

**Messa in sicurezza versante montano a tutela
del sottostante percorso faunistico
che congiunge Via Marconi con la posta ciclabile
di Gardone V.T. in sponda idraulica
sinistra del Fiume Mella**

Finanziato dall'Unione europea - NextGenerationEU

Progetto Esecutivo

**Relazione Geotecnica
e Geomeccanica**

Rev01

Dott. Davide Martello

Studio di Geologia
Via Convento 52/c, Gardone V.T. (BS)

1. PREMESSA	1
2. ANALISI DEGLI SCENARI	10
3. CRITERI CONSIDERATI PER LA SCELTA PROGETTUALE	32
Barriere Paramassi.....	32
Dati di rilievo.....	33
Analisi numeriche.....	37
Barriere elastiche per colate detritiche tipo Debris-Flow.....	44
Analisi e modellazione del debris-flow in progetto.....	47
Verifica della capacità di ritenuta del materiale.....	49
4. CONCLUSIONI	55

Gardone V.T., Gennaio 2022

1. Premessa

Nella presente Relazione Tecnica vengono descritte le modellazioni geotecniche e geomeccaniche su cui si sono basati i criteri di scelta sui vari interventi proposti.

Vengono ripresi gli scenari descritti nella Relazione Geologica ed analizzati dal punto di vista geotecnico e geomeccanico mediante l'utilizzo delle elaborazioni dati dei rilievi e delle indagini eseguite.

In relazione alla tipologia di terreno, trattandosi prevalentemente di aree in cui si rileva il substrato roccioso affiorante o subaffiorante, la caratterizzazione dei materiali è stata eseguita mediante:

- prove di rottura a carico puntiforme tipo Point-Load TEST per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica del materiale roccia, eseguite dallo scrivente in situ su campioni prelevati direttamente dal versante;
- rilievi geomeccanici per quanto riguarda la caratterizzazione degli ammassi rocciosi, eseguiti dallo scrivente su affioramenti rocciosi in corrispondenza delle diverse zone considerate.

Le elaborazioni dei dati di campagna hanno consentito la caratterizzazione degli ammassi rocciosi interessati dal progetto: in particolare sono state definite le caratteristiche geomeccaniche per il dimensionamento degli ancoraggi e la definizione dei volumi dei massi potenzialmente mobilizzati.

Le indicazioni relative alle caratteristiche litotecniche dei terreni descritte nel PGT riportano:

“Alle unità litologiche è stata associata una prima caratterizzazione geotecnica alla stima della quale hanno concorso sia indagini geognostiche e studi eseguiti in precedenza che da altri dati disponibili derivanti da indagini di carattere geologico effettuate sul territorio. La caratterizzazione geomeccanica dei litotipi lapidei è ben riassunta dal parametro RMR derivante dalla classificazione di Bieniawski che esprime un giudizio di qualità sull’ammasso roccioso. Con riferimento ai caratteri litologici evidenziati per le diverse unità stratigrafiche presenti può essere eseguita una suddivisione con un giudizio di massima da un punto di vista delle caratteristiche di resistenza come segue. I parametri geotecnici e geomeccanici riportati sono analoghi a quelli utilizzati per il calcolo della amplificazione sismica locale nelle sezioni analizzate dallo studio della Regione Lombardia:

Dolomia Principale, Medolo, Formazione di Concesio, Selcifero Lombardo, Maiolica : ammassi rocciosi di qualità media o discreta

Parametri	min	max
RMR base	50	70
Φ (°)	30	40
c (KPa)	250	350

Tali parametri risultano piuttosto coerenti con quelli ricavati dai rilievi.

Rilievi Geomeccanici

I dati relativi alla caratterizzazione geomeccanica per la definizione dei parametri utili al dimensionamento degli ancoraggi di fondazione

Dal punto di vista geomeccanico, sono stati valutati i due aspetti principali dell'ammasso roccioso, quelli relativi cioè alle caratteristiche della roccia intatta, e alle caratteristiche delle discontinuità.

In questa fase preliminare pre-disgaggio, sono state registrate le peculiarità principali utili a definire la qualità dell'ammasso roccioso soprattutto in funzione della definizione del modello di calcolo per la caduta massi e la relativa definizione degli interventi di difesa.

Roccia intatta (materiale roccia)

È costituita da calcari e calcari marnosi con possibili interstrati argillitici in strati ben definiti, generalmente piano paralleli con spessori decimetrici variabili.

La resistenza meccanica della roccia è stata testata mediante prove di compressione a carico puntiforme (Point-Load Strength Test) che hanno mostrato valori di resistenza discreti-buoni che tendono a diminuire lievemente in corrispondenza di alterazioni nella struttura (ad esempio in corrispondenza di alcune suture stilolitiche).

La tecnica di prova adottata, secondo la metodologia di Greminger, ha permesso di calcolare l'indice di resistenza Is_{50} e di stimare la resistenza a compressione monoassiale della roccia.

La prova prevede la rottura di campioni di roccia mediante un martinetto idraulico e la misura del carico massimo di rottura, questo valore, unitamente all'area della superficie di rottura del materiale, consente il calcolo dell'indice di resistenza della roccia.

I campioni utilizzati sono stati prelevati lungo gli affioramenti della zona PAI 1.

Sono state eseguite alcune rotture di campioni: di queste sono state registrate le misure utili alle elaborazioni; gli elaborati riferiti alla prova, in allegato, hanno

consentito di determinare le seguenti caratteristiche di resistenza riferiti al materiale roccia.

Indice di resistenza medio	Is ₅₀	5.1	MPa
Resistenza a trazione	r.t.	4.6	MPa
Resistenza a compressione	r.c.m.	122.7	MPa

Discontinuità

Gli aspetti principali relativi alle discontinuità sono relativi ad una raccolta statistica delle caratteristiche geometriche.

Dal punto di vista strutturale, l'ammasso roccioso è caratterizzato principalmente da 3 famiglie di discontinuità principali, formate dalla stratificazione, e da almeno due ordini di fratturazione subverticale che origina blocchi prevalentemente prismatici.

Sulla base delle misurazioni effettuate in campagna sull'affioramento in oggetto, e sui valori di resistenza meccanica ottenuti dalle prove di Point-load eseguite, è stata applicata una delle principali classificazioni geomeccaniche: RMR di Beniaowski mod. Romana.

Le misurazioni sono relative all'assetto geometrico dell'ammasso roccioso (inteso come sistema materiale-roccia più discontinuità) e riguardano il numero, le dimensioni, l'orientamento spaziale e le caratteristiche geometriche delle discontinuità (stratificazione, scistosità, fratturazioni) presenti.

Le elaborazioni dei dati inseriti, secondo le differenti metodologie, consente di classificare gli ammassi rocciosi inserendoli in una classe di qualità, avente determinate caratteristiche geomeccaniche.

Le discontinuità in un ammasso roccioso condizionano, in modo più o meno evidente, il comportamento meccanico dell'ammasso stesso e del modello geotecnico alla base di qualsiasi calcolo; è quindi importante, al fine di una

corretta valutazione delle condizioni di stabilità, una precisa descrizione della struttura della massa e delle discontinuità sia in termini qualitativi che quantitativi.

Per la determinazione del modello geotecnico dell'ammasso verranno, quindi, illustrati nella presente le fasi di rilievo delle giaciture, riferite alle condizioni geostrutturali (spaziatura, apertura, persistenza) e alle condizioni idrauliche e di resistenza delle discontinuità (scabrezza, resistenza delle pareti, grado di alterazione, materiali di riempimento).

Il procedimento utilizzato per l'esecuzione del rilievo è quello descritto nelle raccomandazioni ISRM, tradotte in italiano da O. Del Greco nella Rivista Italiana di Geotecnica - R.I.G. 2/93; il titolo originale delle raccomandazioni è *"Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses"*.

Rilievo delle discontinuità

È il termine generale per qualsiasi interruzione di continuità in una massa rocciosa avente resistenza a trazione bassa o nulla. È il termine collettivo per la maggior parte delle fessure, dei piani di stratificazione, dei piani di scistosità, delle zone di indebolimento e delle faglie.

I dieci parametri scelti nelle Raccomandazioni ISRM per descrivere le discontinuità e le masse rocciose sono definiti come segue:

Orientazione

Posizione della discontinuità nello spazio. Le superfici di discontinuità possono essere rappresentate come un piano la cui giacitura è individuata da una coppia di angoli (α , β) o (α , γ) dove α è l'*inclinazione*, γ la *direzione* e β

l'*azimut* della discontinuità (nella terminologia anglosassone rispettivamente *dip*, *strike* e *dip direction* riferita ad un piano).

La massima inclinazione del piano medio della discontinuità α (*dip*) è misurata con il clinometro ed è espressa in gradi con numeri di due cifre, da 00° a 90°.

L'*azimut* della immersione β (*dip direction*) è misurato in gradi contati in senso orario rispetto al Nord ed è espresso con un numero di tre cifre da 000° a 360°.

La coppia (*dip*, *dip direction*) rappresenta il vettore immersione.

Le misure vengono eseguite lungo una linea di campionamento, materializzata sul fronte roccioso con una bandella metrica fissata alle estremità del rilievo, vengono quindi rilevate tutte le discontinuità incontrate procedendo da una estremità all'altra.

Spaziatura (S)

Distanza tra discontinuità adiacenti misurata in direzione ortogonale alle discontinuità stesse. Normalmente ci si riferisce alla spaziatura media o modale di un sistema di fessure. Essa, unitamente all'orientazione ed alla persistenza, determina la forma e le dimensioni dei blocchi in cui si divide l'ammasso roccioso. Poiché la misura d , espressa in cm, viene eseguita ortogonalmente alla discontinuità, deve essere corretta tenendo conto dell'angolo δ tra la discontinuità e la linea di campionamento: $S = d \sin \delta$. Per ciascuna famiglia si definisce così una distribuzione di frequenza che si può rappresentare con istogrammi; la distribuzione della spaziatura è alla base della classificazione ISRM.

Continuità o Persistenza

Lunghezza della traccia della discontinuità osservata in un affioramento. Può dare una misura grossolana dell'estensione areale o della profondità di penetrazione di una discontinuità. Il fatto che il piano di discontinuità termini in roccia massiccia o contro altre discontinuità, riduce la persistenza.

Scabrezza

Rugosità delle superfici affacciate di una discontinuità e ondulazione relativamente al piano medio delle discontinuità. Sia la rugosità che il suo andamento morfologico contribuiscono alla resistenza di taglio, specialmente nel caso di strutture interconnesse e senza spostamenti relativi. L'importanza della rugosità diminuisce con l'aumentare dell'apertura della discontinuità stessa.

In termini generali la rugosità può essere caratterizzata da una ondulazione e da una rugosità vera e propria; nel primo caso la forma della ondulazione provoca la dilatanza in caso di scorrimento trasversale, nel secondo caso la forma della rugosità tende ad essere rotta in caso di scorrimento.

La metodologia e la strumentazione per eseguire il rilievo sono riportate nelle Raccomandazioni ISRM.

