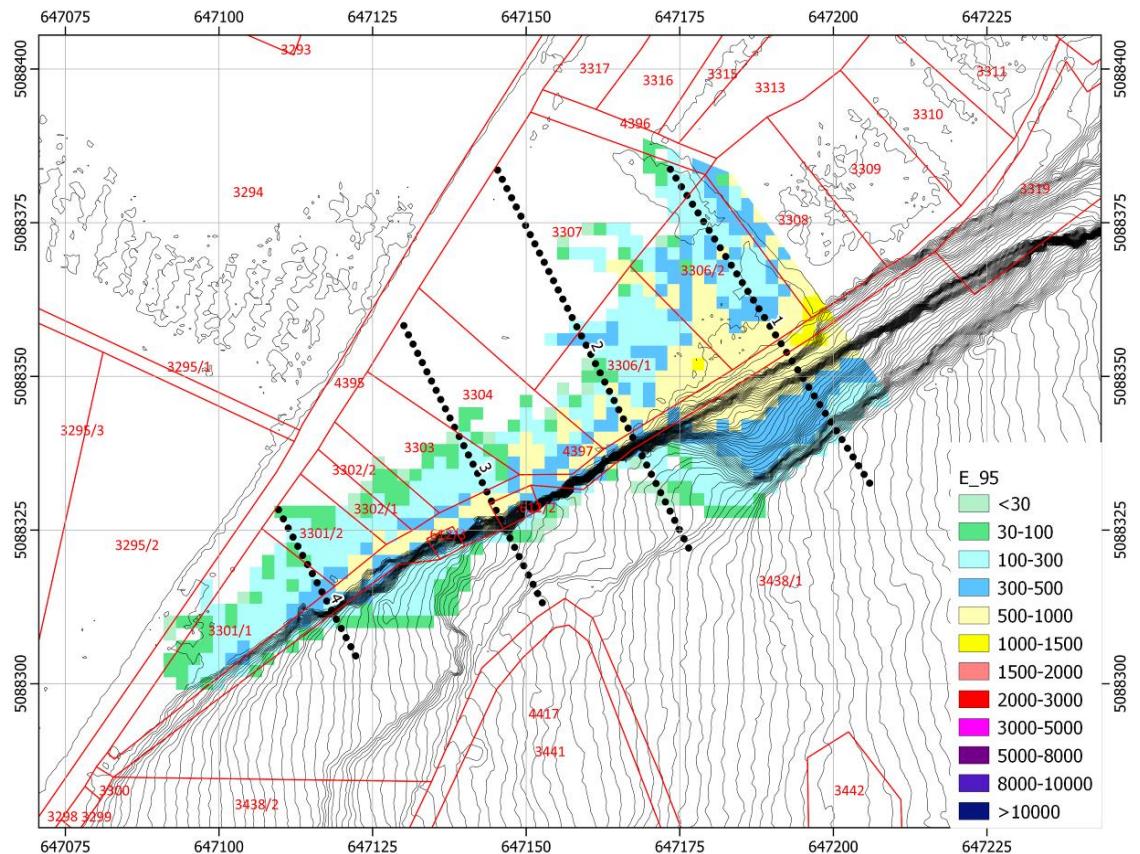


Figura 15 Altezze di rimbalzo – matrice per valutare l'intensità del fenomeno

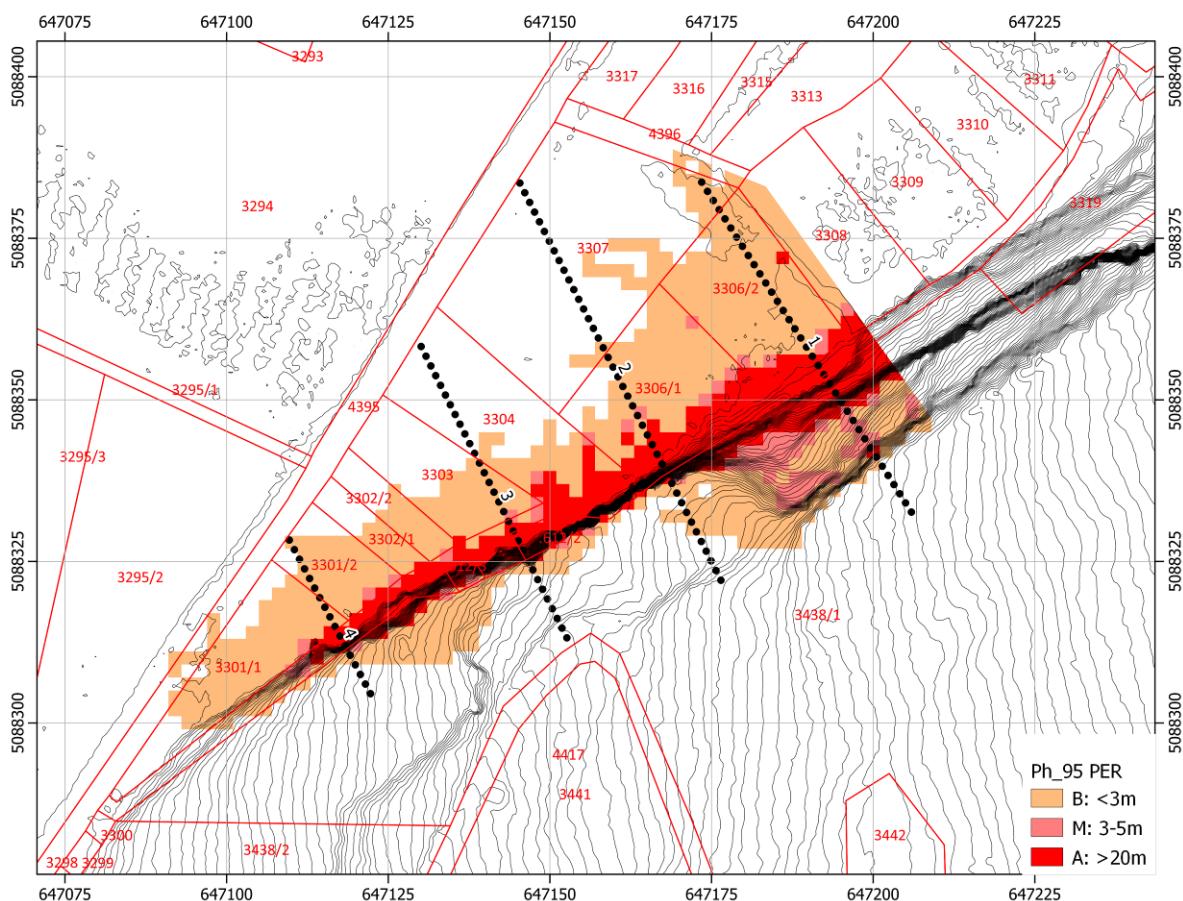


Figura 16 Velocità – matrice per valutare l'intensità del fenomeno

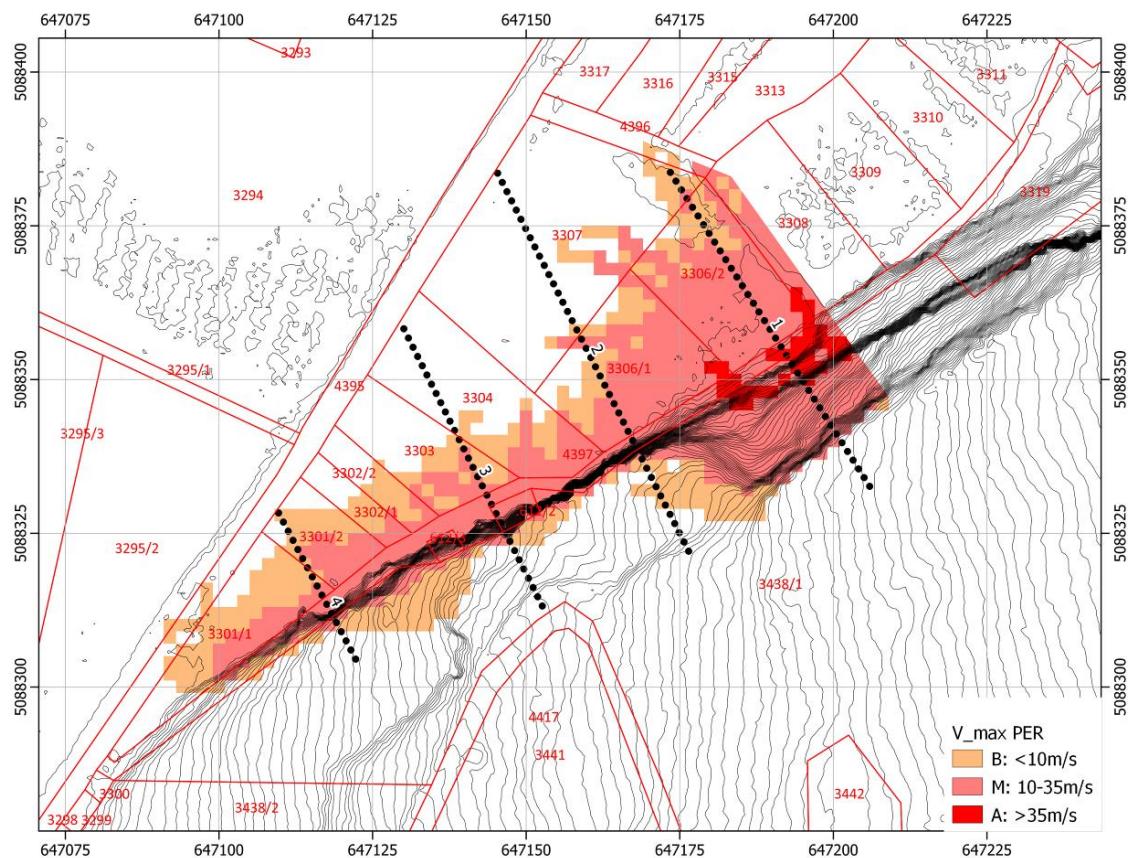
