



Politecnico
di Torino

Centro Interdipartimentale SISCON
Safety of InfraStructures and CONstructions



CONTRATTO DI RICERCA

SUPPORTO ALTAMENTE SPECIALISTICO AL RESPONSABILE DEL
PROCEDIMENTO NELL'AMBITO DELLA PROGETTAZIONE DI
INTERVENTI DI DIFESA DELLA STRADA ROMANA DELLE GALLIE



RELAZIONE FINALE

Prof. Ing. Valerio De Biagi

Ing. Maddalena Marchelli

Prof. Ing. Daniele Peila

Giugno 2022



INDICE

1	PREMESSA	2
2	FINALITÀ DEL LAVORO DI RICERCA.....	5
3	ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ	7
3.1	<i>Definizioni preliminari</i>	7
3.2	<i>Metodologia</i>	7
3.2.1	Volume e tempo di ritorno per la definizione dello scenario	9
3.2.2	Analisi di propagazione	9
4	ELEMENTI A RISCHIO	13
5	CALCOLO DEL RISCHIO PER ELEMENTI CON ESPOSIZIONE NON UNITARIA.....	18
5.1	<i>Premessa metodologica</i>	18
5.2	<i>Metodo ETA per tracciato con viabilità pedonale</i>	23
5.2.1	Impatto tra blocco in fase di crollo e pedone	25
5.2.2	Albero degli eventi semplificato	27
5.3	<i>Metodo ETA per tracciato con viabilità ciclabile</i>	29
6	VALUTAZIONE DEI PARAMETRI CINEMATICI DEI BLOCCHI IN CADUTA.....	30
6.1.1	Norma UNI 11211-4:2018: parametri di impatto	31
6.1.2	Analisi traiettografiche bidimensionali	32
7	CASO STUDIO.....	34
7.1	<i>Identificazione del fenomeno, individuazione delle aree sorgenti e dei loro volumi (scenari)</i>	35
7.1.1	Caratterizzazione geologica-geomorfologica e dei dissesti	36
7.1.2	Analisi degli eventi pregressi	38
7.1.3	Frequenza di crollo	43
7.1.4	Scelta del blocco di progetto per le analisi di propagazione	45
7.2	<i>Analisi traiettografiche di propagazione tridimensionali</i>	46
7.2.1	Validazione dei parametri di input	50
7.3	<i>Calcolo del rischio per elementi a esposizione non unitaria</i>	54
7.4	<i>Analisi traiettografiche bidimensionali di dettaglio: assunzioni di calcolo</i>	58
7.4.1	Scelta dei parametri di restituzione	60
7.4.2	Analisi traiettografiche bidimensionali per la valutazione dell'energia	75
8	CONCLUSIONI.....	107
9	BIBLIOGRAFIA	109
10	ALLEGATI.....	112

1 PREMESSA

La presente relazione è redatta ai sensi del contratto “Supporto altamente specialistico al responsabile del procedimento nell'ambito della progettazione di interventi di difesa della strada Romana delle Gallie” repertoriato al n° 1062/2021 presso Politecnico di Torino – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, avente come affidatario il Servizio Geologico della Regione Autonoma Valle d’Aosta (resp. Dott. Geol. Davide Bertolo).

L’attività di ricerca è finalizzata alla predisposizione di strumenti per l’analisi di rischio da caduta massi su differenti elementi esposti, con particolare riferimento ad infrastrutture viarie ad elevata frequentazione pedonale e di pregio culturale. Il caso studio è rappresentato dalla parete compresa tra l’abitato di Bard e l’intersezione tra la strada romana delle Gallie e la SS. 26 “della Valle d’Aosta”. Le attività di studio e ricerca, applicate al caso studio di Bard, “Strada romana delle Gallie” hanno previsto:

- ideazione e predisposizione di una metodologia per la valutazione del rischio su un’infrastruttura viaria caratterizzata da alto traffico pedonale e di notevole pregio culturale;
- analisi degli eventi pregressi nell’area e dei risultati del rilievo topografico di dettaglio (affidato a ditta esterna) finalizzata all’individuazione delle volumetrie potenzialmente instabili;
- definizione della frequenza di accadimento degli eventi di crollo che interessano il tracciato della Strada Romana delle Gallie;
- analisi di propagazione per l’identificazione della probabilità di occorrenza spaziale;
- studio delle condizioni di traffico e valutazione puntuale del rischio annuo;
- analisi traiettografiche bidimensionali di dettaglio al fine di valutare la pericolosità e i parametri cinematici dei blocchi in transito;
- proposte per la gestione del rischio.

Il presente report di ricerca è stato redatto dal sottoscritto, Prof. Ing. Valerio De Biagi, responsabile scientifico della ricerca, dall’Ing. Maddalena Marchelli e dal Prof. Ing. Daniele Peila.

La documentazione consultata, cui si farà riferimento, è quella indicata nel seguito:

1. Elaborato “Rilievo laser scanner di siti nei Comuni di Bard, Donnas e Pontboset nell’ambito delle valutazioni preliminari agli interventi di difesa della Strada Romana delle Gallie e del capoluogo di Pontboset, per il periodo 15/03/2021 – 31/12/2021. Risultati area di Bard – Rapporto tecnico” a cura di IMAGEO S.R.L. datato 15/03/2021 comprensivo dei seguenti documenti allegati:



- a. Elaborati grafici allegati al Rapporto Tecnico:
 - i. Allegato 1: risultati del rilievo geomeccanico;
 - ii. Allegato 2: parametri geomeccanici;
 - iii. Allegato 3: Volume Roccioso Unitario;
 - iv. Allegato 4: Slope Mass Rating SRM;
 - v. Allegato 5: Settori potenzialmente instabili.
- b. Fogli di calcolo Excel (datati 10/12/2021)
- c. VRU_stat_Bard2021_deliverable_v1.xls
- d. Volumi_Bard2021_deliverable_v1.xls

L'attività di ricerca è stata svolta nell'ambito del centro Interdipartimentale SISCON (Safety of InfraStructures and CONstructions) del Politecnico di Torino a cui il responsabile scientifico della ricerca afferisce e nell'ambito delle attività del Rockfall Protection Laboratory del DIATI a cui afferiscono l'Ing. Marchelli e il Prof. Peila.

2 FINALITÀ DEL LAVORO DI RICERCA

Il presente lavoro sviluppa lo studio di pericolosità e di rischio per fenomeno di caduta massi su aree ad elevata frequentazione e di pregio culturale. In questo ambito si parla di studio a “medio-piccola scala”, in cui le aree potenzialmente sorgenti di crollo sono multiple così come gli elementi potenzialmente a rischio.

Il presente lavoro di ricerca è pertanto finalizzato non solo all’ideazione di metodologie per il calcolo del rischio associato al fenomeno di caduta massi su elementi a rischio con esposizione non unitaria (ossia in movimento) quali pedoni e ciclisti che transitano su una viabilità podereale ma consente anche di effettuare valutazioni di rischio anche su elementi statici, quali, ad esempio, l’infrastruttura viaria stessa.

I risultati del lavoro di ricerca sono applicati ad un caso studio, con particolare riferimento alle pareti rocciose del versante sinistro orografico della valle della Dora Baltea in Valle d’Aosta, nel Comune di Bard, tra l’omonimo forte e l’abitato di Donnas, comprendente un versante a differente acclività e di estensione pari a circa 29 ettari insistente su varie infrastrutture viarie, comprendenti:

- la Strada Statale SS26 della Valle d’Aosta di competenza del compartimento ANAS della Valle d’Aosta;
- la ferrovia Chivasso-Ivrea-Aosta di competenza di RFI;
- la Strada Romana delle Gallie;
- la viabilità locale a servizio dei fondi agricoli a valle della Strada Romana delle Gallie.

È inoltre presente un canale artificiale di proprietà di CVA a scopi idroelettrici.

La presente relazione è relativa esclusivamente alla Strada Romana delle Gallie e alla viabilità locale, quali possibili infrastrutture di transito per i pedoni e i ciclisti. Nel seguito della presente, la viabilità locale è definita come “Altra strada”.

In riferimento all’individuazione delle aree sorgenti di potenziale crollo, data l’estensione dell’area, gli scriventi fanno riferimento ai risultati riportati nel Rapporto Tecnico e nell’Allegato 5 a cura di IMAGEO del 15/03/2021. In particolare, a pag. 57 del suddetto Rapporto Tecnico si osserva che: *“Integrando le informazioni ottenute dalle analisi morfologica e geomeccanica con i dati raccolti direttamente in campagna, sono stati selezionati una serie di elementi geologici e geomorfologici caratterizzanti la presenza di potenziali situazioni di instabilità. [...]Nel dettaglio, l’osservazione della parete ha permesso il riconoscimento di elementi rocciosi separati dal fronte roccioso attraverso più sistemi di discontinuità aperte, a testimoniare una disarticolazione parziale o totale*



dal fronte; talora i blocchi rocciosi si presentano ruotati o appoggiati su superfici inclinate in apparente equilibrio precario.[...] Nel complesso sono stati riconosciuti 138 settori fratturati o disarticolati”.

3 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ

3.1 Definizioni preliminari

La caduta massi rappresenta un fenomeno franoso di crollo particolarmente distruttivo considerando l'intensità potenzialmente in gioco (Volkwein *et al.*, 2011). Nel caso specifico della caduta massi, l'**intensità** è generalmente espressa in termini geometrici (volume del blocco) e meccanici (velocità, energia del blocco) e può essere definita sia all'inizio del fenomeno (zona di innesco) sia alla fine del fenomeno (zona di deposito). Questo valore può infatti ridursi per fenomeni di frantumazione dei blocchi o arresto lungo il percorso o, viceversa, incrementare per l'innesco di ulteriori crolli, eventualmente a sciame. Nell'ottica di uno studio probabilistico del fenomeno si possono identificare quindi probabilità di accadimento spaziale, temporale e di **intensità iniziale e finale. Viene inoltre definito tempo di ritorno il tempo medio che intercorre tra il verificarsi** di due successivi eventi di entità uguale o superiore ad un dato valore di intensità (Fell, 1994).

La **pericolosità** si configura come la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di una certa intensità si verifichi in un certo periodo di tempo in una certa area. Qualora non sia presente il termine temporale si parla di **pericolosità relativa**.

L'**analisi della pericolosità** è un processo che mira alla valutazione della probabilità di accadimento spaziale e temporale di un fenomeno di data intensità. La creazione di mappe di pericolosità (suddivisione del territorio in zone caratterizzate da differenti livelli di pericolosità) permette poi di valutare i potenziali elementi a rischio (§4) e condurre un'analisi del rischio (§5.5.3).

Nel caso specifico della caduta massi l'analisi è generalmente condotta al fine di valutare la pericolosità nelle aree di transito o arresto del blocco (fondovalle), partendo dalla definizione di un evento con una determinata intensità iniziale e tempo di ritorno, ossia scegliendo uno specifico **scenario** con cui condurre l'analisi.

L'analisi della pericolosità può essere effettuata sia con metodi quantitativi che qualitativi (Corominas *et al.*, 2005; Corominas e Moya, 2008; Corominas *et al.*, 2014). Nel presente lavoro sono illustrate metodologie di tipo quantitativo.

3.2 Metodologia

Alla luce di quanto espresso al §3.1, le fasi di un'analisi di pericolosità risultano quindi:

1. **Identificazione del fenomeno potenzialmente distruttivo:** ossia valutazione della tipologia e localizzazione delle possibili sorgenti d'innesco ed eventuale possibile zona di arrivo. Questa fase può essere condotta mediante uno studio accurato dei dati cartografici e storici di dettaglio

presenti e/o mediante rilievi in situ finalizzati a studiare le condizioni delle pareti rocciose. Lo studio delle condizioni dell'ammasso roccioso, delle caratteristiche delle discontinuità presenti permette infatti di definire i cinematismi potenzialmente attivabili unitamente alle volumetrie d'innescio potenzialmente in gioco, nonché fornire indicazioni sulla propensione al distacco. Lo studio del terreno e degli eventi passati, mediante anche fotointerpretazione, permette invece di definire sia i possibili percorsi di caduta, che di dare indicazioni sulla possibile frammentazione del blocco e quindi del volume di arrivo dei blocchi. Dall'analisi dei danni è inoltre possibile risalire in via qualitativa alle energie potenzialmente in gioco. Questi ultimi due punti risultano molto utili per la valutazione della probabilità di occorrenza spaziale di cui al punto 3 del presente elenco.

2. **Definizione di uno o più scenari possibili**, ossia identificare la volumetria di partenza, anche sulla base di relazioni volume/tempo di ritorno. Lo studio delle condizioni geomeccaniche della parete unitamente ai rilievi dei blocchi al piede e all'analisi storica permettono di dare indicazioni utili per la definizione di uno scenario.
3. Valutazione della probabilità di occorrenza **spaziale**. All'interno di questa fase ricade quindi *l'analisi di propagazione* del fenomeno, a partire dallo scenario d'intensità considerato. Il presente lavoro adotta metodi quantitativi con un approccio geotecnico-ingegneristico. La modellazione del fenomeno è effettuata dopo una serie articolata di indagini affinché il modello cinematico scelto sia fisicamente basato e i parametri di input siano accurati. Come dettagliato al §3.2.2, la modellazione del fenomeno di caduta massi è effettuata attraverso *modelli traiettografici* i quali possono essere sia rigorosi (il blocco è simulato con la sua forma e massa e vengono considerati tutti i tipi di moto) che lumped-mass (il blocco ha massa concentrata in un punto e il moto di rotazione è semplificato), sia bidimensionali che tridimensionali. I parametri di input possono essere inoltre forniti sia in maniera deterministica che come quantità probabilistiche, vincolando quindi la tipologia di analisi. Nel presente lavoro l'analisi condotta è di tipo semiprobabilistico, ossia la grande maggioranza dei parametri di input sono estratti casualmente all'interno di un range e il fattore di sicurezza è fornito come una distribuzione di probabilità. Il presente lavoro si avvale di un modello traiettografico tridimensionale ibrido di tipo semiprobabilistico, come dettagliato al §3.2.2 e, nello specifico del software scelto, al §7.2 della presente.
4. La probabilità di occorrenza **spazio-temporale**, dati i risultati dell'analisi di propagazione, può essere espressa come il rapporto tra la probabilità di accadimento spaziale e il tempo di ritorno del fenomeno. Per analisi di porzioni di territorio estese la mappatura della probabilità di

occorrenza spazio-temporale risulta particolarmente complessa, non disponendo spesso di informazioni sul dato temporale. Pertanto, questa viene svolta concentrandosi nelle prossimità degli elementi potenzialmente a rischio, sulla base degli eventi pregressi, solitamente riportati nel catasto dei dissesti che le Pubbliche Amministrazioni costantemente aggiornano e registrati in prossimità degli elementi stessi. Indicazioni sono fornite nel §5 ed applicate nel §7.3 della presente.

5. **Valutazione dell'intensità di arrivo.** Nell'ottica di valutare gli elementi a rischio su cui condurre eventualmente un'analisi di rischio finalizzata alla gestione dello stesso risulta utile poter disporre, unitamente alla probabilità di occorrenza spaziale, di una quantificazione energetica (e, nel caso di caduta massi, anche delle altezze di transito) in specifici punti del versante, e.g. in corrispondenza di elementi sensibili. Occorre tuttavia considerare che per analisi su porzioni di territorio molto estese, una valutazione energetica accurata deve prevedere, a valle di rilievi di dettaglio, una modellazione ad hoc per ogni singolo elemento a rischio, eventualmente avvalendosi di modelli numerici differenti.

3.2.1 Volume e tempo di ritorno per la definizione dello scenario

Per il problema in questione, essendo il rischio per gli elementi indipendente dall'energia di impatto, non è necessario definire in maniera compiuta un legame volume/tempo di ritorno. La definizione dello scenario è svolta considerando lo studio degli eventi pregressi nell'area e la presenza di testimoni muti attraverso i quali è possibile definire un'opportuna frequenza di raggiungimento della strada.

Le analisi di propagazione sono svolte considerando le volumetrie identificate nello studio svolto da IMAGEO e riportate nel Rapporto Tecnico.

3.2.2 Analisi di propagazione

La valutazione delle potenziali aree di invasione e della probabilità di passaggio e arresto dei blocchi sono di fondamentale importanza all'interno del processo di analisi della pericolosità. Lo studio di come il fenomeno di caduta massi può propagarsi, ossia i percorsi dei blocchi e le distanze potenzialmente raggiunte da questi permette, infatti, di individuare i potenziali elementi a rischio.

Per analizzare il movimento di caduta, rimbalzo, rotolamento e/o scivolamento dei blocchi possono essere utilizzati differenti approcci, generalmente suddivisibili in modelli di tipo morfologico (o empirici) e modelli fisicamente basati (o cinematici).

Il presente lavoro, concentrandosi su una scala "medio-piccola", propone l'adozione di modelli cinematici, ossia che valutano il moto dei blocchi in modo analitico e descrivono il comportamento

del sistema considerando la fisica del moto, pur adottando ipotesi semplificative. Nonostante le incertezze associate ai modelli stessi, questi risultano infatti affidabili e robusti se vengono limitate le incertezze sugli scenari da considerare e sul valore dei parametri del moto che influenzano il comportamento. Pertanto, si osserva come lo studio del fenomeno e dell'area e la definizione di scenari realistici debbano essere effettuati ricercando la massima accuratezza. Lo studio dell'area deve essere anche mirato a minimizzare l'aleatorietà insita nella determinazione dei dati di input e, tra questi, dei parametri del moto. I dati di input solitamente richiesti sono:

- topografia dell'area ed eventuali ostacoli nel moto;
- localizzazione dell'area sorgente;
- proprietà geometriche e meccaniche del blocco;
- caratteristiche del terreno su cui potenzialmente impatta il blocco.

I modelli cinematici impiegati per descrivere il fenomeno di caduta massi generalmente richiedono, in vece delle caratteristiche del terreno, i valori dei parametri che permettono la descrizione dell'interazione blocco-terreno, come, a titolo di esempio, i coefficienti di restituzione normale e tangenziale. Questi ultimi sono i rapporti tra la velocità post- e pre-impatto di un blocco in direzione normale e tangenziale. Si osserva come questi parametri possono contenere incertezze sia legate al modello stesso (incertezza epistemica) che alla determinazione in sito di questi parametri (incertezza ontica). Per questo motivo, alcuni dati di input sono solitamente forniti in maniera probabilistica (e non deterministica) all'interno di un possibile range di valori; tanto più piccolo il range, maggiore è l'accuratezza del dato. Ne consegue che i risultati, ossia le traiettorie e i parametri cinematici (velocità, altezza), sono forniti in termini probabilistici. Proprio per tale motivo occorre parlare di "*probabilità di occorrenza spaziale*" ossia la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo (nel caso il transito di blocchi in caduta) si verifichi in una data area. Affinché i risultati siano rappresentativi del problema occorre quindi anche che il numero di simulazioni effettuate sia sufficientemente alto da costituire un campione statistico rappresentativo e comprendere il maggior numero di traiettorie che i blocchi possono intraprendere lungo il versante.

Riferendosi nello specifico ai modelli cinematici, quelli ad oggi impiegati sono suddivisibili in:

- rigorosi o "rigid body" (considerano il blocco con la sua propria forma e volume, considerano tutti i tipi di moto);
- stereomeccanici o "lumped-mass" (considerano la massa del blocco concentrata in un punto e spesso trascurano il moto di rotazione);
- ibridi.

Si osserva come spesso nei modelli rigorosi i parametri che permettono la descrizione dell'interazione blocco-terreno siano effettivamente rappresentativi delle caratteristiche del terreno su cui potenzialmente impatta il blocco e non debbano compensare quindi le semplificazioni dei modelli lumped-mass. In ultimo, i modelli possono essere bidimensionali, ossia la direzione del percorso di moto del blocco è univocamente definita, o tridimensionali, qualora si consideri l'intera topografia del versante.

Il presente lavoro, operando a “media-piccola scala” si avvale di un modello ibrido tridimensionale (vedasi il §7.2 per maggiori dettagli circa la tipologia di modello e i parametri di input adottati) per la valutazione della probabilità di occorrenza spaziale dell'intera area e di un modello lumped-mass bidimensionale per le analisi traiettografiche di dettaglio, volte ad investigare i parametri cinematici dei blocchi in caduta.

Per limitare le incertezze epistemiche, quando possibile, risulta opportuno calibrare e/o validare i valori adottati dai parametri. Una back-analysis mira a simulare nel migliore modo possibile un crollo osservato e a determinare da queste osservazioni i valori dei parametri che meglio rappresentano l'interazione suolo-blocco. Tale operazione presuppone però la conoscenza della zona di innesco, della volumetria, della presenza di eventuali interferenze lungo il percorso e della zona di arrivo di uno specifico evento di crollo per cui quindi si conosce la traiettoria. Nel caso di informazioni mancanti o di analisi su grande scala questo tipo di calibrazione non risulta sempre possibile.

L'utilizzo di un modello ibrido tridimensionale per analisi di propagazione che interessano l'intero versante presenta alcuni vantaggi, come di seguito elencato:

- un modello ibrido risulta particolarmente idoneo alla scala di versante in cui quindi la natura geometrica dei blocchi è varia e difficilmente puntualmente descrivibile;
- la tridimensionalità del modello permette inoltre di identificare tutti i percorsi dei blocchi maggiormente probabili, tenendo conto della topografia del sito stesso. Pertanto la risoluzione del modello digitale di elevazione che fornisce la base topografica di input incide notevolmente sulla bontà del risultato.

In merito allo scenario con cui condurre l'analisi, nel presente lavoro gli scriventi hanno adottato una volumetria desunta da osservazioni e misure. Questo ha permesso di valutare la probabilità che un evento di caduta massi si verifichi in una data area. Come dettagliatamente specificato al §5, per gli elementi potenzialmente a rischio considerato, il rischio di incidente fatale è indipendente dal volume



del blocco stesso. In questo ambito, quindi, risulta ampiamente giustificabile la definizione della probabilità di occorrenza spaziale, priva quindi del termine temporale.

4 ELEMENTI A RISCHIO

Gli elementi rappresentano l'oggetto di un'analisi di rischio. Si può affermare che alla presenza di un elemento è collegata l'esistenza di un rischio sullo stesso. In assenza di elemento il rischio è nullo. Volendo fare riferimento all'interazione tra il fenomeno di caduta massi e il mondo antropizzato, l'insieme degli "elementi a rischio" comprende – ma non è limitato a – tutti manufatti che possono essere localizzati su un versante montano. Questi sono rappresentati dalle infrastrutture di transito (strade asfaltate, strade sterrate, vie ferrate, rete sentieristica), dalle infrastrutture dei servizi (elettrodotti AT/MT, rete elettrica a BT, rete telefonica, acquedotto, fognature, canali irrigui) e dalle costruzioni (abitazioni, autorimesse, capannoni, industrie, edilizia a servizio dell'agricoltura).

La quantificazione del rischio può prendere in considerazione il grado di danno in termini di costo di riparazione di un bene danneggiato (rischio fisico), la perdita di vita umana e il danno in relazione all'utilità sociale del bene (rischio sociale), il disagio in merito alle attività coinvolte e al raggiungimento di queste (rischio economico).

La presente trattazione è riferita essenzialmente al rischio sociale, ossia la perdita di vita umana. Nella sua formulazione più generale, il rischio è il prodotto tra pericolosità, esposizione e danno (Fell, 1994). In riferimento al rischio sociale, termine dell'esposizione è proporzionale alla percentuale di tempo per la quale una persona è potenzialmente interessata dal fenomeno naturale. L'esposizione è una quantità compresa tra 0 e 1. Considerando per esempio una strada o un'infrastruttura di transito, è possibile affermare che per gli utenti che si muovono lungo la via di comunicazione la loro esposizione è limitata al solo periodo di transito. In altre parole, considerato che una strada non è costantemente percorsa da automezzi/ciclisti/pedoni, si può facilmente affermare che l'esposizione al pericolo di caduta massi è inferiore all'unità in quanto esistono dei momenti in cui la strada non è percorsa da nessuno. Occorre tuttavia prestare attenzione al fatto che il presente studio è finalizzato al calcolo del rischio sociale; qualora si fosse interessati al rischio economico derivante, per esempio, dall'impatto del blocco roccioso sul sedime, l'infrastruttura avrebbe esposizione unitaria.

Il precedente esempio ci fa comprendere che ci sono alcuni elementi in cui la presenza umana potrebbe essere continuativa, quali le abitazioni. In tale caso si parlerà di elemento con esposizione unitaria.

Nel presente lavoro sono considerati elementi con **esposizione non unitaria**, con particolare riferimento a strade interessate da traffico ciclo-pedonale. Le procedure per l'analisi di rischio di elementi con esposizione non unitaria sono riportate al §5. Le immagini riportate da Figura 1 a Figura 7 illustrano i tracciati considerati nell'ambito della presente.



Figura 1. Vista della porzione orientale della Strada Romana delle Gallie in corrispondenza dell'intersezione con la SS26.



Figura 2. Vista della porzione orientale della Strada Romana delle Gallie.



Figura 3. Vista della porzione della Strada Romana delle Gallie in corrispondenza della conoide di crollo.



Figura 4. Vista della porzione centrale della Strada Romana delle Gallie, con i ruderi di antiche costruzioni.



Figura 5. Vista della porzione occidentale della Strada Romana delle Gallie invasa dalla vegetazione.



Figura 6. Vista della Strada Romana delle Gallie e della viabilità locale (Altra strada) a valle.



Figura 7. Vista della viabilità locale (Altra strada) in salita verso l'abitato di Bard.

5 CALCOLO DEL RISCHIO PER ELEMENTI CON ESPOSIZIONE NON UNITARIA

5.1 Premessa metodologica

Il presente paragrafo tratta del calcolo del rischio su elementi con esposizione non unitaria, ossia sulle infrastrutture di transito, con particolare riferimento alle strade interessate da traffico ciclo-pedonale. Le metodologie proposte nel seguito si inquadrano all'interno delle procedure per la quantificazione del rischio (Corominas *et al.*, 2005; Ferrari *et al.*, 2016; Bunce *et al.*, 1997; Ferlisi *et al.*, 2012; Macciotta *et al.*, 2016, 2017). La scelta di differenziare gli elementi lineari da quelli puntuali è dettata dal fatto che i primi possono essere suddivisi in porzioni di lunghezza anche differente sulla base di una qualche caratteristica/proprietà quale, ad esempio, la probabilità spaziale di invasione del fenomeno di caduta massi. Tale possibilità è alla base delle metodologie sviluppate e dettagliatamente riportate nel seguito del presente capitolo.

Il rischio è espresso in termini di numero di vittime/anno o di probabilità annua che uno o più escursionisti/pedoni o ciclisti perdano la vita a seguito di un fenomeno di caduta massi. Le metodologie proposte nel seguito sono una implementazione di un approccio proposto dagli Autori per la rete sentieristica (Marchelli, 2020; Marchelli *et al.*, 2021).

Gli approcci proposti si basano sull'applicazione del metodo probabilistico dell'albero degli eventi (ETA, Event-Tree Analysis), che consiste nel definire e valutare tutte le possibili evoluzioni di un dato fenomeno naturale (o meno) partendo da un singolo evento iniziatore (nel presente caso, il distacco di un blocco di roccia). Partendo quindi dall'accadimento di un evento iniziatore (Mineo *et al.*, 2017), vengono analizzati tutti i possibili "percorsi", ossia vengono individuati tutti i possibili scenari, mappati come "ramificazioni" (o rami) di un albero, connessi tra loro mediante "nodi" (Peila e Guardini, 2008). I singoli rami permettono la transizione da un nodo all'altro lungo il percorso, definendo alternative binarie (Sì/No, ovvero Accade/Non Accade), fino al raggiungimento dello stato o effetto finale. A ciascun ramo è associata una probabilità. Essendo le alternative binarie mutuamente esclusive, la somma delle probabilità in uscita da ogni nodo è pari a 1. Questo metodo, analizzando tutte le combinazioni, ossia gli stati del sistema, permette di individuare tutte le possibili conseguenze e la loro probabilità di accadimento. I percorsi costruiti, mutuamente esclusivi, sono causati dal contemporaneo verificarsi di tutti gli eventi appartenenti ai rami dell'albero che li definiscono. Pertanto, considerando quindi un unico percorso, che conduce quindi ad un unico esito, la sua probabilità di accadimento è data dal prodotto delle probabilità associate ad ogni ramo di tale

percorso. Considerando invece il più percorsi, la loro probabilità risulterà pari alla somma delle probabilità del verificarsi di ciascun singolo percorso.

Per il fenomeno naturale in esame, l'evento di crollo (o distacco di un blocco) a cui è associata una frequenza media di accadimento (pari al numero medio di blocchi all'anno) o un tempo di ritorno (ossia la distanza temporale media tra due eventi successivi) è definito come "evento iniziatore". Considerato quindi il transito del blocco lungo il tratto di elemento lineare in esame e il passaggio di un pedone/ciclista come due eventi indipendenti, la probabilità che essi si verifichino contemporaneamente è data dal prodotto delle singole probabilità. Considerando tutti i possibili percorsi/scenari che conducono ad una fatalità (vittima), si possono così comporre i vari fattori e pervenire ad un valore di rischio (su base annua) relativo ad incidenti con esito mortale ad incidenti con esito non mortale. In virtù dello stesso principio, scomponendo per esempio una strada in parti omogenee, il rischio associato all'intero elemento a rischio (in termini di numero di vittime all'anno) è dato dalla somma dei rischi associati ad ogni singola parte. Similmente, considerando più scenari di crollo (tra loro statisticamente indipendenti), ossia provenienti da aree sorgenti differenti ma insistenti su uno stesso tratto di infrastruttura, è possibile sommare rischio associato a ciascuno dei singoli scenari di crollo per ottenere il rischio complessivo su quel tratto. Come successivamente dettagliato per ogni elemento a rischio, gli alberi degli eventi proposti sono applicabili ad ogni tipologia di crollo di massi, indipendentemente dal volume.

Si riportano ora delle considerazioni comuni a tutte le analisi di rischio descritte nel seguito del presente capitolo. In generale, un elemento lineare si sviluppa tra due specifici punti del territorio. È opportuno suddividere il percorso dell'elemento lineare in porzioni omogenee per aree sorgenti insistenti su esso e/o per condizioni di traffico. Tali frazioni sono definite con il nome di "porzioni" nel seguito della presente. Si anticipa che sarebbe bene che le porzioni abbiano lunghezza compresa tra 50 m e 100 m. Ogni porzione, a sua volta, è costituita da diverse "sotto-porzioni" omogenee per probabilità di occorrenza spaziale, ossia per probabilità di raggiungimento dei blocchi.

Nel caso più generale possibile, un tratto di strada può essere interessato da crolli provenienti da più di una zona sorgente, ossia da differenti pareti rocciose. Per la i -esima zona sorgente, il fenomeno iniziatore, ossia il distacco di un blocco di roccia dalla parete rocciosa, è caratterizzato da una frequenza annua di accadimento N_D^i espressa come numero di eventi in un determinato arco di tempo, solitamente su base annua. Le metodologie di seguito illustrate considerano il termine N_D come "numero di eventi all'anno". È doveroso ricordare che, qualora il numero di eventi all'anno sia esiguo, è possibile confondere la frequenza annua di accadimento con la probabilità annua di accadimento del crollo di roccia (distacco). In tale caso, questa sarà indicata come $P_{(D)}^i$, in riferimento alla i -esima

zona sorgente. Una volta distaccatisi, i blocchi possono raggiungere l'elemento a rischio con una certa probabilità $P_{(T,D)}^i$. Tale probabilità è stimata mediante analisi di propagazione del fenomeno. I blocchi che si arrestano lungo il pendio non causano invece danno.

Il calcolo del rischio presuppone che sia nota la frequenza degli eventi iniziatori, ossia il numero annuo di distacchi dalle pareti rocciose. A causa dell'impossibilità di monitorare in maniera sufficientemente dettagliata il versante e per l'ampiezza dell'arco temporale necessario per una robusta analisi statistica, il numero annuo di distacchi da ciascuna area sorgente è un'informazione nella pratica impossibile da ottenere, se non per limitati e specifici casi (ad esempio quando la parete scarica direttamente sull'elemento a rischio).

Per ovviare a tale inconveniente, il gruppo di ricerca ha sviluppato una procedura semplificata che prende in considerazione solo gli eventi che possono interessare l'elemento a rischio, indipendentemente dal numero di aree sorgente presenti. Tale procedura è coerente con le informazioni temporali che sono contenute nel catasto dei dissesti che le Pubbliche Amministrazioni costantemente aggiornano, dove si tiene traccia dell'istante di crollo e delle volumetrie che hanno interessato ogni infrastruttura.

Individuate le possibili zone sorgenti insistenti su un elemento a rischio e valutata la frequenza media degli eventi che si sono verificati in passato (e che potranno verificarsi in futuro) e che hanno raggiunto l'elemento a rischio, è possibile individuare una frequenza di crollo specifica, eventualmente diversificata per tratti. Nel seguito è definito con il termine “tratto” l'intero percorso dal punto iniziale al punto finale del percorso.

Per meglio illustrare la procedura semplificata si consideri lo schema riportato in Figura 8. In alto è indicata una mappa della probabilità di raggiungimento a partire da un'area sorgente del fenomeno di crollo. In prossimità della zona di distacco le probabilità di raggiungimento sono maggiori e decrescono via a via che ci si allontana dalla sorgente. Le linee di isoprobabilità di raggiungimento riportate in nero identificano dei campi di colore differente. In blu scuro è riportato il tracciato dell'infrastruttura. Sono identificati con le lettere da A a H i punti di intersezione dell'elemento a rischio con le linee di isoprobabilità 0%, 1% e 5%. A sinistra del punto B (A-B) la probabilità di invasione è nulla, così come a destra del punto G. (G-H).

Dall'informazione disponibile al catasto dissesti si evince che il numero annuo di eventi di crollo che hanno raggiunto l'intero tracciato dell'infrastruttura (ossia quindi il “tratto” tra A e H) è pari a N_R .

Il tratto viene a sua volta suddiviso in porzioni omogenee per aree sorgenti e condizioni di traffico di lunghezza compresa tra 50 e 100 m (e.g. A-C, C-E, E-H).