Scopo di tutti i metodi di misurazione della rugosità è l'eventuale valutazione o calcolo della resistenza al taglio e della dilatanza.

Resistenza delle pareti

Resistenza a compressione equivalente dei lembi affacciati di una discontinuità. Può essere minore della resistenza della roccia massiccia per l'esposizione agli agenti atmosferici o per l'alterazione delle pareti. Costituisce una componente rilevante della resistenza di taglio se le pareti sono a contatto.

Gli effetti dell'azione atmosferica sono di due tipologie principali: disaggregazione meccanica e decomposizione chimica .

La prima si manifesta con l'ampliarsi di discontinuità preesistenti o con la formazione di nuove, l'apertura di fratture integranulari e la rottura di singoli individui minerali.

La seconda si manifesta con una decolorazione della roccia e porta ad una decomposizione dei minerali silicati in minerali argillosi. Nel caso di rocce carbonatiche e saline è molto importante il fenomeno della dissoluzione.

Altro parametro utile per la classificazione dell'ammasso roccioso è il Ja (*"Joint Alteration Number"*) che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento

Apertura

Distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità in cui lo spazio interposto è riempito di aria o acqua.

Le aperture sottili possono essere misurate con calibro, mentre quelle larghe con regolo graduato in mm. Esse sono rilevate lungo l'intersezione con l'allineamento del rilievo.

Riempimento

Materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità e che è di solito meno resistente della roccia primitiva. Tipici materiali di riempimento sono sabbia, limi, argilla, breccia più o meno fine, milonite. Include anche sottili strati di minerali e discontinuità saldate, per esempio vene di quarzo e calcite.

La presenza di materiale di riempimento influenza il comportamento del giunto nei riguardi del movimento reciproco delle pareti della discontinuità, nel rilievo sono indicati quindi la caratteristica in riferimento alla sua durezza.

Filtrazione

Flusso d'acqua e abbondante umidità, visibile nelle singole discontinuità o nella massa rocciosa nel suo insieme.

Le raccomandazioni ISRM forniscono degli schemi descrittivi per stimare la filtrazione attraverso discontinuità senza riempimento e con riempimento.

Numero di sistemi di discontinuità

Definisce l'insieme dei sistemi presenti. La massa rocciosa può essere ulteriormente divisa da discontinuità di carattere singolare.

In fase di rilievo vengono presi in considerazione tutti i sistemi presenti nel fronte; diagrammando i poli delle discontinuità e quindi contornando con linee di ugual densità, si possono ricavare i sistemi principali.

2. Analisi degli scenari

In relazione ai rilievi di campagna, ed alle indicazioni cartografiche del PGT (in particolare l'individuazione delle zone PAI) si possono definire alcuni tratti considerati omogenei e caratterizzati da simili scenari: la definizione degli scenari è stata mantenuta la medesima di quella utilizzata nella progettazione degli interventi che precedono il presente progetto.

Zona Pai 1:

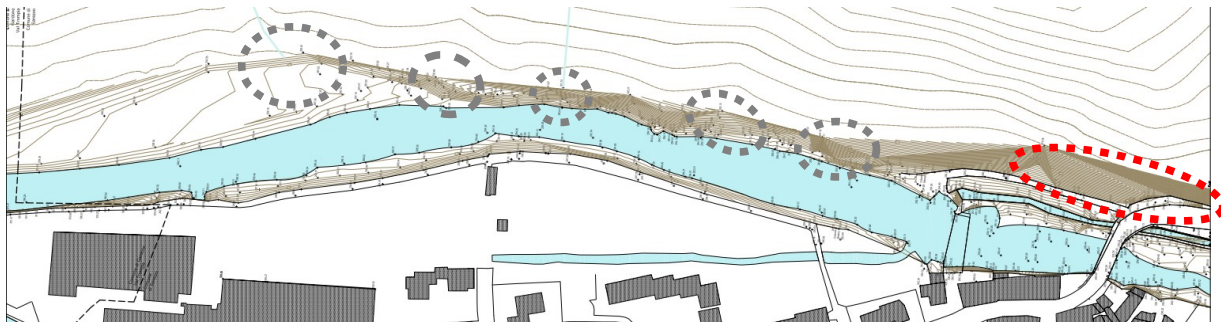


Foto 1: zona PAI 1 Nord

La criticità di tale tratto è relativa a fenomeni simili a quello accaduto recentemente, legata al crollo di blocchi rocciosi dalla parete e dalla possibile caduta massi dal versante soprastante (la porzione basale dello stesso è infatti cartografata nella carta PAI e carta Geologica come frana attiva e caduta massi).

Per la mitigazione del rischio si propone, ad integrazione del progetto CMVT che è relativo alla messa insicurezza della parete, un intervento di messa in sicurezza per la caduta di massi dalla porzione alta del versante che presenta dif-

fuse zone potenziali di sorgente che però sono difficilmente individuabili a causa della difficoltà di accesso al versante.



Foto 2: Zona PAI 1 Sud

Nello stesso scenario rientra anche il tratto di strada di via Marconi che porta all'ingresso della posta ciclabile.

Questo tratto presenta l'installazione di opere di contenimento e consolidamento (mediante la posa reti addossate) di una porzione della parete rocciosa confinante con la strada e l'installazione di barriere messe per l'intercettazione di massi (mediante installazione di profilati metallici e rete con cavi) di un'altra porzione di parete.

In relazione alla tipologia di opera, che è stata realizzata in situ ed è priva di certificazione di qualità, ed alla necessità delle stesse di subire interventi di manutenzione a causa anche della presenza del materiale trattenuto, si ritiene utile la loro sostituzione mediante opere di intercettazione dimensionate sulla base di simulazioni di caduta massi, dotate di certificazione di qualità.

Sono stati eseguiti due rilievi geomeccanici per la caratterizzazione dell'ammasso funzionale al dimensionamento delle opere di ancoraggio e di fondazione.



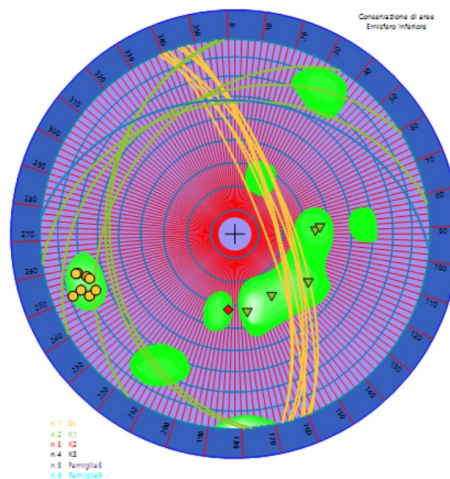
Rilievo PAI 1 Nord

Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	51.31
RMR corretto	49.31
Coesione c (KPa)	256.56
Angolo di attrito ϕ	30.66
Mod. di deformaz. E (GPa)	2.63
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre



Rilievo PAI 1 sud

Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	61.38
RMR corretto	46.38
Coesione c (KPa)	306.89
Angolo di attrito ϕ	35.69
Mod. di deformaz. E (GPa)	22.76
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre



Le misure effettuate hanno consentito la definizione della classe di qualità dell'ammasso roccioso Mediocre o scadente con i relativi parametri geomeccanici.

In questo caso, la definizione di un volume roccioso unitario sulla base dei tre principali set di discontinuità: stratificazione ($85^\circ/70^\circ$), discontinuità k1 ($275^\circ/36^\circ$) e discontinuità k2 ($0^\circ/36^\circ$) rivela un volume piuttosto ridotto ($0.7 \times 0.5 \times 0.6$ m) a causa soprattutto della limitata spaziatura della stratificazione (oltre che dalla persistenza delle fratture k1 e k2 che è spesso limitata).

La valutazione della parte alta dell'affioramento (parete di zona PAI 1 che è oggetto degli interventi CMVT), mostra la possibilità di formazione di blocchi anche di maggiore dimensione, sia a causa della locale variazione dello spessore degli strati, sia a causa della particolare resistenza/cementazione dei giunti interstrato che possono consentire la formazione di pacchi di strati piuttosto solidali.

Per questo motivo, in fase di definizione del masso di progetto per la simulazione della caduta di massi, sono stati considerati blocchi di dimensioni maggiori, con volumi di circa 1.0 m^3 .

Per la messa in sicurezza della parete della zona PAI 1, è prevista la realizzazione di un rinforzo corticale mediante l'installazione di una rete addossata per una superficie di circa 1800 m^2 .

Le caratteristiche dell'ammasso roccioso sono piuttosto omogenee con i principali lineamenti strutturali (st, k1 e k2) statisticamente ben rappresentati.

Sono presenti alcune discontinuità particolarmente evidenti che comportano la formazione di volumi rocciosi già parzialmente isolati dall'ammasso roccioso e che dovranno essere rimossi mediante intervento di disaggio.

In seguito alle operazioni di pulizia e disaggio, dovranno essere verificate le nuove condizioni della parete.



Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	60.21
RMR corretto	53.21
Coesione c (KPa)	301.03
Angolo di attrito ϕ	35.10
Mod. di deformaz. E (GPa)	20.41
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre



Rilievo zona PAI 1-2

Per la messa in sicurezza della parete della zona PAI 1-2, è prevista la realizzazione di un rinforzo corticale mediante l'installazione di una rete addossata per una superficie di circa 800 m².

Le caratteristiche dell'ammasso roccioso sono piuttosto eterogenee in quanto solamente una parte dell'affioramento presenta la tipica stratificazione ben distinta (visibile soprattutto lungo il margine settentrionale dell'affioramento): l'ammasso si presenta spesso piuttosto massivo e con i principali lineamenti strutturali (st, k1 e k2) poco rappresentati (al contrario di altri set di fratturazione minori che invece sono piuttosto diffusi anche se con persistenza ridotte).

Sono presenti alcune discontinuità particolarmente evidenti che comportano la formazione di volumi rocciosi già parzialmente isolati dall'ammasso roccioso (anche a causa della presenza di apparati radicali che si insinuano nelle aperture) e che dovranno essere rimossi mediante intervento di disgaggio.

In seguito alle operazioni di pulizia e disgaggio, dovranno essere verificate le nuove condizioni della parete.