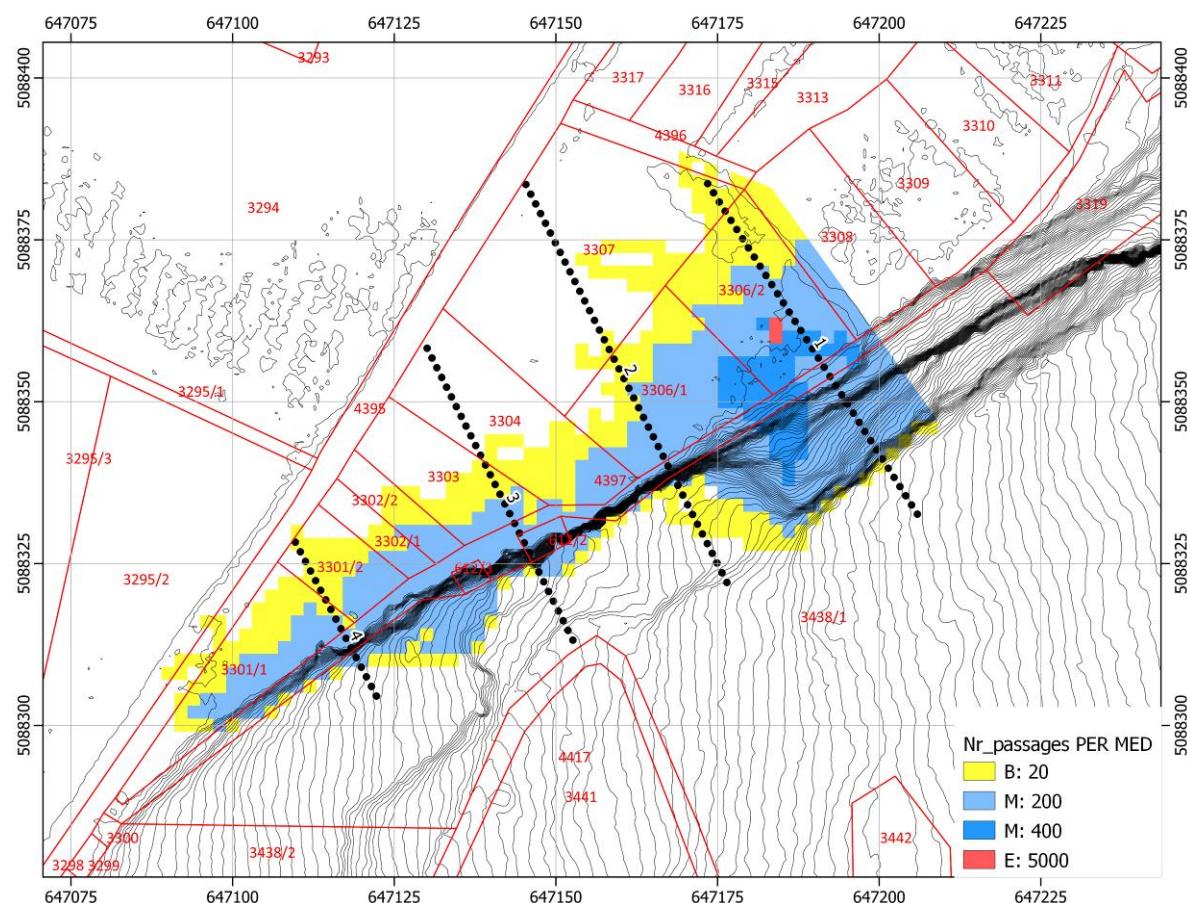


Figura 17 Grado di Pericolosità con intensità media



3.3.2 SIMULAZIONI DI CADUTA MASSI 2D - ROCFALL

Considerata la morfologia del sito si sono individuate delle traiettorie di caduta massi che permettessero di verificare l'efficacia degli interventi individuati.