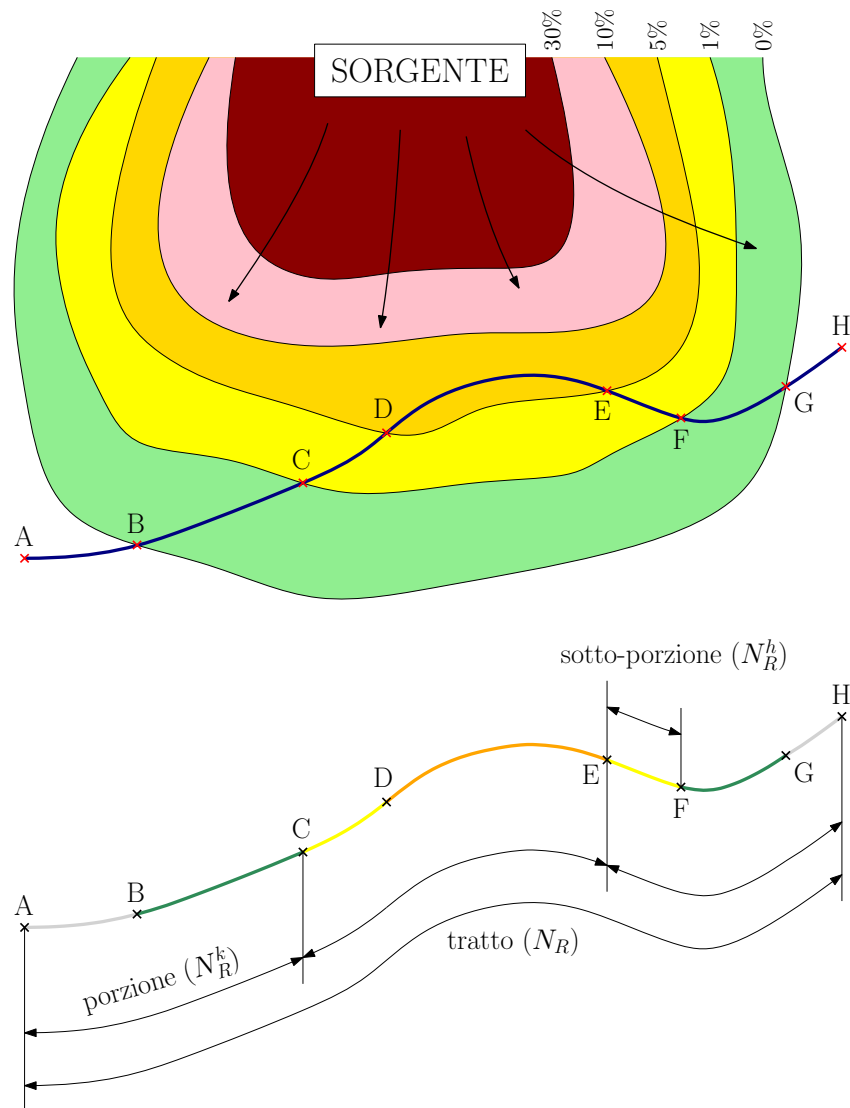


Figura 8. In alto è riportato uno schema di una porzione di territorio su cui insiste un pericolo di caduta massi a partire da una sorgente opportunamente identificata. Sono indicate le probabilità di raggiungimento. In basso è riportato lo schema sintetico del tratto di strada con indicate, per scala di colore, le probabilità spaziali di invasione.

La Figura 8 mostra come ogni porzione sia a sua volta scomponibile in sotto porzioni aventi stessa probabilità di raggiungimento. A titolo di esempio, la sotto-porzione compresa tra i punti D e E è caratterizzata da una probabilità di invasione maggiore della sotto-porzione, ad esempio, compresa tra i punti E e F. Si può dedurre che, a parità di lunghezza, il numero annuo di eventi sulla sotto-porzione CD è maggiore del numero di eventi sulla sotto-porzione EF visto che, se crollano, i blocchi hanno maggiore probabilità di raggiungere la prima (CD).

Sulla base di questa semplice considerazione, noto il numero annuo di eventi di crollo N_R che raggiungono l'elemento a rischio (nel suo complesso), è possibile attribuire alla h -esima sotto-porzione una frequenza specifica calcolata come

$$N_R^h = \frac{P_{(T:D)}^h \ell_h}{\sum_{h=1}^n P_{(T:D)}^h \ell_h} N_R \quad (5.1)$$

dove $P_{(T:D)}^h$ e ℓ_h sono, rispettivamente, la probabilità spaziale di invasione e la lunghezza della h -esima sotto-porzione. La sommatoria a denominatore è estesa alle n sotto-porzioni che compongono il tratto di elemento a rischio. L'Eq. (5.1) nient'altro è che una distribuzione del valore N_R pesata per il termine $P_{(T:D)}^h \ell_h$.

In riferimento alla k -esima porzione, a sua volta composta da m sotto-porzioni, risulta:

$$N_R^k = \frac{\sum_{h=1}^m P_{(T:D)}^h \ell_h}{\sum_{h=1}^n P_{(T:D)}^h \ell_h} N_R \quad (5.2)$$

Per esempio, in riferimento al caso riportato in Figura 8, è possibile valutare il numero di eventi sulla porzione CE come

$$N_R^{CE} = \frac{P_{(T:D)}^{CD} \ell_{CD} + P_{(T:D)}^{DE} \ell_{DE}}{P_{(T:D)}^{AB} \ell_{AB} + P_{(T:D)}^{BC} \ell_{BC} + P_{(T:D)}^{CD} \ell_{CD} + P_{(T:D)}^{DE} \ell_{DE} + P_{(T:D)}^{EF} \ell_{EF} + P_{(T:D)}^{FG} \ell_{FG} + P_{(T:D)}^{GH} \ell_{GH}} N_R \quad (5.3)$$

Nel seguito sono dettagliatamente descritti i diagrammi ad albero (ETA) per gli elementi a rischio identificati al precedente §4. Per l'applicazione di questa metodologia si rimanda al §7.3 della presente.

5.2 Metodo ETA per tracciato con viabilità pedonale

La letteratura scientifica tratta in maniera molto poco estesa il problema del rischio dovuto a caduta massi per escursionisti in transito lungo un tracciato lungo un versante su cui sussiste tale pericolo naturale. Un esempio di calcolo del rischio per persone in transito a piedi su sentiero è riportato in Ansari *et al.* (2014). La metodologia proposta dal gruppo di ricerca per la stima del rischio lungo tale tipologia di infrastrutture è riconducibile allo schema di albero degli eventi, come di seguito illustrato. Qualora la traiettoria del blocco in fase di crollo raggiunga un percorso pedonale, il blocco può colpire, o meno, un pedone. Diversamente da quanto riportato per le infrastrutture su cui transitano autoveicoli (Marchelli *et al.*, 2021), il pedone nel momento del transito del blocco può essere fermo o in movimento. Nel caso, invece, in cui il blocco non colpisca il pedone, è possibile che si arresti sul tracciato o che rimbalzi. In entrambi questi ultimi casi il pedone non è direttamente coinvolto dal fenomeno, quindi non sono trattati nello studio del rischio. Lo schema concettuale alla base delle precedenti considerazioni è riportato in Figura 9. La necessità di differenziare tra pedone in movimento e in sosta permette di generalizzare la metodologia a qualsivoglia tracciato in cui sono presenti aree di sosta o zone panoramiche.

Occorre precisare che il metodo proposto assume che l'albero di eventi precedentemente esposto sia applicabile ad ogni tipologia di crollo di massi. In altre parole, non si prende in considerazione l'effetto del volume sui possibili scenari che si potrebbero generare (differenziando l'albero in funzione del volume). Questa assunzione trova giustificazione nel fatto che la vulnerabilità di un pedone è unitaria e indipendente dal blocco. Pertanto, il numero di eventi all'anno tiene in considerazione il distacco di blocchi di qualsivoglia volume.

Definite le varie probabilità dei nodi dell'albero degli eventi, vedasi la Figura 10, è possibile determinare la probabilità finale di ciascun scenario, identificato dal percorso creato dai rami lungo l'albero, moltiplicando le probabilità dei singoli rami costituenti il percorso considerato. Considerando che il tratto di percorso pedonale è diviso in porzioni omogenee, la probabilità totale relativa a tutti i percorsi con stesso esito (ad esempio, incidente con vittima) della porzione di percorso pedonale analizzata è calcolata quale la somma delle singole probabilità (Marchelli, 2020).

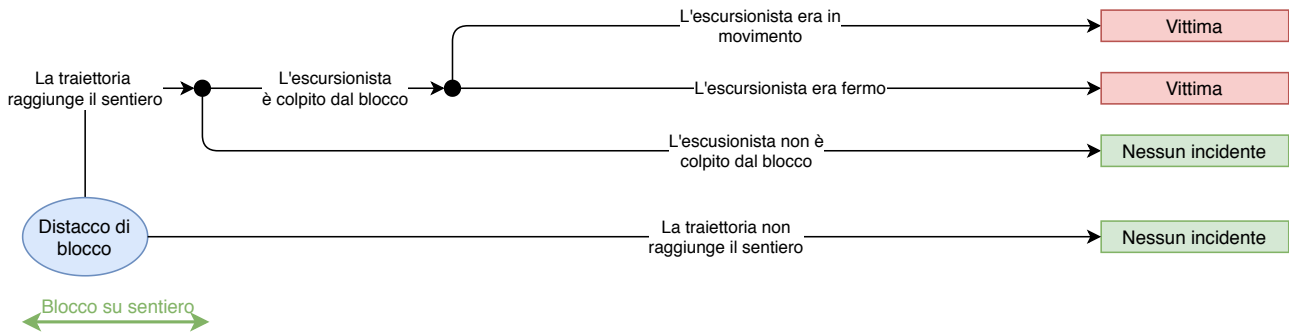


Figura 9. Albero degli eventi semplificato a seguito dell'arrivo di un blocco sulla viabilità pedonale.

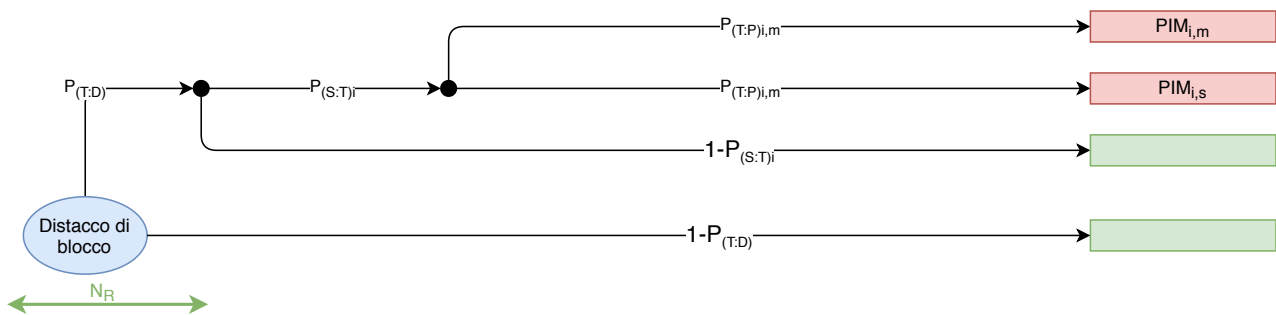


Figura 10. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 9. L'indice superiore relativo alla j -esima condizione di traffico non è riportato per questioni di chiarezza.

È possibile valutare la probabilità di incidente con vittima sulla k -esima porzione come la somma

$${}^kPIM = PIM_i, \quad (5.4)$$

dove PIM_i è la probabilità di vittima a seguito dell'impatto tra blocco in movimento e il pedone. Tale valore niente altro è che la somma di due differenti scenari di impatto, come di seguito descritto. Il valore di probabilità varia da porzione a porzione; non si è aggiunto l'apice k per non appesantire ulteriormente la notazione.

Tale probabilità kPIM è direttamente legata all'accadimento dell'evento iniziatore, ossia il distacco del blocco. Visto che la propagazione del fenomeno è associata alla sorgente di crollo, è opportuno distinguere il valore di probabilità di vittima in funzione della sorgente, ossia utilizzando il simbolo ${}^kPIM^i$, dove, come già riportato, la i è l'indice relativo alla sorgente del fenomeno di caduta massi e la k è l'indice relativo alla porzione. Considerando che nell'arco di un anno avviene dalla i -esima sorgente un numero N_D^i di eventi, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno sulla k -esima porzione almeno una vittima a seguito di incidente dovuto ad un crollo generato dalla i -esima sorgente come:

$${}^k P_{vittima}^i = 1 - (1 - {}^k PIM^i)^{N_D^i}. \quad (5.5)$$

Si specifica che, in linea teorica, se si disponesse dei dati relativi a N_D^i , il numero annuo di eventi N_R per i quali il blocco raggiunge l'intero tratto di percorso pedonale, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile in accordo con l'Eq. (5.6) e il numero annuo di eventi N_R^k per i quali il blocco raggiunge la k -esima porzione di percorso pedonale, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile in accordo con l'Eq. (5.7).

La probabilità annua di avere almeno una vittima sulla k -esima porzione di tracciato omogenea sarà pertanto valutata come:

$${}^k P_{vittima} = \sum_i {}^k P_{vittima}^i, \quad (5.6)$$

estendendo la sommatoria a tutte le aree sorgente che insistono sulla porzione considerata.

Considerando l'assunzione di $P_{(D)}^i \approx N_D^i$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$${}^k P_{vittima} = \sum_i P_{(D)}^i \cdot {}^k PIM^i. \quad (5.7)$$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogenea, ossia

$$P_{vittima} = \sum_k {}^k P_{vittima}. \quad (5.8)$$

Si analizza nel dettaglio lo scenario di interazione tra fenomeno di caduta massi e traffico di escursionisti lungo il percorso pedonale. È opportuno sottolineare ancora una volta che la probabilità che il blocco distaccatosi dalla i -esima area sorgente interagisca con il percorso pedonale è pari a $P_{(T:D)}^i$.

Nel seguito sarà descritto il calcolo del contributo PIM_i dell'Eq. (5.45) che compone la probabilità di rischio mortale per evento di crollo.

5.2.1 *Impatto tra blocco in fase di crollo e pedone*

Tale paragrafo dettaglia il calcolo della probabilità di vittima a seguito di impatto tra blocco in movimento e pedone (pedice i nelle formule che seguono). Affinché si verifichi tale scenario è necessaria la contemporanea presenza del blocco in fase di crollo e del pedone. Tale contemporaneità deve avvenire sia nel tempo (ovvero il blocco deve cadere mentre il pedone transita nel tratto pericolo)

che nello spazio (ossia la persona che transita nel tratto pericoloso deve proprio trovarsi in corrispondenza della traiettoria del blocco in moto). La probabilità spazio-temporale che un pedone sia colpito da un blocco in moto, denominata nel seguito come $P_{(S:T),i}$ è funzione del tempo necessario al pedone a percorrere la porzione pericolosa e dalla numerosità di transiti. Nel caso di percorsi pedonali in cui il traffico è variabile sia nelle varie ore del giorno, che durante i mesi dell'anno, è possibile calcolare il rischio sulla base di differenti condizioni di traffico. Definita quindi la j -esima condizione di traffico (in termini di numero di pedoni per unità di tempo), si può ricavare la probabilità spazio-temporale $P_{(S:T),i}^j$ come prodotto tra la probabilità temporale che un pedone stia transitando sul percorso pedonale nello stesso istante in cui il blocco transita, $P_{(T:P),i}^j$, e la probabilità spaziale che la persona sia sulla traiettoria del blocco, $P_{(S:P),i}^j$:

$$P_{(S:T),i}^j = P_{(T:P),i}^j \cdot P_{(S:P),i}^j. \quad (5.9)$$

I singoli valori di $P_{(T:P),i}^j$ e di $P_{(S:P),i}^j$ sono relativi allo scenario “il pedone è colpito dal blocco” lungo tutto l'anno. Tali valori sono desumibili dalla probabilità spazio-temporale relativa al singolo pedone (pedice 1 nelle formule che seguono), moltiplicata per il traffico orario (numero di transiti all'ora) $n_{v/h}^j$ e il numero annuo di ore n_h^j in cui si verifica tale condizione di traffico. Si ottiene così la probabilità che, a seguito dell'evento, vi sia collisione tra blocco e pedone come:

$$P_{(S:T),i}^j = P_{(T:P),i,1}^j \cdot P_{(S:P),i,1}^j \cdot n_{v/h}^j \cdot n_h^j. \quad (5.10)$$

La probabilità spaziale di un singolo pedone è ricavabile da:

$$P_{(S:P),i,1}^j = \frac{L_e}{\ell_k}, \quad (5.11)$$

dove L_e è lo spazio occupato dalla persona trasversalmente alla linea di massima pendenza del pendio (generalmente assumibile nell'intervallo 0.6 m – 1.0 m) e ℓ_k la lunghezza della porzione di percorso pedonale considerata. Nel dettaglio, la probabilità temporale di un singolo pedone (pedice 1) $P_{(T:P),i,1}^j$ è data dal rapporto tra il tempo in ore per il quale il singolo pedone si trova nella porzione considerata e il numero annuo di ore (8760 in totale). In particolare è possibile distinguere tra due scenari: pedone in movimento e pedone fermo. Nel primo caso, l'informazione temporale da utilizzarsi è rappresentata dal tempo di transito valutato a partire dalla velocità media lungo la porzione di tracciato considerata. Risulta quindi che:

$$P_{(T:P)i,1}^j = P_{(T:P)i,m,1}^j = \frac{t_t}{8760}, \quad (5.12)$$

dove t_t rappresenta il tempo di transito (espresso in ore) del pedone lungo la porzione. Nel secondo caso, ossia pedone fermo, l'informazione temporale da utilizzarsi è rappresentata dal tempo di sosta, ossia risulta:

$$P_{(T:P)i,1}^j = P_{(T:P)i,s,1}^j = \frac{t_s}{8760}, \quad (5.13)$$

dove t_s rappresenta il tempo di sosta (espresso in ore) lungo la specifica porzione di percorso pedonale.

In relazione alle proprietà prima espresse, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-pedone in movimento per evento di crollo a partire dalla i -esima zona sorgente e con la j -esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_{i,m}^{ij} = P_{(T:D)}^i \cdot P_{(T:P)i,m,1}^j \cdot P_{(S:P)i,1}^j \cdot n_{v/h}^j \cdot n_h^j. \quad (5.14)$$

In relazione alle proprietà prima espresse, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-pedone in sosta per evento di crollo a partire dalla i -esima zona sorgente e con la j -esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_{i,s}^{ij} = P_{(T:D)}^i \cdot P_{(T:P)i,s,1}^j \cdot P_{(S:P)i,1}^j \cdot n_{v/h}^j \cdot n_h^j. \quad (5.15)$$

Le due probabilità possono essere sommate ottenendo la probabilità di incidente mortale per impatto masso-pedone a partire dalla i -esima zona sorgente e con la j -esima condizione di traffico:

$$PIM_i^{ij} = PIM_{i,m}^{ij} + PIM_{i,s}^{ij}. \quad (5.16)$$

Considerate le differenti condizioni di traffico, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-pedone per evento di crollo a partire dalla i -esima zona sorgente risulta:

$$PIM_i^i = \sum_j PIM_i^{ij} = P_{(T:D)}^i \sum_j \left(P_{(T:P)i,m,1}^j + P_{(T:P)i,s,1}^j \right) \cdot n_{v/h}^j \cdot n_h^j, \quad (5.17)$$

ossia la sommatoria è estesa alle condizioni di traffico.

5.2.2 Albero degli eventi semplificato

Come illustrato al §5.1, il dato relativo al numero di distacchi in parete potrebbe non essere disponibile in fase di redazione dell'analisi di rischio in quanto tale informazione non è di facile

reperimento su tutte le pareti e richiede un monitoraggio del territorio di lunga durata. Inoltre, studi specifici circa la cosiddetta propensione al distacco devono essere adeguatamente calati alla realtà che si sta studiando e, quindi, potrebbero risultare non sempre applicabili a tutti i casi. Si possiedono, invece, usualmente, molte più informazioni circa i massi che hanno interessato direttamente la via di transito. Tali informazioni sono fornite dai gestori della rete sentieristica e dagli utilizzatori della stessa. È quindi possibile modificare l'albero di eventi presentato in Figura 9 inglobando le precedenti considerazioni. La Figura 11 e la Figura 12 riportano l'albero di eventi semplificato e la nomenclatura relativa alle probabilità. Lo schema ha origine dall'evento "Blocco su sentiero", intendendo un generico percorso pedonale.

L'evento iniziatore è caratterizzato da una frequenza annua di accadimento N_R^k , come riportato nell'Eq. (5.2). Relativamente alla differenziazione relativa alle aree sorgente, nel caso semplificato tale valutazione non è necessaria. Analogamente a quanto precedentemente esposto, qualora il numero di eventi all'anno sia esiguo, è possibile confondere la frequenza annua di accadimento con la probabilità annua di accadimento di un blocco su percorso pedonale. In tale caso, questa sarà indicata come $P_{(R)}^k$. Anche nel caso di albero di eventi semplificato restano valide le considerazioni di omogeneità dei tratti da scegliere, precedentemente esposte per il caso generale, per la valutazione quantitativa del rischio.

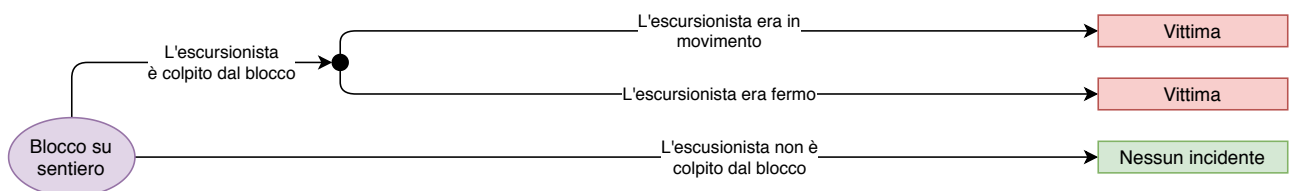


Figura 11. Albero degli eventi semplificato a seguito dell'arrivo di un blocco sul sentiero.

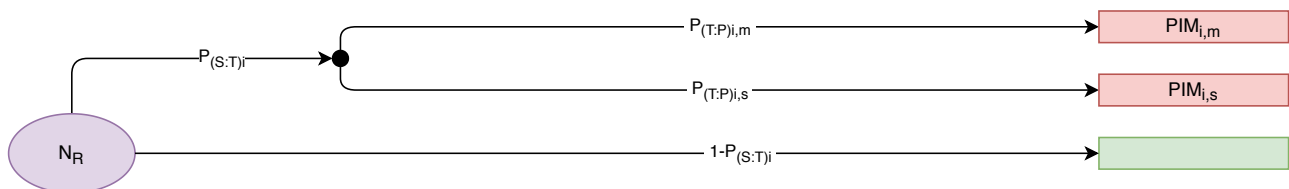


Figura 12. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 11. L'indice superiore relativo alla j -esima condizione di traffico non è riportato per questioni di chiarezza.

Essendo inalterato lo sviluppo dell'albero a valle del blocco su porzione di percorso pedonale, sulla base delle considerazioni precedentemente riportate circa la condizione di marcia del pedone (in sosta

o in movimento), è possibile pervenire alle probabilità di vittima a seguito di impatto con pedone come:

$${}^kPIM = \sum_j \left(P_{(T:P)i,m,1}^j + P_{(T:P)i,s,1}^j \right) \cdot n_{v/h}^j \cdot n_h^j. \quad (5.18)$$

In riferimento alla k -esima porzione, in accordo a quanto precedentemente esposto, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno almeno una vittima a seguito di incidente dovuto ad un blocco su percorso pedonale come:

$${}^kP_{vittima} = 1 - (1 - {}^kPIM)^{N_R^k}. \quad (5.19)$$

Considerando l'assunzione di $P_{(R)}^k \approx N_R^k$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$${}^kP_{vittima} = P_{(R)}^k \cdot {}^kPIM. \quad (5.20)$$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogeneo, ossia

$$P_{vittima} = \sum_k {}^kP_{vittima}. \quad (5.21)$$

5.3 Metodo ETA per tracciato con viabilità ciclabile

Relativamente a questa casistica si rimanda per intero a quanto espresso nel §5.2, evidenziando però che la probabilità spaziale di un singolo ciclista è ricavabile da:

$$P_{(S:P)i,1}^j = \frac{L_c}{\ell_k}, \quad (5.22)$$

dove L_c è lo spazio occupato dal ciclista trasversalmente alla linea di massima pendenza del pendio (ragionevolmente assunta pasri a 1.8 m) e ℓ_k la lunghezza della porzione di sentiero considerata.

6 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI CINEMATICI DEI BLOCCHI IN CADUTA

Il presente capitolo della relazione intende fornire gli strumenti utili per un'analisi di propagazione di dettaglio al fine di quantificare i parametri cinematici dei blocchi in caduta ed, eventualmente, pianificare gli interventi di mitigazione del rischio.

In merito alla metodologia adottata per le analisi di propagazione condotte si rimanda al §3.2.2 della presente relazione e al §7.2 per la sua applicazione al caso studio. Per la valutazione dei parametri cinematici di interesse, occorre calcolare l'energia e le altezze di transito associate al fenomeno nella posizione in cui s'intende realizzare eventuali interventi di mitigazione e/o nella posizione in cui si collocano gli elementi a rischio.

In merito alla valutazione dell'intensità, la quantificazione dell'energia di arrivo è funzione della volumetria d'innesco del blocco, scelta in fase di definizione dello scenario, oltre che delle caratteristiche della topografia e della tipologia della superficie su cui impatta.

La scelta della volumetria d'innesco risulta spesso un'operazione complessa. Una volta individuate le possibili volumetrie occorre effettuare analisi di propagazione mirate, mediante modelli numerici fisicamente basati che si avvalgono di approcci statistico-probabilistici.

Tra i modelli di calcolo delle traiettorie, quelli di tipo lumped-mass, benché semplificati in quanto non permettono di considerare la geometria del blocco e il moto rotatorio sia valutato in maniera semplificata, risultano particolarmente utili per operare alla scala di dettaglio. Questi modelli, basandosi sull'equazione del moto di tipo parabolico (blocco in caduta) e di scivolamento, restituiscono traiettorie e parametri cinematici (velocità e altezza di volo) indipendenti dalla massa. Pertanto, note la velocità nel punto in esame, è possibile quantificare l'energia cinetica per differenti volumetrie come:

$$E_k = \frac{1}{2} m_k v_k^2 \quad (6.1)$$

dove m_k e v_k sono i valori caratteristici della massa (funzione del volume scelto) e della velocità del blocco.

La normativa italiana (D.M. 17 febbraio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni») non effettua una specifica trattazione della tematica, pertanto, relativamente ai valori caratteristici e di progetto, la norma italiana UNI 11211-4 (2018) fornisce utili raccomandazioni per

il calcolo dei parametri di impatto sulle opere paramassi passive (Par. 5.3), di cui si rimanda al §6.1.1 della presente.

Alla luce di quanto espresso, per la valutazione dell'energia a media scala la metodologia proposta suggerisce di effettuare una o più analisi traiettografiche bidimensionali lumped-mass su direttrici ritenute particolarmente significative e valutare su queste la velocità e l'altezza di transito del blocco in corrispondenza di specifici punti. Queste quantità sono fornite in termini di valori caratteristici che, come evidenziato al §6.1.1 della presente, sono i valori i corrispondenti al frattile 95% della distribuzione di probabilità.

Dalla combinazione di questi risultati con le considerazioni del legame volume d'innesco/tempo di ritorno sulla determinata area si possono ricavare le energie di progetto. In aggiunta occorre determinare l'altezza di transito h_k , il cui valore caratteristico corrisponde al frattile 95% della distribuzione di probabilità.

Le direttrici devono prendere in considerazione le aree a maggiore pericolosità, identificate dalle analisi di propagazione tridimensionali, scegliendo il percorso di caduta più probabile in funzione della topografia del sito.

In funzione di questi risultati, adottando i coefficienti amplificativi suggeriti dalla norma UNI 11211-4 (2018) e riportati al §6.1.1 della presente, è possibile calcolare l'energia di impatto di progetto e, successivamente, condurre le analisi di rischio relative.

6.1.1 Norma UNI 11211-4:2018: parametri di impatto

Si riporta ora uno stralcio della norma UNI 11211-4:2018, utile a fornire indicazioni per la valutazione dell'energia di impatto e le altezze di calcolo. La velocità di progetto dei blocchi v_d è calcolata come:

$$v_d = v_k \gamma_F \quad (6.2)$$

dove v_k è definita come la velocità in corrispondenza del punto considerato corrispondente al frattile 95% delle velocità calcolate nelle analisi traiettografiche, mentre γ_F è il coefficiente di amplificazione, espresso come $\gamma_F = \gamma_{Tr} \gamma_{Dp}$, dove γ_{Tr} è il coefficiente di affidabilità del calcolo delle traiettorie (1,02 per simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione – o altri parametri eventualmente richiesti – ottenuti da analisi a ritroso e 1,10 per simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione – o altri parametri eventualmente richiesti – ottenuti da sole informazioni bibliografiche), mentre γ_{Dp} è il coefficiente che tiene conto della qualità della discretizzazione

topografica del pendio (1,02 per pendii discretizzati con buona precisione in rapporto alle caratteristiche del sito, 1,10 per una discretizzazione medio bassa).

Relativamente alla massa di progetto m_d , questa è calcolata come:

$$m_d = V_b \rho \gamma_m \quad (6.3)$$

dove V_b è il volume del blocco di progetto, ρ è la massa per unità di volume della roccia in posto, γ_m è il coefficiente di amplificazione della massa espresso come $\gamma_m = \gamma_{VolF1} \gamma_\psi$, dove γ_{VolF1} è il coefficiente legato alla precisione del rilievo del volume del blocco di progetto (1,02 per rilievi accurati, 1,10 in assenza di rilievi accurati), mentre γ_ψ è il coefficiente legato alla valutazione della massa per unità di volume della roccia (generalmente assunto pari a 1).

Relativamente alle altezze di progetto si ha che:

$$h_d = h_k \gamma_F \quad (6.4)$$

dove h_k è definita come l'altezza di transito del blocco in corrispondenza del punto considerato corrispondente al frattile 95% delle altezze calcolate nelle analisi traiettografiche.

Si precisa come questo valore sia riferito al baricentro del blocco e che quindi, per la quantificazione dell'altezza di intercettazione di un'eventuale opera di mitigazione, sia necessario aggiungere un franco pari ad almeno metà della dimensione caratteristica del blocco e non minore di 50 cm.

6.1.2 Analisi traiettografiche bidimensionali

Come espresso nel §6, le simulazioni preliminari per la valutazione dell'energia devono essere impostate su sezioni trasversali al versante ritenute particolarmente significative. Per la progettazione vera e propria di interventi di mitigazione, ulteriori analisi potrebbero essere necessarie sulla base dei rilievi specificatamente integrati dai progettisti incaricati, eventualmente anche su altre direttrici. Il codice di calcolo suggerito per queste analisi si avvale di un modello di moto bidimensionale e comportamento di tipo lumped-mass.

Nei codici di calcolo tradizionali di tipo lumped-mass il coefficiente di restituzione tangenziale e il coefficiente di restituzione normale sono i coefficienti rappresentativi dell'interazione suolo-blocco. Questi rappresentano fisicamente rispettivamente il rapporto tra la velocità dopo e prima che il masso rimbalzi al suolo, in direzione tangenziale e normale. Altro parametro risulta il coefficiente di attrito, che regola il moto traslatorio del blocco. I coefficienti di restituzione, in questo caso, devono essere rappresentativi del tipo di suolo su cui il blocco impatta, del tipo di roccia del blocco che impatta, ma

devono anche essere calibrati per racchiudere al loro interno le ipotesi semplificative che il modello implementato nel codice presenta (e.g. assenza di rotolamento).

Ai fini della simulazione occorre valutare i seguenti parametri geomeccanici di input:

- base topografica di input: in funzione del rilievo di dettaglio a disposizione;
- velocità di caduta iniziale;
- tipologia delle sorgenti di distacco: puntuali e/o lineari;
- densità della roccia;
- numero di simulazioni simulazioni per ogni sorgente di distacco: queste devono costituire un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzi l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello;
- il codice di calcolo di tipo lumped-mass prevedono generalmente l'assenza di fenomeni di frantumazione dei blocchi;
- il codice di calcolo di tipo lumped-mass prevedono generalmente si avvale del metodo probabilistico Montecarlo per la determinazione dei parametri, ovvero il coefficiente di restituzione normale R_n , il coefficiente di restituzione tangenziale R_t e angolo di attrito al rotoscivolamento ϕ . Per la determinazione di questi ultimi occorre effettuare un'analisi quanto più accurata delle caratteristiche del terreno e dell'interazione blocco-terreno e, qualora possibile effettuare una calibrazione e/o validazione dei parametri scelti.

7 CASO STUDIO

Il caso studio relativo al presente contratto di ricerca è rappresentato dalla porzione di territorio localizzata nel versante sinistro della Valle d'Aosta, nel Comune di Bard, tra il forte e l'abitato di Donnas. L'area si estende da una quota di circa 325 m s.l.m. (quota della viabilità locale al piede della parete rocciosa, definita come "Altra Strada") fino alla quota compresa tra 500 e 640 m s.l.m. (sommità delle pareti rocciose), come riportato nella Figura 13.

L'area copre un'estensione di circa 29 ettari. Come meglio dettagliato nel seguito della presente, sull'area insistono numerose pareti rocciose, anche di notevole dimensione, mentre gli elementi a rischio considerati sono le due strade a valle delle stesse: la Strada Romana delle Gallie e l'Altra Strada.

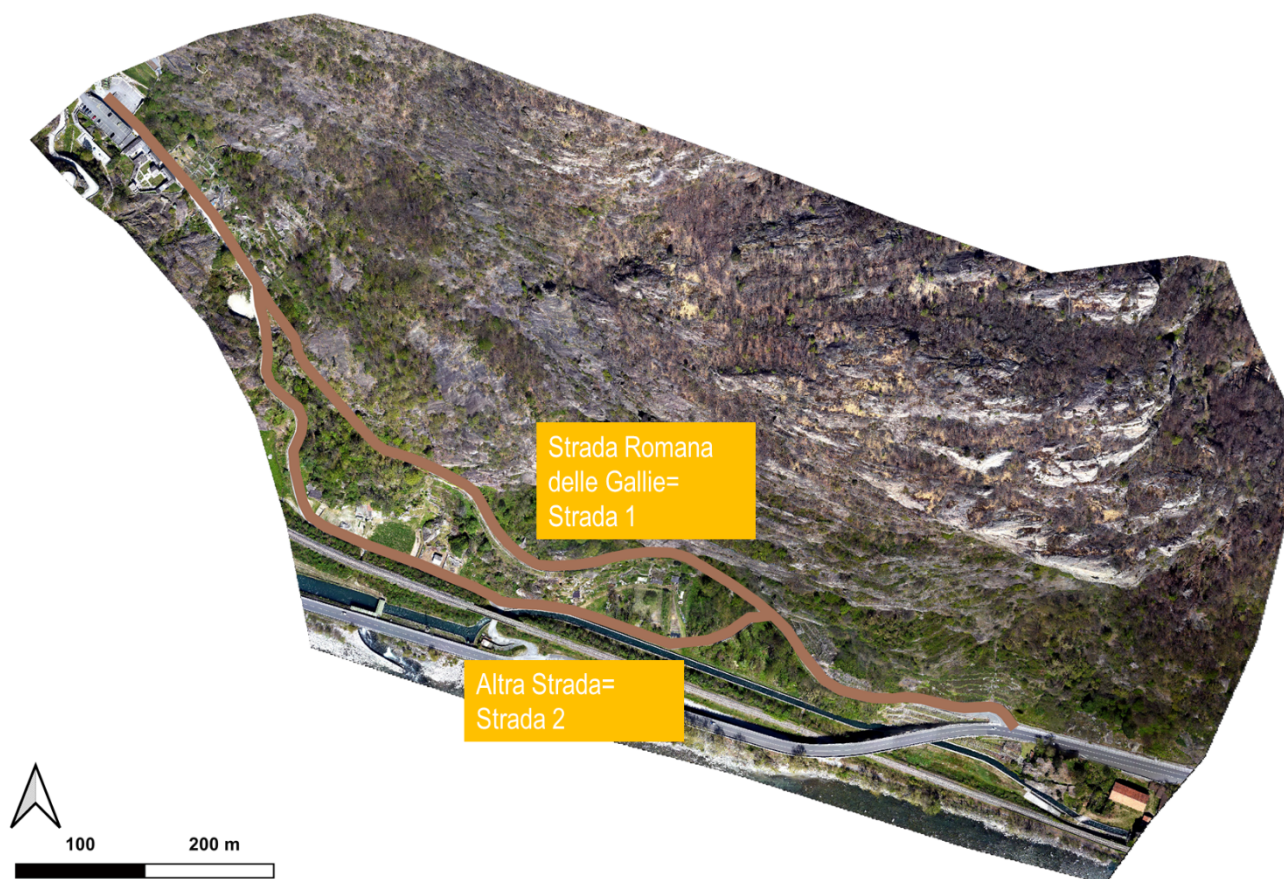


Figura 13. Localizzazione dell'area studio.