Zona PAI 2:

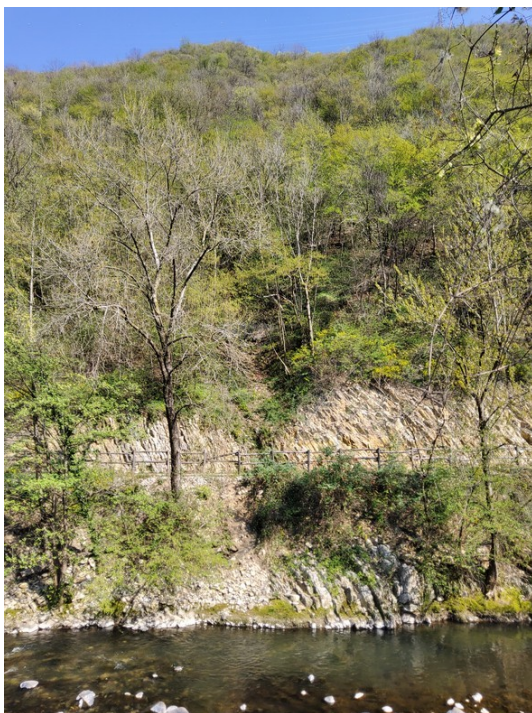
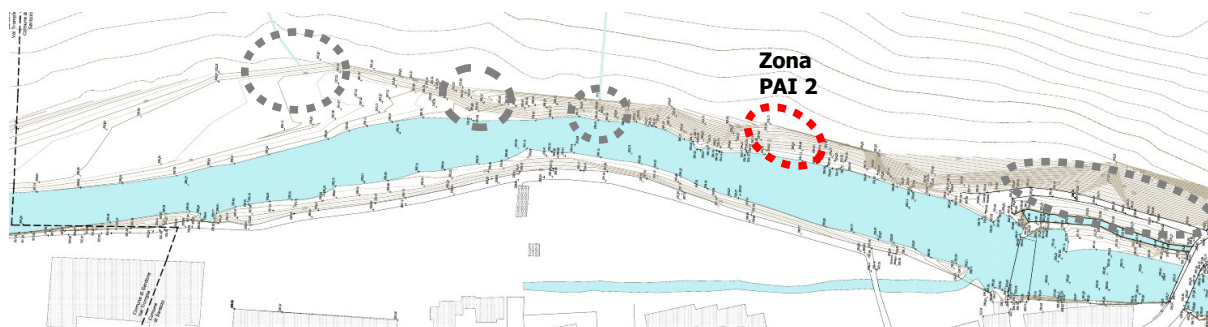
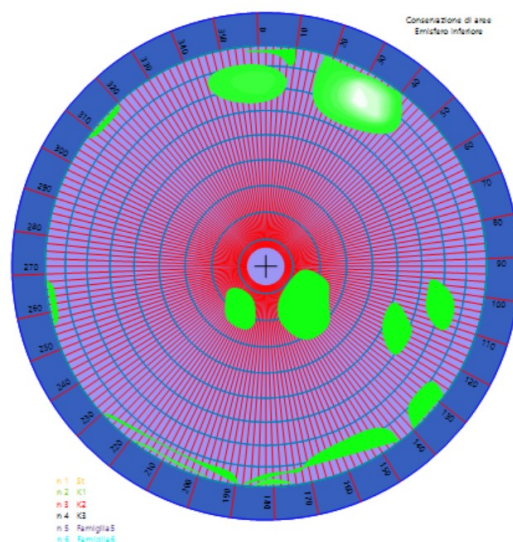


Foto 2: zona PAI 2

Questo tratto presenta un taglio continuo nel versante con l'ammasso roccioso contenuto da una rete addossata fino a circa 1.5 m dal piano di calpestio.

La criticità in questo tratto è stata definita dall'individuazione di un conoide attivo non protetto (cartografia PAI del PGT).

Attualmente l'opera di contenimento è parzialmente deformata a causa del materiale accumulato.



Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	51.31
RMR corretto	49.31
Coesione c (KPa)	256.56
Angolo di attrito fi	30.66
Mod. di deformaz. E (GPa)	2.63
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre

E' stato eseguito un rilievo geomeccanico in corrispondenza di un affioramento sufficientemente esteso ed in prossimità dell'ubicazione dell'opera di difesa. Le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso sono state utilizzate per il dimensionamento degli ancoraggi dell'opera di difesa prevista:

- installazione di una barriera flessibile in rete d'acciaio per la mitigazione del rischio indotto da colate detritiche (Debris-Flow), dimensionata in modo tale che sia in grado di resistere alla pressione combinata dinamica (durante il processo di riempimento) e statica (a barriera colmata), calcolata in base alle dimensioni del bacino idrografico sotteso alla sezione e con certificazione di qualità.

Zona PAI 3:

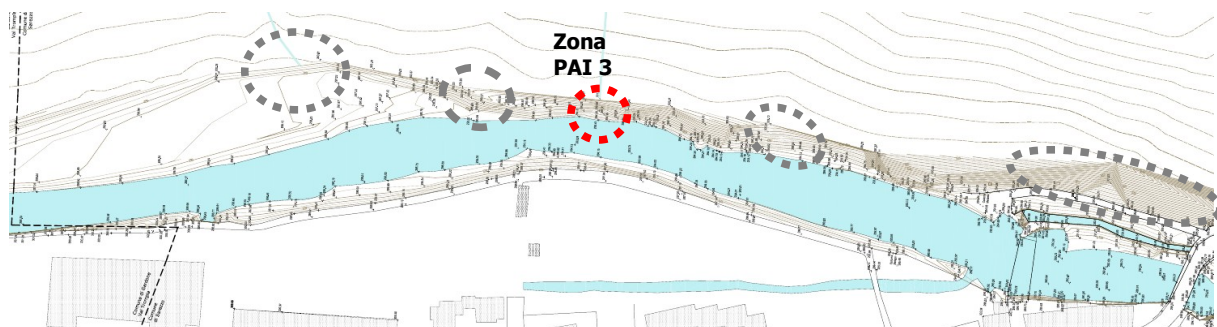


Foto 3: zona PAI 3

Questo tratto mostra caratteristiche simili al tratto PAI 2, in cui viene individuata una zona PAI per la presenza di una fascia di frana attiva all'interno di un asta torrentizia.

Anche in questo caso l'incisione non è particolarmente accentuata (seppur visibile) nella porzione basale del versante, all'interno del substrato del substrato roccioso affiorante con discreta continuità.

Attualmente la zona presenta una barriera di contenimento del trasporto solido danneggiata dalla presenza di blocchi rocciosi che si sono accumulati a ridosso.



Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	51.59
RMR corretto	49.59
Coesione c (KPa)	257.95
Angolo di attrito ϕ	30.80
Mod. di deformaz. E (GPa)	3.18
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre

E' stato eseguito un rilievo geomeccanico in corrispondenza di un affioramento sufficientemente esteso ed in prossimità dell'ubicazione dell'opera di difesa. Le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso sono state utilizzate per il dimensionamento degli ancoraggi dell'opera di difesa prevista:

- installazione di una barriera flessibile in rete d'acciaio per la mitigazione del rischio indotto da colate detritiche (Debris-Flow), dimensionata in modo tale che sia in grado di resistere alla pressione combinata dinamica (durante il processo di riempimento) e statica (a barriera colmata), calcolata in base alle dimensioni del bacino idrografico sotteso alla sezione e con certificazione di qualità.

Zona PAI 4

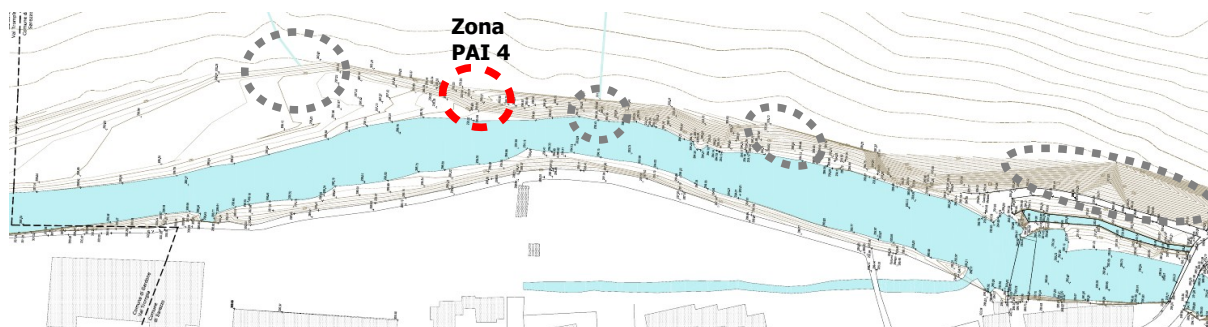


Foto 4: zona PAI 4

Questo tratto mostra caratteristiche simili al tratto PAI 2 e 3, in cui viene individuata una zona PAI per la presenza di una fascia di frana attiva all'interno di un'asta torrentizia, ad una quota superiore rispetto al piano della pista ciclabile.

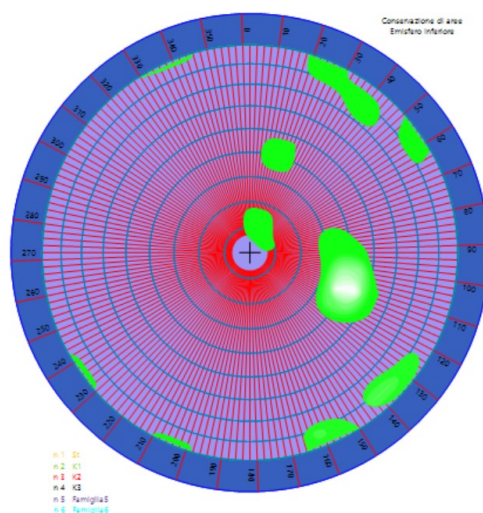
L'incisione non è particolarmente accentuata, anche in questo caso presumibilmente a causa della presenza del substrato roccioso affiorante, ma l'asta torrentizia è comunque ben visibile.

All'interno dell'asta è presente una barriera di contenimento del trasporto solido danneggiata da un albero crollato sulla sommità della rete.

E' stato eseguito un rilievo geomeccanico in corrispondenza di un affioramento sufficientemente esteso ed in prossimità dell'ubicazione dell'opera di difesa

Le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso sono state utilizzate per il dimensionamento degli ancoraggi dell'opera di difesa prevista:

- installazione di una barriera flessibile in rete d'acciaio per la mitigazione del rischio indotto da colate detritiche (Debris-Flow), dimensionata in modo tale che sia in grado di resistere alla pressione combinata dinamica (durante il processo di riempimento) e statica (a barriera colmata), calcolata in base alle dimensioni del bacino idrografico sotteso alla sezione e con certificazione di qualità.



Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	60.43
RMR corretto	58.43
Coesione c (KPa)	302.15
Angolo di attrito ϕ	35.22
Mod. di deformaz. E (GPa)	20.86
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre

Zona PAI 5

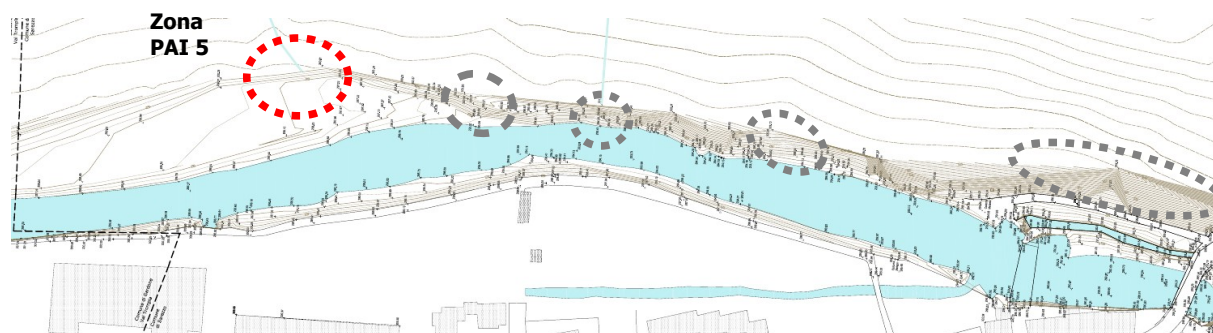


Foto 5: zona PAI 5

Questo tratto è caratterizzato da una copertura detritica che riveste con discreta continuità gli affioramenti del substrato roccioso nella fascia di base al raccordo con la pista ciclabile.