Il programma permette di individuare le traiettorie più probabili dei massi che possono cadere dal versante, e di calcolare le loro caratteristiche cinematiche lungo il pendio su base statistica. L'analisi statistica si concretizza facendo variare in maniera casuale l'angolo di impatto del masso, all'interno di limiti definiti dalla dimensione dei blocchi e dalle caratteristiche del pendio, e le proprietà del materiale, della pista e del masso che influenzano le caratteristiche di rimbalzo sul pendio. La rappresentazione numerica di queste proprietà viene data dai coefficienti di restituzione normale (kN) e tangenziale (kT), dove per direzione normale si intende quella perpendicolare alla superficie, mentre quella tangenziale è quella parallela alla superficie.

I parametri di ingresso utilizzati sono:

- Zona di partenza dei blocchi: sorgente lineare lungo il ciglio sommitale.
- Volume: $1 \text{ m}^3 \pm 0,2 \text{ m}^3$
- Forma: sferica
- Coefficienti di restituzione e rugosità: i valori utilizzati sono riportati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Tabella 7 Coefficienti di restituzione

	kn		kt	
Descrizione (colore riportato nella sezione)	media	dev	media	dev
Roccia intatta	0,35	0,02	0,90	0,02
Roccia fratturata e/o degradata	0,34	0,03	0,84	0,03
Detrito grossolano poco vegetato	0,31	0,03	0,82	0,03
Detrito fine poco vegetato	0,30	0,02	0,80	0,02

- Numero di simulazioni: l'analisi condotta è di tipo probabilistico e si ritiene che 1.000 simulazioni di caduta per ogni traiettoria forniscano un adeguato valore statistico.

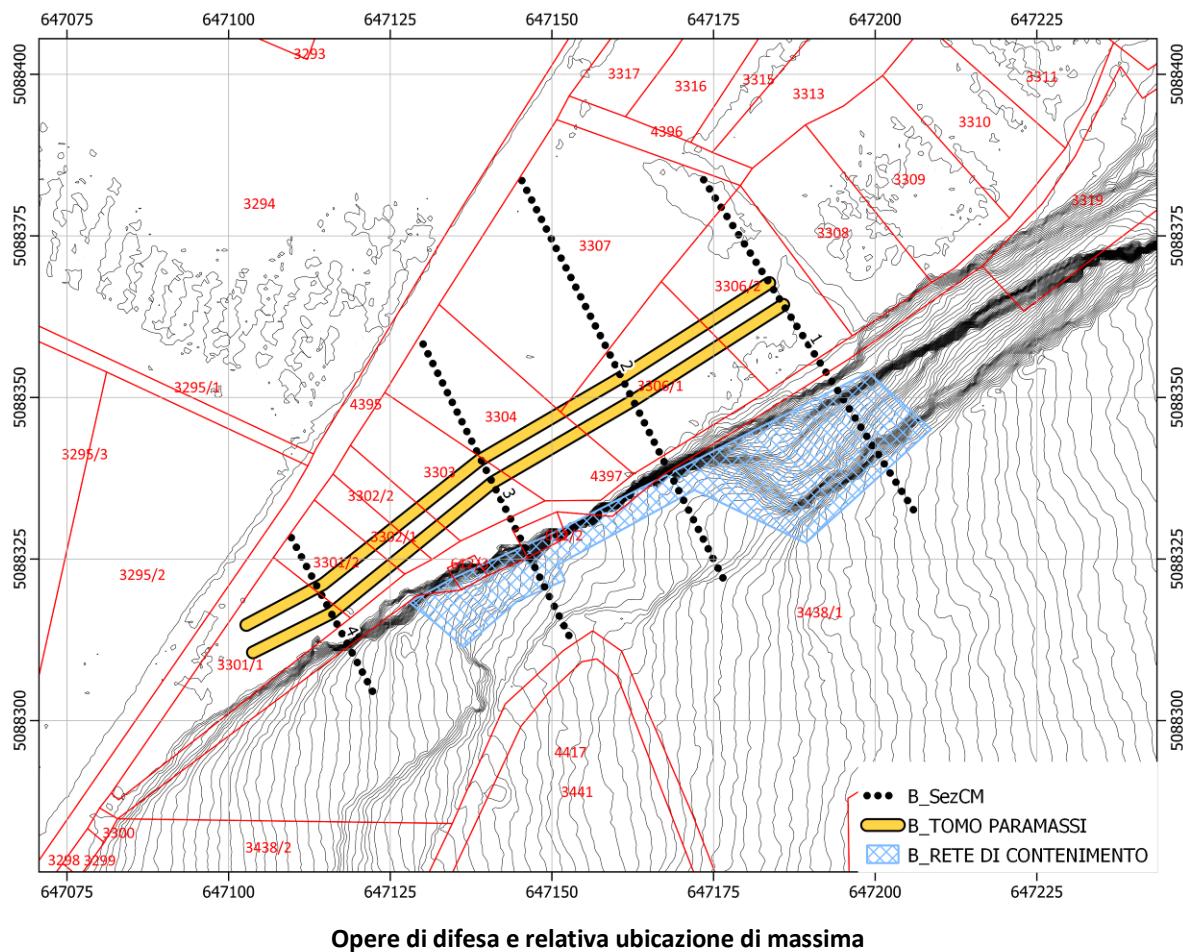
Le elaborazioni per ciascuna sezione, suddivise per scenario, e comprendono:

- l'andamento delle traiettorie ottenute dalla simulazione;
- l'istogramma della posizione di arresto dei massi;
- L'inviluppo dell'energia cinetica in corrispondenza del tomo paramassi.
- L'inviluppo dell'altezza di impatto lungo la verticale del tomo

3.4 OPERE DI DIFESA E/O MISURE DI SICUREZZA

3.4.1 Scenari

Nello specifico, ai fini dell'individuazione degli interventi di difesa e di prevenzione volti alla riduzione o all'eliminazione del rischio, si individuano si ritiene debba essere realizzato uno tomo paramassi e reti in aderenza.



3.4.2. OPERE DI MESSA IN SICUREZZA

La realizzazione degli interventi in oggetto prevede la realizzazione di:

- **Reti con contenimento in parete**
- **Tomo paramassi**
- **Interdetta l'entrata ai fori**
- **Piano di monitoraggio delle opere.**

3.4.3 CRONOPROGRAMMA

Gli interventi di difesa previsti sono propedeutici alla realizzazione dell'intervento edilizio previsto e pertanto le lavorazioni edili all'interno della particella potranno avvenire solo a seguito di certificato di regolare esecuzione delle opere di messa in sicurezza.