7.1 Identificazione del fenomeno, individuazione delle aree sorgenti e dei loro volumi (scenari)

L'individuazione delle aree sorgenti e dei volumi potenzialmente coinvolti è avvenuta attraverso le seguenti modalità operative:

- studio della documentazione cartografica e relazioni a disposizione, in grado di fornire informazioni geologiche, litologiche, idrogeologiche, geomorfologiche e dei dissesti dell'area. La documentazione presente sul Geoportale Regionale¹ è stata integrata con le risultanze dello studio condotto da IMAGEO e riportato nell'elaborato “Rilievo laser scanner di siti nei Comuni di Bard, Donnas e Pontboset nell'ambito delle valutazioni preliminari agli interventi di difesa della Strada Romana delle Gallie e del capoluogo di Pontboset, per il periodo 15/03/2021 – 31/12/2021. Risultati area di Bard – Rapporto tecnico” del 15/03/2021 e relativi allegati. Le risultanze della caratterizzazione geologica-geomorfologica sono riassunte al §7.1.1 della presente, mentre le risultanze dell'analisi storica degli eventi pregressi sono individuabili al §7.1.2;
- rilievi in situ finalizzati allo studio dell'area. In particolare sono stati condotti rilievi in data 06/10/2021, 22/03/2022 e 5/05/2022, finalizzati all'individuazione delle pareti potenzialmente sorgenti d'innescio, alla valutazione qualitativa delle condizioni geostutturali delle pareti stesse, allo studio della tipologia di terreno presente, della pezzatura e disposizione degli eventuali blocchi, alle evidenze di crolli presenti e rilievi dei blocchi al piede, così come meglio specificato al §7.1.1 della presente;
- studio delle risultanze delle analisi condotte da IMAGEO S.R.L., ossia delle elaborazioni dei rilievi fotogrammetrici e laser scanner delle porzioni rocciosi condotte in termini di ortofoto planimetriche e frontali delle pareti, e di caratterizzazione geomeccanica delle pareti, così come riportato nell'elaborato “Rilievo laser scanner di siti nei Comuni di Bard, Donnas e Pontboset nell'ambito delle valutazioni preliminari agli interventi di difesa della Strada Romana delle Gallie e del capoluogo di Pontboset, per il periodo 15/03/2021 – 31/12/2021. Risultati area di Bard – Rapporto tecnico” a cura di IMAGEO del 15/03/2021 e relativi allegati.

¹ <http://geoportale.regione.vda.it/> e <http://catastodissesti.partout.it/>

7.1.1 Caratterizzazione geologica-geomorfologica e dei dissesti

Come riportato nello studio di IMAGEO precedentemente citato, le rocce del versante in studio appartengono alla Zona Sesia-Lanzo, Unità Interna, anche nota in letteratura come “Complesso dei Micascisti eclogitici”. Nel dettaglio dell’area di indagine, affiorano rocce granitoidi eclogitiche e porfirici.

I principali sistemi di discontinuità presenti e i parametri geomeccanici degli ammassi sono stati desunti da IMAGEO analizzando porzioni di nuvola di punti relative alle pareti rocciose, depurate dalla vegetazione, suddividendo in aree rappresentative, per ciascuna delle quali sono stati individuati settori di approfondimento strutturale. Dall’analisi di questi schemi si evince che tutti i versanti tipo presentano caratteristiche geometriche favorevoli allo sviluppo dei diversi cinematismi, con più alta frequenza nei versanti a maggiore inclinazione.

Le analisi volte allo studio dei parametri geomeccanici sono state effettuate adottando l’approccio bidimensionale della “finestra di osservazione”. La metodologia di lavoro si basa sull’identificazione delle *breakline* del modello 3D ottenuto dall’elaborazione della nuvola di punti, dalle quali vengono ricavate in modo automatico le tracce delle discontinuità sulla superficie che interpola il fronte roccioso. Queste sono quindi classificate in base alla loro inclinazione apparente ed utilizzate per determinare le proprietà geomeccaniche delle porzioni d’ammasso roccioso contenute all’interno della “finestra d’osservazione” (una per ogni unità litologica), quali: spaziatura dei singoli sistemi di discontinuità, J_v (Volumetric Joint Count) e VRU (Volume Roccioso Unitario).

Ai fini delle analisi di rischio si evidenziano i volumi rocciosi unitari (VRU) riportati nella Tabella 1. Tali volumi sono estrapolati dall’Allegato 3 del Rapporto Tecnico e dal documento “VRU_stat_Bard2021_deliverable_v1.xls” fornito da IMAGEO in data 10/12/2021. Questi sono stati ricavati effettuando elaborazioni in specifiche finestre di osservazione, riportate in Tabella 1 in Figura 14.

Tabella 1. Volumi Rocciosi Unitari desunti dall’analisi condotta da IMAGEO e localizzazione delle aree di campionamento delle volumetrie (Figura 14).

Litologia	Minimo (m ³)	Medio (m ³)	Massimo (m ³)	95°percentile (m ³)
Area 1	0.18	1.37	11.50	4.06
Area 2	0.12	1.21	24.55	4.24
Area 3	0.62	7.54	51.59	27.34
Area 4	0.06	1.2	28.42	3.94



Figura 14: Suddivisione in aree rappresentative (Rapporto Tecnico a cura di IMAGEO, pag. 13)

Occorre segnalare che nel Cap.6 del Rapporto Tecnico e nell'Allegato 5 dello stesso: *“Integrando le informazioni ottenute dalle analisi morfologica e geomeccanica con i dati raccolti direttamente in campagna, sono stati selezionati una serie di elementi geologici e geomorfologici caratterizzanti la presenza di potenziali situazioni di instabilità. L’individuazione in parete è avvenuta tramite osservazione diretta da terra, osservazione da elicottero, ispezione della nuvola di punti; gli elementi riconosciuti e riportati nel modello tridimensionale sono:*

- *presenza di blocchi rocciosi ruotati, talora disarticolati, separati dalla parete attraverso discontinuità aperte, le quali talora asseconano anche una parziale rotazione del blocco;*
- *presenza di ammassi rocciosi suddivisi in più blocchi, separati dalla parete attraverso discontinuità aperte;*
- *presenza di discontinuità molto persistenti, chiaramente riconoscibili alla scala di indagine della parete;*
- *presenza di nicchie di distacco con superficie rocciosa fresca, non alterata, indice della caduta del blocco roccioso in tempi recenti;*
- *presenza di vegetazione lungo le fessure che delimitano blocchi e ammassi.*

[...] Il carattere di instabilità potenziale dei volumi rocciosi indicati è frutto di valutazioni qualitative basate sul contesto geologico-strutturale locale, come riconosciuto dalle ispezioni della parete da terra e della nuvola di punti; non sono stati svolti sopralluoghi diretti in parete quindi la valutazione è condizionata dall’effettiva visibilità delle porzioni di parete in oggetto.”

Nel complesso sono stati riconosciuti 138 settori fratturati o disarticolati, visibili nell'Allegato 5 del Rapporto tecnico, suddivisi come:

- blocchi singoli disarticolati dalla parete o in equilibrio precario;
- ammassi rocciosi rilasciati, disarticolati, talora ammassi di blocchi completamente separati;
- aree ad intensa fratturazione, sede preferenziale del distacco di blocchi rocciosi.

Questi presentano volumetria complessiva variabile, da 0.5 m³ a 8236.5 m³.

Questi 138 settori, anche sulla base dell'analisi degli eventi pregressi e delle risultanze del rilievo, sono stati considerati dagli scriventi come rappresentativi delle aree sorgenti di potenziale crollo e utilizzati nelle analisi di propagazione.

7.1.2 Analisi degli eventi pregressi

L'analisi degli eventi pregressi è stata realizzata unendo le informazioni provenienti dalle seguenti fonti:

- i. Catasto dissesti regionale;
- ii. Osservazione diretta in sito.

In riferimento alla (i) consultazione del Catasto Dissesti regionale (<http://catastodissesti.partout.it/>), tale banca dati ha permesso di analizzare i fenomeni franosi occorsi nell'area in esame, con particolare riferimento ai fenomeni di caduta massi nel periodo di attivazione del Catasto, nato in forma embrionale nei primi anni '90, sviluppatosi in forma cartografica a partire dagli anni 2000, assumendo la sua configurazione attuale a partire dal 2011. Figura 15 riporta gli eventi censiti nel Catasto Dissesti regionale nella zona oggetto di studio².

Considerando i soli eventi di crollo che hanno interessato l'area, la Tabella 2 riporta, ove presenti:

- l'ID del fenomeno franoso così come censito nel Catasto Dissesti e corrispondente alla scheda di dettaglio scaricabile dal Geonavigatore³;
- la tipologia di movimento;
- la località (come da catasto dissesti);
- la data dell'evento;
- indicazioni sulla volumetria, ove possibile suddivisa in complessiva e unitaria (VRU);
- indicazioni sulla quota di innesco e/o arrivo, sulle cause innescanti e sui danni.

² Informazione consultabile al sito: <http://geonavsct.partout.it/pub/GeoCartoSCT/index.html>

³ Informazione consultabile al sito: <http://geonavsct.partout.it/pub/geodissesti/>

Dall'analisi delle informazioni presenti nel catalogo dei dissesti emerge che il tracciato della Strada Romana delle Gallie è stato interessato da 6 eventi di crollo.

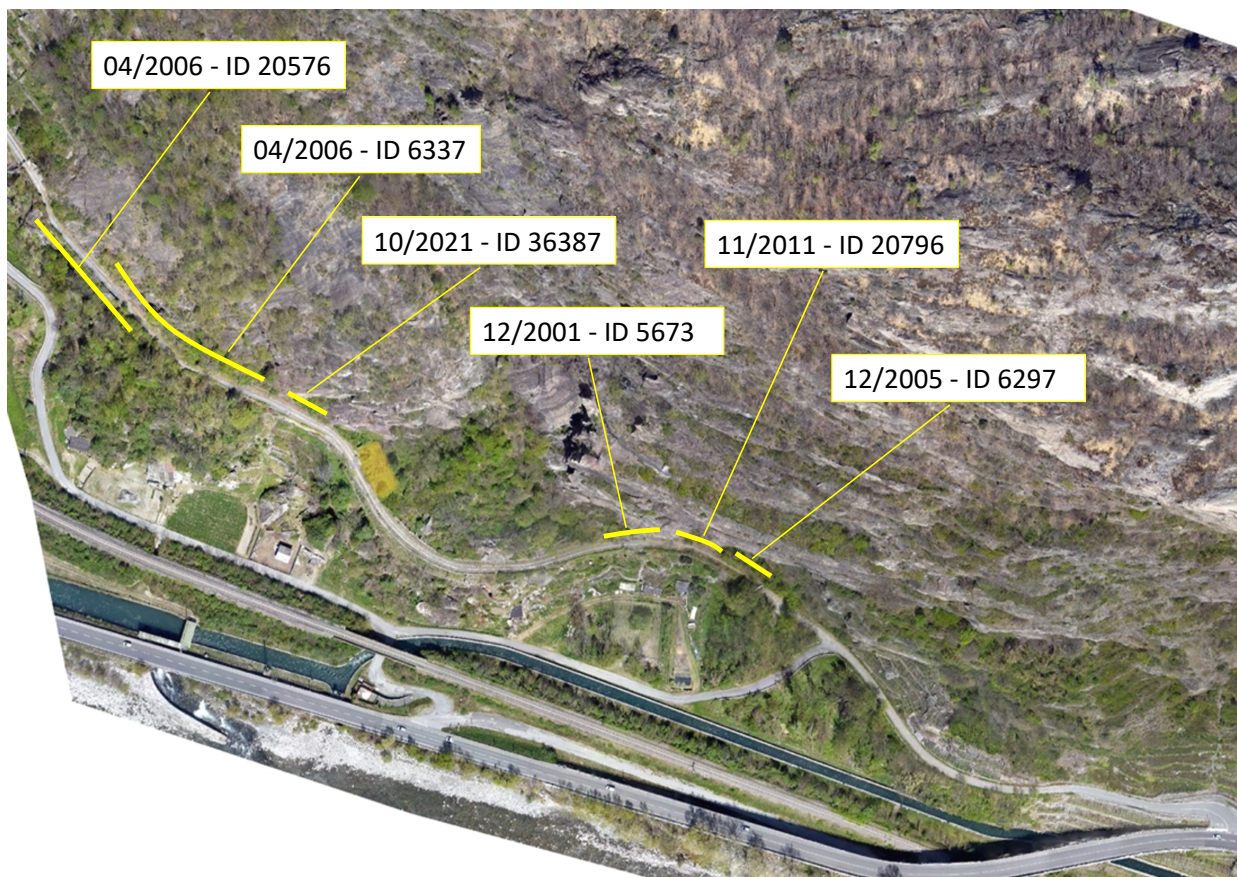


Figura 15. Eventi pregressi censiti nel Catasto Dissesti.

Tabella 2. Tabella riassuntiva dei fenomeni franosi occorsi nell'area oggetto di studio.

ID	Tipologia	Località	Data	Volume	Descrizione
5673	Caduta massi	Palestra di Roccia	11/2001	VRU: 0.1-0.5 m ³ Volume Totale: N.D.	Sono crollati alcuni distaccatisi dal fronte subverticale (a più ordini di cenge invase talvolta da e arborea-arbustiva) che presenta fratture aperte e persistenti (distacco quota 430 m slm). Un blocco di dimensione prossima ad 0,5 mc ha bypassato la strada comunale per arrestarsi nella scarpata sottostante.
6297	Caduta massi	Palestra di roccia (La bistecca)	14/12/2005	VRU: N.D. Volume Totale: 0.3 m ³	Crollo di un blocco (0.3 m ³) con traiettoria per lo più verticale che ha impattato la strada di accesso al Forte, arrestandosi. Non è stata identificata la nicchia di distacco.

ID	Tipologia	Località	Data	Volume	Descrizione
6337	Frana di crollo	Loc. Peredrettes	19/04/2006	VRU: N.D. Volume Totale: N.D.	La massa franata impattando contro una balza rocciosa posta a valle della nicchia di distacco si è frantumata in vari blocchi che hanno percorso 3 diverse traiettorie: lungo questa i blocchi hanno intercettato il bosco e la strada comunale sottostante, talora oltrepassandoli e raggiungendo quasi il fondovalle.
20567	Caduta massi	Strada Romana tra Cimitero e cappella St. Jean	04/2006* (2009)	VRU: 1-2 m ³ Volume Totale: N.D	Distacco di alcuni massi (1-2 mc) lungo un tratto di 100 m
20796	Caduta massi	SC Donnas-Bard	10/11/2011	VRU: N.D. Volume Totale: 0.5 m ³	il fenomeno è consistito, nel distacco di un volume lapideo complessivo piuttosto ridotto (inferiore a 0,5 mc). Il blocco distaccatosi ha impattato su un piano sporgente lungo il fronte della parete fratturandosi, e si è proiettato in caduta libera in parte sulla sede stradale ed in parte lungo il settore di pendio terrazzato ubicato immediatamente a valle della sede stradale: in corrispondenza dei terrazzamenti agricoli sono stati infatti individuati due volumi freschi riconducibili al crollo, parzialmente piantati nel terreno, di dimensioni comprese tra 0,1-0,2 mc. Non è stato possibile individuare con esattezza la posizione plano-altimetrica della nicchia di distacco, la quale si localizza comunque certamente nel tratto di parete compreso tra la cengia su cui è installata la fila di barriere paramassi più bassa ed il tratto di fronte ove è stata individuata la traccia di impatto.
36387	Frana di crollo	San Giovanni	16/10/2021	VRU: fino a 2-3 m ³ Volume Totale: 40-30 m ³	il fenomeno è consistito in un crollo lapideo che ha coinvolto un volume complessivo stimato di circa 40-50 mc. Il materiale franato, si è mobilizzato secondo un evidente cinematismo di scivolamento a cuneo a partire da un settore di parete rocciosa situato circa 15-20 m a monte della carreggiata, per poi percorrere secondo una dinamica di scivolamento e piccoli rimbalzi la sottostante placca rocciosa inclinata prima di impattare al suolo e frantumarsi in volumi unitari di minor pezzatura rispetto al volume originario. La maggior parte del materiale franato, fortemente eterometrico (VRU compreso fra pochi dmc fino a 2-3 mc), si è accumulato sulla carreggiata, ostruendola completamente, mentre alcuni elementi lapidei con VRU >1mc, dopo aver sfondato il cordolo in muratura bordo strada, hanno arrestato la propria dinamica di caduta nel sottostante settore prativo.

In riferimento alle (ii) osservazioni dirette in sito, è necessario precisare che il tracciato storico è attualmente chiuso al traffico, sia pedonale che veicolare, per mezzo di una barriera fisica. L'interruzione è stata disposta, benché in momenti differenti, sia dal comune di Donnas che dal comune di Bard con apposita ordinanza. In dettaglio, il comune di Bard ha disposto la chiusura sul tratto di competenza a partire dal 2006 mentre il comune di Donnas ha disposto la chiusura a partire dal 2011.

L'evidenza dell'attuale non utilizzo dell'infrastruttura è evidente se si osserva la vegetazione attualmente presente che rende il transito molto difficoltoso (Figura 5). Si può pertanto ritenere che durante il periodo di chiusura nessuno si sia recato sulla strada o, perlomeno, abbia avuto la necessità di transitarci. In tale periodo, pertanto, i piccoli blocchi lapidei che hanno interessato il tracciato si sono arrestati su di esso e non sono stati rimossi. In data 21/10/2021 gli scriventi si sono recati, previa autorizzazione, sul tracciato chiuso al traffico e hanno eseguito un sopralluogo dello stato dei luoghi. Hanno potuto identificare n. 20 blocchi di roccia di piccole dimensioni distaccatisi dalla soprastante parete e arrestatisi lungo il tracciato. La posizione dei blocchi è riportata nella Figura 16. Ogni blocco è stato misurato e ne è stato valutato il volume. Risultano volumetrie comprese tra $2.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ a $1.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. La Figura 17 riporta la probabilità cumulata complementare empirica delle volumetrie su un piano bi-logaritmico. Si nota che i punti sono allineati lungo una retta, confermando l'invarianza di scala (comportamento frattale) prevista in letteratura. Risultano 8 blocchi di dimensioni maggiori di 0.001 m^3 (idealmente un cubo di 10 cm di spigolo, o una sfera di 12.4 cm di diametro), identificate con il colore verde in Figura 17.

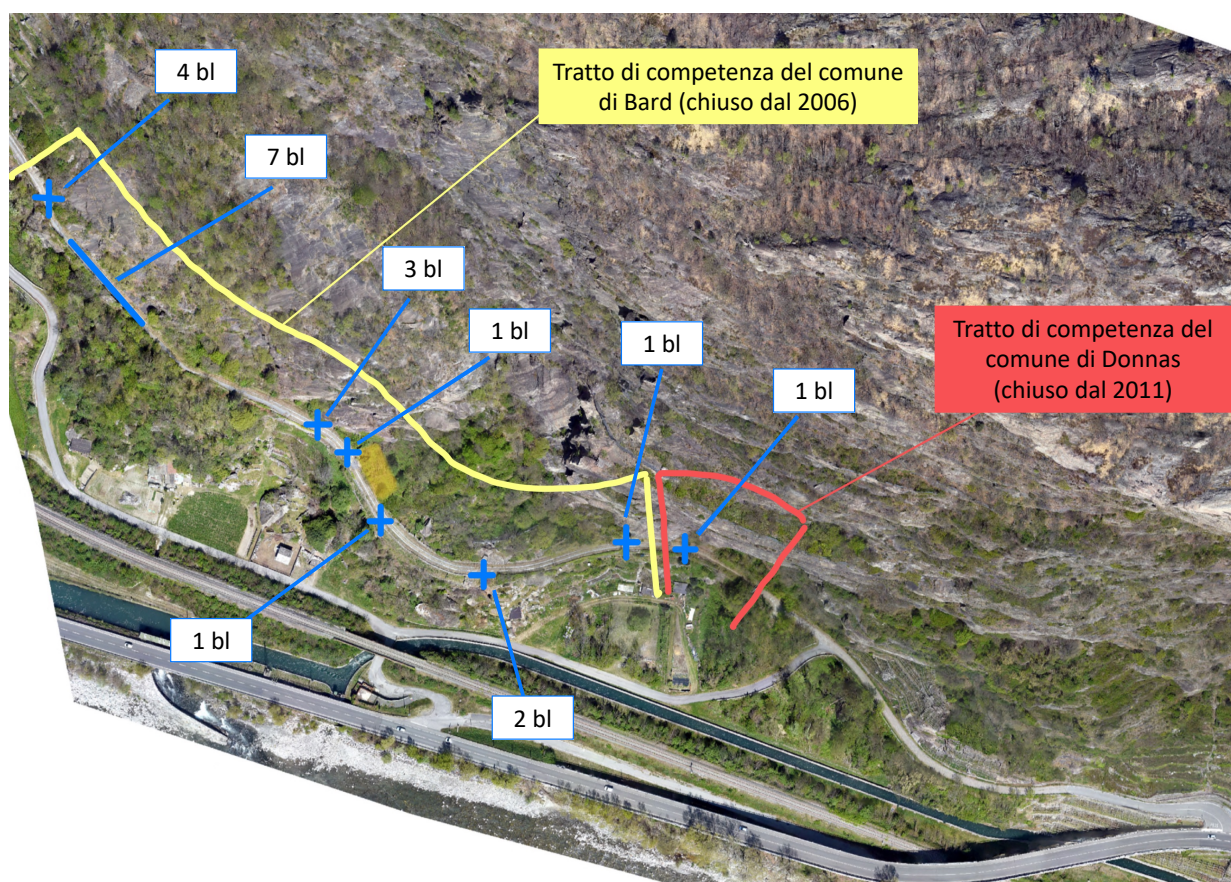


Figura 16. Posizione dei piccoli blocchi rilevati durante il sopralluogo del 21/10/2021.

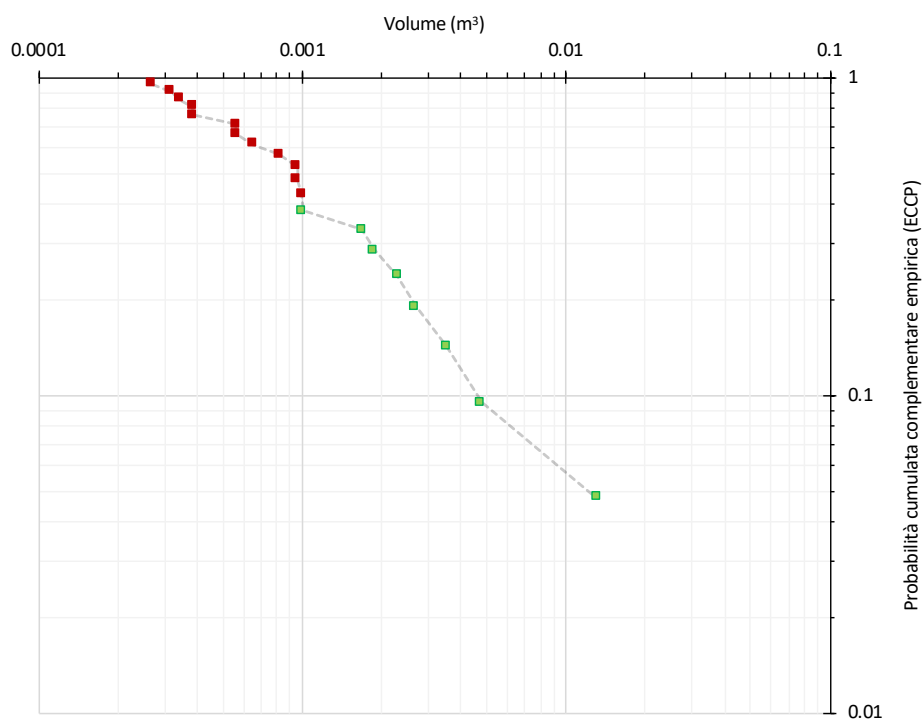


Figura 17. Cumulata complementare empirica delle volumetrie rinvenute lungo la strada.



Figura 18. Esempi di blocchi di piccole dimensioni rinvenuti sul tracciato della Strada Romana delle Gallie.

7.1.3 Frequenza di crollo

La valutazione del rischio annuo richiede la conoscenza della frequenza con la quale avvengono i fenomeni di crollo nella zona interessata. Tale analisi è svolta a partire dalle informazioni storiche nell'area e dal rilievo eseguito considerando le sole volumetrie maggiori di $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

Risultano pertanto nel periodo 2001-2021, di durata temporale pari a $t = 21$ anni un totale di $n = 14$ eventi, di cui 6 ciclopici inventariati nel catasto dissesti e 8 rinvenuti dagli scriventi.

Nell'ipotesi di indipendenza degli eventi, il processo di accadimento del blocco sulla strada è da considerarsi un processo di tipo Poissoniano, per il quale è definita una frequenza annua di accadimento, λ . Considerando che il periodo di osservazione è limitato, si ha una stima della frequenza annua di accadimento pari al rapporto tra il numeri di eventi e la durata del periodo di osservazione, ossia:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{t} = \frac{14}{21} = 0.67 \text{ eventi/anno} \quad (7.1)$$

Questo valore indica che, mediamente, avviene un crollo ogni 1.49 anni, circa un anno e mezzo.

Il valore della frequenza annua ottenuto, $\hat{\lambda}$, è una stima, pertanto è soggetta ad un certo grado di incertezza dovuto all'aleatorietà del processo di crollo. Come riportato in De Biagi (2017), è possibile definire un valore di frequenza annua che tenga in considerazione l'incertezza. Nel dettaglio, definito il percentile q della distribuzione dei possibili valori di λ , il corrispondente λ_q è definito a partire dalla seguente uguaglianza:

$$1 - \frac{\Gamma(n+1, \lambda_q t)}{\Gamma(n+1)} = q \quad (7.2)$$

dove $\Gamma(\cdot, \circ)$ è la funzione Gamma superiore incompleta e $\Gamma(\circ)$ è la funzione Gamma. Utilizzando una durata t pari a 21 anni e un numero n di eventi pari a 14, risulta che al valore $\hat{\lambda}$ pari a 0.67 eventi all'anno corrisponde un percentile pari al 0.5, ossia vi è una probabilità del 50% che i blocchi cadano più frequentemente di quanto individuato, ossia un evento ogni 1.49 anni. Volendo calcolare il valore corrispondente al percentile 90%, si ottiene un valore λ_{90} pari a 0.9585, questo significa che, sulla base dei dati osservati nel periodo di osservazione (limitato), vi è il 90% di probabilità che la vera frequenza di crollo sia inferiore a 0.9585 eventi all'anno, in altre parole vi è il 10% di probabilità che i blocchi cadano più frequentemente di un evento ogni 1.04 anni.

Considerando gli elementi a rischio, la limitata quantità di informazioni in merito ai crolli e la presenza di una parete complessa, articolata e di notevole estensione, gli scriventi considerano che il valore corrispondente al percentile 50% non sia da considerarsi sufficientemente cautelativo. Si suggerisce al contrario di utilizzare il valore corrispondente al percentile 90%, ossia una frequenza di crollo pari a 0.9585 eventi all'anno, approssimati ad 1 evento all'anno. Tale valore indica il numero di blocchi che sono attesi per anno sull'intero tracciato della Strada Romana delle Gallie. In definitiva si considera nelle calcolazioni del rischio:

$$N_R^{SRG} = 1 \text{ eventi/anno} \quad (7.3)$$

La valutazione della frequenza di raggiungimento dei blocchi sulla strada che corre parallela, ma a valle, alla Strada Romana delle Gallie, identificata nella presente come “Altra strada” è eseguita confrontando la probabilità di occorrenza spaziale del fenomeno di crollo, pesata per i singoli tratti. In altre parole, se nel tratto a monte la probabilità spaziale è pari al 20% e nel tratto a valle, considerate le medesime zone sorgente, è pari al 10%, risulterà che la frequenza media di raggiungimento sul tracciato inferiore è pari a un evento ogni due anni (il doppio del tratto di monte). In maniera rigorosa, si può scrivere che il numero di eventi attesi sul tracciato dell’ “Altra strada”, N_R^{AS} , è pari a:

$$N_R^{AS} = \frac{\sum_{h=1}^n P_{(T:D)}^{h,SRG} \ell_h}{\sum_{j=1}^m P_{(T:D)}^{j,AS} \ell_j} N_R^{SRG} \quad (7.4)$$

dove $P_{(T:D)}^{h,SRG}$ è la probabilità di occorrenza spaziale sull’ h -esimo tratto della Strada Romana delle Gallie di lunghezza ℓ_h e $P_{(T:D)}^{j,AS}$ è la probabilità di occorrenza spaziale sul j -esimo tratto della strada a valle (Altra strada) di lunghezza ℓ_j .

Come dettagliatamente descritto nei paragrafi seguenti, le analisi di propagazione, una cui sintesi è riportata in Figura 20 hanno permesso di determinare le probabilità di cui alla Eq. (7.4) e le lunghezze, da cui risulta che il numero annuo di eventi di crollo attesi sul tracciato dell’ “Altra strada” è pari a:

$$N_R^{AS} = 0.6 \text{ eventi/anno} \quad (7.5)$$

7.1.4 Scelta del blocco di progetto per le analisi di propagazione

Lo studio in campo e l’analisi delle risultanze dell’indagine condotta da IMAGEO, i cui risultati sono riportati al §7.1.1 della presente, ha permesso di individuare le possibili aree sorgenti e le loro volumetrie così come rappresentate nell’Allegato 5 del Rapporto Tecnico a firma di IMAGEO.

Ai fini dell’analisi di propagazione queste sono state considerate rappresentative della reale condizione in parete, anche a fronte dell’analisi degli eventi pregressi, sia le misure delle volumetrie condotte dagli scriventi.

In particolare ai fini dell'analisi di propagazione tridimensionale, volta a definire una probabilità di occorrenza spaziale, si sono considerate come aree sorgenti e come volumi quelli identificati nell'Allegato 5 del Rapporto Tecnico.

Anche nelle analisi traiettografiche di dettaglio, condotte con un modello di tipo lumped-mass, le aree sorgenti sono state localizzate in corrispondenza di quelle identificate nell'Allegato 5. Occorre comunque precisare che, ai fini della definizione dei parametri cinematici di velocità e altezza di volo la quantificazione del volume non influisce sulla traiettoria dei blocchi in caduta.

Si intende inoltre sottolineare che:

- ai fini dell'analisi di rischio per elementi con esposizione non unitaria è necessario conoscere la probabilità spaziale di invasione. Non sono pertanto richieste informazioni circa i livelli energetici o le volumetrie;
- non è stato considerato il fenomeno di rimobilitazione dei blocchi isolati individuati lungo il pendio per effetto del crollo di porzioni di pareti rocciose soprastanti, che potrebbero indurre un eventuale crollo a sciame.

7.2 Analisi traiettografiche di propagazione tridimensionali

Le analisi di propagazione effettuate hanno mirato all'individuazione della probabilità di occorrenza spaziale del fenomeno, così come espresso al §3.2 della presente. Le analisi con modello di simulazione di traiettorie di caduta tridimensionali sono state eseguite con il codice di calcolo Rockyfor 3D (www.ecorisq.org; Dorren, 2015). Questo applicativo software consente di operare su dati territoriali preparati in ambiente GIS e restituisce le informazioni relative alle aree di invasione. Il modello combina algoritmi deterministici con approcci stocastici, in quanto, date le incertezze connesse alla determinazione dei parametri questi sono determinati in maniera stocastica, facendoli variare entro un intervallo di valori plausibili.

I dati di input richiesti dal modello sono:

- modello digitale del terreno (DEM);
- posizione delle “celle sorgenti”, ovvero le zone da cui potenzialmente potrebbe distaccarsi un blocco,
- densità dei massi (per ogni cella sorgente);
- dimensioni del blocco (altezza, larghezza e lunghezza, per ogni cella sorgente);
- forma del blocco di caduta (per ogni cella sorgente): la forma del blocco determina come vengono calcolati il volume del blocco e il momento di inerzia, mentre per calcolare la

posizione del blocco, il rimbalzo sulla superficie del pendio e l'impatto contro gli alberi, Rockyfor3D usa sempre una forma sferica;

- scabrezza della superficie inclinata, espressa come dimensione del materiale che ricopre la superficie del pendio, percepita guardando il pendio verso valle, lungo la direzione di caduta di un ipotetico masso. Tale scabrezza viene espressa in termini probabilistici da tre classi di probabilità, chiamate rg70, rg20, rg10. Queste classi descrivono la probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza (espressa in m) lungo il suo percorso. È quindi il parametro che determina l'energia persa durante il rimbalzo sulla superficie e non una scabrezza aggiuntiva alla topografia;
- tipologia del suolo: rappresenta l'elasticità del terreno e consente di calcolare il coefficiente di restituzione normale R_n (rapporto tra le componenti normali delle velocità post- e pre-impatto) sulla base degli algoritmi del codice. Il codice di calcolo prevede 8 tipi di suolo, collegati direttamente al valore di R_n .

Il modello fisico di cui si avvale è di tipo ibrido, in quanto, relativamente al moto il modello simula la caduta libera in aria con un algoritmo standard per il moto parabolico uniformemente accelerato, permettendo così di determinare la posizione e la velocità all'intersezione con la topografia. Il moto in caduta libera è quindi indipendente dal volume e dalla forma del blocco. Relativamente al rimbalzo, invece, la velocità (di traslazione e di rotolamento) dopo un rimbalzo sulla superficie è funzione della forma e della dimensione del blocco stesso. L'angolo di deviazione dopo un rimbalzo sulla superficie è determinato dalla topografia, dalla direzione di caduta del blocco prima del rimbalzo e dalla velocità del blocco che cade.