Si tratta di deposito di versante e conoide formato da clasti calcarei centi-decimetri spigolosi, con liste di selce.

Le pendenze sono piuttosto elevate ed il detrito è spesso colonizzato dalla vegetazione ed appare prevalentemente stabile.

Tale area è individuata sulla cartografia PAI come "area di conoide attiva non protetta" ed attualmente non presenta precedenti visibili opere di difesa

I clasti, che derivano dalla disaggregazione degli affioramenti del substrato roccioso soprastante, sono tipicamente eterodimensionali e con forma irregolare ma spigolosa: l'accumulo lungo il pendio favorisce normalmente la deposizione gradata con graduale variazione della granulometria spostandosi dall'alto verso il basso.

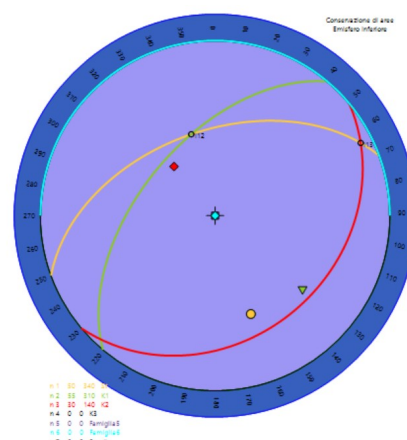
Grazie soprattutto alla forma che presenta spigoli vivi, tali depositi sono caratterizzati da angoli di attrito piuttosto elevati, ovvero sono dotati di buone caratteristiche geotecniche che ne favoriscono la parziale stabilità.

La potenziale pericolosità di questi accumuli è legata prevalentemente alla elevata pendenza del piano di appoggio e ad altre condizioni che potrebbero instabilizzarli come la presenza di grandi quantità di acqua tra i clasti (in occasione di fenomeni atmosferici piuttosto intensi che potrebbero formare flussi idrici concentrati lungo il pendio), oppure la caduta di altro materiale vegetale o roccioso dall'alto.

Sono stati rilevati rari blocchi rocciosi di dimensioni decimetriche nella piana alluvionale dei quali è incerta l'origine soprattutto in seguito ai lavori di sbancamento eseguiti per la realizzazione della pista.

Gli affioramenti che si rinvenivano al piano della pista mostrano un'altezza di pochi metri, mentre nella parte più alta del versante si scorgono porzioni di parete, che emergono dalla fascia detritica, che potrebbero causare distacchi.

L'estensione degli affioramenti raggiungibili è piuttosto limitata e quindi la raccolta statistica dei dati relativi alle giaciture delle discontinuità è altrettanto limitata.



Rock Mass Rating (Beniawsky)	
RMR base	54.14
RMR corretto	52.14
Coesione c (KPa)	270.70
Angolo di attrito ϕ	32.07
Mod. di deformaz. E (GPa)	8.28
Classe	Terza
Descrizione	Mediocre

Le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso sono state utilizzate per il dimensionamento degli ancoraggi dell'opera di difesa prevista:

- installazione di una barriera flessibile in rete d'acciaio per la mitigazione del rischio indotto da colate detritiche (Debris-Flow), dimensionata in modo tale che sia in grado di resistere alla pressione combinata dinamica (durante il processo di riempimento) e statica (a barriera colmata), calcolata in base alle dimensioni del bacino idrografico sotteso alla sezione e con certificazione di qualità.

3. Criteri considerati per la scelta progettuale

I criteri utilizzati per le scelte progettuali, adottati in relazione alle differenti tipologie di pericolosità riscontrata e/o riportata dalla cartografia PAI sulla base di eventi avvenuti nel tempo, hanno consentito l'individuazione di differenti tipologie di intervento.

Barriere Paramassi

Questo tipo di intervento è stato individuato per la zona PAI 1.

La proposta progettuale è volta alla riduzione delle possibili conseguenze dirette sulla parte iniziale della ciclabile (imbocco Sud da via Marconi che presenta anche un impianto di derivazione delle acque a scopo idroelettrico) storicamente ed anche recentemente interessato da eventi di tipo crollo di blocchi rocciosi dalla parete e rotolamento di massi dal versante, mediante l'installazione di barriere paramassi.

L'installazione delle barriere paramassi, grazie alla loro funzione di intercettazione sia di eventuali blocchi distaccati dagli affioramenti, sia di blocchi appoggiati al versante, consentono la protezione di una vasta porzione del territorio a valle ed è stato considerato l'intervento maggiormente efficace in relazione alla notevole estensione areale della porzione di versante potenzialmente instabile e parzialmente inesplorabile.

Dove non è stato possibile raggiungere fisicamente la zona di interesse, sono state eseguite osservazioni tramite volo con drone anche se fortemente limitati anch'essi a causa della fitta vegetazione che copre il pendio e che rende difficilmente osservabili eventuali ammassi e/o zone di subaffioramento e di detrito.

La difficoltà della perlustrazione del versante di monte, non consentono la puntuale individuazione delle aree di sorgente e della caratterizzazione geomeccanica per cui verranno utilizzati i dati dei rilievi eseguiti alla base del versante, unitamente alle misure relative alle geometrie dei massi caduti di cui si ha testimonianza.

Dati di rilievo

Una volta definiti gli interventi di massima da eseguire lungo il versante, la successiva fase di dimensionamento delle opere di difesa, ovvero delle barriere paramassi, è stato eseguito soprattutto sulla base delle risultanze del rilievo di campagna che hanno consentito di definire le caratteristiche prestazionali delle opere.

Le *condizioni geomorfologiche* considerate, sono state definite mediante la ricerca di alcuni possibili corridoi di discesa, individuati con simulazioni di caduta massi con modello tridimensionale del versante da cui sono state definite le possibili piste di discesa dei massi di progetto.

La modellazione del versante è stata realizzata mediante tecnica SAPR solamente per la porzione basale del pendio a causa della vegetazione particolarmente fitta che non ha consentito una corretta restituzione dell'andamento del terreno del versante: il rilievo è stato quindi integrato con la cartografia ufficiale del territorio comunale.

Il limitato dettaglio del rilievo del versante non consente di quantificare precisamente le asperità del terreno, soprattutto in termini di micro-topografia: le inevitabili semplificazioni introdotte nella produzione del dato topografico disponibile, non consentono di rilevare la presenza di elementi come piccoli terrazza-

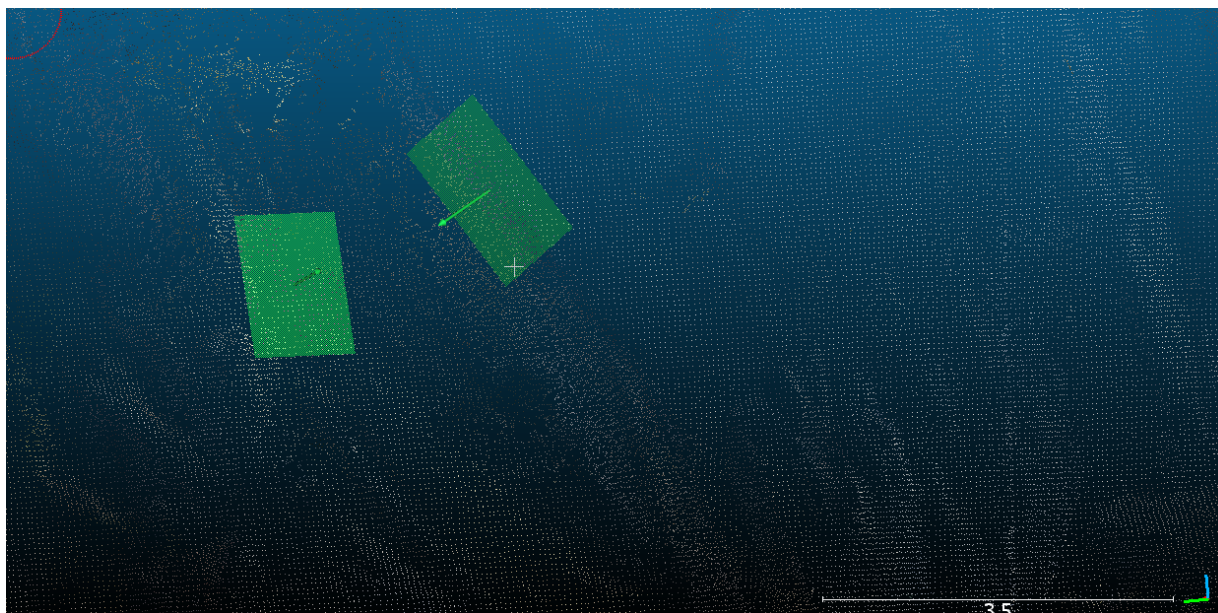
menti, affioramenti rocciosi, piccoli impluvi, dati che quindi non vengono valutati dalle simulazioni.



estratto modello digitale del versante



Dettaglio affioramento roccioso



Esempio orientazione discontinuità su modello digitale del terreno

Sulla base del rilievo e delle indicazioni fotografiche, è stata fatta la caratterizzazione del pendio dal punto di vista della tipologia della copertura: in questo caso è stata considerato complessivamente un pendio con roccia alterata: in via cautelativa non è stata considerata la presenza della vegetazione.

In base a questo, sono stati definiti i coefficienti di restituzione, parametri caratterizzanti il rimbalzo, che esprimono la dissipazione di energia cinetica nell'urto (Pfeiffer e Bowen, 1989):

	Coeff. di restituzione normale	Coeff. di restituzione tangenziale
Roccia integra	0.65-0.75	0.87-0.92

Le *condizioni geomeccaniche* si riferiscono invece alle caratteristiche dei blocchi potenzialmente instabili, sia facenti parte di un ammasso roccioso, verificate tramite rilievi geomeccanici utili a definire la qualità dell'ammasso roccioso so-

prattutto in funzione della determinazione del volume roccioso unitario (VRU), sia come blocchi isolati che rappresentano la pericolosità principale considerata.

Come anticipato, la definizione di un volume roccioso unitario sulla base dei tre principali set di discontinuità: rivela un volume piuttosto ridotto ($0.7 \times 0.5 \times 0.6$ m volume = 0.21 m^3) a causa soprattutto della limitata spaziatura della stratificazione (oltre che dalla persistenza delle fratture k1 e k2 che è spesso ridotta).

Gli affioramenti mostrano la possibilità di formazione di blocchi anche di maggiore dimensione, sia a causa della locale variazione dello spessore degli strati, sia a causa della particolare resistenza/cementazione dei giunti interstrato che possono consentire la formazione di pacchi di strati piuttosto solidali.