4 CONCLUSIONI

Lo studio di compatibilità ha dettagliatamente analizzato le condizioni di rischio valutando i caratteri geomeccanici della parete, individuando la tipologia di fenomeno presente e valutandone il suo effetto attraverso la definizione del volume di progetto da utilizzarsi nelle verifiche di caduta massi.

Sintesi elaborazioni 3D

Le elaborazioni tridimensionali hanno mostrato come il netto contrasto morfologico tra la parete e la piana di fondovalle determini rimbalzi piuttosto accentuati. Nella fascia più a nord, complice la presenza di alcune cenge parzialmente vegetate metà parete, il fenomeno si amplifica e conseguentemente si allunga la distanza di arresto dalla parte.

In base alla matrice per definire l'entità del fenomeno si ottiene che una intensità media/bassa nei confronti delle velocità e media/alta nei confronti delle altezze di rimbalzo, rimarcando il fatto che la fascia immediatamente sottostante la parete abbia una alta intensità del fenomeno. Incrociando tale valore con la mappa delle frequenze di passaggi si ottiene che la fascia al piede della parete, per una larghezza di 10-15 metri, ha pericolo medio (P3) a cui segue una fascia con pericolo basso (P2) che ha larghezza variabile tra 5 e 10 metri.

Sintesi elaborazioni 2D

Dalle simulazioni emerge come la sezione 1 ovvero la sezione che attraversa la parete dove suddivisa da cenge risulti la maggiormente critica. Lanciando le simulazioni dal cielo sommitale si rilevano del rimbalzi particolarmente accentuati che limitano in misura marcata l'utilizzo della pf sottostante (vedi traiettoria di simulazione ed istogramma dei punti di arresto). Ne deriva che per poter utilizzare l'area sottostante è necessario posare delle reti in aderenza nella fascia di parete medio alta al fine di contenere i distacchi e potere abbassare la fascia sorgente di caduta massi riducendo così i possibili rimbalzi. Questo settore pur risultando poco fratturato manifesta locali distacchi di volumi lastriformi.

Le sezioni 2, 3 e 4 rimarcano come la verticalità della parete determini rimbalzi accentuati che riducono brevemente. Considerando un'opera di protezione a 10 metri dalla parete le energie cinetiche al 95° sono inferiori ai 200 kJ e le altezze di rimbalzo, sempre al 95° percentile, inferiori ai 2 metri.

OPERE DI MESSA IN SICUREZZA

Dalle simulazioni di caduta massi deriva che la fascia alla base della parete è interessata dal passaggio di blocchi con frequenze medie e basse seppur con energie contenute. La scelta del tipo di interventi è strettamente connessa alla ampiezza della superficie adibita a parcheggio che si intende rendere fruibile.

Si individuano 3 scenari:

Nel caso si intendesse utilizzare l'intera superficie ed arrivare sino a pochi metri dalla parete è necessario intervenire tutta la parete a monte delle p.f. in oggetto con reti di contenimento adeguatamente ancorate.

Nel caso non si intendesse intervenire con alcun intervento l'area fruibile sarebbe ridotta in misura marcata perché sarebbe esterna alle traiettorie simulate a cui si aggiungebbe un franco si sicurezza di 5 metri e guard rail in calcestruzzo.

E' rappresentativo di una situazione intermedia che richiede interventi in parte al fine di ridurre l'altezza della zona di distacco e la presenza di un opera di contenimento al piede della parete posta ad una certa distanza. Considerando un'opera di protezione a 10 metri dalla parete le energie cinetiche al 95° sono inferiori ai 200 kJ e le altezze di rimbalzo, sempre al 95° percentile, inferiori ai 2 metri. In fase progettuale il dimensionamento dell'opera dovrà essere a norma della UNI 11211-4 e dovrà considerare una Ec95 di 200 kJ ed una altezza di inferiore ai 2 m con un blocco di 1m³.

Il progetto dovrà essere completato da relativo piano di monitoraggio dell'opera.

Alla luce dell'analisi effettuata, a livello tecnico si ritiene compatibile una **MODIFICA NORMATIVA ART. 62 COMMA 4 DELLE NTA DEL PRG**