Le simulazioni eseguite hanno previsto differenti punti di distacco. Per ogni cella sorgente sono stati effettuati 5000 lanci (ossia circa 40 milioni di blocchi in caduta simulati su tutta l'area), che quindi costituiscono un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzasse l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello.

Questo ha permesso di ottenere una mappa della probabilità di accadimento spaziale, non considerando il termine temporale.

I dati di input utilizzati sono stati:

- DTM con risoluzione di cella 1x1 m;
- densità dei massi: 2700 kg/m³;
- dimensioni del blocco in funzione delle volumetrie scelte;

- forma del blocco di caduta: sferica;
- scabrezza della superficie inclinata:(rg70, rg20, rg10): si veda la Tabella 3;
- tipologia del suolo: si veda la Tabella 3.

I dettagli della validazione dei dati di inputi sono riportati al §7.2.1.

Tabella 3. Parametri di input utilizzati per le analisi tridimensionali.

Descrizione	Codice	rg70	rg20	rg10	soil
Roccia affiorante	R	0	0	0,05	6
Roccia Boscata	RBV	0,05	0,05	0,2	4
Proprietà con presenza di appezzamenti con massi e muretti	PMM	0	0,05	0,1	5
Zone vegetate misto prato	VP	0,05	0,05	0	3
Strade	S	0	0	0,05	7

Rockyfor3D fornisce la probabilità di invasione di ciascuna cella. Come già espresso, nella presente analisi di propagazione viene considerata la probabilità che un evento di caduta massi si verifichi in una data area. In altre parole, l'informazione ottenuta è di natura spaziale, totalmente svincolata da una probabilità annua di accadimento. Sono state definite le seguenti classi di probabilità di occorrenza (spaziale) p :

Tabella 4. Classi di probabilità di occorrenza spaziale p .

Bassa	$p \leq 1\%$
Medio-bassa	$1\% < p \leq 5\%$
Medio-alta	$5\% < p \leq 10\%$
Alta	$10\% < p \leq 30\%$
Altissima	$p > 30\%$

La p rappresenta la probabilità che un blocco, distaccatosi, raggiunga una data cella del modello. La Tavola 2 (Allegato 2) riporta i risultati in termini di probabilità di occorrenza spaziale. La sovrapposizione tra occorrenza spaziale e elementi a rischio è riportata nella Tavola 3 (Allegato 3). Figura 19 e Figura 20 riportano estratti delle Tavole sopra menzionate.

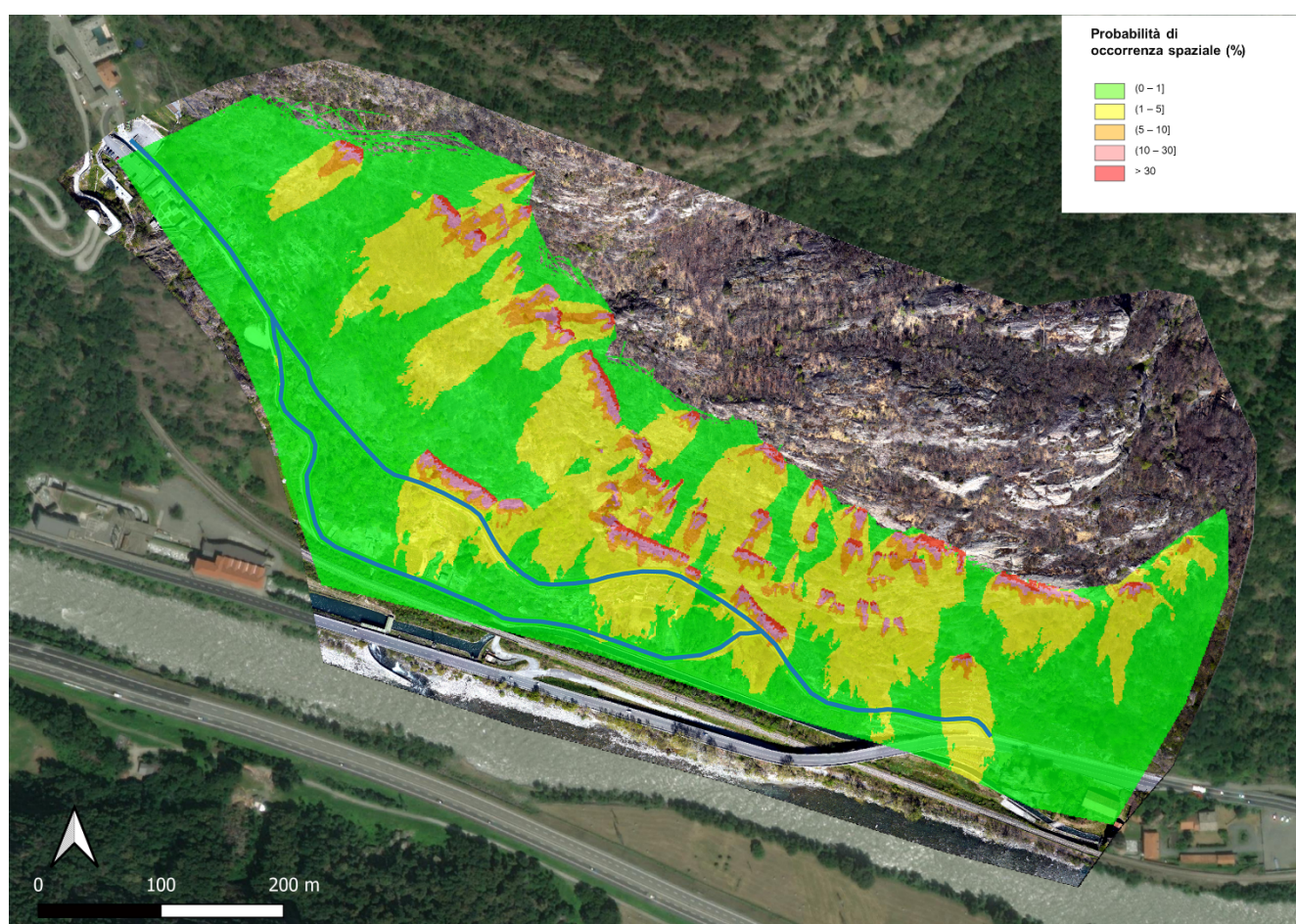


Figura 19: Estratto dalla Tavola 2 (Allegato 2) con indicata la probabilità di occorrenza spaziale e i tracciati delle strade investigate.

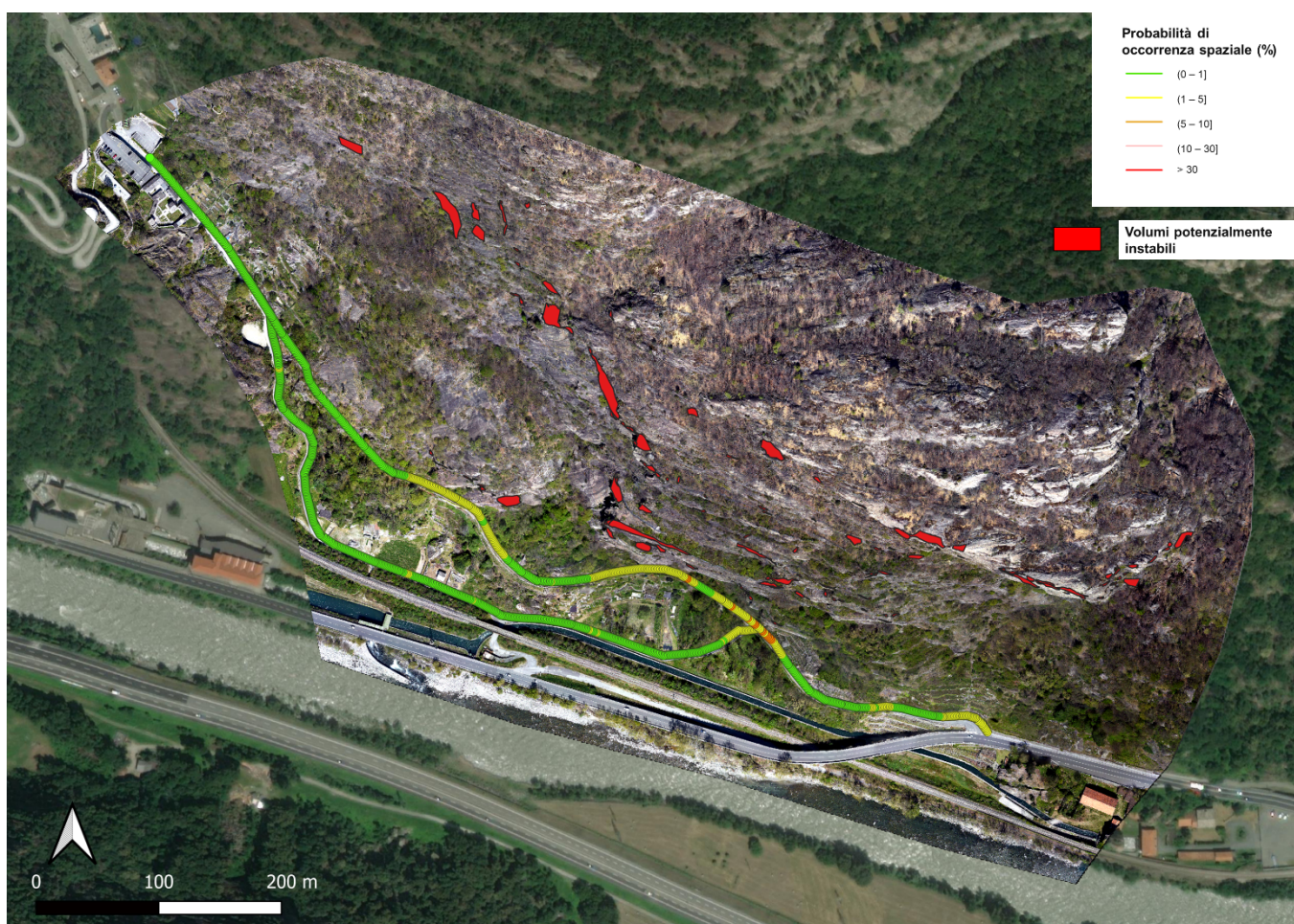


Figura 20. Estratto dalla Tavola 3 (Allegato 3) con indicata la probabilità di occorrenza spaziale sugli elementi a rischio considerati.

7.2.1 Validazione dei parametri di input

Il codice adottato nelle analisi condotte (Rockyfor3D), di tipo ibrido, utilizza dati di input che possono essere definiti in campo: la scabrezza, funzione delle dimensioni dei blocchi, è stata geometricamente investigata dalle evidenze del rilievo, mentre la tipologia di suolo è stata scelta in accordo con gli studi geologici, i rilievi in situ e i suggerimenti forniti dal manuale del codice di calcolo.

Avendo quantificato mediante le risultanze dei rilievi i valori di rg_{70} , rg_{20} , rg_{10} , per limitare le incertezze aleatorie del terreno ed epistemiche del modello cercando di tarare al meglio il coefficiente relativo alla tipologia del suolo, è stata inoltre eseguita una verifica qualitativa in termini di aree di invasione.

Si precisa infatti che le analisi di propagazione 3D condotte sono mirate ad una valutazione della sola probabilità di occorrenza spaziale e non alla valutazione dell'intensità del fenomeno.

Si precisa inoltre che l'esecuzione di una back-analysis completa presuppone la conoscenza della zona di innesco, della volumetria, eventuali interferenze lungo il percorso, e della zona di arrivo di uno specifico evento di crollo, per cui quindi si conosce la traiettoria e si ricercano i parametri che meglio rappresentano l'interazione suolo-blocco. Nel caso di informazioni mancanti o di analisi su grande scala questo tipo di calibrazione non risulta sempre possibile.

È stata pertanto eseguita una validazione dei parametri scelti effettuando analisi 3D su specifiche porzioni di territorio individuate al fine di comparare in termini di aree di invasione le risultanze di eventi pregressi realmente occorsi di cui si hanno informazioni di maggior dettaglio (benchè sempre di media accuratezza) e verificare quindi che le ipotesi assunte producano risultati comparabili con i dati reali.

In particolare dal Catasto Dissesti regionale è stato possibile reperire informazioni mediamente accurate relative a due eventi: l'evento occorso 19/04/2006 (codice fenomeno del Catasto Dissesti Regionale SCT: F-19-04-2006-00-v-Cr-x ID 6337) e l'evento occorso il 16/10/2021 (codice fenomeno del Catasto Dissesti Regionale SCT: F-16-10-2021-00-v-Cr-x ID 36387).

Si precisa come questi eventi siano stati utilizzati anche per effettuare la back-analysis per l'individuazione dei corretti parametri di input per le analisi traiettografiche bidimensionali.

Al seguito vengono riportati una descrizione sommaria dell'evento (un dettaglio maggiore sarà fornito ai § 7.4.1.1 e §7.4.1.2 relativi alla back-analysis dei parametri di input per le analisi bidimensionali), le aree (con riquadro rosso) e i rispettivi volumi di innesco di input e le risultanze delle simulazioni effettuate, in termini di probabilità di occorrenza spaziale del fenomeno, con individuazione dell'area sorgente identificata. Si specifica che, a livello grafico, la legenda utilizzata è quella riportata in Tabella 4.

Ai fini delle simulazioni sono stati adottati i seguenti parametri geomeccanici di input:

- DTM con risoluzione di cella 1x1 m;
- densità dei massi: 2700 kg/m³;
- dimensioni del blocco in funzione della volumetria unitaria indicata nel catasto dissesti in relazione all'evento (se disponibile);
- forma del blocco di caduta: sferica;
- scabrezza della superficie inclinata:(rg70, rg20, rg10): si veda la Tabella 3;
- tipologia del suolo: si veda la Tabella 3.

7.2.1.1 Evento del 19/04/2006 in località Peredrettes (ID 6337)

Il Catasto Dissesti riporta un occorso il 19/04/2006 in località Peredrettes (ID 6337), descritto come *“Frana di crollo. La massa franata impattando contro una balza rocciosa posta a valle della nicchia di distacco si è frantumata in vari blocchi che hanno percorso 3 diverse traiettorie di caduta. Lungo queste traiettorie i blocchi hanno intercettato il bosco e la strada comunale sottostanti, talora oltrepassandoli e giungendo quasi nel fondovalle.”*

Volume di partenza stimato (da fotointerpretazione): stimato 8 m³

7.2.1.2 Evento del 16/10/2021 in località San Giovanni (ID 36387)

Il Catasto Dissesti riporta un occorso il 16/10/2021 in località San Giovanni (ID 36387), descritto come *“Frana di crollo [...]il fenomeno di dissesto si è innescato nella giornata di sabato 16 ottobre 2021 ed è consistito in un crollo lapideo che ha coinvolto un volume complessivo stimato di circa 40-50 mc. Il materiale franato, litologicamente costituito da micascisti eclogitici a mica bianca della Zona Sesia-Lanzo (Sistema Austroalpino), si è mobilizzato secondo un evidente cinematisma di scivolamento a cuneo a partire da un settore di parete rocciosa situato circa 15-20 m a monte della carreggiata, per poi percorrere secondo una dinamica di scivolamento e piccoli rimbalzi la sottostante placca rocciosa inclinata prima di impattare al suolo e frantumarsi in volumi unitari di minor pezzatura rispetto al volume originario. La maggior parte del materiale franato, fortemente eterometrico (VRU compreso fra pochi dmc fino a 2-3 mc), si è accumulato sulla carreggiata, ostruendola completamente, mentre alcuni elementi lapidei con VRU > 1mc, dopo aver sfondato il cordolo in muratura bordo strada, hanno arrestato la propria dinamica di caduta nel sottostante*

Volume roccioso unitario di partenza stimato: 3 m³

Le risultanze delle analisi mostrano come le aree di invasione risultanti dalle analisi (considerando probabilità di occorrenza spaziale maggiore di 1%) siano compatibili con gli arrivi dei blocchi identificati negli eventi reperiti e cartografati negli archivi disponibili (Figura 21).

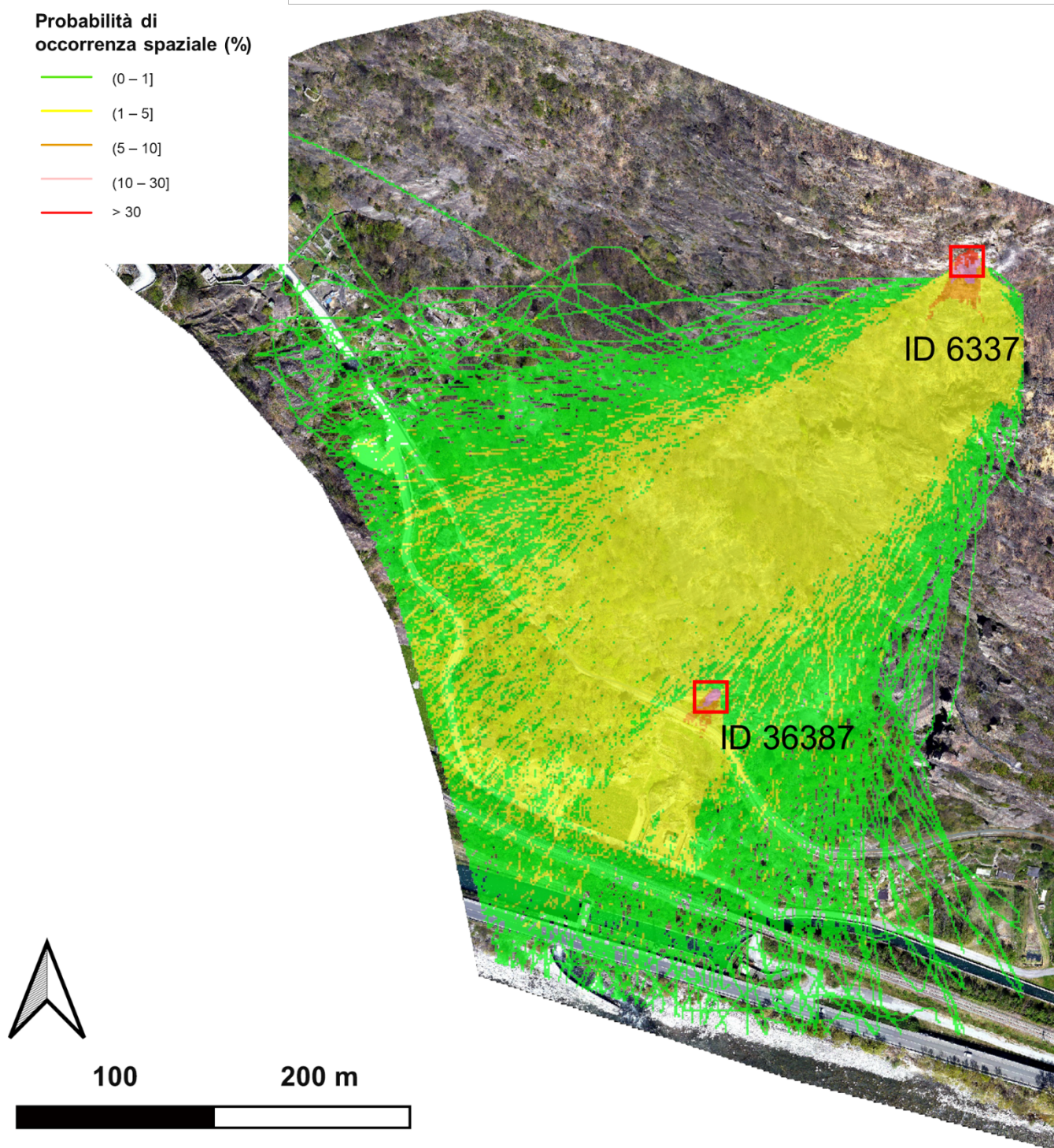


Figura 21: Risultati delle analisi di propagazione tridimensionali su eventi occorsi (ID 6337 e ID 36387) del Catasto Dissesti.

7.3 Calcolo del rischio per elementi a esposizione non unitaria

Il presente paragrafo riporta le assunzioni ed i dati di input per il calcolo del rischio sugli elementi individuati precedentemente e secondo le metodologie riportate al §5. Gli elementi a rischio con esposizione non unitaria sono rappresentati dalla Strada Romana delle Gallie e dalla strada a valle della stessa, definita Altra Strada, che conducono ad un elemento ad alto interesse culturale quale il Forte di Bard. La probabilità di occorrenza spaziale su tali elementi è riportata nella Tavola 3 (Allegato 3) e richiamata in Figura 20. In riferimento agli elementi a rischio con esposizione non unitaria, ossia per le infrastrutture di transito, non è possibile identificare, a priori, il traffico sia pedonale che ciclabile su ciascun tratto. Pertanto, il rischio è stato valutato in riferimento a differenti condizioni di traffico. Questo permette, definito il livello di rischio, di determinare il massimo numero di transiti all'ora. Sono stati condotti separatamente tre scenari:

- traffico solo pedonale;
- traffico solo ciclistico;
- traffico ciclo-pedonale.

Per ciascuna configurazione e per ciascuna strada nelle Tavole 4 A,B (Allegato 5) sono riportati i grafici di probabilità di avere almeno una vittima all'anno a seguito del fenomeno di caduta massi su strada, in funzione del numero annuo di pedoni, ciclisti, e di entrambi contemporaneamente.

Le valutazioni di rischio sono state condotte utilizzando i seguenti dati:

- velocità di transito dei pedoni = 4.5 km/h
- velocità di transito dei ciclisti = 10 km/h
- lunghezza del singolo pedone = 0.6 m
- lunghezza del singolo ciclista = 1.8 m
- tempo di sosta (nel solo caso di pedoni) = 0,05 h
- unica condizione di traffico per l'intero anno solare, dunque percorribilità = 8740 ore/anno

Le velocità di transito sono state desunte dai tempi di percorrenza medi riportati su simili tipologie di strada sul catasto sentieri della Valle d'Aosta⁴. Il numero di eventi atteso su ciascun tratto è stato ricavato dall'analisi dei dati pregressi e dalle risultanze dei sopralluoghi in sito.

⁴ Si rimanda a <https://mappe.regione.vda.it/pub/geosentieri/index.html>

In particolare, come descritto al §7.1.3, per la Strada Romana delle Gallie (Strada 1 in Figura 13) la frequenza attesa N_R è pari a 1 evento/anno, mentre per l'Altra Strada (Strada 2 in Figura 13) risulta pari a 0.6 eventi/anno.

Ai fini dell'analisi del rischio, la frequenza attesa N_R deve essere opportunamente distribuita su ciascuna porzione di strada secondo l'Eq. (5.2). Il rischio su ciascun tratto di strada, espresso in probabilità di vittima, per differenti condizioni di traffico (numero di escursionisti all'ora) è riportato nelle Tavole 4 A,B (Allegato 5).

Gli estratti delle Tavole 4A,B (Allegato 4) sono riportati da Figura 22 a Figura 27. Dalla lettura del grafico in Figura 25, relativo al transito solo pedonale su Altra Strada si nota che non è presente nessuna condizione di traffico, eccetto l'assenza di traffico, per la quale il rischio è inferiore a 10^{-5} (vittime/anno). Un rischio pari a 10^{-5} è ottenuto con un traffico orario di 1 pedone, ossia 8760 pedoni all'anno.

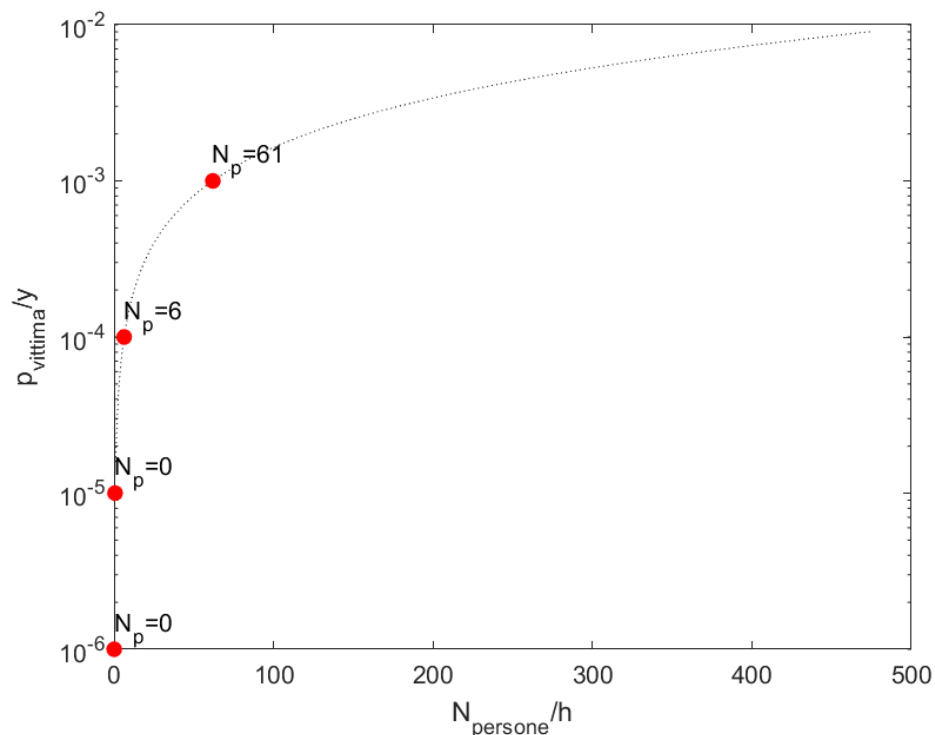


Figura 22. Strada Romana delle Gallie: probabilità annua di avere almeno una vittima in funzione del solo traffico pedonale.

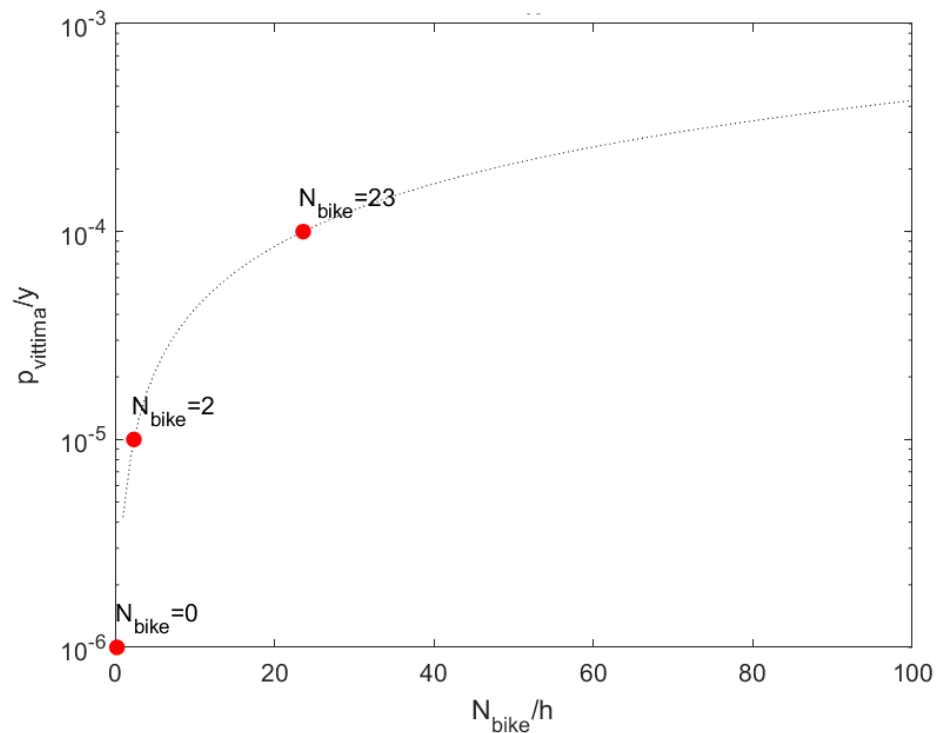


Figura 23. Strada Romana delle Gallie: probabilità annua di avere almeno una vittima in funzione del solo traffico ciclabile.

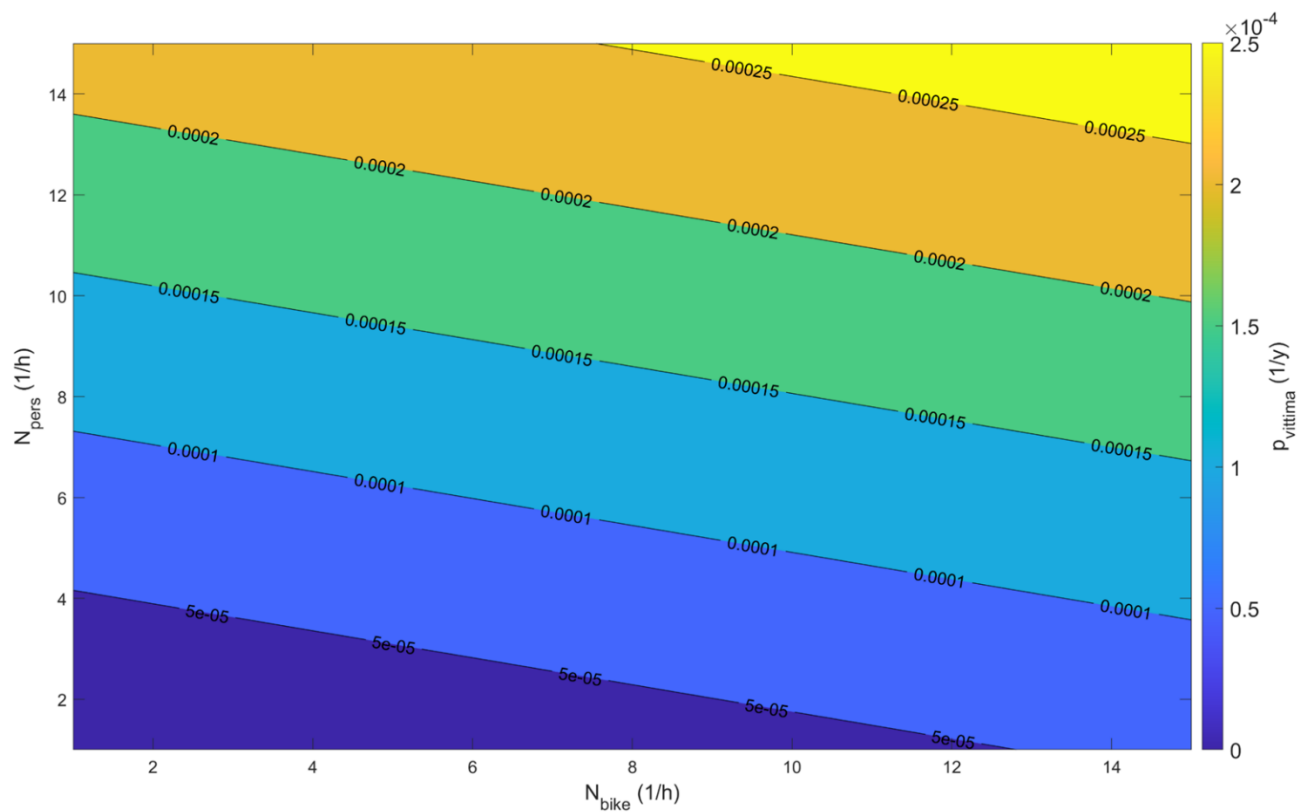


Figura 24. Strada Romana delle Gallie: probabilità annua di avere almeno una vittima in funzione del traffico ciclo-pedonale

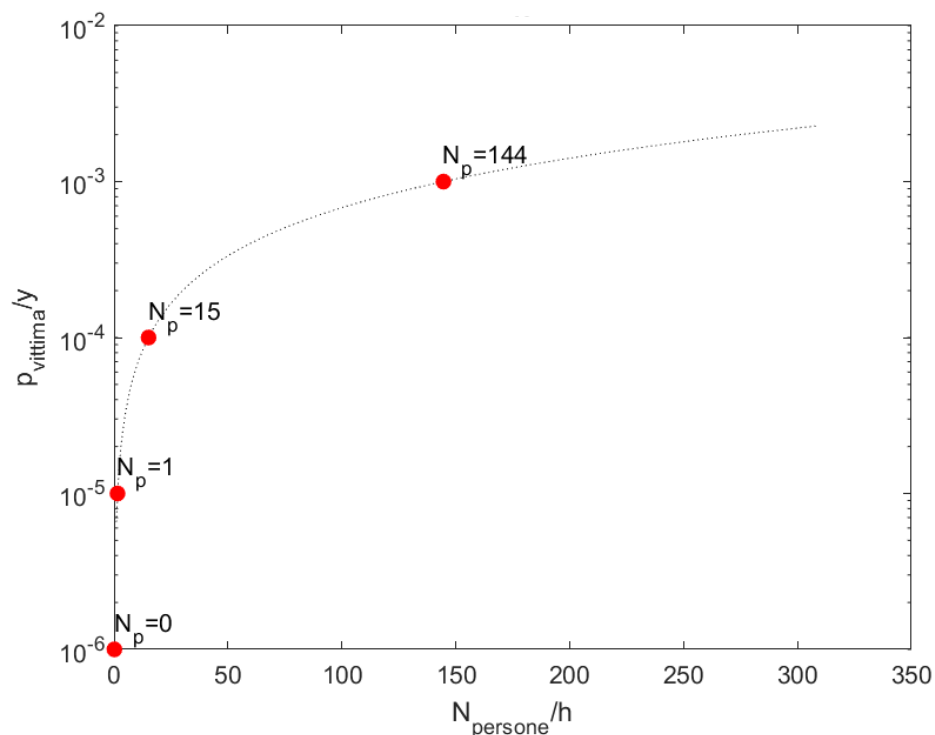


Figura 25. Altra Strada: probabilità annua di avere almeno una vittima in funzione del solo traffico pedonale.

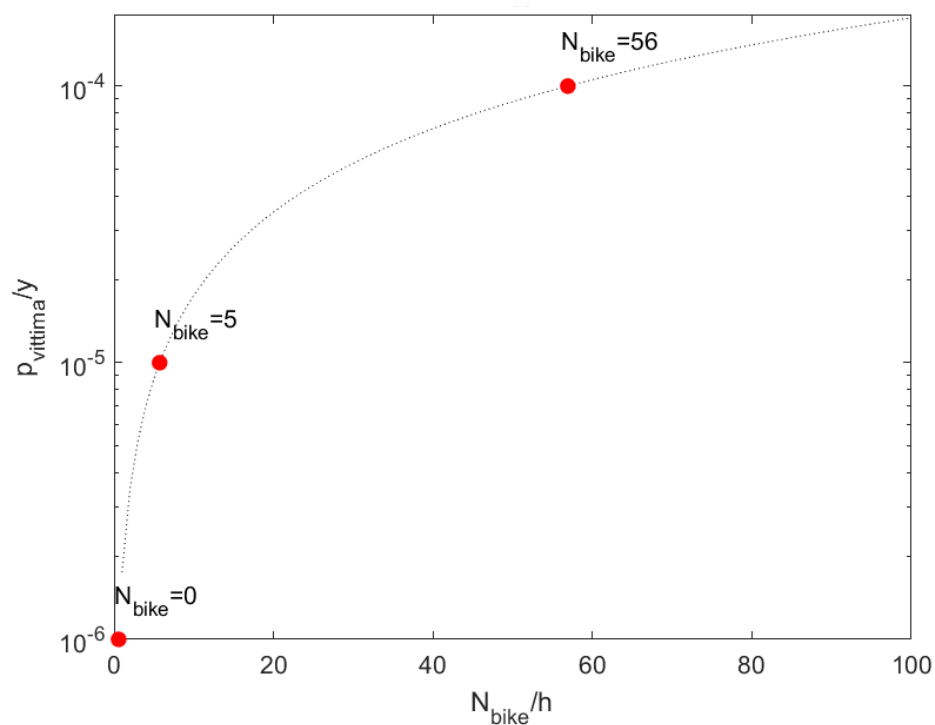


Figura 26. Altra Strada: probabilità annua di avere almeno una vittima in funzione del solo traffico ciclabile.