Anche nel recente episodio di ribaltamento/scivolamento di un blocco dalla parete affiorante nella zona PAI 1, la movimentazione ha coinvolto un volume notevole di roccia (cuneo di dimensioni circa $7.0 \times 1.7 \times 2.0$ m) che si è mossa in maniera solidale anche a fronte di una stratificazione piuttosto evidente.

Per questo motivo, in fase di definizione del masso di progetto per la simulazione della caduta di massi, sono stati considerati blocchi di dimensioni maggiori, con volumi di circa 0.5 m^3 in modo da considerare sia la possibile presenza di pacchi di strati solidali, sia per la persistenza delle fratturazioni che non sempre riesce ad isolare volumi rocciosi di limitate dimensioni coerentemente con la spaziatura delle stesse.

In particolare è stato considerato un blocco di progetto a forma discoidale di raggio pari a 0.5 m ed altezza pari a 0.6 m (volume = 0.47 m^3).

Analisi numeriche

Per poter dimensionare le opere di difesa proposte, sono state effettuate alcune simulazioni numeriche relative alla caduta di massi dal versante: inizialmente è stato utilizzato un modello 3D che considera i blocchi come puntiformi che impattano su un piano quotato. Questo è formato da un reticolo di nodi tridimensionali costituenti una mesh triangolare che rappresenti l'intera zona tra il distacco e l'arresto dei blocchi.

Gli elementi del reticolo devono essere definiti in modo da poter considerare costante, all'interno del perimetro, l'inclinazione e la direzione del pendio insieme ai parametri fisici del modello che sono i coefficienti di restituzione normale e tangenziale, definiti come rapporto di energia post e pre-impatto.

Successivamente, sulla base delle traiettorie individuate con il modello 3D, è stato utilizzato un codice di calcolo bidimensionale basato sul modello detto CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program, Pfeiffer e Bowen (1989)) con lo scopo di modellare il moto di caduta di blocchi aventi la forma puntiforme e discoidale con sezione circolare nel piano verticale del movimento.

Il criterio di modellazione, consente di tener conto della natura casuale della maggior parte dei parametri che controllano l'impatto sul pendio, in modo da poter condurre numerose simulazioni che riproducano sia la variabilità naturale, sia l'elevato grado di aleatorietà connessi ai fenomeni di propagazione dei massi sui versanti.

La progettazione dei sistemi di difesa passiva, atti ad intercettare ed arrestare blocchi rocciosi in moto su di un pendio, richiede la valutazione preliminare di un blocco di riferimento detto "blocco di progetto" con cui determinare alcuni parametri caratteristici come:

- ♦ altezze delle traiettorie di caduta e dei rimbalzi rispetto la superficie del pendio;
- ♦ energie assunte dai blocchi lungo i percorsi di caduta, in funzione della loro massa e velocità raggiunta;
- ♦ massime distanze raggiunte dai massi e zone di espandimento a valle.

L'analisi è stata impostata con differenti simulazioni di 200 lanci distribuiti sulla parte superiore del profilo topografico, le variabili considerate nelle simulazioni effettuate sono: la dimensione del masso di progetto (raggio = 0.5 m e spessore = 0.6 m) e la velocità di partenza di 1.0 m/s (utilizzati valori di velocità superiori nei casi di impatti multipli e rimobilizzazioni – vedi considerazioni finali).

L'analisi statistica dei lanci, vede (soprattutto nel caso delle dimensioni minori e della minore velocità di partenza) la gran parte dei massi movimentati terminare la corsa lungo il pendio, mentre aumentando il valore delle dimensioni e della velocità si rinvergono blocchi che terminano la corsa sul fondovalle (nella presente relazione vengono riportati gli esiti delle sole simulazioni con massi di dimensioni maggiori).

In allegato vengono riportati alcuni esiti della sezione con le traiettorie e i punti di arresto dei lanci simulati.

Sezione 01N

Barriera N°	Xb(m)	Yb(m)	HpMax[m]	Vmax[m/s]	E _{max} [KJ]
1.0	175.919	362.411	0.009	5.914	20.115

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	12.38	m/s
Energia massima pre-impatto	84.7	KJ
Ascissa massima raggiunta	175.924	m

Sezione 02N

Barriera N°	Xb(m)	Yb(m)	HpMax[m]	Vmax[m/s]	Emax[KJ]
1.0	135.704	352.592	0.23	27.329	608.228

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	27.09	m/s
Energia massima pre-impatto	573.565	KJ
Ascissa massima raggiunta	135.778	m

Sezione 03S

Barriera N°	Xb(m)	Yb(m)	HpMax[m]	Vmax[m/s]	Emax[KJ]
1.0	98.373	342.404	0.17	17.907	262.006

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	18.42	m/s
Energia massima pre-impatto	259.01	KJ
Ascissa massima raggiunta	98.458	m

Sezione 04S

Barriera N°	Xb(m)	Yb(m)	HpMax[m]	Vmax[m/s]	Emax[KJ]
1.0	106.753	327.732	0.802	26.345	576.025

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	25.95	m/s
Energia massima pre-impatto	517.094	KJ
Ascissa massima raggiunta	106.798	m

Tra i dati ricavati, quelli che verranno utilizzati per il dimensionamento delle opere di difesa saranno: l'altezza massima di rimbalzo e l'energia cinetica massima (valore in funzione della velocità massima e della massa del blocco si progetto).

Le elaborazioni delle simulazioni evidenziano la possibilità di rimbalzi piuttosto limitati nella parte bassa del versante ed energia massima attesa, inferiore a 650 kJ: tali valori andranno a caratterizzare dal punto di vista prestazionale, l'opera di difesa, nella fattispecie le caratteristiche della barriera paramassi.

Per la definizione dell'opera di difesa, oltre al livello energetico richiesto, ed alle altezze del rimbalzo previste sono state effettuate le seguenti considerazioni:

- come confermato anche dalle simulazioni, la maggior parte dei blocchi potenzialmente mobilitabili si fermano lungo il tragitto e per questo dobbiamo considerare anche la possibile presenza di blocchi lungo il versante che possono essere anche coinvolti in una ri-mobilitazione singola o multipla. Con le simulazioni di caduta massi non si possono valutare scenari di caduta e propagazione di blocchi multipli ma la ripetizione di lanci di blocchi singoli, le cui forma e dimensione restano costanti lungo tutta la propagazione.

Non essendo quindi calcolati i fenomeni di interazione tra blocchi in contemporanea discesa, il potenziale aumento di volume di materiale da intercettare e frenare da parte delle barriere verrà considerato con una maggiorazione della prestazione energetica delle stesse.

- Nel caso di rimobilitazione di blocchi appoggiati sul pendio a causa dell'impatto con altri blocchi, nelle simulazioni è stata considerata una velocità iniziale maggiore, pari a 3.0 m/s, rispetto a quella considerata in condizioni normali a causa dell'urto.

- Il modello matematico utilizzato nelle simulazioni eseguite si basa su un masso di progetto con forma discoidale e non considera lo spin di un blocco di forma prismoidale che nelle fasi di rimbalzo e di rotolamento, può modificare la conseguente traiettoria aerea che potrebbe essere anche notevolmente aumentata proporzionalmente alla velocità angolare di spin.

Il potenziale aumento delle altezze di rimbalzo attese (piuttosto bassa quelle risultanti dalle simulazioni anche in funzione della mancanza della fase iniziale di caduta libera) verrà considerato con un innalzamento della altezza della barriera (compatibilmente con il rapporto altezza/energia per le barriere certificate)

- la restituzione cartografica utilizzata per i profili delle simulazioni, non posso-
no tener conto della micro-topografia del pendio e quindi la possibilità di piccoli terrazzamenti o particolari affioramenti del substrato roccioso. Nel caso specifico, a causa della stratificazione localmente sub-verticale, si formano (ben visibili lungo via Marconi e la parete PAI 1) delle sporgenze rocciose, anche a ridosso del ciglio, che potrebbero amplificare il rimbalzo di un blocco dotato di spin, anche se dotato di velocità tangenziale limitata.

In base alle risultanze delle simulazioni a cui vengono applicati i seguenti coefficienti:

- γ_{Tr} (è il coefficiente di affidabilità di calcolo delle traiettorie adottato pari a 1,10 per simulazione di caduta basate su coefficiente di restituzione derivati da sole informazioni bibliografiche);
- γ_{Dp} (è il coefficiente che tiene conto della qualità di discretizzazione topografica del pendio adottato precauzionalmente pari a 1,10 per pendii discretizzati con precisione medio-bassa;
- e un franco libero minimo superiore comunque non minore di 0,50 m.
- considerando che l'energia cinetica sollecitante di progetto $ES_d < E_{barriera} / \gamma_E$ ove $\gamma_E = 1,20$ è il coefficiente di sicurezza da applicare ai valori energetici

ed in base alla considerazioni sopra riportate che a favore di sicurezza inducono ad una maggiorazione sia della prestazione energetica, sia dell'altezza

dell'opera, si ritiene che il migliore approccio alla mitigazione del rischio di caduta massi trattato, sia costituito dalla installazione di n. 03 barriere paramassì in grado di assorbire energie fino a 2000.0 kJ e di altezza pari a 4.0 m e di lunghezza pari a 60.0 m, 70.0 m e 80.0 m.

L'Appaltatore ha la possibilità di proporre ogni altro tipo di barriera in commercio nel rispetto delle prestazioni indicate nella presente relazione, riprese nel Capitolato. I materiali utilizzati dovranno soddisfare le normative vigenti.

Sulla planimetria di progetto sono ubicate le opere previste: l'esatta ubicazione delle strutture potrà essere precisamente definita in sito tramite tracciatura in collaborazione con l'impresa esecutrice.

Dimensionamento fondazioni

Nella apposita Relazione di calcolo allegata, viene fatta la verifica secondo i carichi di progetto costituiti dalle forze di picco registrate sulle funi e sulle fondazioni (ancoraggi) durante i tests MEL (Massimo Livello Energetico) eseguito secondo la norma ETAG 027 per la barriera .

I carichi agenti considerati per il dimensionamento delle fondazioni sono variabili per i diversi modelli dei vari costruttori presenti sul mercato.

L'Appaltatore ha la possibilità di proporre ogni altro tipo di barriera in commercio nel rispetto delle prestazioni indicate nella presente relazione, riprese nel Capitolato. I materiali utilizzati dovranno soddisfare le normative vigenti indicate nella normativa.

Per quanto riguarda la determinazione delle tensioni di connessione dei ter-

reni interessati, si ipotizza per semplicità che il terreno sia formato da uno strato omogeneo per l'intera profondità d'infissione degli ancoraggi. Occorrerà verificare durante la perforazione la corrispondenza tra queste ipotesi progettuali e le caratteristiche effettivamente riscontrabili in sito ed applicare conseguentemente le tipologie di fondazione per le fondazioni dei montanti, degli ancoraggi di monte e laterali, dei risultati di dimensionamento contenuti nella presente relazione.