Trento, maggio 2021

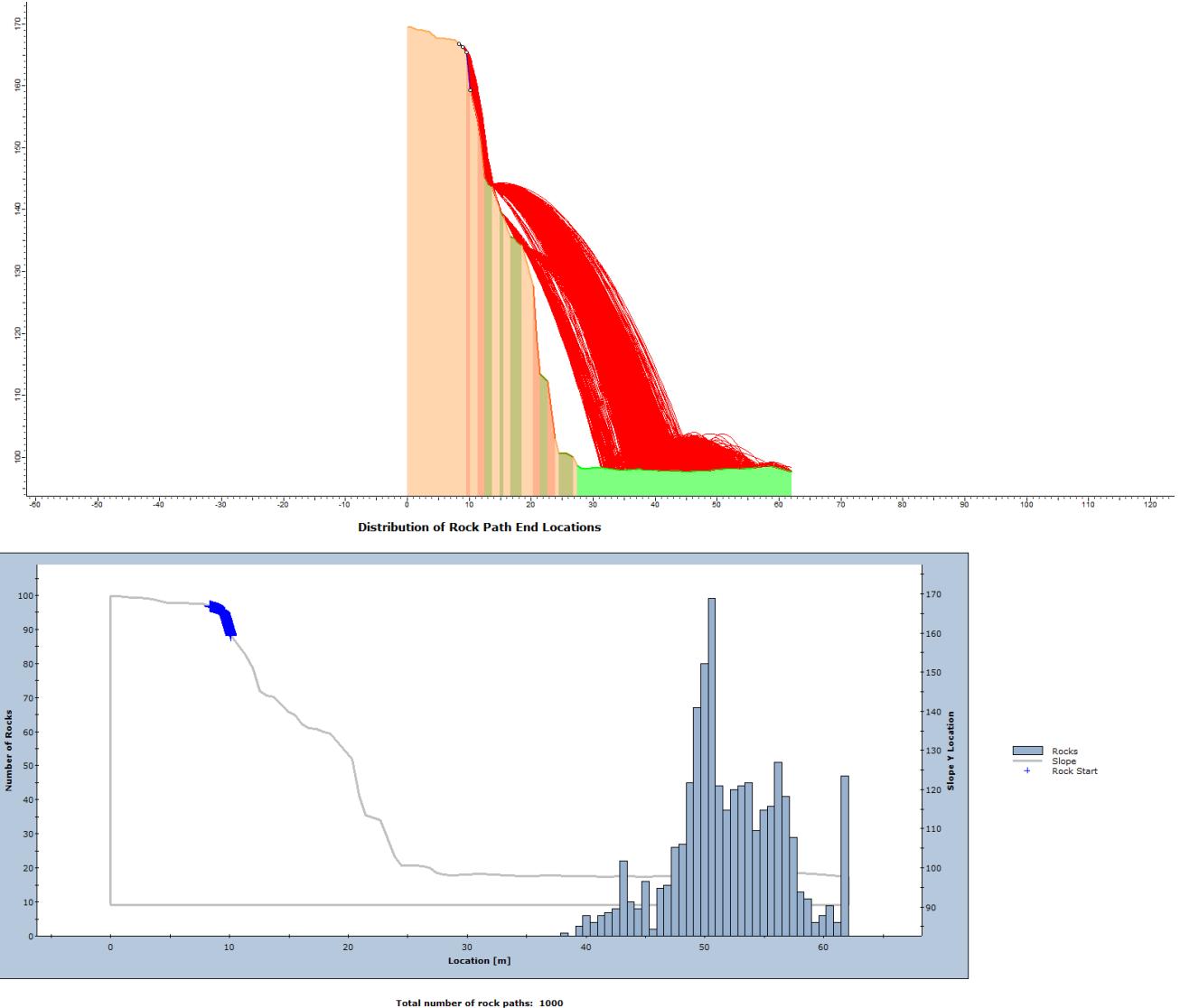
Arco 02.doc

IL RELATORE:

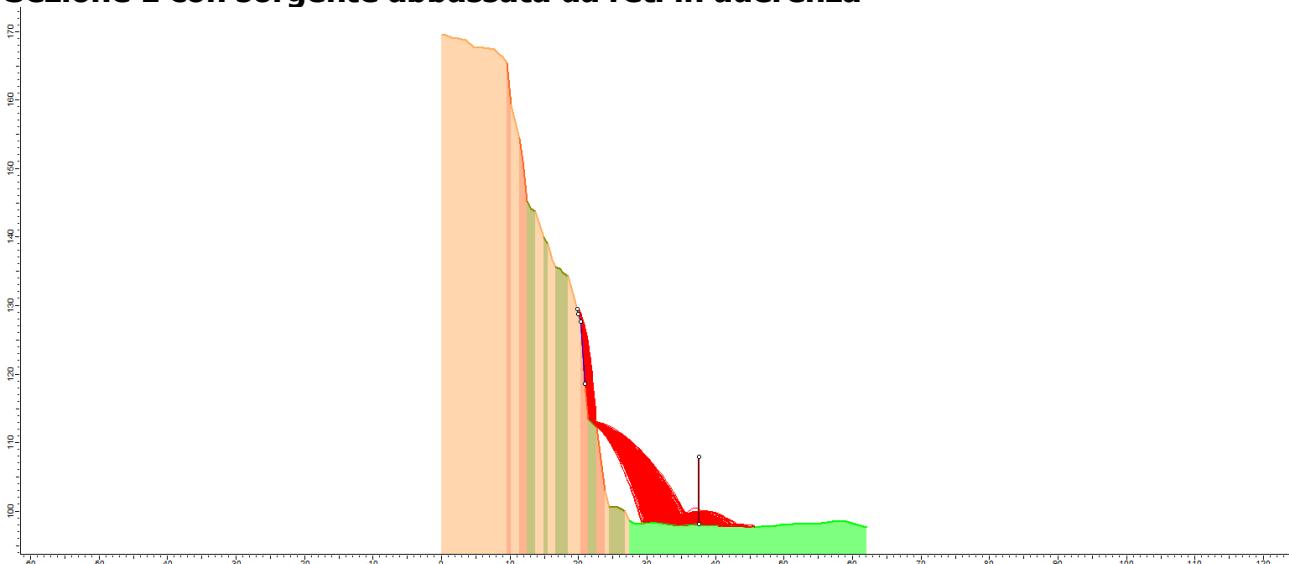


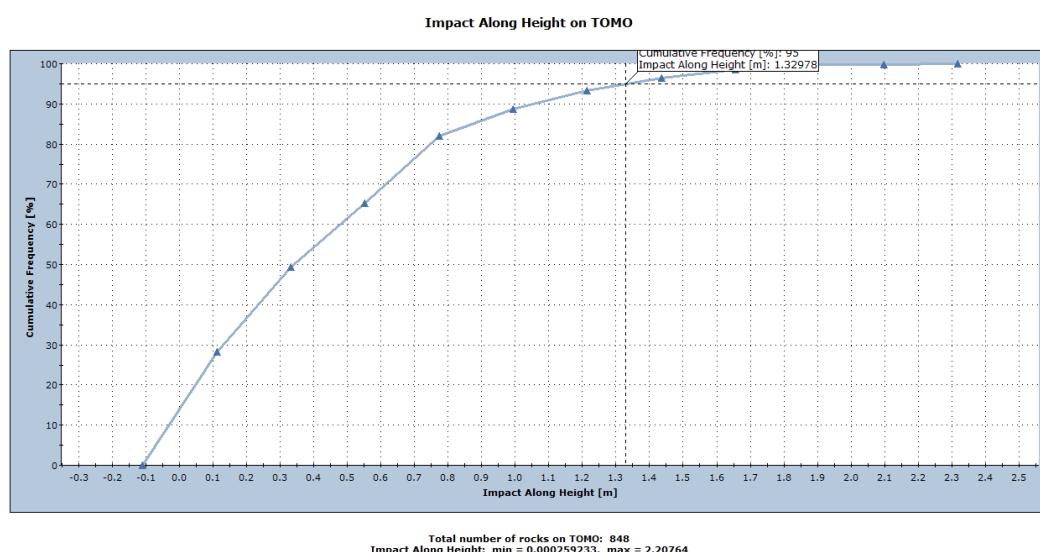
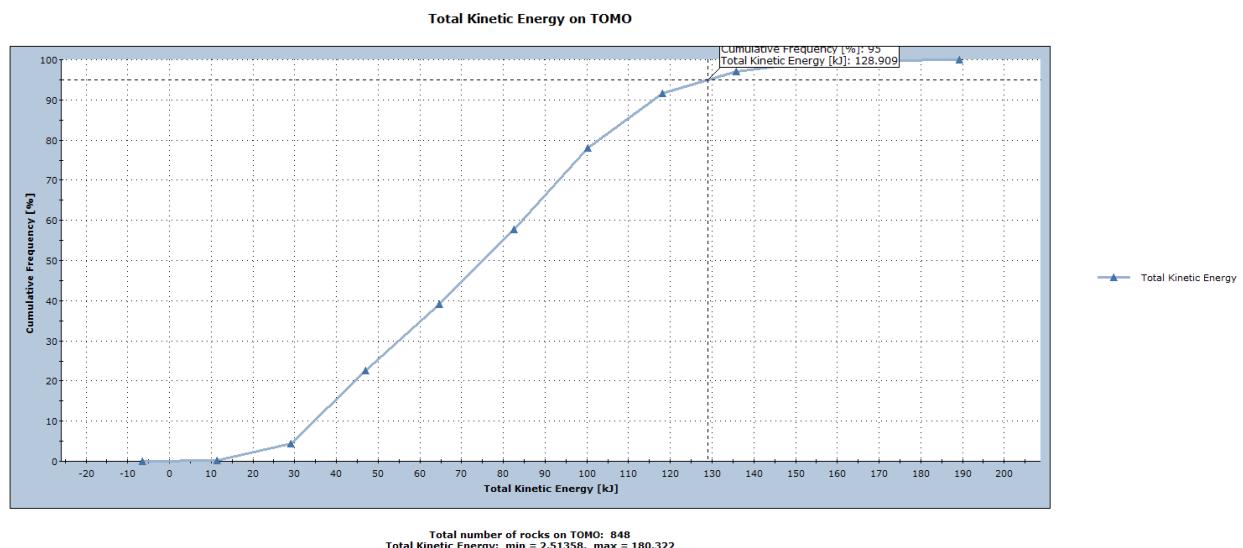
ALLEGATO