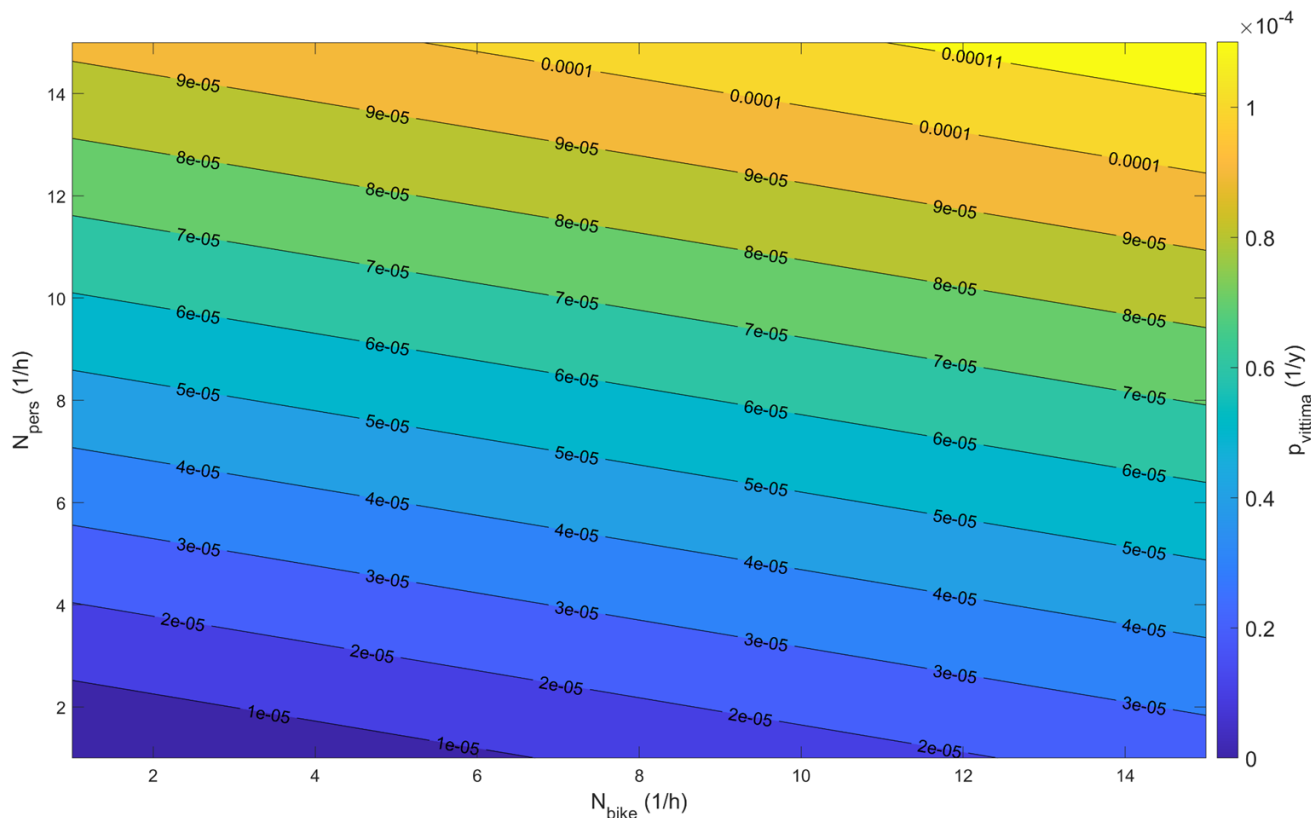


Figura 27. Altra Strada: probabilità annua di avere almeno una vittima in funzione del traffico ciclo-pedonale.

Il grafico di Figura 27 sull'Altra Strada mostra che un rischio annuo per uso promiscuo ciclo-pedonale pari, per esempio, a 5×10^{-5} è ottenuto con differenti condizioni di traffico, quali 8 pedoni/ora e 2 biciclette/ora oppure 6 pedoni/ora e 14 biciclette/ora.

7.4 Analisi traiettografiche bidimensionali di dettaglio: assunzioni di calcolo

Le simulazioni preliminari per la valutazione dell'energia sono state impostate su sezioni trasversali al versante ritenute particolarmente significative, in funzione dei risultati delle analisi di propagazione tridimensionali effettuate nell'analisi di pericolosità e scegliendo il percorso di caduta più probabile in funzione della topografia del sito.

Il codice di calcolo adottato, Rocfall 2021, si avvale di un modello di moto bidimensionale e comportamento di tipo lumped mass.

Ai fini della simulazione sono stati adottati i seguenti parametri geomeccanici di input:

- base topografica di input: rilievo di dettaglio con isoipse ogni 50 cm;
- velocità di caduta iniziale: 0 m/s;
- sorgenti di distacco lineari;

- densità della roccia: 2700 kg/m³;
- 5000 simulazioni per ogni sorgente di distacco di tipo lineare: queste costituiscono un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzasse l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello;
- assenza di fenomeni di frantumazione dei blocchi;
- metodo probabilistico Montecarlo per la determinazione del coefficiente di restituzione normale R_n e del coefficiente di restituzione tangenziale R_t . L'angolo di attrito al rotoscivolamento φ è stato scelto come valore deterministico cautelativo di 30°. Per i coefficienti di restituzione è stata adottata una distribuzione normale con i valori di media e deviazione standard (σ) riportati in Tabella 5. La Figura 28 riporta invece le tipologie di terreno utilizzate.

Tabella 5. Parametri di restituzione normale e tangenziale di input nelle analisi 2D.

Descrizione	Codice	R_n (-)	R_t (-)
Roccia affiorante	R	0.40 ($\sigma = 0.04$)	0.80 ($\sigma = 0.04$)
Roccia Boscata	RBV	0.30 ($\sigma = 0.04$)	0.70 ($\sigma = 0.04$)
Proprietà con presenza di appezzamenti con massi e muretti	PMM	0.30 ($\sigma = 0.04$)	0.65 ($\sigma = 0.04$)
Zone vegetate misto prato	VP	0.30 ($\sigma = 0.04$)	0.55 ($\sigma = 0.04$)
Strade	S	0.40 ($\sigma = 0.04$)	0.80 ($\sigma = 0.03$)

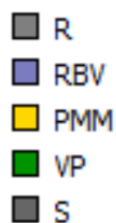


Figura 28. Tipologie di terreno e colore associato nelle analisi 2D.

7.4.1 Scelta dei parametri di restituzione

Per la scelta dei parametri di restituzione da adottare occorre, in linea di principio, ove possibile, effettuare:

- un accurato rilievo in situ per individuare la tipologia di terreno su cui il blocco eventualmente impatta;
- uno studio bibliografico della letteratura presente;
- i suggerimenti del software di calcolo adottato, in funzione delle assunzioni semplificative e delle ipotesi di calcolo su cui si basa;
- una calibrazione mediante back-analysis di eventi passati.

L'esecuzione di una back-analysis completa presuppone la conoscenza della zona di innesco, della volumetria, eventuali interferenze lungo il percorso e della zona di arrivo di uno specifico evento di crollo, per cui quindi si conosce la traiettoria e si ricercano i parametri che meglio rappresentano l'interazione suolo-blocco. Tali parametri sono funzione del codice di calcolo adottato.

Nel caso di informazioni mancanti o di analisi su media/grande scala questo tipo di calibrazione non risulta sempre possibile.

Nel caso in esame, è stato effettuato un accurato rilievo, utile per l'individuazione dei parametri di input per le analisi di propagazione tridimensionale, unitamente ad uno studio della letteratura presente e del manuale del software di calcolo adottato⁵.

Relativamente ad una completa calibrazione, il presente lavoro inquadra un territorio a medio-piccola scala, di cui si dispongono solo alcune informazioni rispetto ad eventi pregressi in specifici punti del territorio. Pertanto, in sede di una calibrazione mediante back-analysis, è stata eseguita una validazione dei parametri scelti effettuando analisi 2D sugli eventi occorsi rispettivamente il 19/04/2006 (codice fenomeno del Catasto Dissesti Regionale SCT: F-19-04-2006-00-v-Cr-x ID 6337) e il 16/10/2021 (codice fenomeno del Catasto Dissesti Regionale SCT: F-16-10-2021-00-v-Cr-x ID 36387) al fine di risimulare gli eventi pregressi di cui si hanno informazioni di maggior dettaglio e verificare che le ipotesi assunte producano risultati comparabili con le risultanze di questi eventi realmente occorsi.

A seguito sono riportate, per ciascun fenomeno, la descrizione sintetica dell'evento e risultanze delle simulazioni effettuate, in termini di:

- profilo con individuazione della tipologia di suolo utilizzata, della linea di distacco (a livello grafico indicata nelle figure con pallini bianchi) e delle traiettorie;

⁵ https://www.roscience.com/help/rocfall/baggage/rn_rt_table.htm

- punti di arresto lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- distribuzione delle velocità lungo il pendio sulla specifica direttrice.

Ai fini delle simulazioni sono stati adottati i seguenti parametri geomeccanici di input:

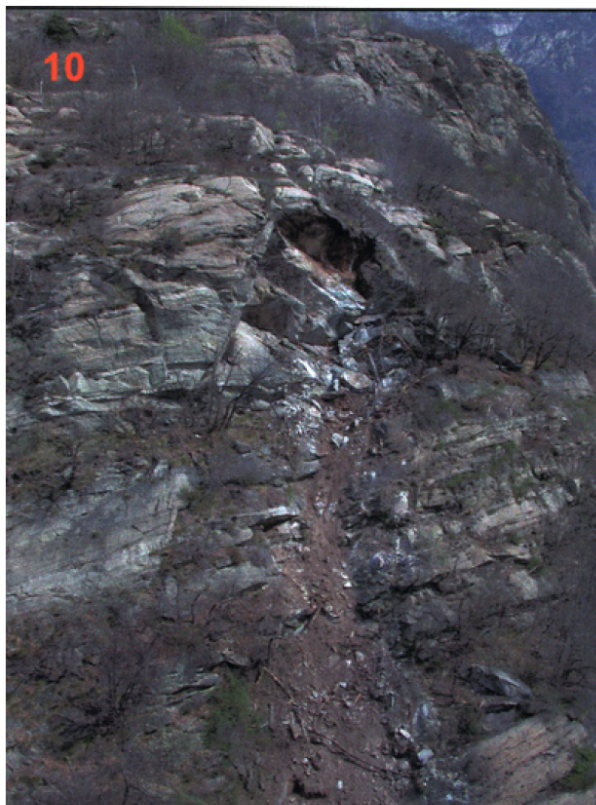
- base topografica di input: rilievo di dettaglio con isoipse ogni 50 cm;
- velocità di caduta iniziale: 0 m/s;
- sorgente di distacco lineare in corrispondenza delle indicazioni reperite nel Catasto Dissesti (a livello grafico indicata nelle figure con linee blu);
- densità della roccia: 2700 kg/m³;
- 5000 simulazioni per ogni sorgente di distacco di tipo lineare: queste costituiscono un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzasse l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello;
- assenza di fenomeni di frantumazione dei blocchi;
- metodo probabilistico Montecarlo per la determinazione del coefficiente di restituzione normale R_n e del coefficiente di restituzione tangenziale R_t . L'angolo di attrito al rotoscivolamento φ è stato scelto come valore deterministico cautelativo di 30°. Per i coefficienti di restituzione è stata adottata una distribuzione normale con i valori di media e deviazione standard (σ) riportati in Tabella 5. La Figura 28 riporta invece le tipologie di terreno utilizzate.

7.4.1.1 Evento del 19/04/2006 in località Peredrettes (ID 6337)

Il Catasto Dissesti riporta un occorso il 19/04/2006 in località Peredrettes (ID 6337), descritto come *“Frana di crollo. La massa franata impattando contro una balza rocciosa posta a valle della nicchia di distacco si è frantumata in vari blocchi che hanno percorso 3 diverse traiettorie di caduta. Lungo queste traiettorie i blocchi hanno intercettato il bosco e la strada comunale sottostanti, talora oltrepassandoli e giungendo quasi nel fondovalle.”* (Figura 29).



Vista dall'alto del settore immediatamente a monte della strada romana



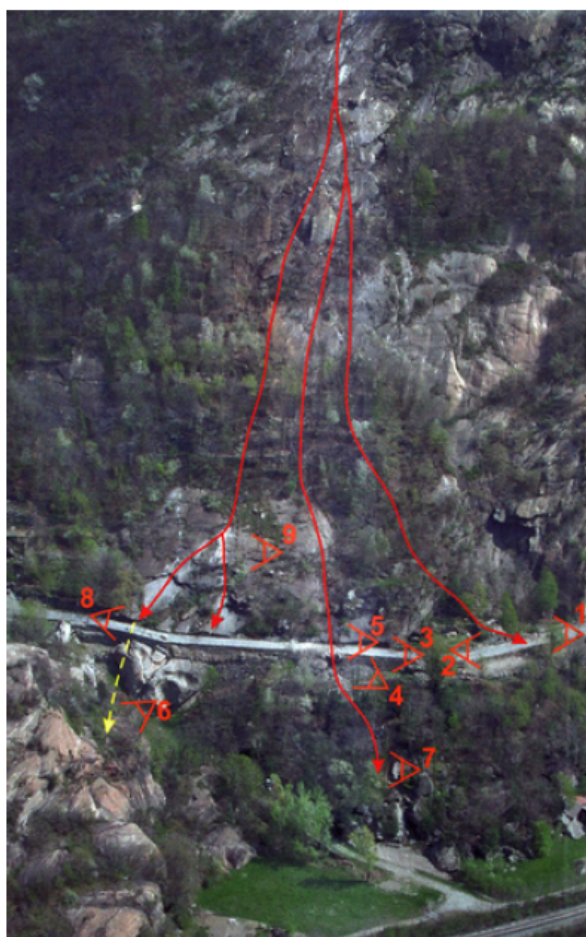
Vista frontale sulla nicchia di distacco

Figura 29. Foto dell'evento occorso il 19/04/2006 (Catasto Dissesti ID 6337).

Il crollo si è sviluppato lungo tre direttrici (Figura 30). Coerentemente sono state eseguite 3 analisi traiettografiche sulle medesime direttrici (Figura 31).



Vista sulla parte alta della traiettoria compiuta dai blocchi.



Vista sulla parte bassa della traiettoria compiuta dai blocchi.

Figura 30. Foto dell'evento occorso il 19/04/2006 (Catasto Dissesti ID 6337): traiettorie percorse.

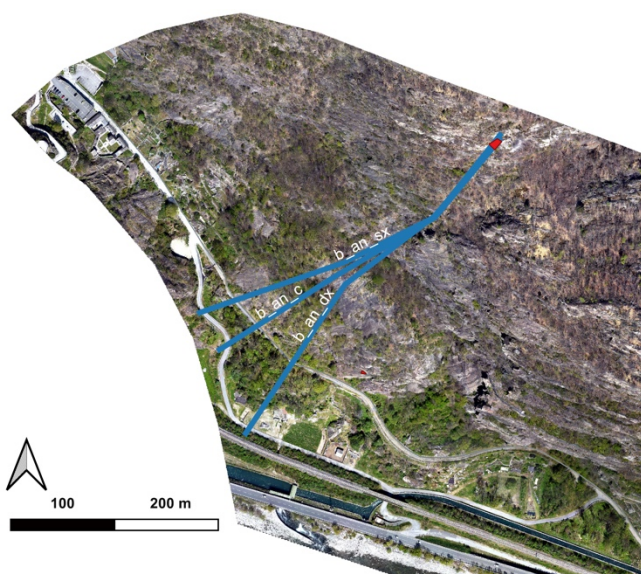
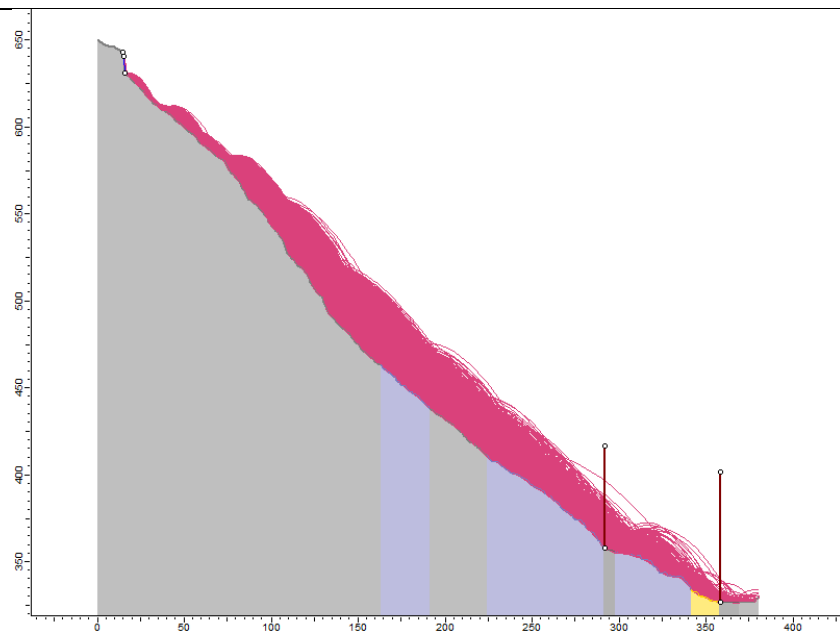


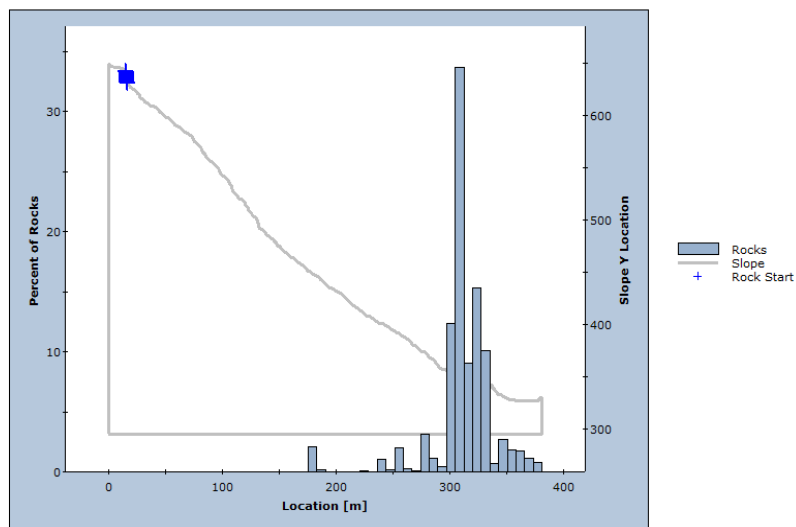
Figura 31. Traiettorie di caduta simulate

Profilo b_an_dx (destra)

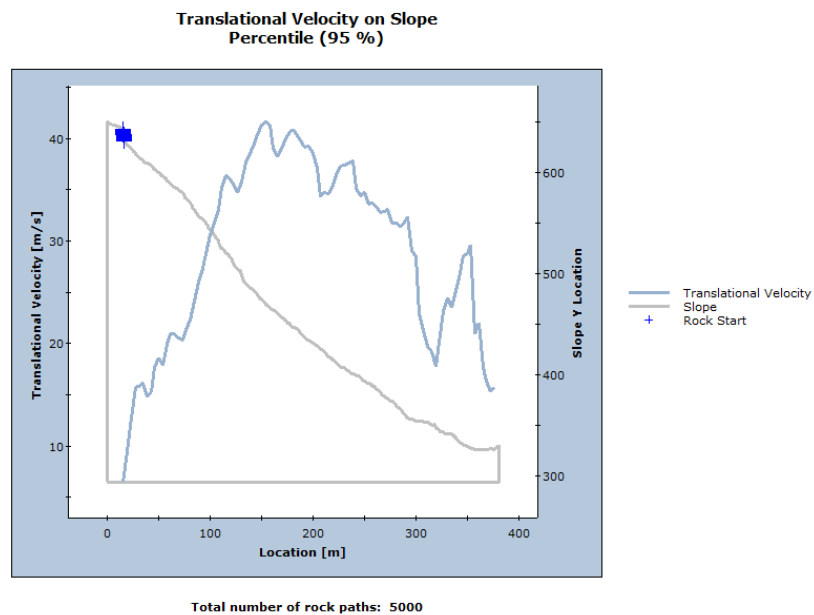
1 linea di distacco (5000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations



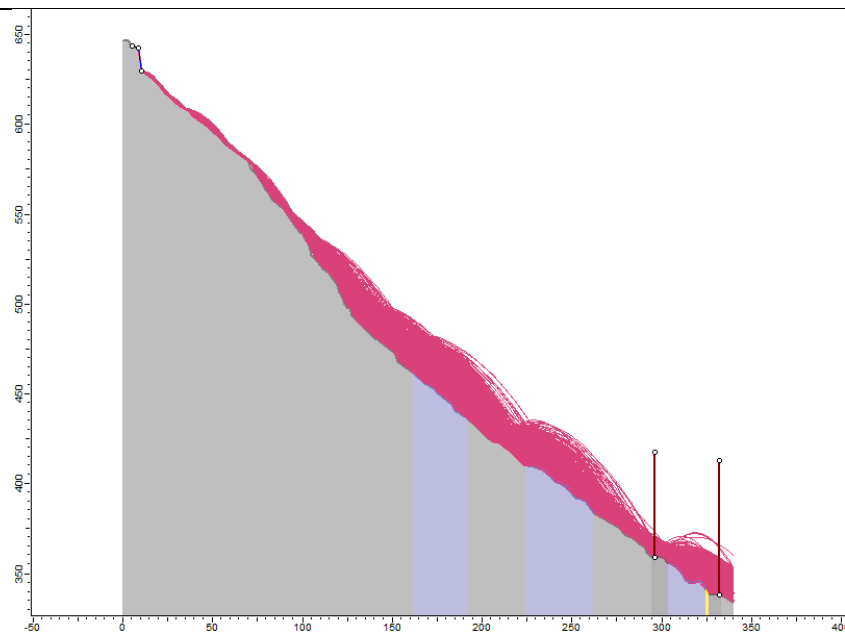
Total number of rock paths: 5000



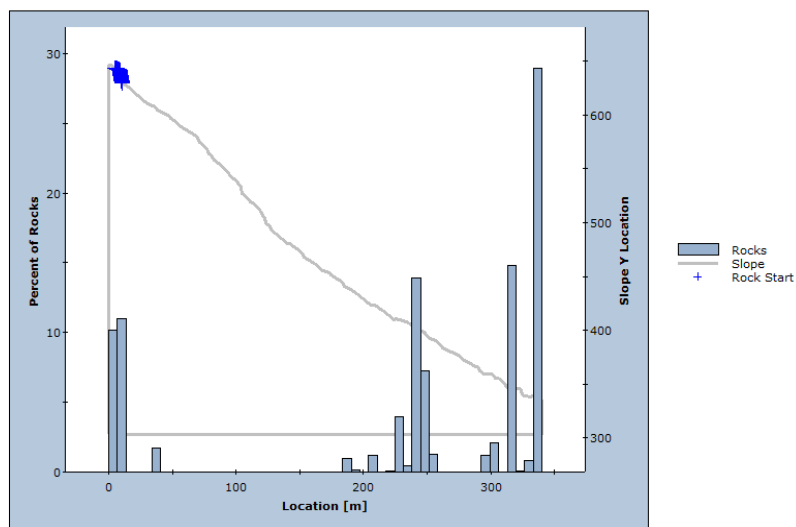
Si evidenzia come i blocchi arrivino e si arrestino in gran parte in corrispondenza della Strada Romana delle Gallie (collettore a monte), mentre pochi altri proseguano nella sottostante strada (collettore a valle).

Profilo b_a_n_c (centrale)

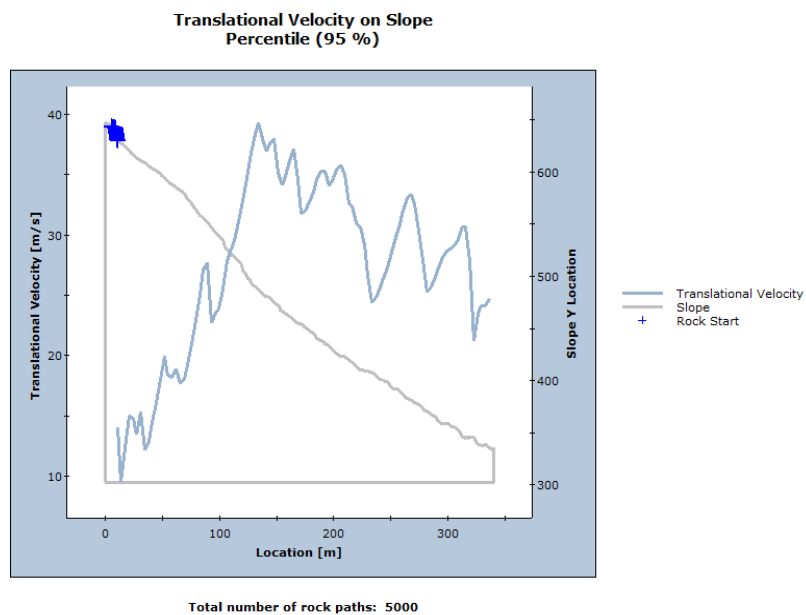
1 linea di distacco (5000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations



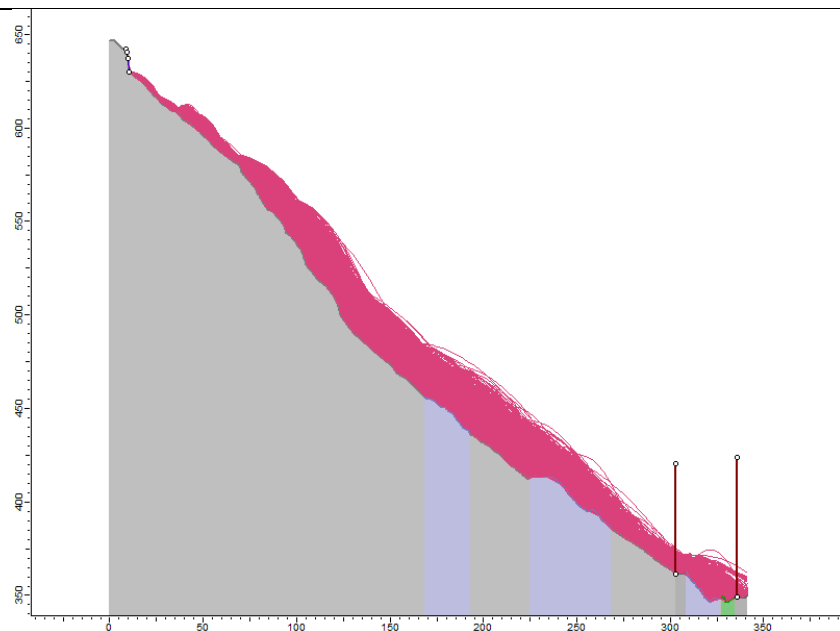
Total number of rock paths: 5000



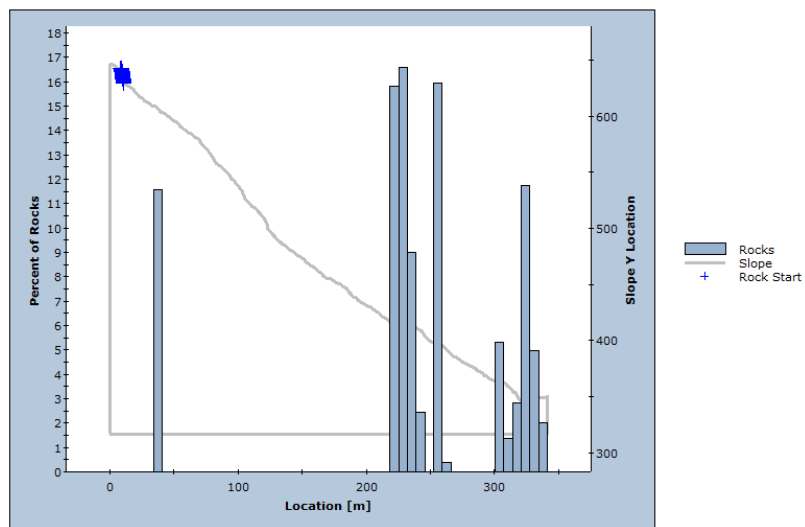
Si evidenzia come i blocchi arrivino e si arrestino in parte lungo il pendio, in parte in corrispondenza della Strada Romana delle Gallie (collettore a monte) e in parte proseguano fino alla strada sottostante (collettore a valle). Le due strade in questa sezione risultano infatti molto vicine fra loro. Anche nel fenomeno occorso la traiettoria centrale risulta quella in cui i punti di arresto sono avvenuti più a valle (Figura 30).

Profilo b_an_sx (Sinistra)

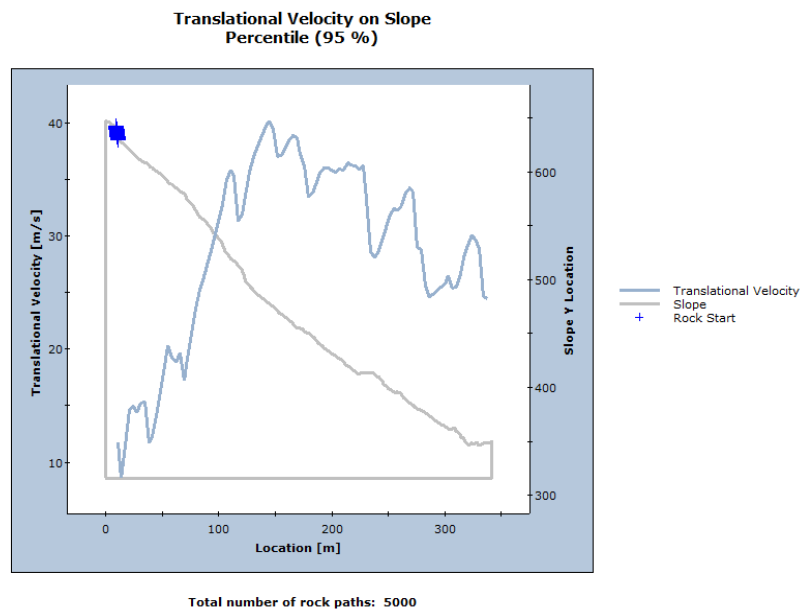
1 linea di distacco (5000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations



Total number of rock paths: 5000



Si evidenzia come i blocchi arrivino e si arrestino in parte lungo il pendio, in gran parte in corrispondenza della Strada Romana delle Gallie (collettore a monte) e in parte proseguano fino alla strada sottostante (collettore a valle). Le due strade in questa sezione risultano infatti molto vicine fra loro.

7.4.1.2 Evento del 16/10/2021 in località San Giovanni (ID 36387)

Il Catasto Dissesti riporta un occorso il 16/10/2021 in località San Giovanni (ID 36387), descritto come *“Frana di crollo [...]il fenomeno di dissesto si è innescato nella giornata di sabato 16 ottobre 2021 ed è consistito in un crollo lapideo che ha coinvolto un volume complessivo stimato di circa 40-50 mc. Il materiale franato, litologicamente costituito da micascisti eclogitici a mica bianca della Zona Sesia-Lanzo (Sistema Austroalpino), si è mobilizzato secondo un evidente cinematismo di scivolamento a cuneo a partire da un settore di parete rocciosa situato circa 15-20 m a monte della carreggiata, per poi percorrere secondo una dinamica di scivolamento e piccoli rimbalzi la sottostante placca rocciosa inclinata prima di impattare al suolo e frantumarsi in volumi unitari di minor pezzatura rispetto al volume originario. La maggior parte del materiale franato, fortemente eterometrico (VRU compreso fra pochi dmc fino a 2-3 mc), si è accumulato sulla carreggiata, ostruendola completamente, mentre alcuni elementi lapidei con VRU >1mc, dopo aver sfondato il cordolo in muratura bordo strada, hanno arrestato la propria dinamica di caduta nel sottostante settore prativo.”* Alcune immagini dell’evento sono riportate in Figura 32. Figura 33 riporta la traiettoria di caduta simulata.



Figura 32. Foto dell'evento occorso il 16/10/2021 (Catasto Dissesti ID 36387).