Si prevede, inoltre, che la miscela di iniezione per la realizzazione di elementi di trasmissione al terreno degli sforzi indotti nella struttura in elevazione, sia di tipo cementizio e sia posta in opera secondo il processo di iniezione di tipo globale e messa in pressione unica (metodo IGU).

Si evidenzia che tutte le parti metalliche saranno opportunamente zincate secondo le normative vigenti e gli ancoraggi potranno essere convenientemente protetti contro la potenzialità corrosiva dell'ambiente esterno dovute alla presenza di acqua ed eventuali componenti chimici aggressivi.

Barriere elastiche per colate detritiche tipo Debris-Flow

Questo tipo di intervento è stato individuato per le zone PAI 2-3-4 e 5.

Si tratta dell'installazione di barriere elastiche, tipo paramassi, che consentano di trattenere la porzione del trasporto solido che può essere movimentata in eventi di piena nei torrenti montani.

Il rilievo degli interventi già in essere nell'area, mostra che effettivamente i torrenti, pur essendo privi di acqua per buona parte dell'anno, nei periodi particolarmente piovosi innescano processi di trasporto solido che sono evidenziati dai volumi di detrito accumulati in pochi anni.

Sulla base delle condizioni geomorfologiche e dell'area del bacino sotteso, mediante un codice di calcolo viene valutata la massa di detrito che può essere rimobilizzata e trasportata fino alla base del versante.

In relazione alle dimensioni delle sezioni considerate, saranno previste:

- barriere elastiche certificate senza montante (interventi PAI 2, 3, 4)
- barriere elastiche certificate con montante (interventi PAI 5)

Per la stima del volume degli eventi di colata, cioè la valutazione del volume massimo che potenzialmente può essere trasportato, non avendo a disposizione dati da rilievo topografico di dettaglio e le difficoltà logistiche nel percorrere le varie aste torrentizie, è stato utilizzato un metodo geomorfico (metodo di Hungr et al. '84) che si basa sulle caratteristiche geologiche e di stabilità del canale e delle fasce spondali per stimare il volume totale V [m^3] definendo un parametro e_i [m^3/m] che rappresenta l'apporto detritico stimato per unità di lunghezza L [m] secondo la formula:

$$V = \sum_{i=1}^n L_i \cdot e_i$$

Sulla base delle informazioni raccolte dal rilievo delle porzioni terminali dei canali che sono state estese anche per le porzioni non direttamente investigate, è stato considerato il valore di apporto detritico unitario e_i relativo a canali con alveo e sponde in roccia oppure con sottile strato di detrito o suolo sciolto su roccia (Classe A e B definita dagli Autori) avente valore variabile tra 5-10.

I parametri delle zone interessate sono:

Zona intervento	Superficie bacino [m ²]	Lunghezza canale [m]	Valore e_i	Volume totale [m ³]
PAI 2	11155.0	220.0	8	1760.0
PAI 3	28680.0	240.0	8	1920.0
PAI 4	16820.0	240.0	8	1920.0
PAI 5	13435.0	300.0	8	2400.0

verranno utilizzati nei calcoli di dimensionamento dell'opera, un volume di circa 2000.0 m³ per le zone di intervento PAI 2, PAI 3, PAI 4, ed un volume di 2400.0 m³ per la zona PAI 5.

Il dimensionamento delle barriere flessibili contro colate detritiche prende spunto dal volume di materiale che si vuole o si deve trattenere, ma anche dalle condizioni morfologiche locali, intendendo con queste le pendenze dall'asta torrentizia e le ampiezze delle sezioni trasversali dell'asta.

Le barriere per debris flow possono assumere con facilità la geometria della sezione trasversale di un torrente; anche nel caso in esame, le analisi realizzate in questa sede considerano una geometria vagamente trapezoidale che verrà adattata alla effettiva sezione del canale.

Il dimensionamento è stato fatto sulla base del programma Deb_flow, sviluppato nell'ambito di un progetto KTI della Confederazione Elvetica e che consente un adeguato dimensionamento delle barriere flessibili a rete in grado di arrestare le colate detritiche, entro certi limiti, direttamente in sito, ossia lungo le aste torrentizie.

Il programma esegue una verifica delle capacità della barriera sia di carattere strutturale (ossia confrontando le capacità della barriera nei confronti dei carichi che si vengono a determinare nel corso della colata), sia di carattere geometrico (ossia confrontando le capacità di ritenuta dell'impianto con i volumi di detrito attesi per gli eventi esaminati).

L'output è dunque la determinazione dell'impianto di protezione esprimendo sia la tipologia di barriera, sia le configurazioni geometriche, ancorché schematiche.

Il volume mobilitabile da un evento di colata risulta uno dei parametri di più difficile valutazione. In letteratura sono presenti una buona quantità di metodi per la stima della magnitudo di una colata, cioè il volume massimo di materiale detritico posto in movimento durante un evento di 'debris flow'.

Le formule usate sono sempre empiriche, e valide per le condizioni sperimentali da cui sono state ricavate; questo implica un'importante variabilità e una difficile valutazione della magnitudo che in molti casi risulta fortemente sovrastimata.

Valutazioni maggiormente precise sui volumi potrebbero essere eseguite tramite l'analisi di eventi di colata passati soprattutto avendo a disposizione dati che comprendono periodi piuttosto estesi e con eventi significativi.

Generalmente si tende a calcolare il volume mobilitato con un procedimento a ritroso: si parte determinando quale sia la barriera adatta, dal punto di vista

sia strutturale che geometrico, e per tale barriera si valuta il volume che può essere arrestato.

Analisi e modellazione del debris-flow in progetto

Per la valutazione della tipologia di barriere flessibili necessaria per resistere sia al carico dinamico sia al carico statico, sono stati ipotizzati 3 casi. Nel seguito saranno presentate le differenze tra i casi ipotizzati.

Tipo e densità del debris flow atteso

Il codice di calcolo permette di identificare la tipologia di materiale che caratterizza una colata: da eminentemente fine (*"muddy"*) a grossolano (*"granular"*). La diversa tipologia di materiale comporterà una sostanziale differenza dei carichi applicati sulla barriera come verrà illustrato di seguito.

Come è stato possibile osservare dal rilievo, il materiale presente in alveo a seguito dei passati eventi e che è tuttora contenuto nelle opere esistenti, risulta costituito per lo più da materiale detritico grossolano: per cui si rientra nel caso di colata granulare.

Si assume, per cui, un materiale mobilitabile di tipo granulare per i primi due casi e di tipo fine per il terzo.

La densità imposta risulta essere pari a:

Caso 1 $\rightarrow \gamma = 2270 \text{ kg/m}^3$

Caso 2 $\rightarrow \gamma = 1960 \text{ kg/m}^3$

Caso 3 $\rightarrow \gamma = 1820 \text{ kg/m}^3$

Volume totale

In base a quanto anticipato; si considera la mobilitazione di 2000 m³ di materiale per le zone PAI 2, 3 e 4 e 2400 m³ per la zona PAI 5.

Numero atteso di pulsazioni

Da prove sperimentali, ma anche e soprattutto dall'osservazione di eventi naturali, è stato evidenziato che il fenomeno delle colate detritiche avviene in pulsazioni successive; chiaramente, minore è il numero delle pulsazioni, maggiore è il carico che la barriera o le barriere devono sopportare. In questa analisi è stato assunto un numero di pulsazioni (n) variabile da 1 a 3.

Caso 1 → n=3

Caso 2 → n=3

Caso 3 → n=3

Volume mobilitato nella prima ondata

Il volume più importante di materiale è generalmente trasportato nella prima ondata, ed il programma Deb_flow tiene conto di questo fatto. Nel seguito si riportano i valori utilizzati per il calcolo, che derivano dall'esperienza e dai dati consigliati dal programma.

Caso 1 → 1000 m³

Caso 2 → 1000 m³

Caso 3 → 1000 m³

Portata di picco attesa o portata di picco calcolata empiricamente

La portata debris di picco può essere calcolata come:

$$Q_p = 0.135V^{0.78}$$

(Rickenmann, 1999)

La barriera è soggetta alla pressione dinamica massima durante la prima pulsazione, quindi per il dimensionamento il programma calcola soltanto la portata corrispondente alla prima ondata, dalla quale deriva la velocità maggiore del flusso.

I valori di portata adottati per tutte le zone sono i seguenti:

Caso 1 → 30 m³/s

Caso 2 → 30 m³/s

Caso 3 → 30 m³/s

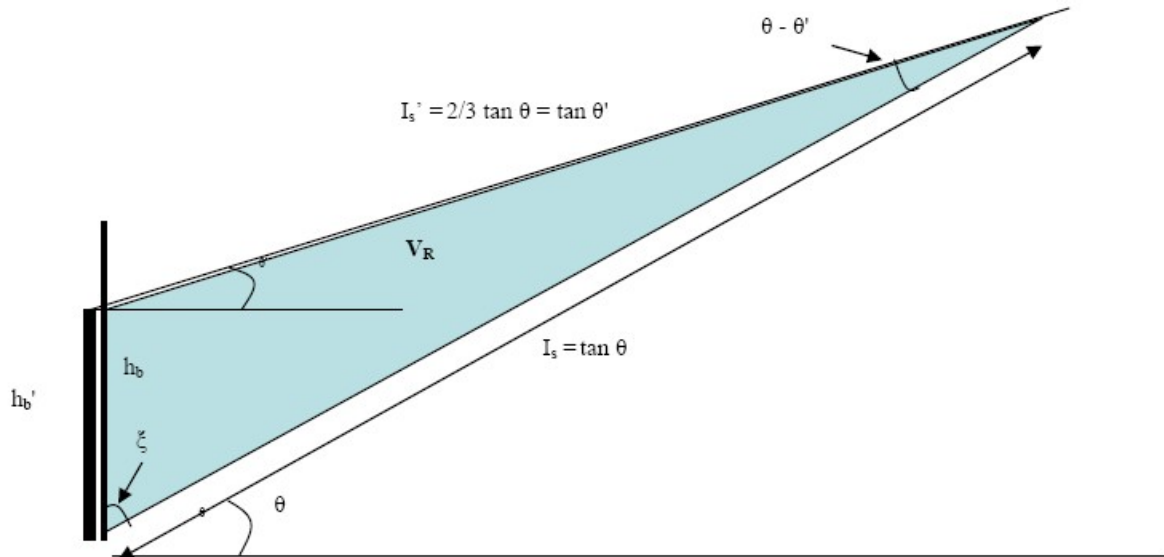
Geometria delle sezioni

Viste le attuali condizioni dell'alveo e le effettive quantità di detrito presente (anche se accumulato in periodo di tempo piuttosto limitato di circa 7 anni), oltre ai volumi mobilitabili stimati, è stata definita 1 barriera di forma trapezoidale per ogni zona individuata, di altezza compresa tra i 3.0 m (per le zone PAI 2, 3 e 4) e i 4.0 m (per la zona PAI 5).