Sezione 1

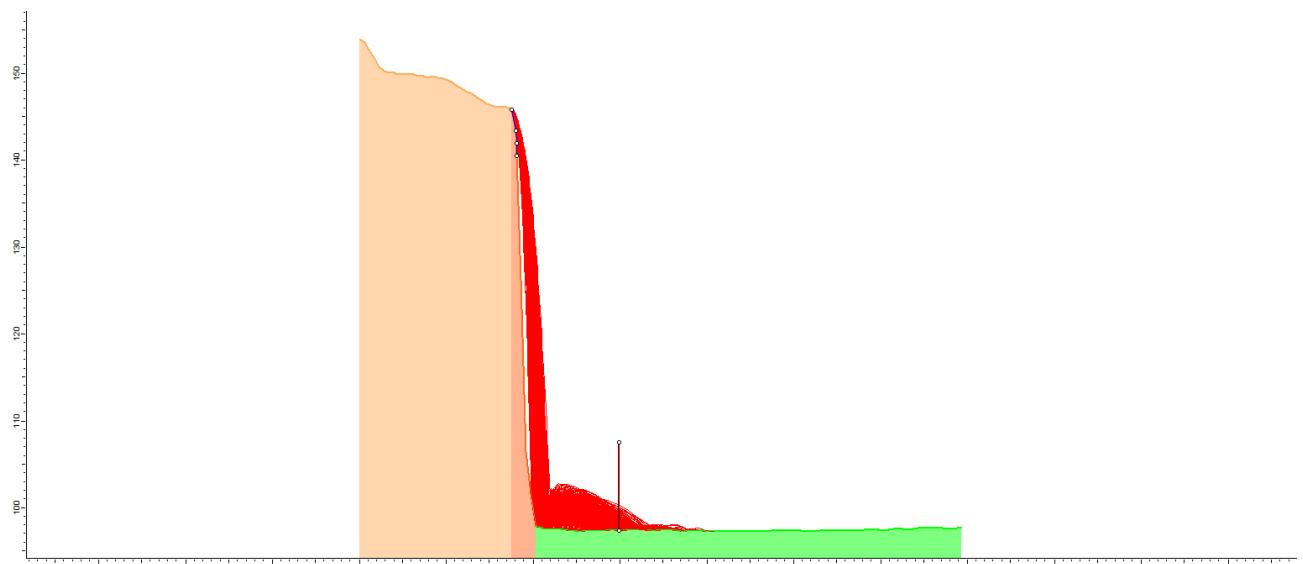


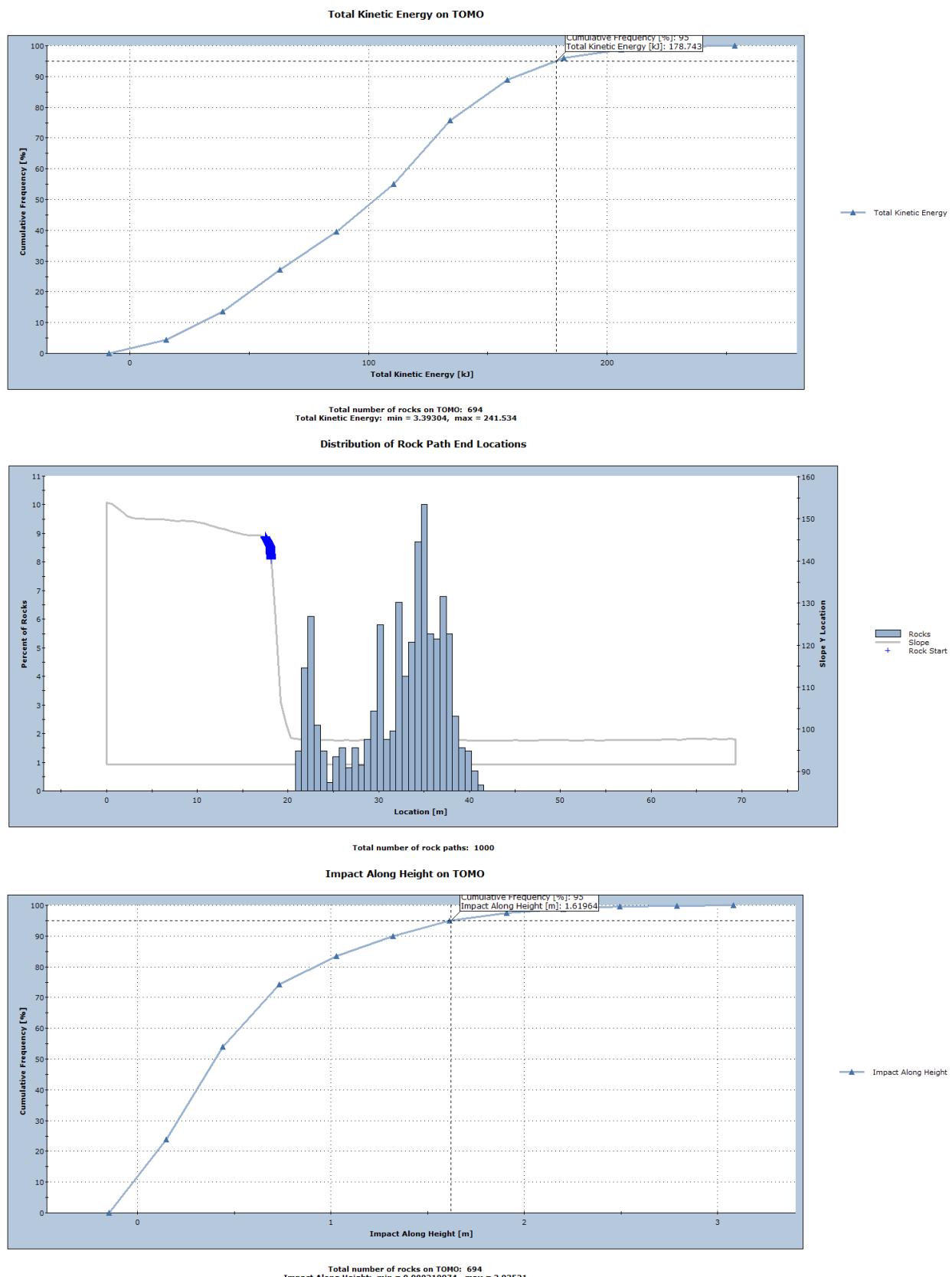
Sezione 1 con sorgente abbassata da reti in aderenza