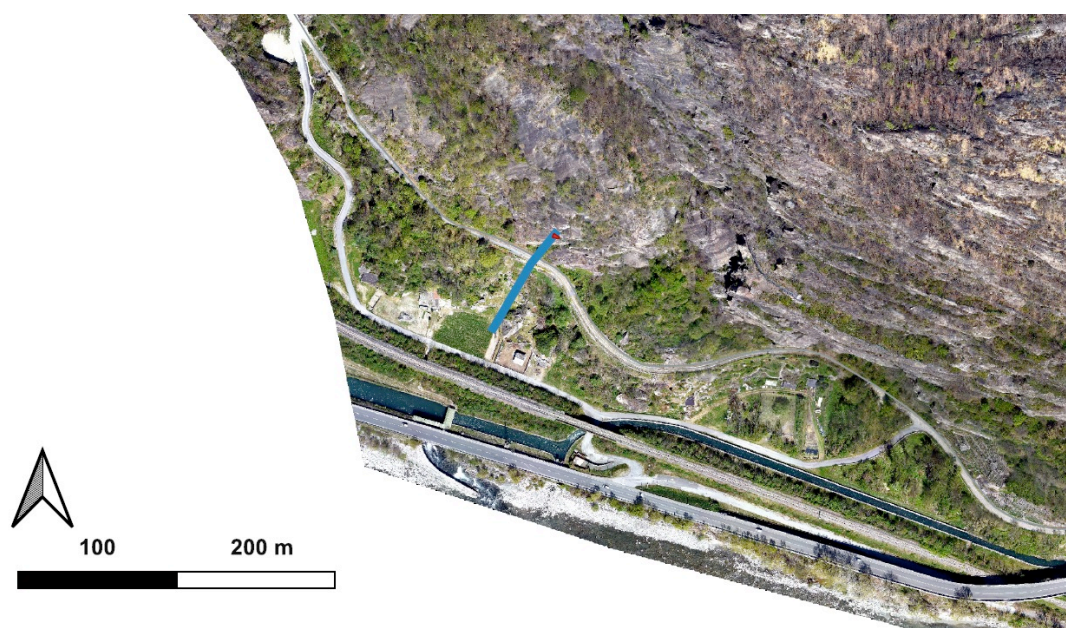
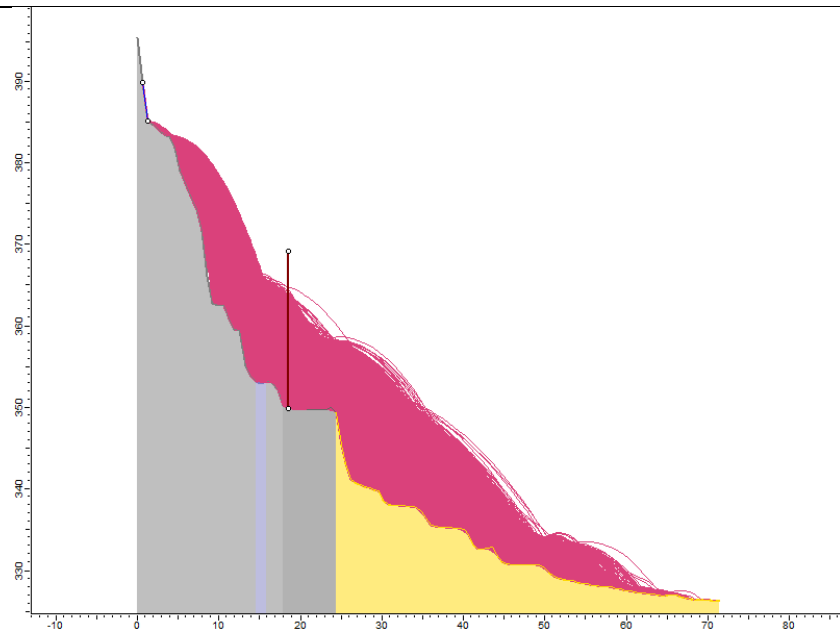
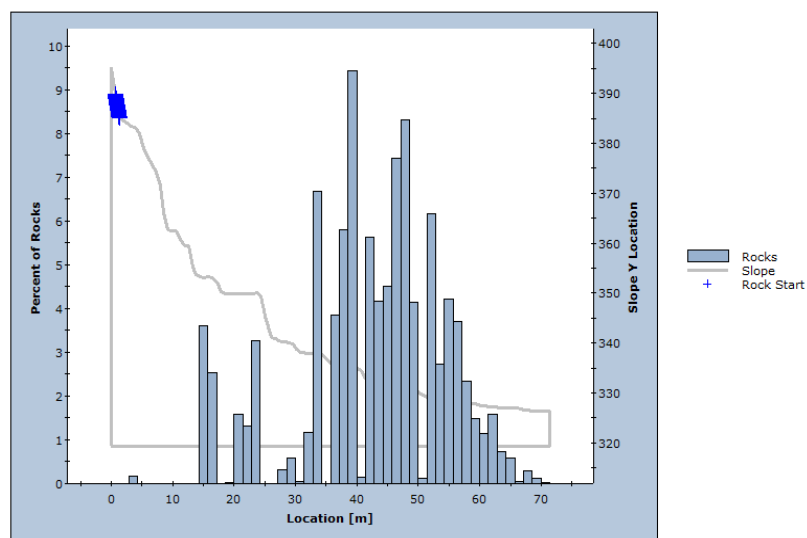


Figura 33. Traiettoria di caduta simulata

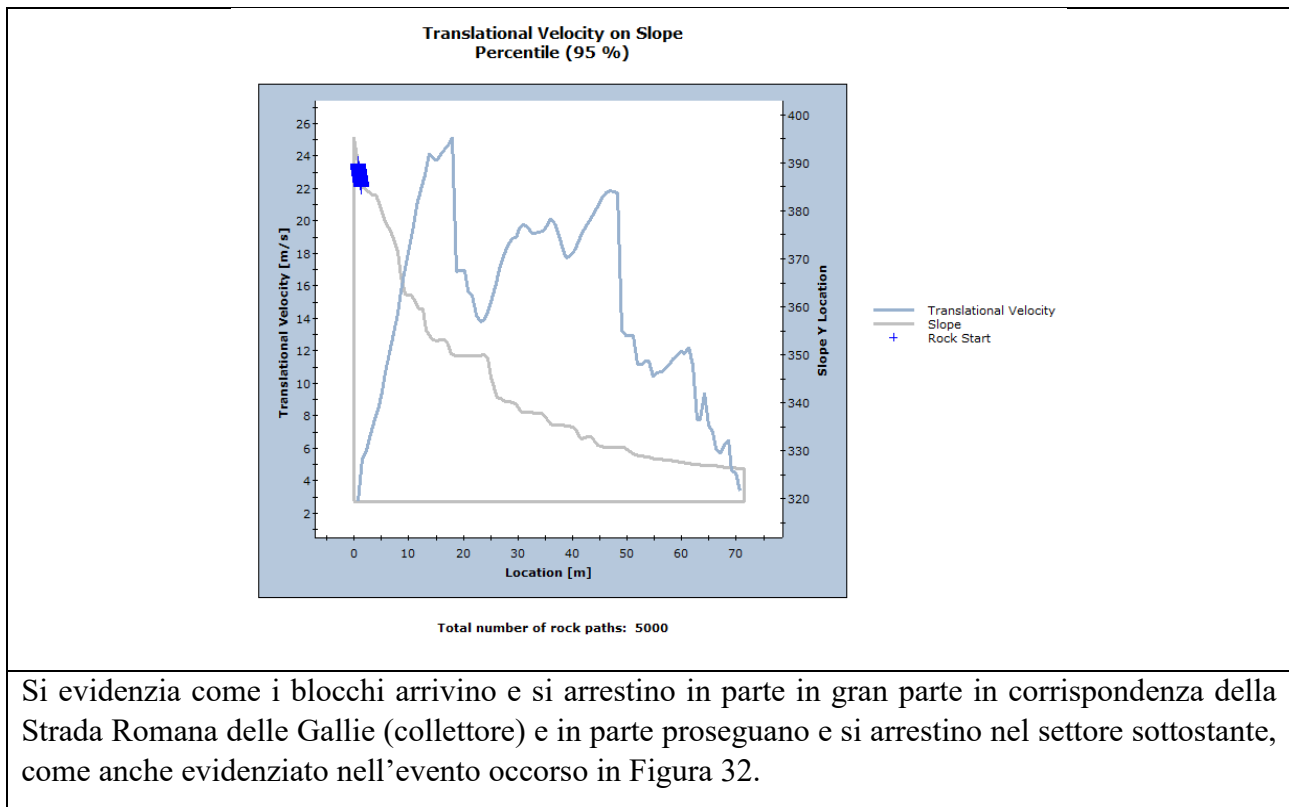
1 linea di distacco (5000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations



Total number of rock paths: 5000



7.4.2 Analisi traiettografiche bidimensionali per la valutazione dell'energia

Le simulazioni preliminari per la valutazione dell'energia sono state impostate su sezioni trasversali al versante ritenute particolarmente significative, in funzione dei risultati delle analisi di propagazione tridimensionali effettuate nell'analisi di pericolosità e scegliendo il percorso di caduta più probabile in funzione della topografia del sito. Le aree sorgenti identificate sono state scelte in funzione di quanto espresso nel Rapporto Tecnico e nell'Allegato 5 a cura di IMAGEO, già precedentemente citato. Si riportano nel seguito i risultati relativi alle analisi traiettografiche 2D eseguite (Figura 34, Figura 35). In particolare il §7.4.2.1 illustra le risultanze della propagazione in assenza di opere di protezione (equivalente ad attribuire un'efficacia nulla alle barriere di protezione). Il §7.4.2.2 riporta invece le analisi integrative che tengono in considerazione l'attuale presenza di opere di mitigazione del rischio.

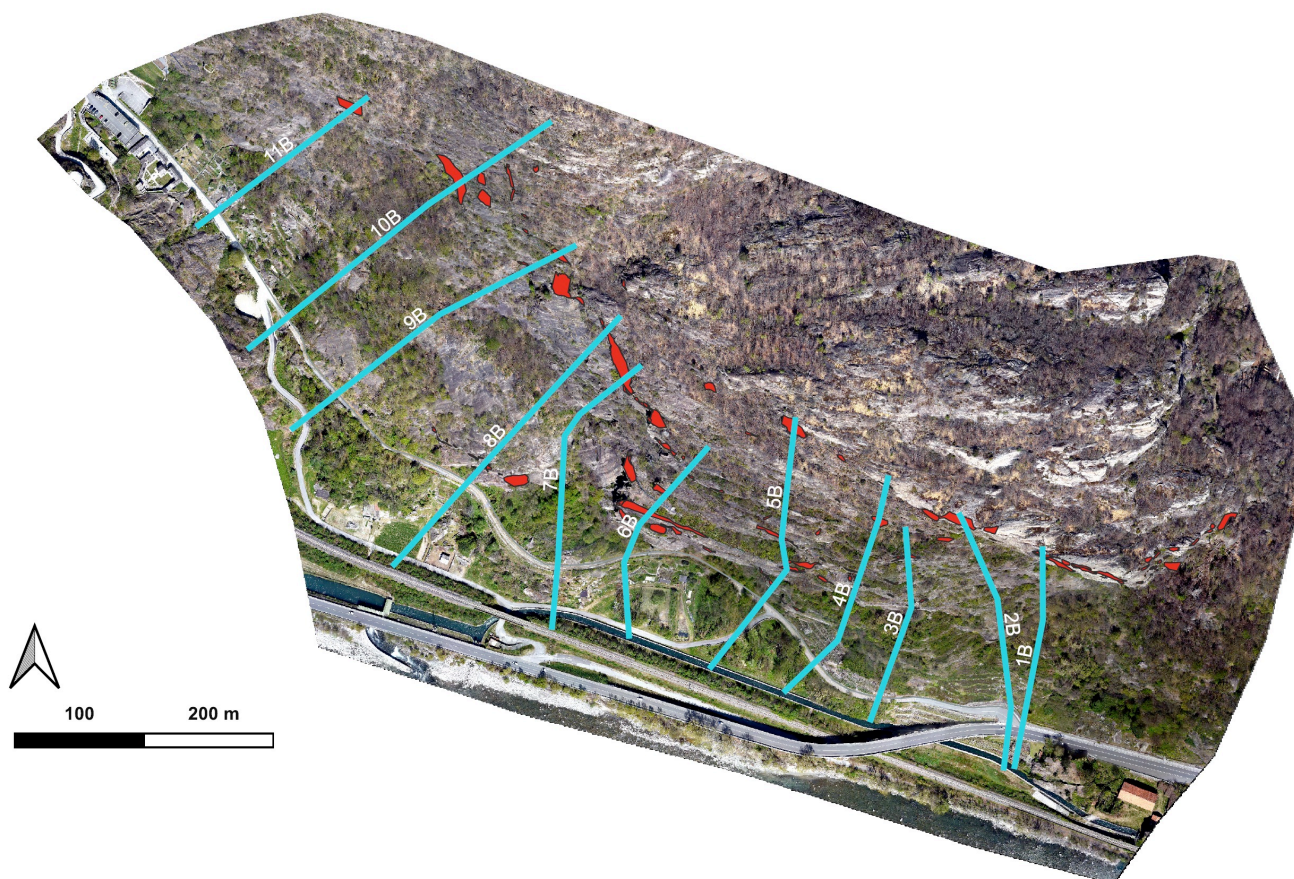


Figura 34. Planimetria dei profili individuati. In rosso sono indicate le aree sorgenti identificate nel Rapporto Tecnico a cura di IMAGEO datato 15/03/2021.

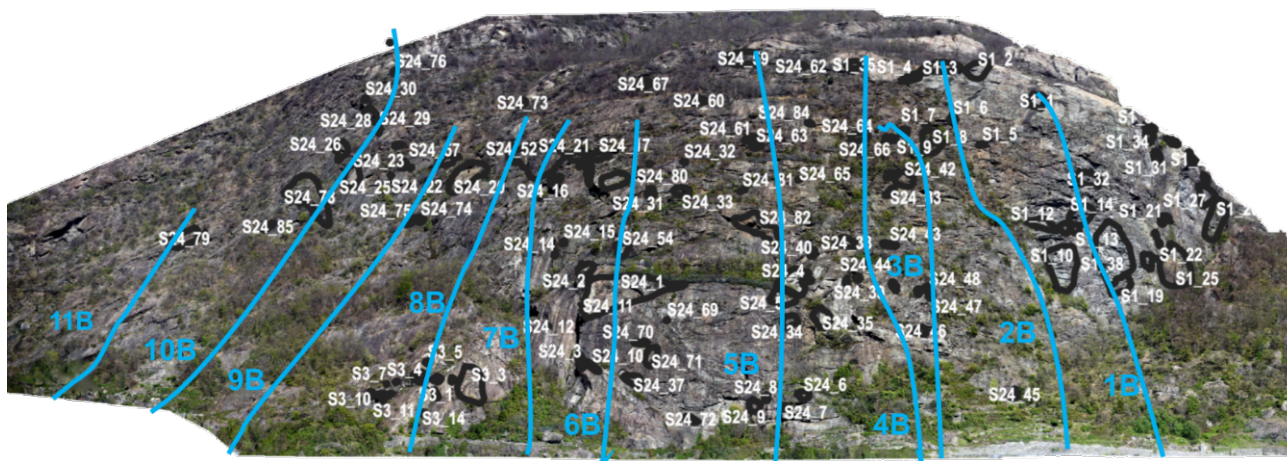


Figura 35. Vista prospettica dei profili realizzati. In nero sono indicate le aree sorgenti identificate nel Rapporto Tecnico a cura di IMAGEO, con la nomenclatura come da Rapporto.

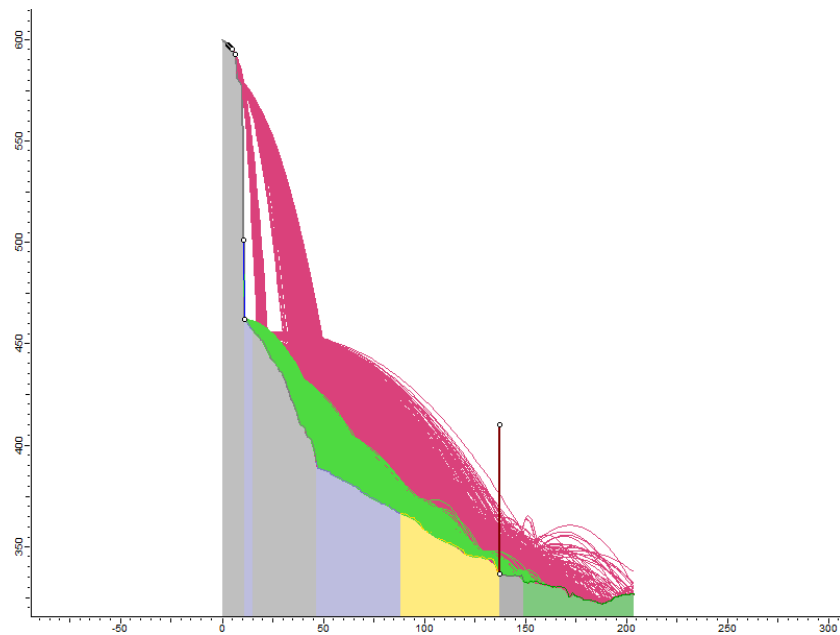
Per ogni sezione vengono riportate le immagini relative a:

- profilo con individuazione della tipologia di suolo utilizzata (come da Figura 28) , delle linee di distacco (a livello grafico indicata nelle figure con pallini bianchi e linee blu) e delle traiettorie per ogni linea di distacco (rappresentate nelle figure con colori differenti a seconda della linea di distacco da cui provengono). Nei casi in cui non evidenti rimbalzi, il moto è in prevalenza di rototraslazione. Lungo il profilo è indicato un collettore a monte corrispondente alla Strada Romana delle Gallie e uno a valle corrispondente all'Altra Strada. Dove presente un unico collettore, i due tratti di strada coincidono;
- distribuzione percentuale dei punti di arresto lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- distribuzione delle velocità (95° percentile per ogni area sorgente) lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- distribuzione delle altezze di volo (95° percentile per ogni area sorgente) lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- frequenza di arresto, considerando complessivamente tutte le aree sorgente lungo il pendio sulla specifica direttrice, in corrispondenza dei due collettori;
- velocità 95% considerando complessivamente tutte le aree sorgente lungo il pendio sulla specifica direttrice, in corrispondenza dei due collettori;
- altezza di volo 95% considerando complessivamente tutte le aree sorgente lungo il pendio sulla specifica direttrice, in corrispondenza dei due collettori.

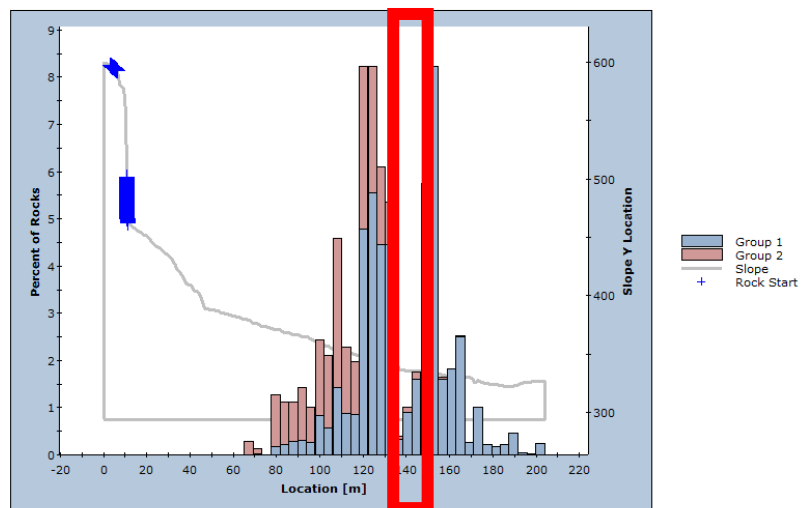
7.4.2.1 Analisi in assenza di barriere

Profilo 1A

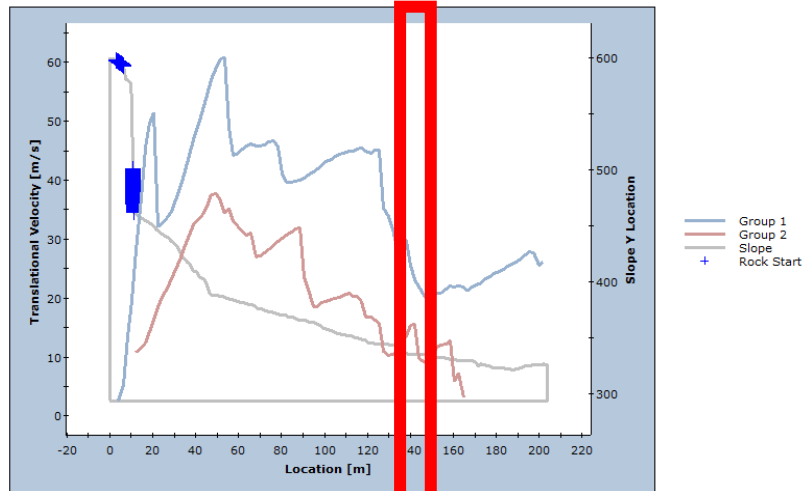
2 linee di distacco (10000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

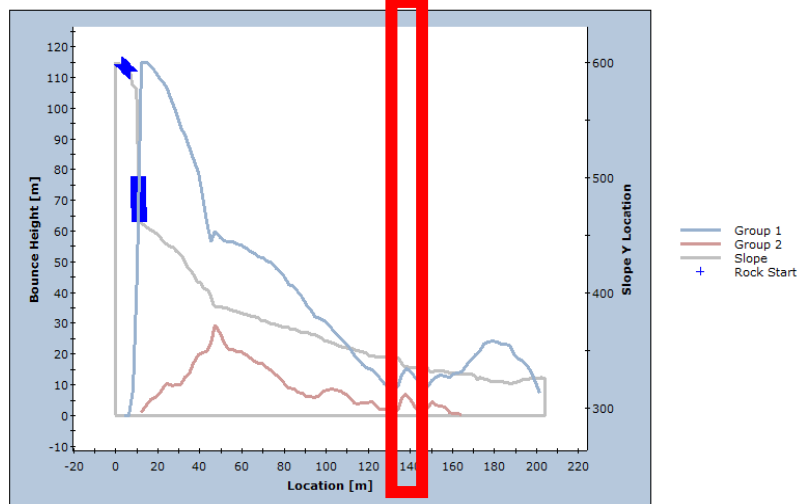


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

Collettore Strada Romana delle Gallie e Altra Strada:

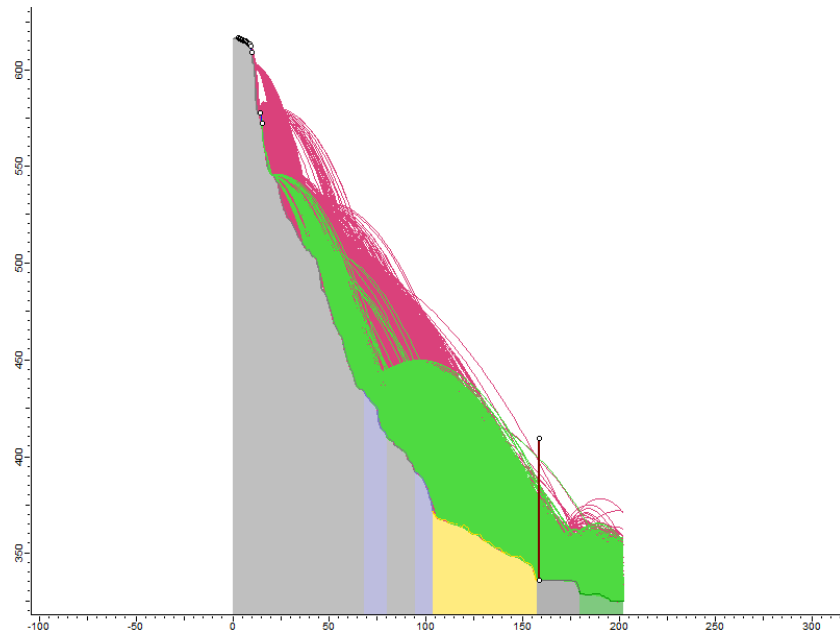
%blocchi: 28%

Velocità (95%): 28.83 m/s

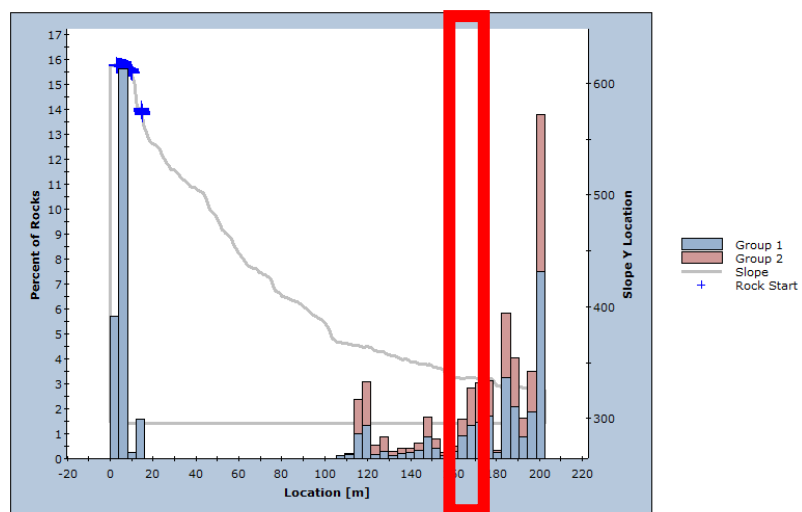
Altezza (95%): 14.84 m

Profilo 2A

2 linee di distacco (10000 lanci)

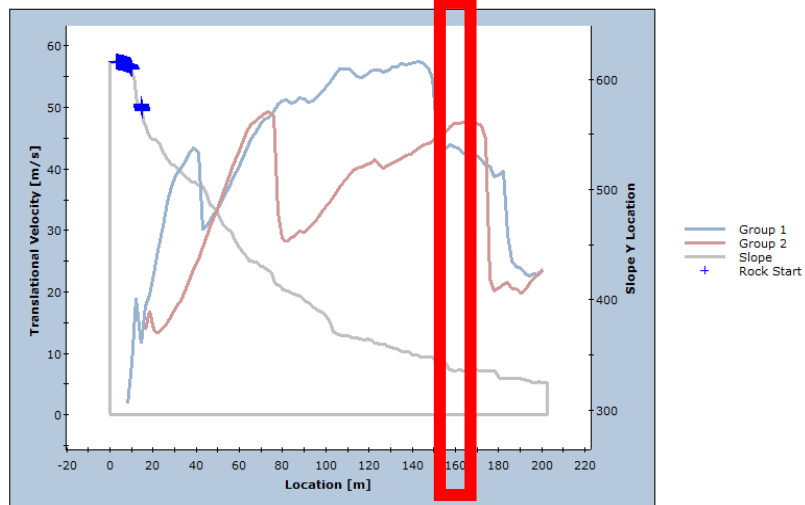


Distribution of Rock Path End Locations



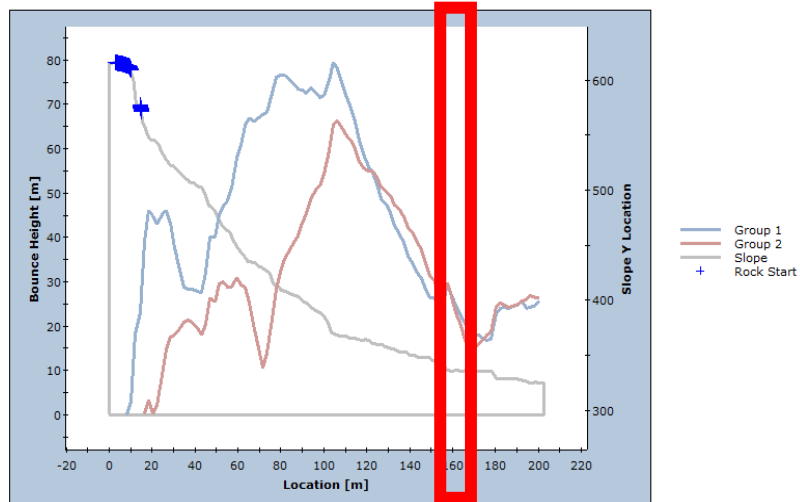


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

Collettore Strada Romana delle Gallie e Altra Strada:

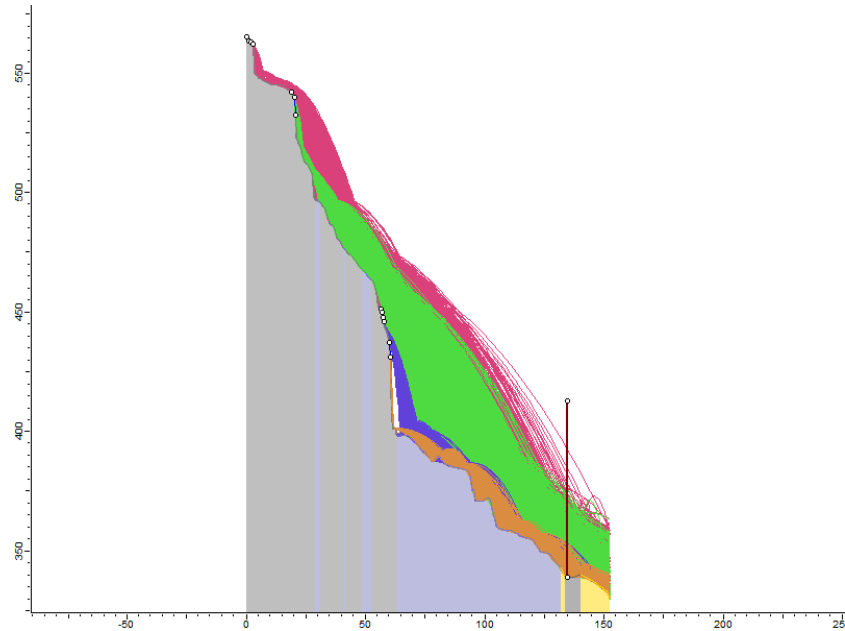
%blocchi: 59%

Velocità (95%): 47.19 m/s

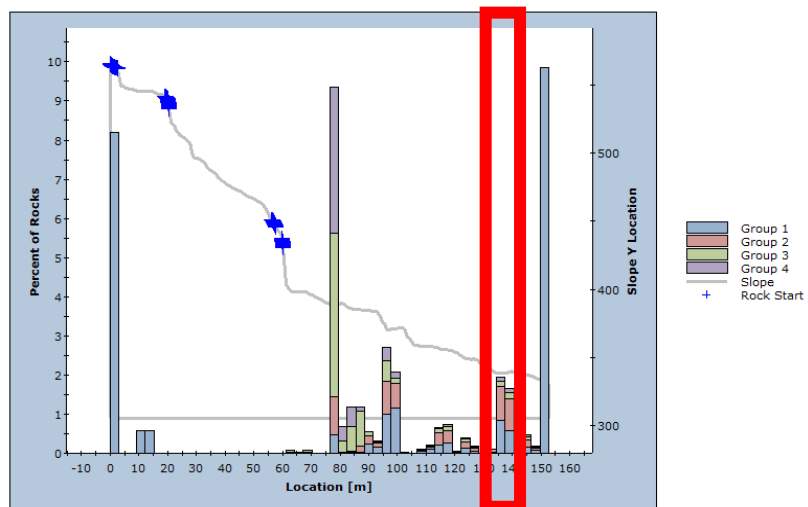
Altezza (95%): 28.20 m

Profilo 3B

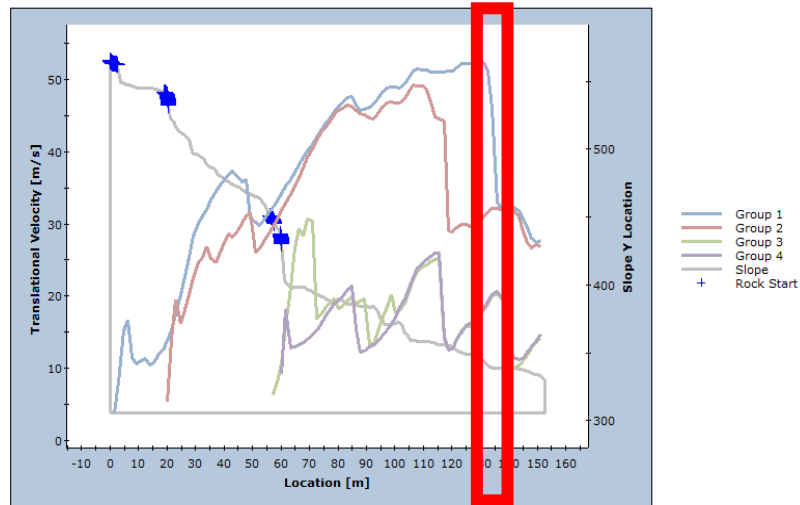
4 linee di distacco (20000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

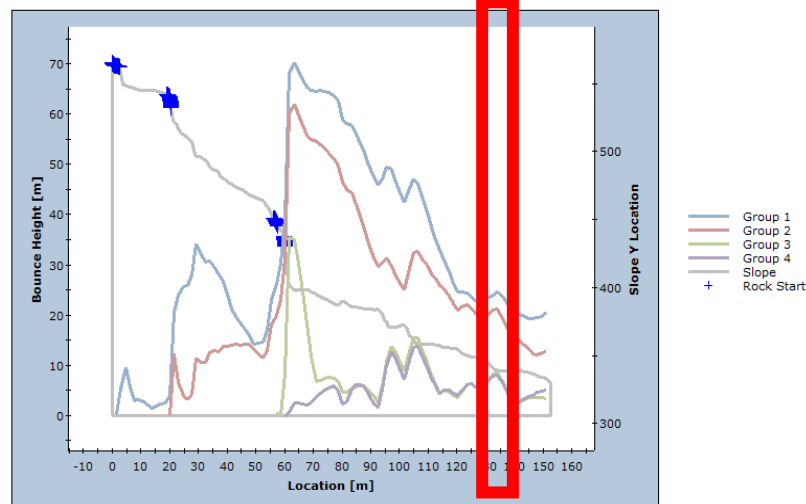


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 20000 of 20000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3, Group 4

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 20000 of 20000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3, Group 4

Collettore Strada Romana delle Gallie e Altra Strada:

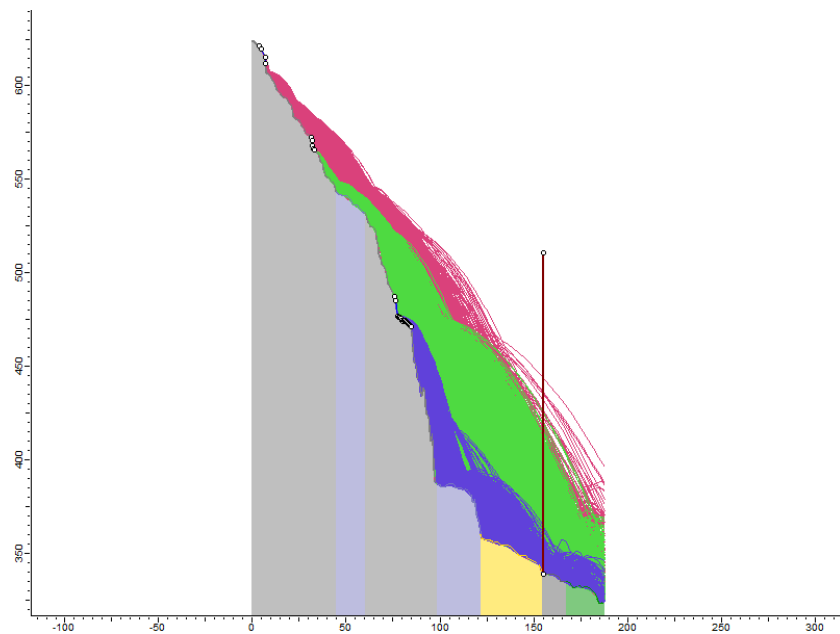
%blocchi: 38%

Velocità (95%): 32.49 m/s

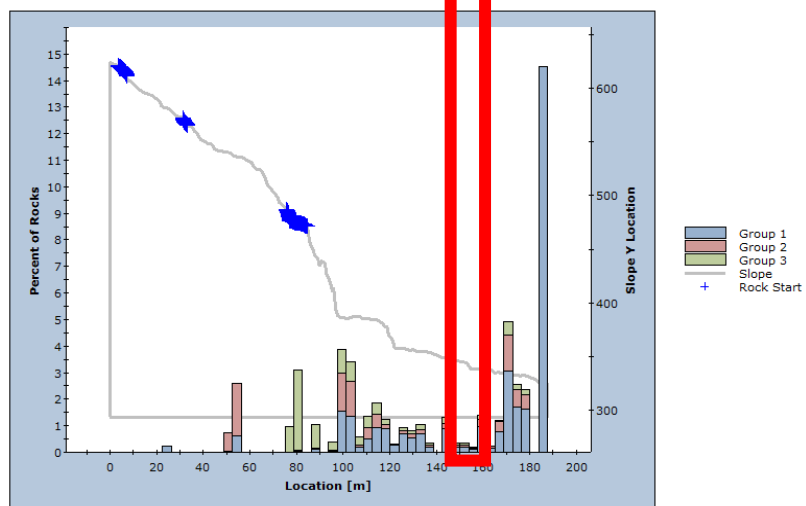
Altezza (95%): 22.14 m

Profilo 4B

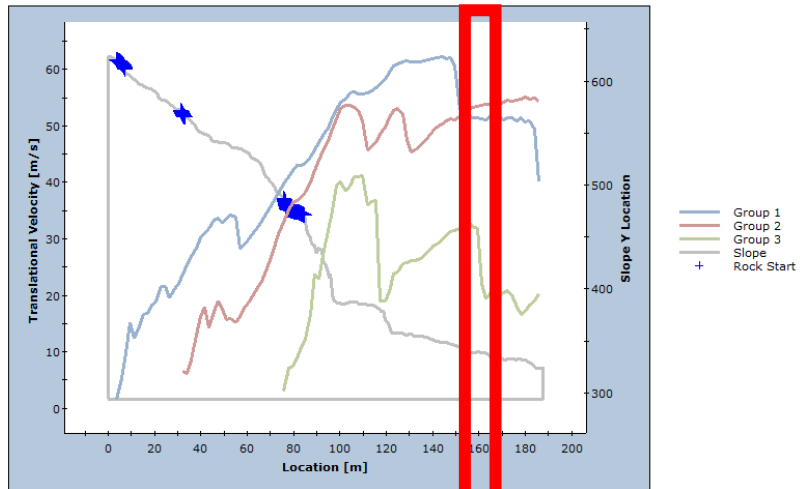
3 linee di distacco (15000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