Verifica della capacità di trattenuta di materiale

A seguito di analisi sperimentali su campi prova naturali, citati anche in precedenza, successivamente ad un evento di colata detritica che impatta su una barriera flessibile a rete, si configurano le condizioni illustrate nello schema seguente

$$V_r = 0.5 \cdot h_b \perp' \cdot L \cdot b_m + h_b \parallel' \cdot h_b \perp' \cdot b_m = 0.5 \cdot h_b'^2 \cdot b_m \cdot \sin(\xi) \left(\frac{\sin(\xi)}{\tan(\theta - \theta')} + \cos(\xi) \right)$$



dove:

h_b è l'altezza nominale della barriera come installata

h_b' è l'altezza residua della barriera dopo l'impatto

θ è l'angolo medio di inclinazione del versante a monte della barriera

θ' è l'angolo di deposizione del materiale accumulato a monte della barriera

ξ è l'angolo tra la rete ad anelli e il fondo dell'alveo

b_m è la media tra la base maggiore e la base minore

I_s è il gradiente dell'accumulo di materiale fermato dalla barriera, al fondo del torrente

I_s' è il gradiente dell'accumulo di materiale fermato dalla barriera

I parametri sopra elencati in corrispondenza delle barriere, applicando le funzioni sopra illustrate divengono sono riportati negli output del foglio di calcolo, da cui:

$$V_R = 2068 \text{ m}^3 \quad (\text{per la barriera PAI 2})$$

$$V_R = 2206 \text{ m}^3 \quad (\text{per la barriera PAI 3})$$

$$V_R = 2206 \text{ m}^3 \quad (\text{per la barriera PAI 4})$$

$$V_R = 2934 \text{ m}^3 \quad (\text{per la barriera PAI 5})$$

Il programma considera una geometria semplificata, cioè un'area trasversale di forma trapezoidale che si mantiene costante per il tratto in analisi, il che è un'assunzione a favore di sicurezza, dato che dalle caratteristiche geomorfologiche ci si può aspettare che invece l'area trasversale (di forma irregolare) aumenti a monte della sezione considerata; la geometria presa in considerazione dal programma è quindi falsamente 3D, dal che deriva un volume di trattenuta delle barriere minore a quello che si avrebbe in realtà.

velocità del fronte e altezza del flusso

La velocità nel fronte del flusso di debris viene calcolata mediante Rickenmann (1999) nel modo seguente:

$$v = 2.1 Q_p^{0.34} I_s^{0.2}$$

Il codice utilizza anche la formula di Strickler per il calcolo della velocità del flusso. Per le simulazioni sono stati scelti dei valori intermedi tra quelli calcolati tramite Rickenmann e quelli derivanti da Strickler (valido per tutte le quattro zone):

Caso 1 → 5.9 m/s

Caso 2 → 5.9 m/s

Caso 3 → 5.9 m/s

L'altezza del flusso h è calcolata come funzione della sezione ortogonale al flusso e della portata, secondo la seguente formula (continuità del flusso):

$$h_{fl} = \frac{Q_p}{v * b_u}$$

Dove b_u è la base minore del trapezio della sezione ipotizzata della barriera.

I valori di altezza del flusso sulla barriera per la prima ondata sono i seguenti:

$h_{fl} = 0.8$ m nel caso PAI 2, 3 e 4

$h_{fl} = 1.0$ m nel caso PAI 5

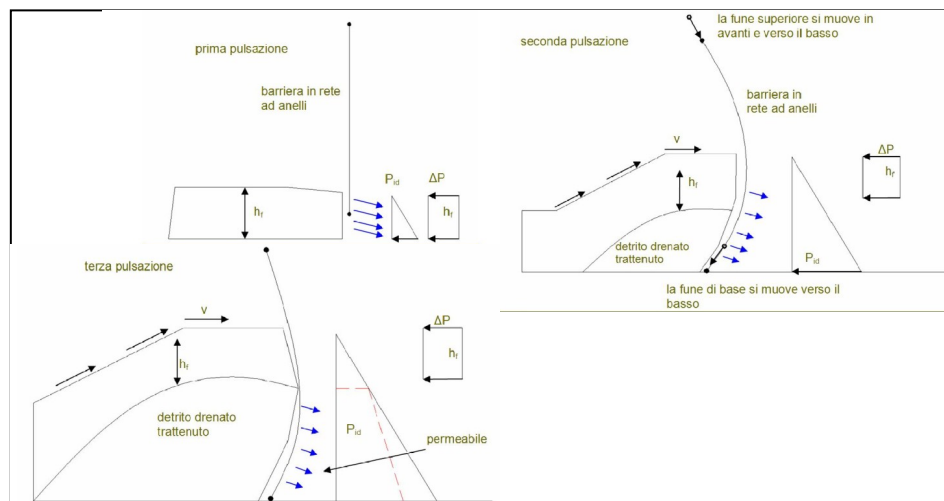
Il programma fornisce un valore massimo ammissibile dell'altezza di magra ("*basal opening*") pari a $2/3 * h_{fl}$, ma questo valore può essere diverso per un torrente determinato, e dipende del comportamento del torrente stesso.

Il programma basa i risultati sul caso più critico.

processo di carico subito dalla barriera per tre ondate successive

Le barriere sono progettate in modo tale che i carichi agenti sulla rete, cioè il carico statico e il carico dinamico siano opportunamente sostenuti dalla rete stessa e questa funzioni ancora, prevalentemente, in campo elasto-plastico. L'impatto della colata detritica avviene di solito in diverse pulsazioni le quali si muovono sopra il materiale trattenuto dalla barriera, trasportato dalla pulsazio-

ne precedente. La mostra uno schema delle pressioni agenti sulla barriera flessibile per ogni pulsazione.



Sulla base dello schema illustrato nella figura precedente, si determinano le condizioni di carico che agiscono sulla barriera condizionandone la tipologia in termini di resistenza alle pressioni massime cui dovrà resistere nel corso delle pulsazioni fino al riempimento ed al successivo “overflow”.

Carico dinamico massimo

Il carico dinamico massimo è calcolato con la seguente formula:

$$F_D = C_D \rho v^2 h_{fl} \quad [N / m]$$

dove:

ρ = densità della colata

C_D = coefficiente sperimentale di trascinamento (determinato mediante i test)

v = velocità del flusso

Nelle schede di output, è riportata la pressione dinamica $[kN/(m \cdot h_{fl})]$ per tutti i casi, ossia per ogni barriera.

Carico statico massimo

Per la prima ondata il carico statico viene calcolato con:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho g h_{fl}^2$$

Nelle schede di output è riportata la pressione statica massima agente su ogni barriera, cioè quella che corrisponde alla condizione finale dopo l'ultima ondata. Questa pressione massima tiene conto del peso del materiale che passa sopra la barriera già riempita (*overflowing*).

I carichi massimi così determinati sono importanti per la scelta delle tipologia della barriera e per la sua configurazione.

risultati ottenuti

Il volume di materiale detritico trattenuto calcolato è pari a

$V_R = 2068 \text{ m}^3$ (per la barriera PAI 2)

$V_R = 2206 \text{ m}^3$ (per la barriera PAI 3)

$V_R = 2206 \text{ m}^3$ (per la barriera PAI 4)

$V_R = 2934 \text{ m}^3$ (per la barriera PAI 5)

Per i casi analizzati le barriere necessarie per resistere sia al carico dinamico, sia al carico statico sono caratterizzate da una geometria trapezoidale con un'ampiezza in sommità che va dai 10.0 m ai 18.0 m e alla base 5.0 – 6.0 m, un'altezza utile che va dai 3 m ai 4 m e che sia in grado di resistere ad una pressione minima di 120 e 140 kPa.

Come detto, le barriere per debris flow possono assumere con facilità la geometria della sezione trasversale di un torrente, le analisi realizzate in questa sede considerano una geometria trapezoidale che verrà adattata alla effettiva

sezione del canale anche in seguito alle previste operazioni di pulizia, disgaggio (per 50 m² per ogni sito) ed escavazione (per 20 m³ per ogni sito) per la regolarizzazione della sezione e la predisposizione alla installazione dell'opera.

Sulla planimetria di progetto sono ubicate le opere previste: l'esatta ubicazione delle strutture potrà essere precisamente definita in sito tramite tracciatura in collaborazione con l'impresa esecutrice.

4. Conclusioni

Nella progettazione dell'intervento descritto, si è proceduto alla valutazione delle caratteristiche morfologiche e geomeccaniche del tratto di versante in oggetto.

In relazione:

alle differenti tipologie di pericolosità del sito, rappresentato dalla probabilità che si verifichi un evento come la rimobilizzazione di blocchi rocciosi dal versante oppure il distacco di porzioni rocciose dagli affioramenti lungo la pista ciclabile;

alla vulnerabilità dell'area, rappresentata dalla possibilità che si verifichino danni alle cose e/o alle persone in seguito al dissesto,

si è provveduto alla scelta di una serie di interventi di difesa:

- installazione di barriere paramassi che vadano ad interessare la fascia dei potenziali corridoi di discesa dei massi.

Il dimensionamento di queste barriere è stato eseguito mediante l'analisi delle probabili traiettorie di discesa e della quantità di energia posseduta dai blocchi

in movimento: la scelta progettuale è stata quella di installare n. 03 barriere paramassi in grado di garantire la protezione da fenomeni di caduta massi con sviluppo energetico fino a 2000.0 kJ e di altezza pari a 4.0 m e di lunghezza pari a 60.0 m, 70.0 m e 80.0 m.

L'Appaltatore avrà la possibilità di proporre ogni altro tipo di barriera in commercio nel rispetto delle prestazioni indicate nella presente relazione, riprese nel Capitolato. I materiali utilizzati dovranno soddisfare le normative vigenti.

Sulla planimetria di progetto sono ubicate le opere previste: l'esatta ubicazione delle strutture potrà essere precisamente definita in sito tramite tracciatura in collaborazione con l'impresa esecutrice.

- installazione di barriere flessibili tipo Debris-Flow in corrispondenza di n. 04 scoli montani già individuati dalla cartografia tecnica e da precedenti interventi.

Il dimensionamento delle opere è stato effettuato sulla base dei volumi detritici potenzialmente trasportabili e per resistere sia al carico dinamico, sia al carico statico: le barriere sono caratterizzate da una geometria trapezoidale con un'ampiezza in sommità che va dai 10.0 m ai 18.0 m e alla base 5.0 – 6.0 m, un'altezza utile che va dai 3 m ai 4 m e che sia in grado di resistere ad una pressione minima di 120 e 140 kPa.