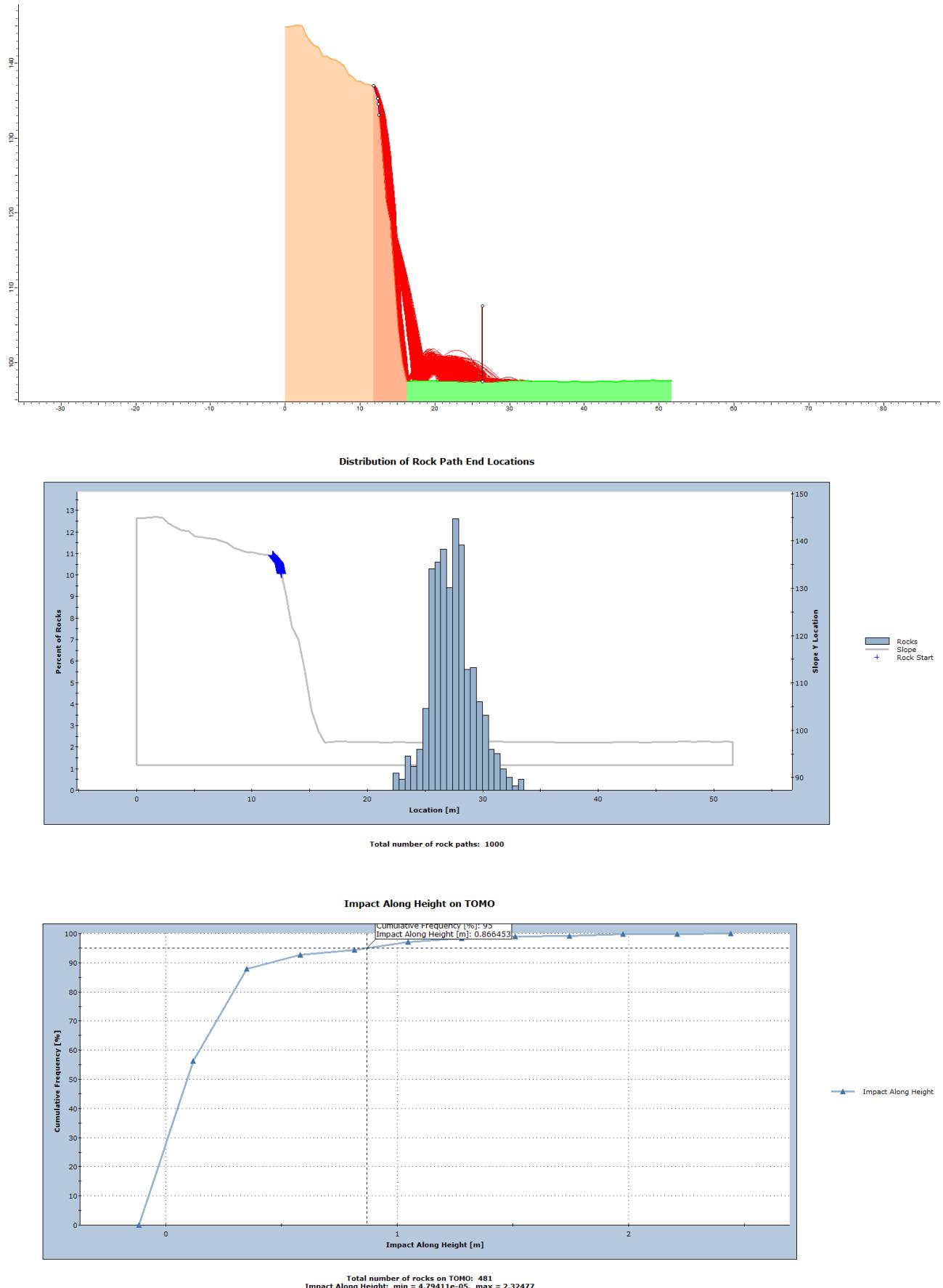


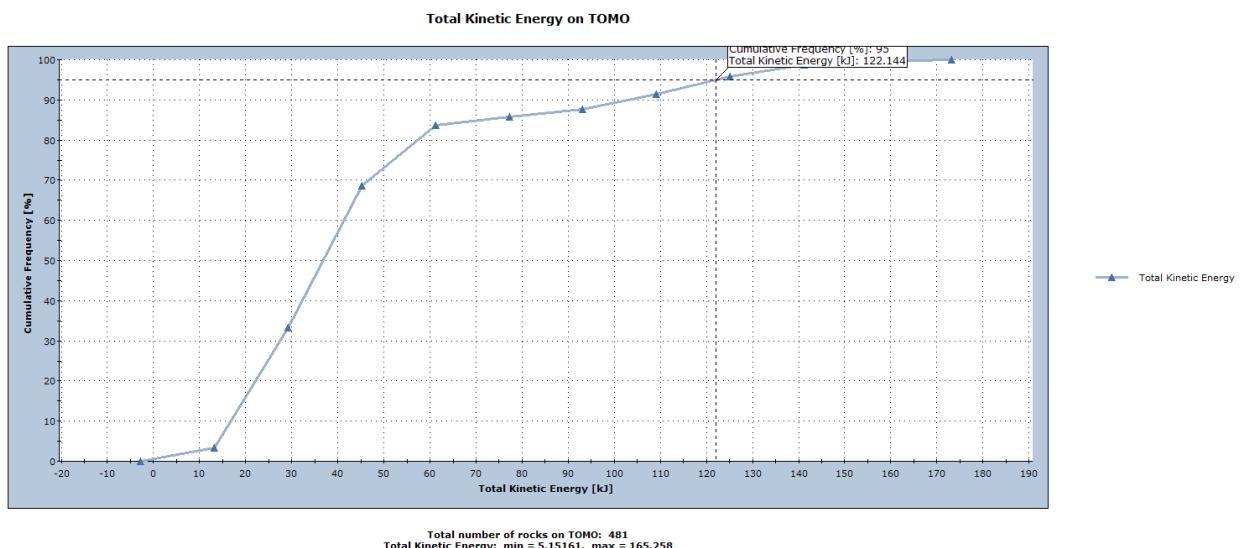
Sezione 2



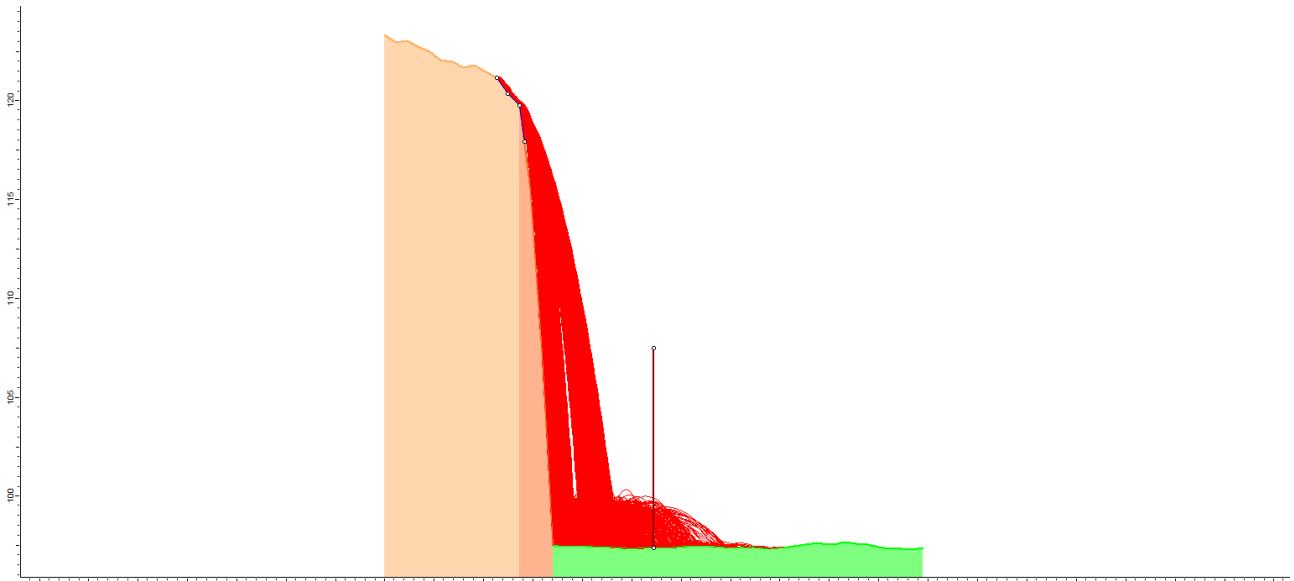


Sezione 3

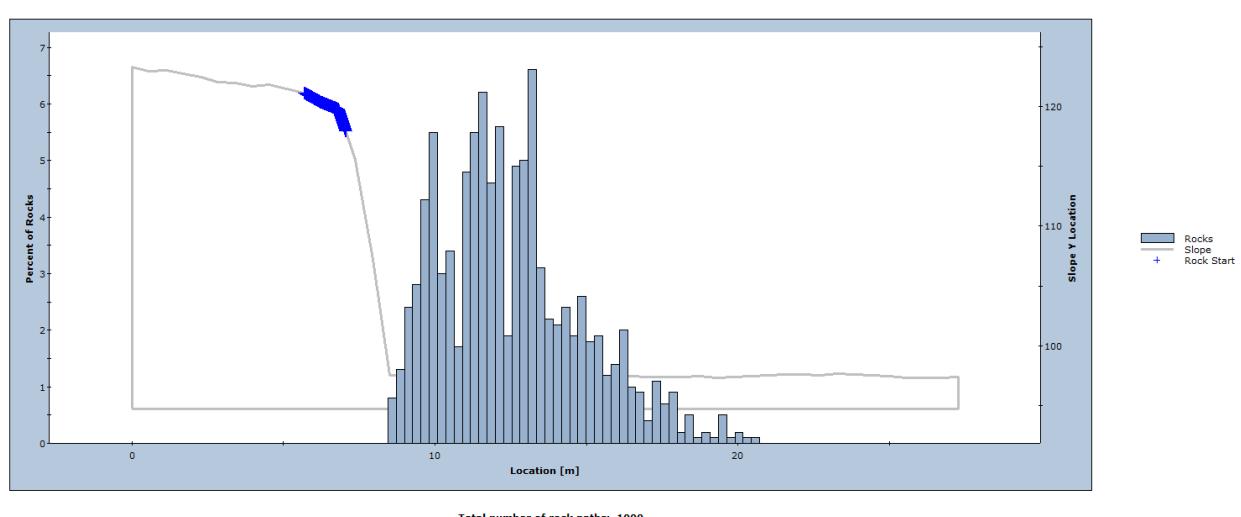