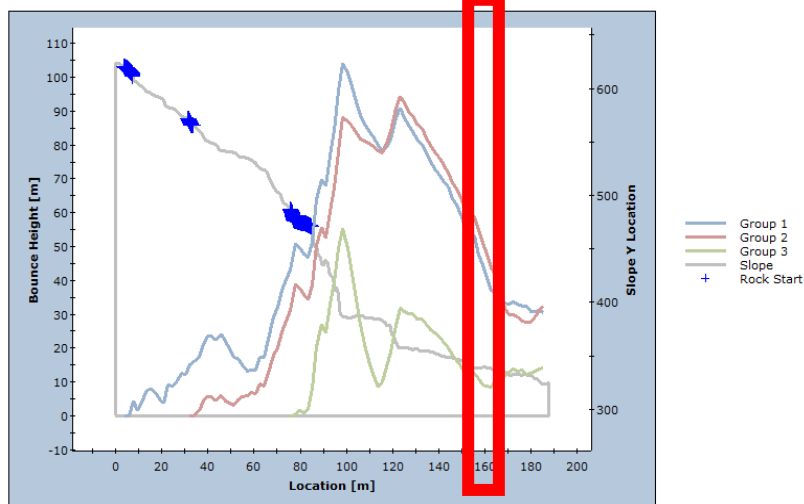


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 9000 of 9000
 Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 9000 of 9000
 Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

Collettore Strada Romana delle Gallie e Altra Strada:

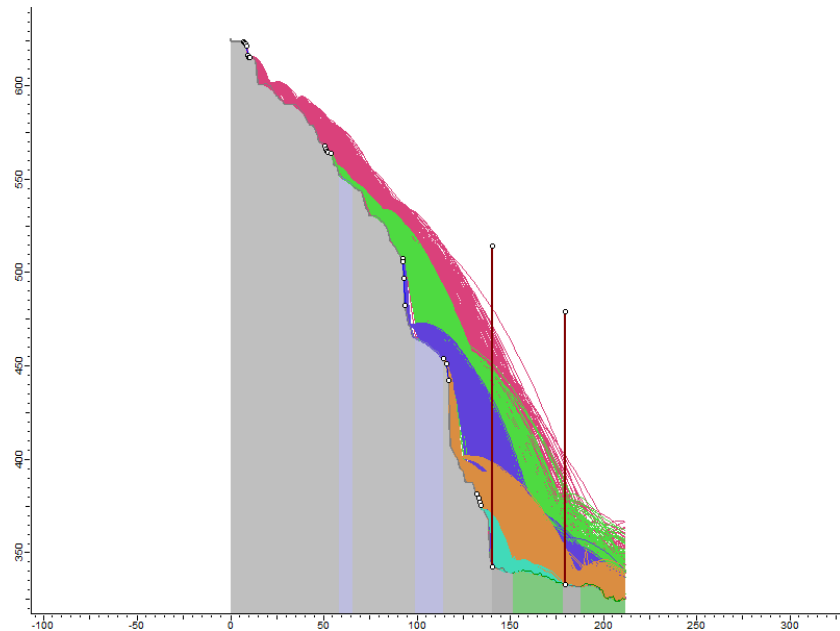
%blocchi: 29%

Velocità (95%): 52.60 m/s

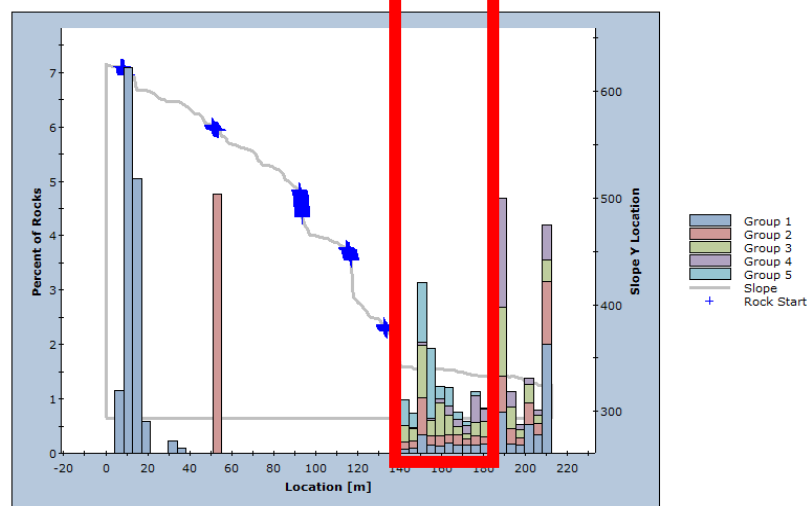
Altezza (95%): 56.44 m

Profilo 5B

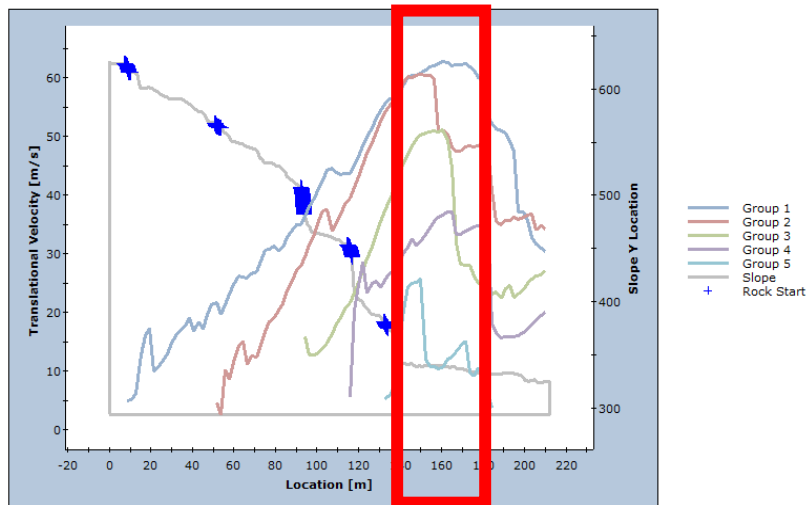
5 linee di distacco (25000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

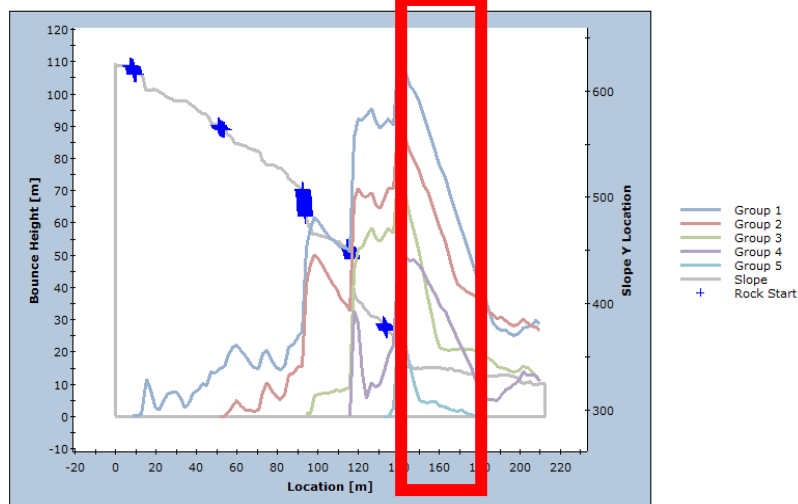


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 25000 of 25000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3, Group 4, Group 5

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 25000 of 25000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3, Group 4, Group 5

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi: 84%

Velocità (95%): 53.59 m/s

Altezza (95%): 82.35 m

Collettore Altra Strada:

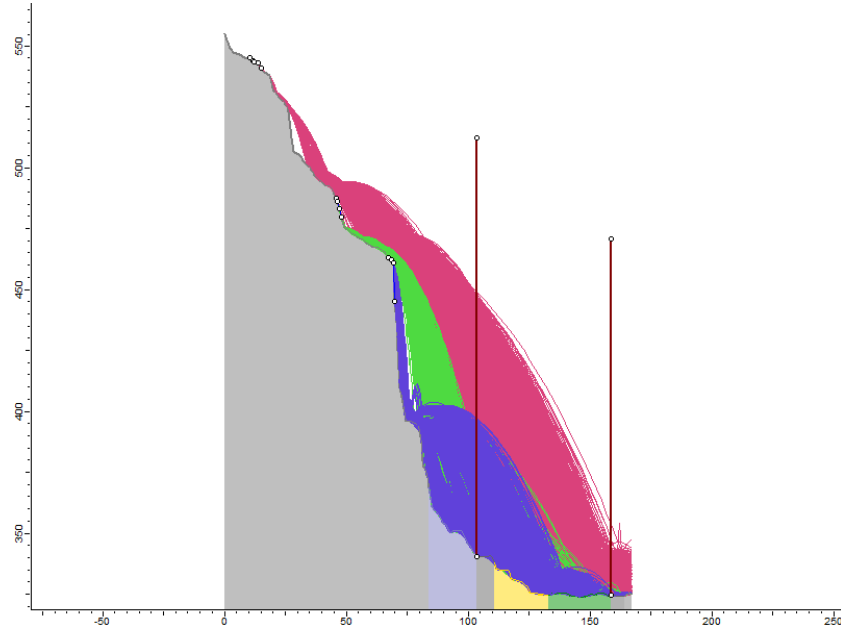
%blocchi: 37%

Velocità (95%): 42.29 m/s

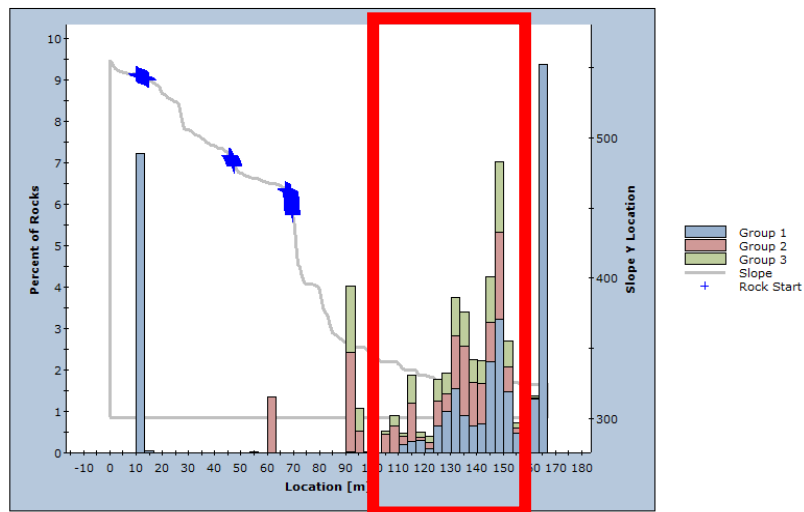
Altezza (95%): 26.23 m

Profilo 6B

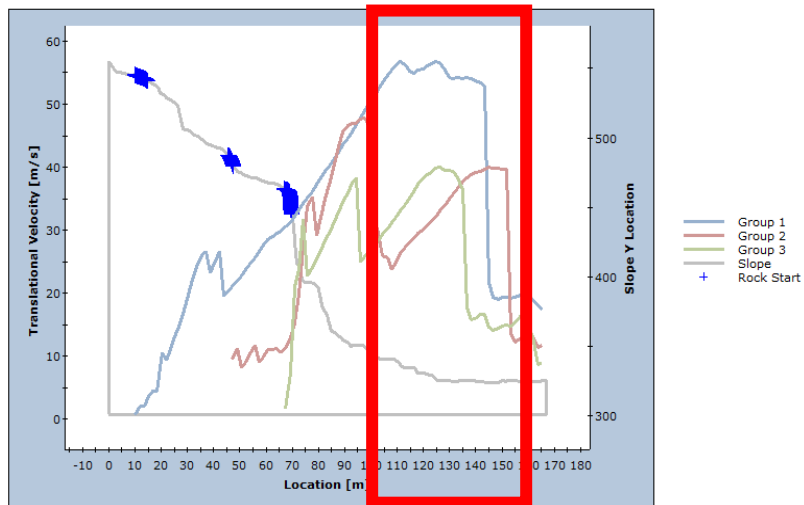
3 linee di distacco (15000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

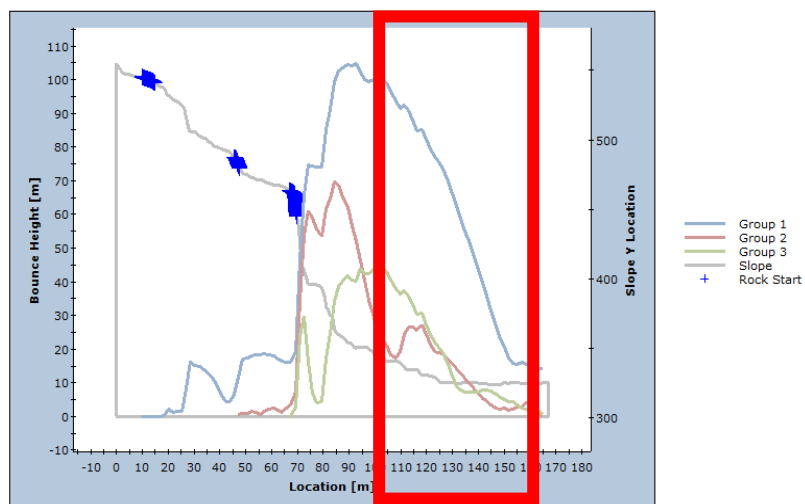


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 15000 of 15000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 9000 of 9000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi: 79%

Velocità (95%): 48.87 m/s

Altezza (95%): 81.76 m

Collettore Altra Strada:

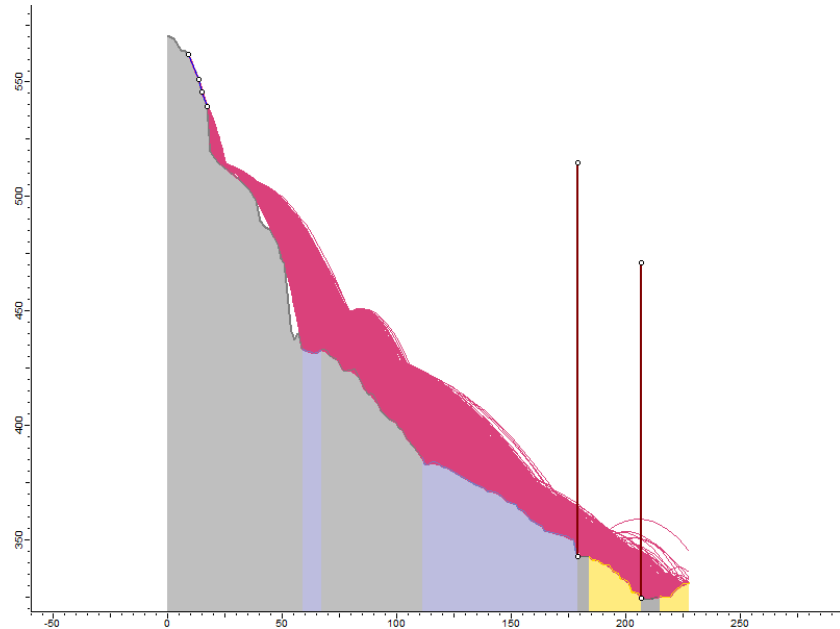
%blocchi: 9%

Velocità (95%): 19.50 m/s

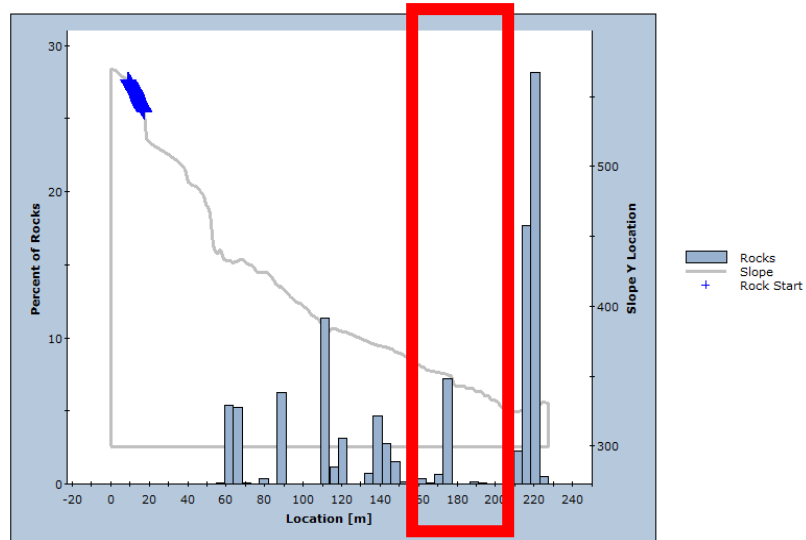
Altezza (95%): 13.06 m

Profilo 7B

1 linea di distacco (5000 lanci)

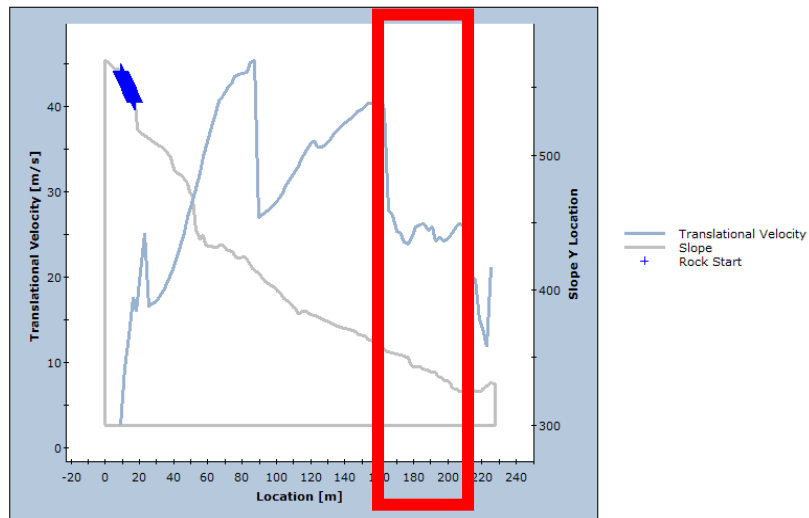


Distribution of Rock Path End Locations



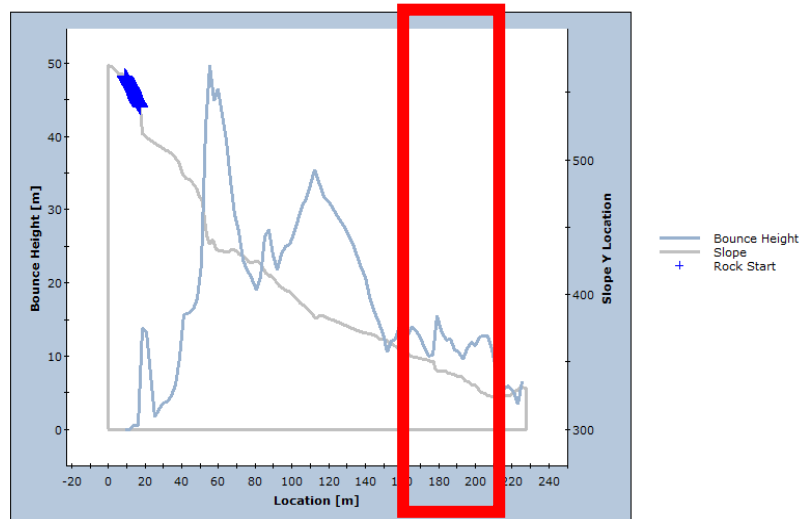
Total number of rock paths: 5000

**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of rock paths: 5000

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of rock paths: 5000

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi: 49%

Velocità (95%): 24.86 m/s

Altezza (95%): 15.58 m

Collettore Altra Strada:

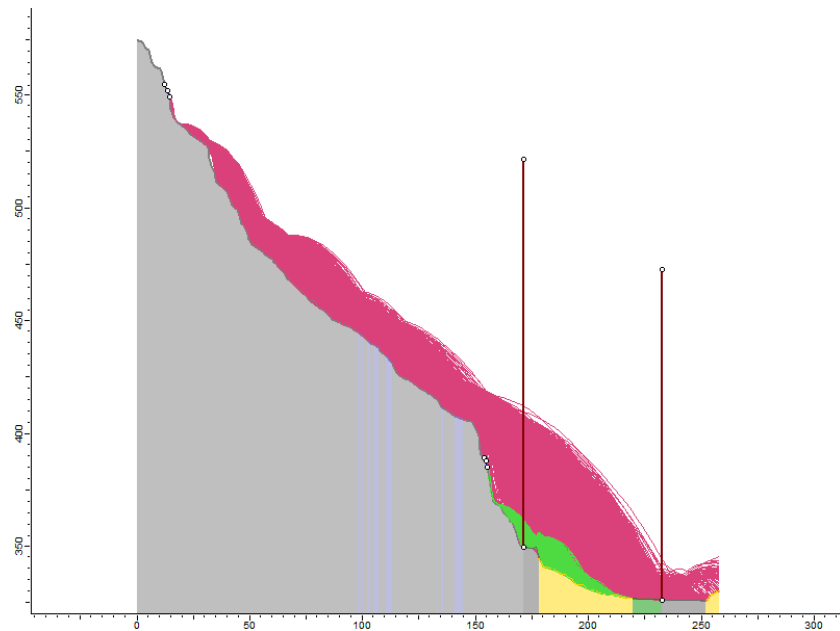
%blocchi: 49%

Velocità (95%): 26.22 m/s

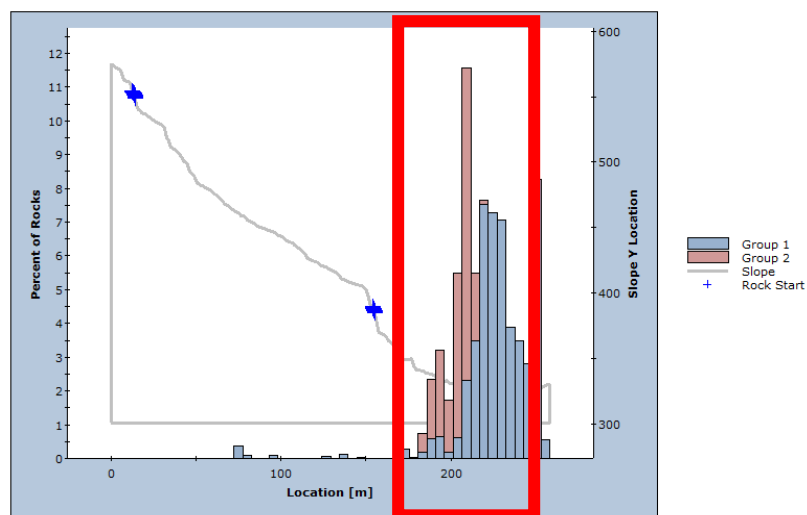
Altezza (95%): 12.97 m

Profilo 8B

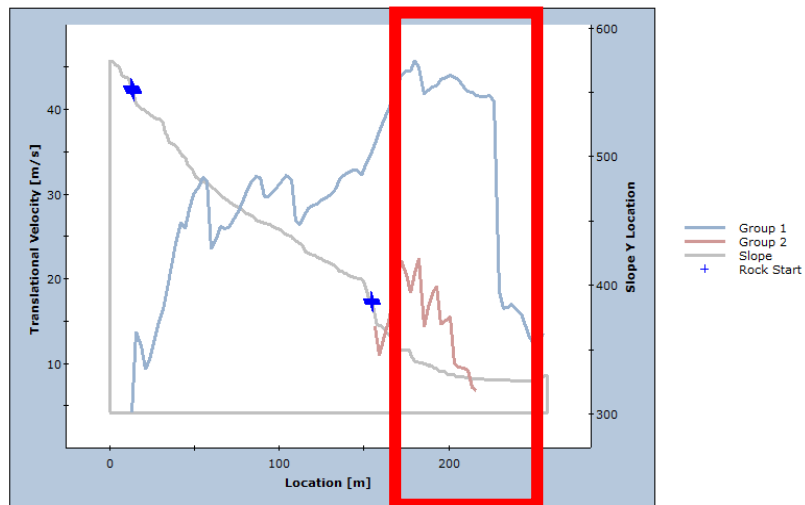
2 linee di distacco (10000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

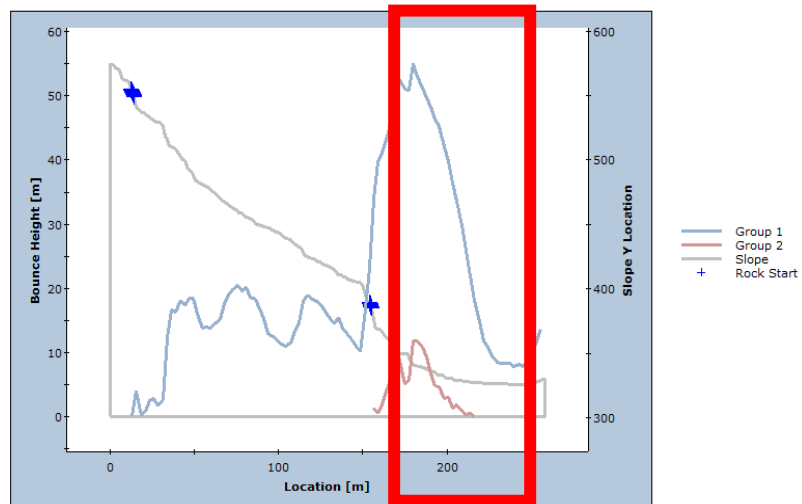


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi: 99%

Velocità (95%): 39.50 m/s

Altezza (95%): 50.44 m

Collettore Altra Strada:

%blocchi: 19%

Velocità (95%): 17.24 m/s

Altezza (95%): 8.39 m

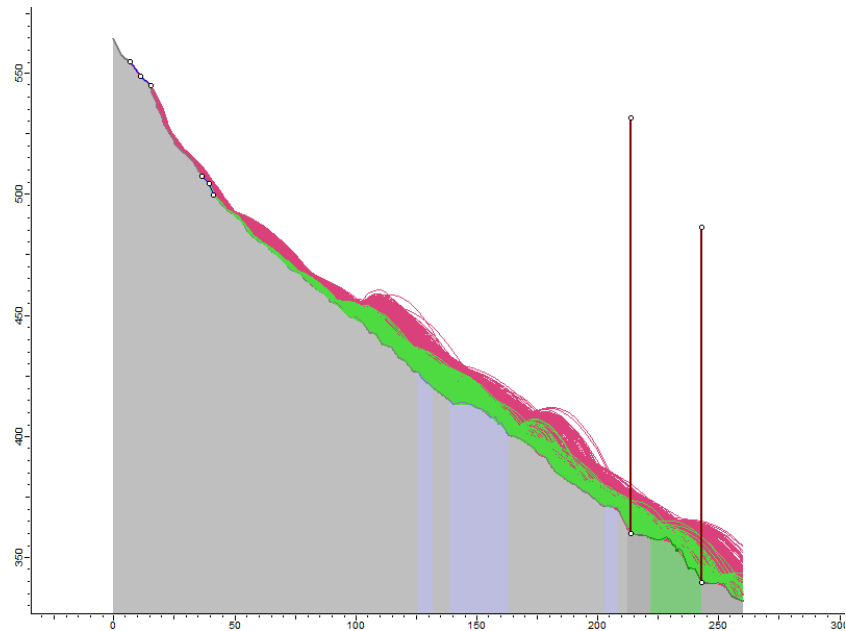


**Politecnico
di Torino**

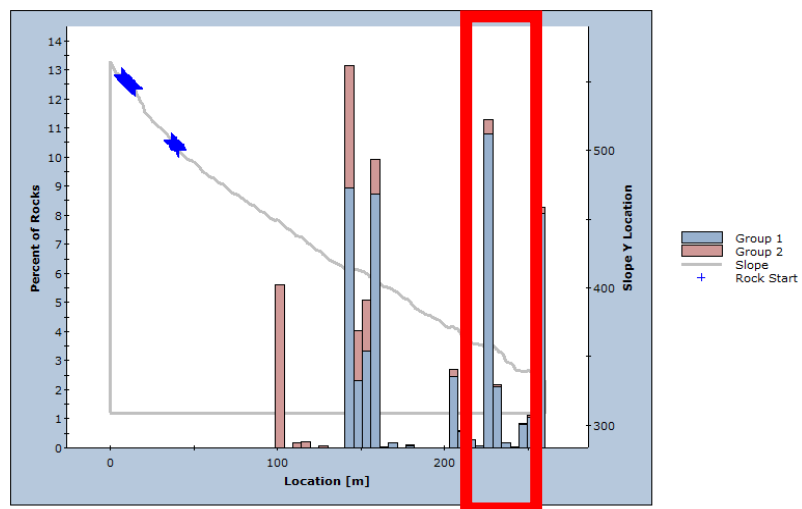
Supporto altamente specialistico al responsabile del procedimento nell'ambito della progettazione di interventi di difesa della strada Romana delle Gallie – RELAZIONE FINALE

Profilo 9B

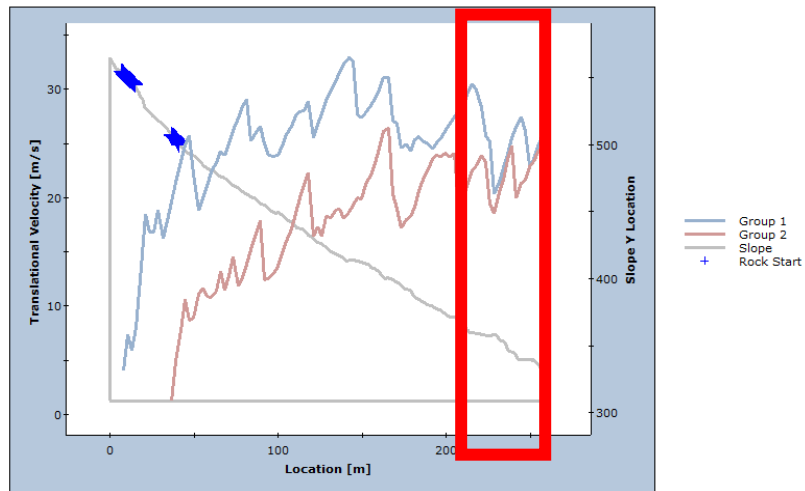
2 linee di distacco (10000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

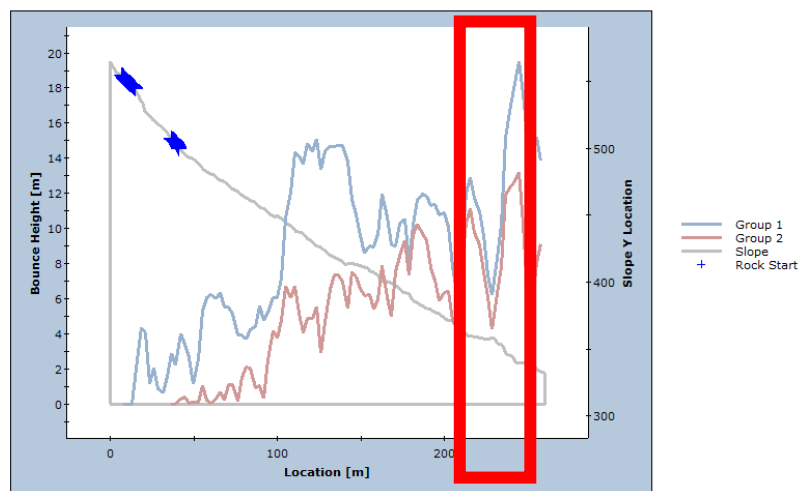


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 10000 of 10000
Rock Selection: Group 1, Group 2

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi: 25%

Velocità (95%): 29.57 m/s

Altezza (95%): 13.52 m

Collettore Altra Strada:

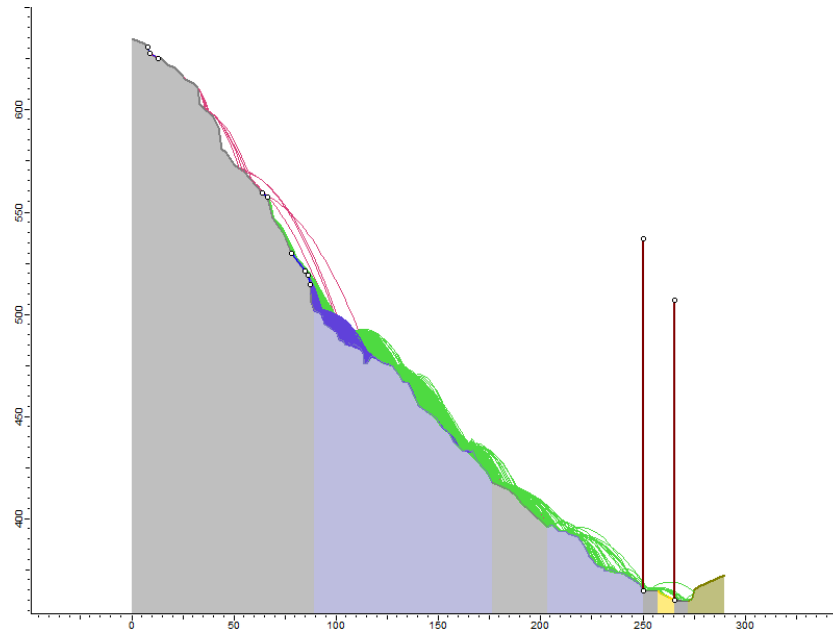
%blocchi: 11%

Velocità (95%): 27.31 m/s

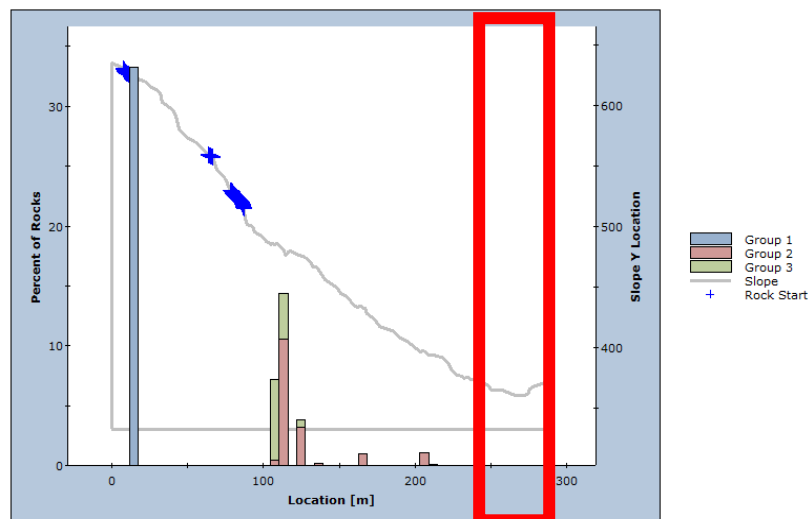
Altezza (95%): 20.19 m

Profilo 10B

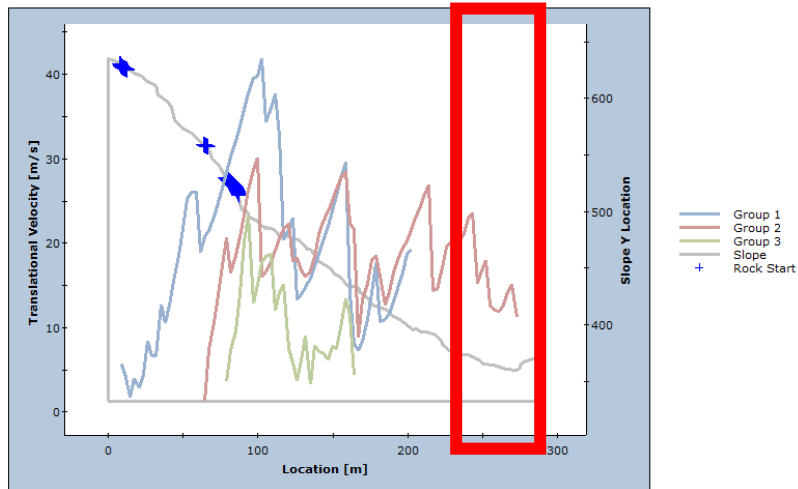
3 linee di distacco (15000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

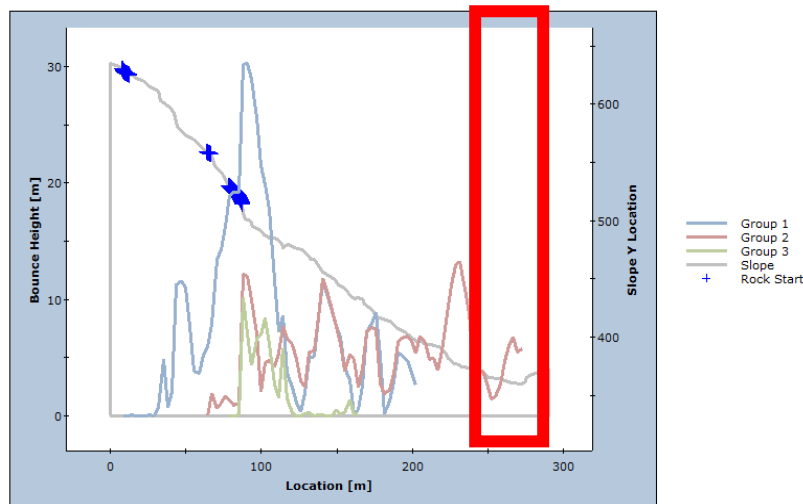


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 15000 of 15000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 15000 of 15000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi: 1%

Velocità (95%): 18.46 m/s

Altezza (95%): 2.84 m

Collettore Altra Strada:

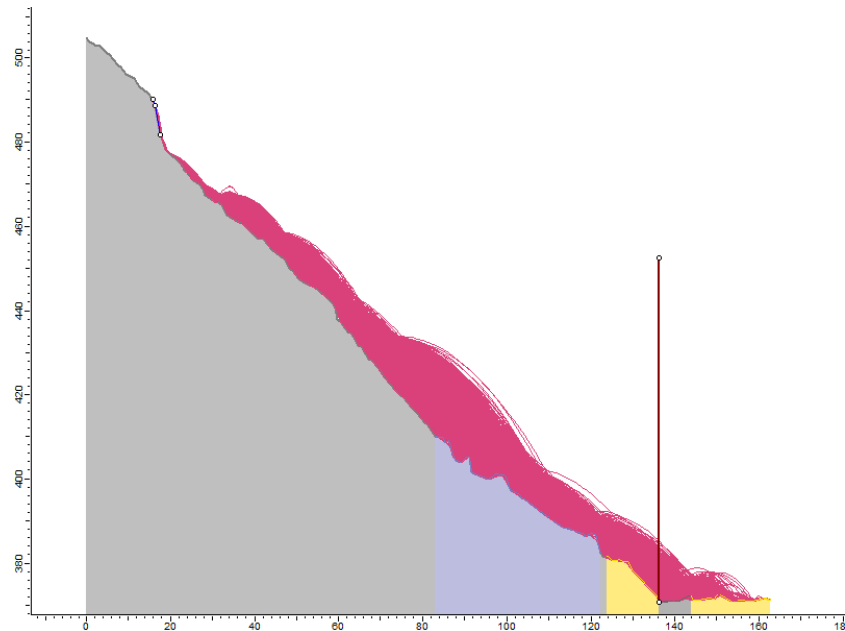
%blocchi: 1%

Velocità (95%): 13.78 m/s

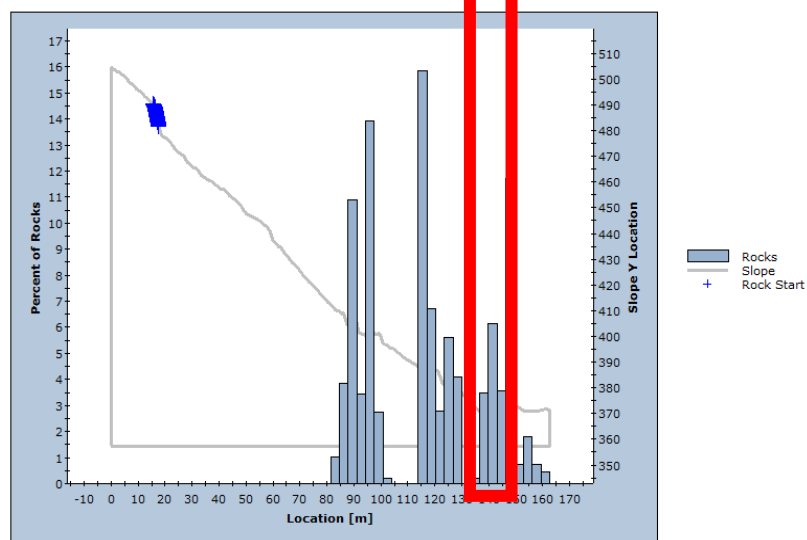
Altezza (95%): 8.67 m

Profilo 11B

1 linea di distacco (5000 lanci)

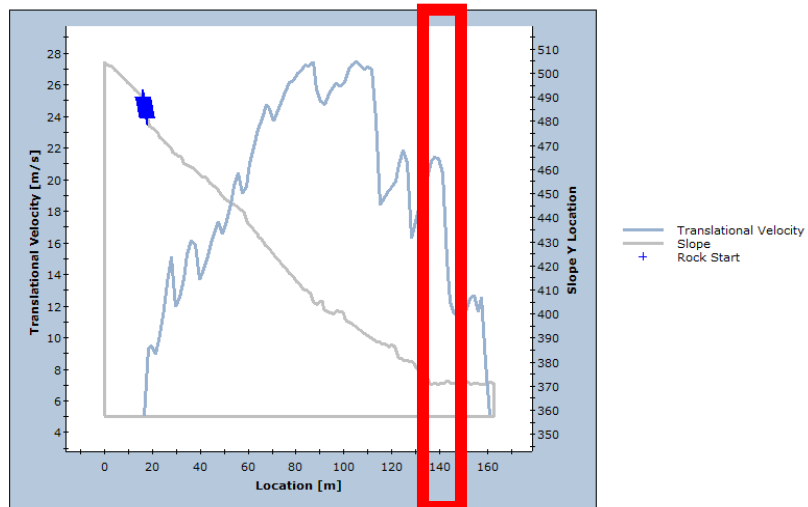


Distribution of Rock Path End Locations



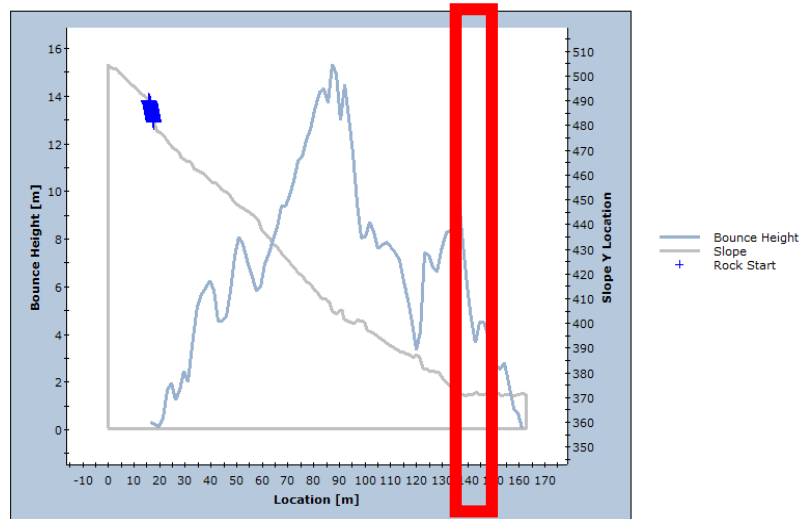
Total number of rock paths: 5000

**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of rock paths: 5000

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of rock paths: 5000

Collettore Strada Romana delle Gallie e Altra Strada:

%blocchi: 30%

Velocità (95%): 21.17 m/s

Altezza (95%): 9.81 m

7.4.2.2 Analisi in presenza delle barriere (esistenti)

Il versante in esame è caratterizzato dalla presenza di opere di difesa, in particolare barriere paramassi a rete (Figura 36), trascurate nelle precedenti analisi traiettografiche a favore di sicurezza, non essendo stato possibile eseguire valutazioni sullo stato di conservazione delle stesse per difficoltà tecnico-operative di raggiungimento del sito senza ausilio di personale abilitato a calate in parete.

Per completezza, per i profili lungo cui sono presenti tali opere, i.e. 5B e 6B nello specifico, sono state eseguite analisi traiettografiche anche in presenza delle opere di difesa.

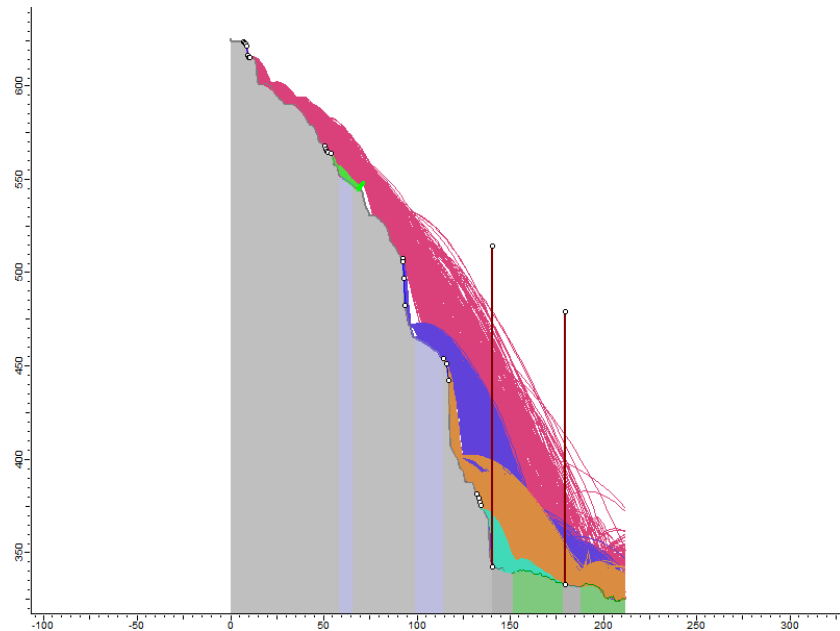
Nello spirito di un'analisi lumped-mass, in cui i parametri cinematici di velocità e altezza di volo non sono influenzati dalla massa del blocco, le barriere sono state inserite come elementi fisici con capacità di assorbimento energetico infinito e altezza pari al valore di progetto dell'altezza della traiettoria, assumendo quindi che la progettazione delle stesse fosse stata tale da arrestare tutti i blocchi che eventualmente impattano sulle stesse. In questo modo, viene valutata la sola capacità di intercettazione delle traiettorie stesse, evidenziando quelle che superano le barriere.



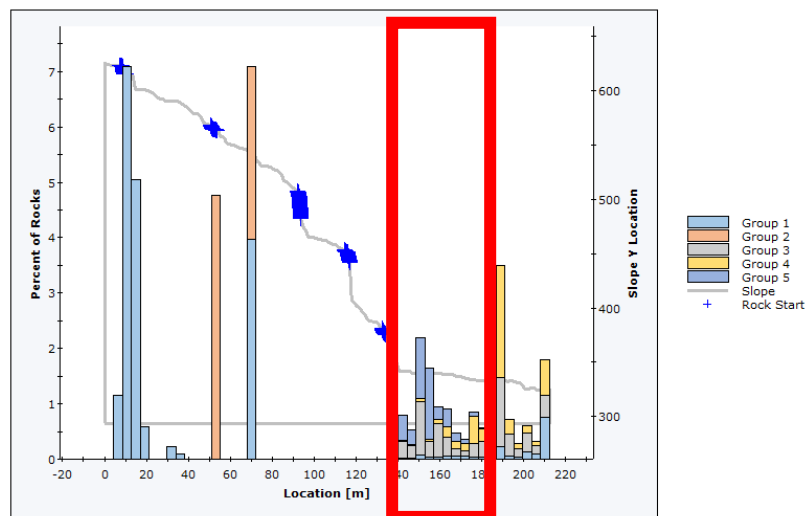
Figura 36. Vista frontale della porzione di parete nella quale sono installate le barriere paramassi.

Profilo 5B con barriera

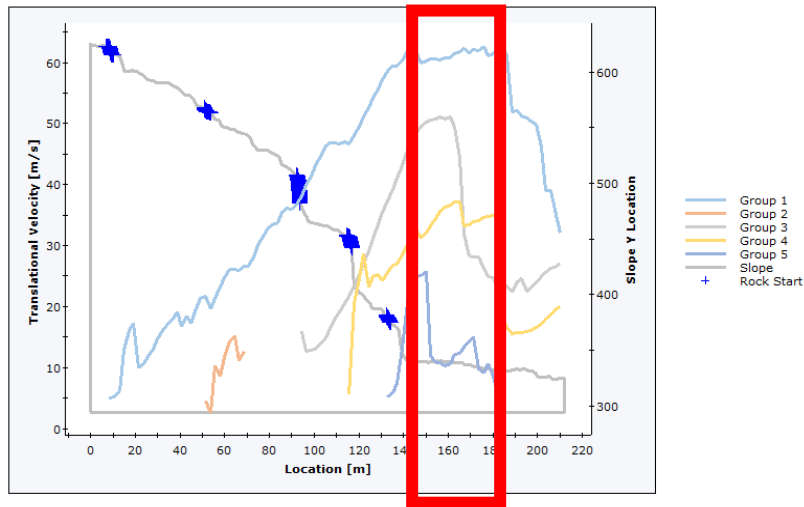
5 linee di distacco (25000 lanci)



Distribution of Rock Path End Locations

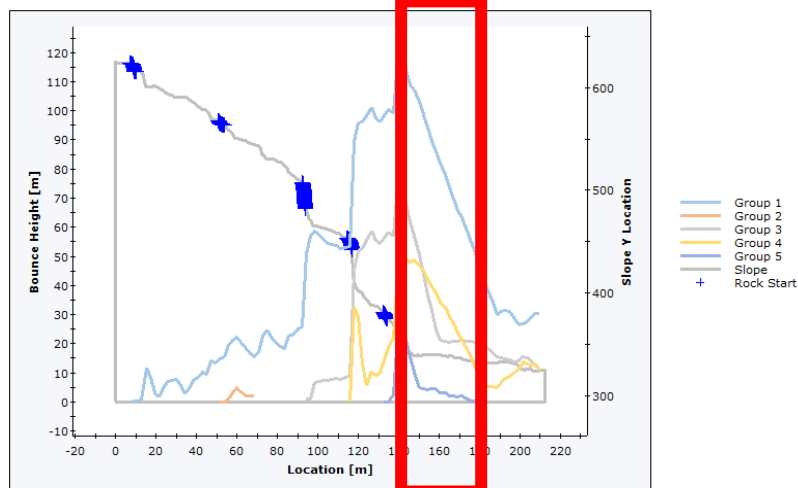


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 25000 of 25000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3, Group 4, Group 5

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 25000 of 25000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3, Group 4, Group 5

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi (esclusi quelli intercettati dalla barriera esistente): 77%

Velocità (95%): 43.28 m/s

Altezza (95%): 73.02 m

Collettore Altra Strada:

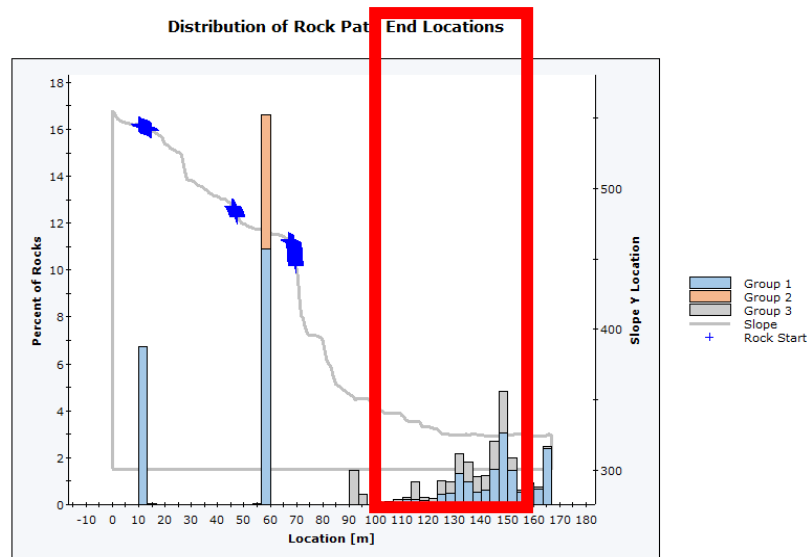
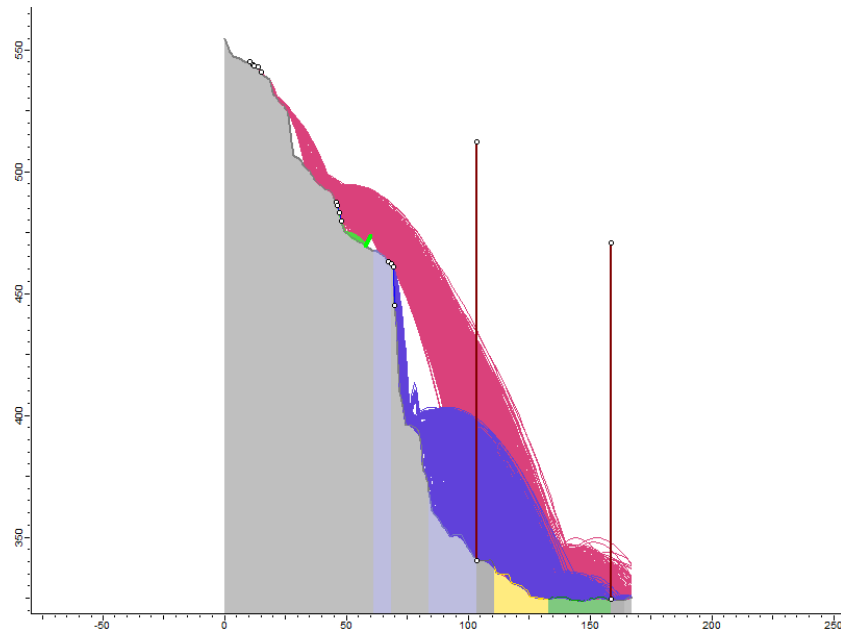
%blocchi (esclusi quelli intercettati dalla barriera esistente): 32%

Velocità (95%): 34.92 m/s

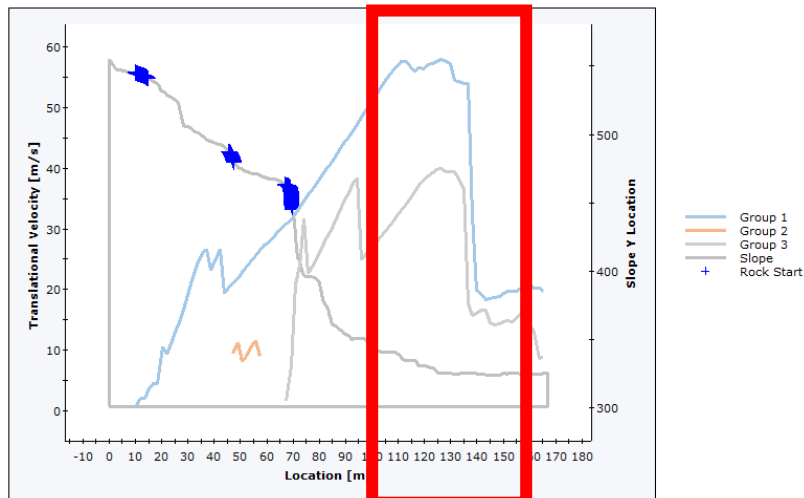
Altezza (95%): 18.90 m

Profilo 6B con barriera

3 linee di distacco (15000 lanci)

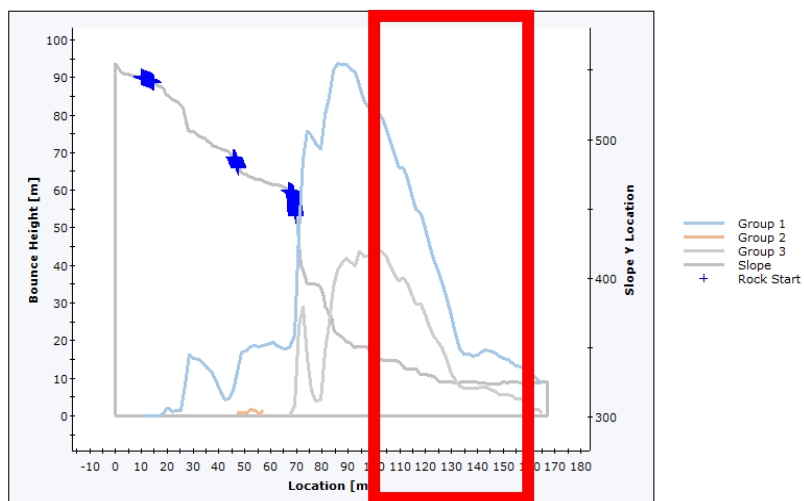


**Translational Velocity on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 15000 of 15000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

**Bounce Height on Slope
Percentile (95 %)**



Total number of selected paths: 15000 of 15000
Rock Selection: Group 1, Group 2, Group 3

Collettore Strada Romana delle Gallie:

%blocchi (esclusi quelli intercettati dalla barriera esistente): 78%

Velocità (95%): 51.7 m/s

Altezza (95%): 75.13 m

Collettore Altra Strada:

%blocchi (esclusi quelli intercettati dalla barriera esistente): 7%

Velocità (95%): 20.74 m/s

Altezza (95%): 12.49 m

7.4.2.3 Tabella riassuntiva

Si riportano nella Tabella 6 i valori caratteristici individuati per ciascun profilo, in corrispondenza della Strada Romana delle Gallie (SRG) e dell'Altra Strada sottostante (AS). Si precisa come in alcune sezioni queste coincidano ($\equiv$).

Tabella 6. Risultati delle analisi traiettografiche bidimensionali

Profilo	v₉₅ (m/s)	h₉₅ (m)	% di arrivo
1B SRG $\equiv$ 1B AS	28.83	14.84	28%
2B SRG $\equiv$ 2B AS	47.19	28.20	59%
3B SRG $\equiv$ 3B AS	32.49	22.14	38%
4B SRG $\equiv$ 4B AS	52.60	56.44	29%
5B SRG	53.59	82.35	84%
5B AS	42.29	26.23	37%
5B SRG con barriera	43.28	73.02	77%
5B AS con barriera	34.92	18.90	32%
6B SRG	48.87	81.76	79%
6B AS	19.50	13.06	9%
6B SRG con barriera	51.70	75.13	78%
6B AS con barriera	20.74	12.49	7%
7B SRG	24.86	15.58	49%
7B AS	26.22	12.97	49%
8B SRG	39.50	50.44	99%
8B AS	17.24	8.39	19%
9B SRG	29.57	13.52	25%
9B AS	27.31	20.19	11%
10B SRG	18.46	2.84	1%
10B AS	13.78	8.67	1%
11B SRG $\equiv$ 11B AS	21.17	9.81	30%



Si osserva come la particolare conformazione del pendio con pareti molto alte ed aggettanti in roccia nuda comporti, per alcune sezioni, velocità il cui valore (alto) appare anomalo rispetto ai risultati ottenuti dagli usuali calcoli traiettografici. Tali velocità, ancorché elevate, sono ritenute compatibili con la specifica geometria della parete studiata. Unitamente, anche le altezze di volo particolarmente elevate dipendono dalla particolare morfologia e, in particolare, devono essere ritenute possibili in relazione anche al rischio che i blocchi in movimento possano frantumarsi impattando sulla roccia nuda, provocando lanci di frammenti con traiettorie anomale anche in relazione all'altezza di volo.

8 CONCLUSIONI

Il presente lavoro è finalizzato alla codifica di metodologie organiche per lo studio di pericolosità e di rischio per fenomeno di caduta massi su infrastrutture viarie ad elevata frequentazione pedonale e di pregio culturale. Il caso studio è rappresentato dalla parete compresa tra l'abitato di Bard e l'intersezione tra la strada romana delle Gallie e la SS. 26 "della Valle d'Aosta", con particolare riferimento alla mobilità ciclo-pedonale lungo due possibili tracciati.

In merito allo studio della pericolosità, operando ad una "media-piccola scala", riveste particolare importanza l'analisi di propagazione del fenomeno in termini di probabilità di occorrenza spaziale. Pertanto si è ritenuto opportuno adottare un modello di calcolo ibrido tridimensionale che permette di identificare la gran maggioranza delle possibili traiettorie di crollo. Le analisi permettono di valutare differenti probabilità di occorrenza spaziale per ogni punto del tracciato.

Gli elementi a rischio identificati sono i pedoni/ciclisti lungo i due possibili tracciati. Il rischio, quantificato nel presente caso come la probabilità annua di incidente con almeno una vittima, è calcolato per differenti condizioni di traffico: solo pedonale, solo ciclabile, ciclo/pedonale. Ai fini di fornire informazioni utili alla Pubblica Amministrazione per la gestione e la mitigazione del rischio sono state anche realizzate analisi traiettografiche bidimensionali ad-hoc su specifiche direttrici, che hanno permesso di identificare i parametri cinematici dei blocchi eventualmente distaccatesi.

Sia per le analisi tridimensionali che bidimensionali, le potenziali sorgenti di crollo sono state individuate a partire dagli studi condotti da IMAGEO e integrate con osservazioni in sito realizzate nel corso dei sopralluoghi dagli Scriventi, anche sulla base dell'analisi degli eventi pregressi. Data l'estensione dell'area e l'acclività del versante, non si esclude che puntuali sorgenti crollo, limitrofe a quelle indicate, per le quali la traiettoria di crollo è facilmente assimilabile a quelle analizzate, non siano state individuate e analizzate.

I risultati e le elaborazioni eseguite premettono quindi di fornire un quadro sufficientemente omogeneo e una quantificazione delle criticità dovute al fenomeno di caduta massi che sussistono sull'area in esame. Brevemente queste possono essere riassunte:

- dalle analisi traiettografiche bidimensionali si riscontra come la particolare conformazione del pendio con pareti molto alte ed aggettanti in roccia nuda comporti, per alcune sezioni, valori di velocità e altezze apparentemente anomali rispetto ai risultati ottenuti dagli usuali calcoli traiettografici. Tali velocità, ancorché elevate, sono ritenute compatibili con la specifica geometria della parete studiata. Unitamente, anche le altezze di volo particolarmente elevate dipendono dalla particolare morfologia e, in particolare, devono essere ritenute possibili in

relazione anche al rischio che i blocchi in movimento possano frantumarsi impattando sulla roccia nuda, provocando lanci di frammenti con traiettorie anomale;

- non è possibile individuare una condizione di traffico pedonale sulla Strada Romana delle Gallie per cui il rischio annuo di vittima sia inferiore o pari a 10^{-5} ;
- per l'Altra Strada è possibile individuare una condizione di traffico ciclo-pedonale per il quale il rischio annuo di vittima sia pari a 10^{-5} . Nella condizione di solo traffico pedonale la soglia di rischio di 10^{-5} sarebbe rispettata per 1 persona/ora, difficilmente controllabile;
- per entrambi i tracciati, la zona più prossima all'intersezione con la SS26 presenta un alto livello di pericolosità, sia per la probabilità di occorrenza spaziale che per i parametri cinematici dei blocchi in eventuale caduta. Data la morfologia ed estensione delle aree di potenziale crollo e le energie ed altezze di volo dei blocchi, la mitigazione del rischio in quest'area risulta pertanto particolarmente complessa e onerosa con le tecniche ad oggi disponibili.

Ai fini di predisporre misure di mitigazione per la gestione e fruizione dell'area, si suggerisce di:

- sfruttare il passaggio già esistente sotto la ferrovia per poter accedere all'Altra Strada, nella porzione più prossima al Forte (dal passaggio a Nord-Ovest). In questo caso sarebbe necessario estendere il marciapiede attualmente presente lungo la SS. 26 (verso l'abitato di Donnas) fino all'imbocco con suddetto passaggio;
- integrare il livello di conoscenza degli ammassi rocciosi e della localizzazione e caratterizzazione (anche volumetrica) dei potenziali blocchi o porzioni instabili, con particolare riferimento alla porzione di parete che insiste sul tratto potenzialmente usufruibile. Questa analisi dovrebbe essere condotta integrando i dati del rilievo di IMAGEO con specifiche calate e investigazioni sul sito.

9 BIBLIOGRAFIA

- Ansari M.K., Ahmad M., Singh T.N. (2014) Rockfall risk assessment for pilgrims along the circumambulatory pathway, Saptashrungi Gad Temple, Vani, Nashik Maharashtra, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 5(1): 81-92.
- Bunce C.M., Cruden D.M., Morgenstern N.R. (1997) Assessment of the hazard from rock fall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal* 34: 344-356.
- Corominas J., Copons R., Moya J., Vilaplana J.M., Altimir J., Amigò J. (2005) Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides* 2: 343-357.
- Corominas J., Moya J. (2008) A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology* 102(3-4): 193-213.
- Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J. P., Fotopoulou S., Pitilakis K. (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(2): 209-263.
- De Biagi V., Napoli M.L., Barbero M., Peila D. (2017) Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17: 103-113.
- De Biagi V. (2017) Brief communication: Accuracy of the fallen blocks volume-frequency law. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17: 1487-1492.
- Dorren L.K.A. (2015) Rockyfor3D (v5.2) Revealed - Transparent description of the complete 3D rockfall model. EcorisQ paper (www.ecorisq.org): 32 pp.
- Fell R. (1994) Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal* 31(2): 261-272.
- Ferlisi S., Cascini L., Corominas J., Matano F. (2012) Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (Southern Italy). *Natural Hazards* 62: 691-721.
- Ferrari F., Giacomini A., Thoeni K. (2016) Qualitative rockfall hazard assessment: a comprehensive review of current practices. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49: 2865-2922.



- Guzzetti F., Reichenbach P., Ghigi S. (2004) Rockfall Hazard and Risk Assessment along a Transportation Corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environmental Management* 34: 191–208.
- Macciotta R., Martin C.D., Morgenstern N.R., Cruden D.M. (2016). Quantitative risk assessment of slope hazards along a section of railway in the Canadian Cordillera—a methodology considering the uncertainty in the results. *Landslides* 13: 115-127.
- Macciotta R., Martin C. D., Cruden D.M., Hendry M., Edwards T. (2017). Rock fall hazard control along a section of railway based on quantified risk. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 11: 272-284.
- Marchelli M., De Biagi V., Peila D. (2020) An event-tree based approach for the quantitative risk assessment for pedestrian along hiking trails subjected to rockfall. *Interpraevent2020*, 11-14 maggio, Bergen (NO).
- Marchelli, M. (2020) Event tree analysis for mountain roads under rockfall hazard. *GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA*, LVII, n. 3, pp. 41-46
- Marchelli, M., De Biagi, V., Bertolo, D., Paganone, M., & Peila, D. (2021). A mixed quantitative approach to evaluate rockfall risk and the maximum allowable traffic on road infrastructure. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1-11.
- Mignelli C., Lo Russo S., Peila D. (2012) *ROckfall risk MANagement* assessment: the RO. MA. Approach. *Natural Hazards* 62: 1109-1123.
- Mineo S., Pappalardo G., D'Urso A., Calcaterra D. (2017) Event tree analysis for rockfall risk assessment along a strategic mountainous transportation route. *Environmental Earth Sciences* 76: 620.
- Peila D. and Guardini C. (2008) Use of the event tree to assess the risk reduction obtained from rockfall protection devices. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 1441-1450.
- Pine R.J., Roberds W.J. (2005) A Risk-based Approach for the Design of Rock Slopes Subject to Multiple Failure Modes Illustrated by a Case Study in Hong Kong. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42: 261–275.



UNI 11211-4:2018 Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo (in vigore dal 18/10/2018).

Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Jaboyedoff M. (2011) Rockfall characterisation and structural protection - A review. Natural Hazards and Earth System Sciences 11:2617-2651.



10 ALLEGATI

- Allegato 1. Elaborato grafico “Tavola 1 – Volumi di innesco” datato giugno 2022.
- Allegato 2. Elaborato grafico “Tavola 2 – Probabilità di occorrenza spaziale” datato giugno 2022.
- Allegato 3. Elaborato grafico “Tavola 3 – Probabilità di occorrenza spaziale su strade” datato giugno 2022.
- Allegato 4. Elaborato grafico “Tavola 4 – Probabilità di occorrenza spaziale su strade. Eventi pregressi” datato giugno 2022.
- Allegato 5. Elaborato grafico “Tavola 5 A,B – Rischio sulle strade” datato giugno 2022.