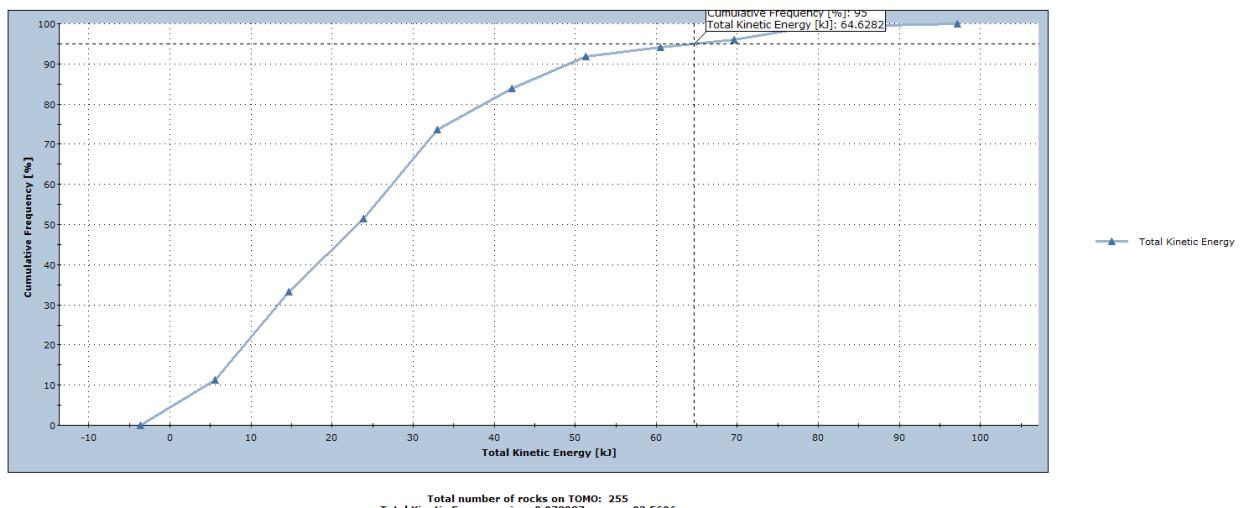
Sezione 4



Distribution of Rock Path End Locations



Total Kinetic Energy on TOMO



Impact Along Height on TOMO