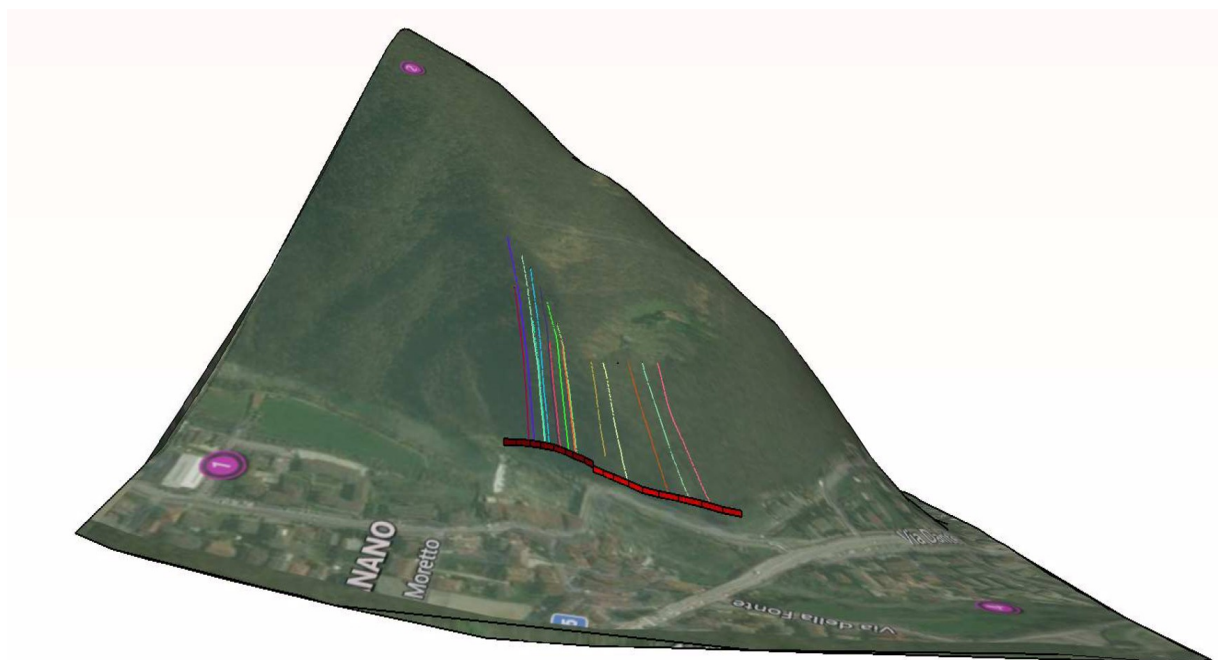
Le barriere per debris flow possono assumere con facilità la geometria della sezione trasversale di un torrente, le analisi realizzate in questa sede considerano una geometria trapezoidale che verrà adattata alla effettiva sezione del canale anche in seguito alle previste operazioni di pulizia, disgaggio ed escavazione per la regolarizzazione della sezione e la predisposizione alla installazione dell'opera.

Sulla planimetria di progetto sono ubicate le opere previste: l'esatta ubicazione delle strutture potrà essere precisamente definita in sito tramite tracciatura in collaborazione con l'impresa esecutrice.

- Esecuzione di interventi di pulizia e disgaggio: consiste nell'esplorazione delle pareti rocciose ed abbattimento dei volumi di roccia che si presentano in condizioni d'equilibrio instabile con l'ausilio di leve e, dove necessario, di attrezzature idrauliche ad alta pressione quali martinetti ed allargatori ecc...(PAI 1-2); e realizzazione di interventi di consolidazione corticale mediante rivestimento della scarpata con rete addossata, fune in trefoli d'acciaio ed ancoraggi in barre d'acciaio nelle aree PAI 1 (per una superficie prevista pari a circa 1800.0 m²) e PAI 1-2 (per una superficie prevista pari a circa 790.0 m²).

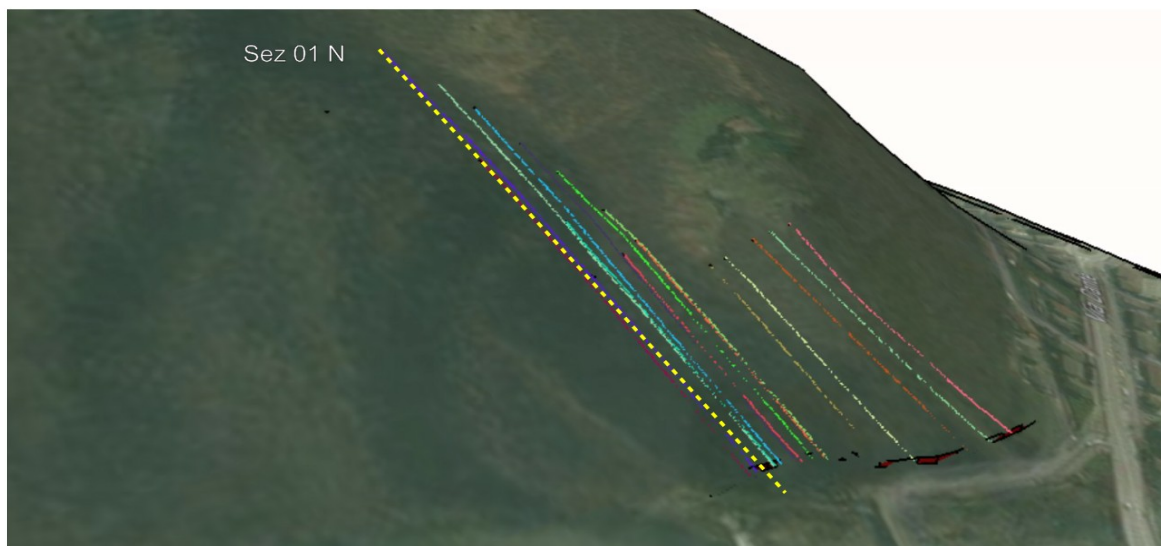
Dott. Geol. Davide Martello

Report elaborati simulazioni di caduta massi



Modello del terreno per simulazione 3D

Sez 01N



CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	3.0 m/s
Velocità iniziale in y	-3.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

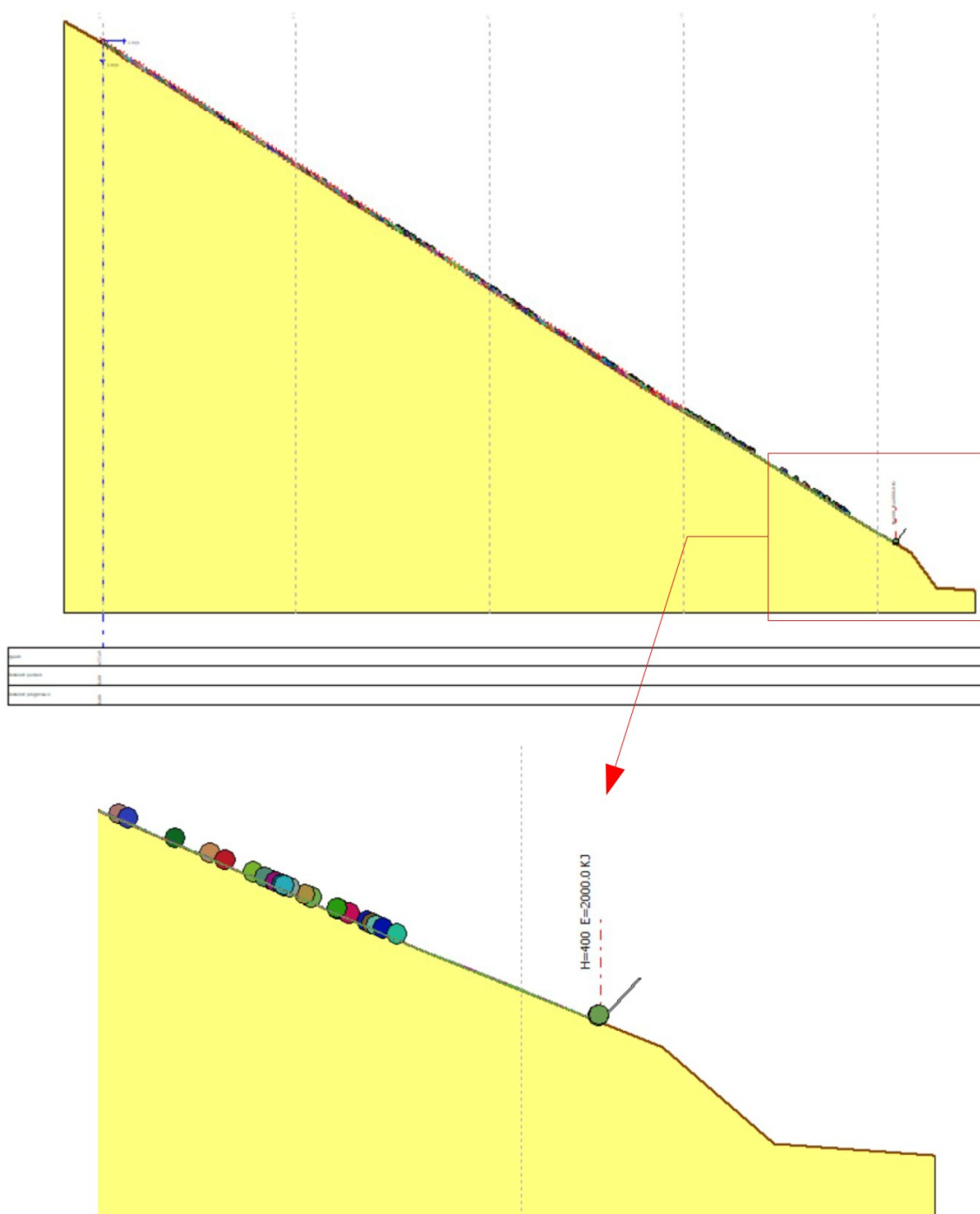
BARRIERE

(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 0	175.919	362.411	0.009	5.914	20.115

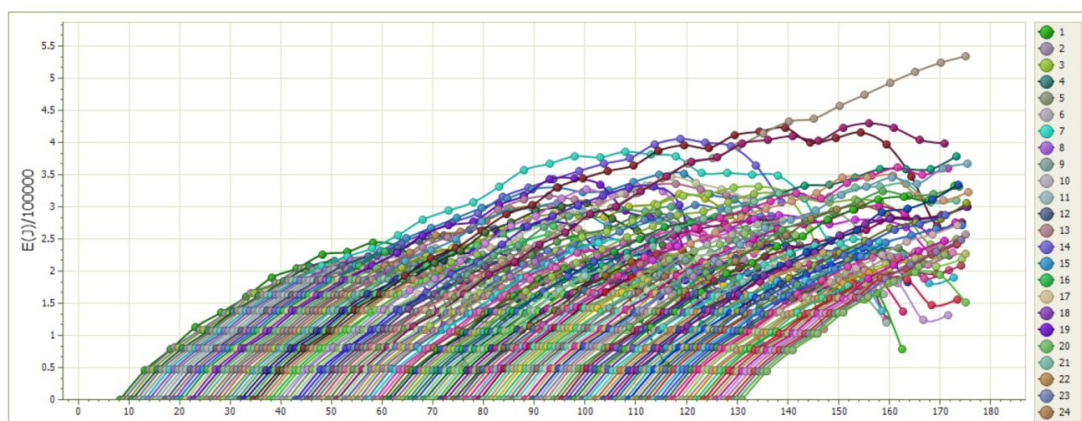
ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	12.38 m/s
Velocità minima	1.682 m/s
Velocità media	6.793 m/s
Scarto quadratico medio	3.274 m/s
Energia massima pre-impatto	84.714 KJ
Energia media pre-impatto	31.429 KJ
Scarto quadratico energia	25.114 KJ
Ascissa media di arresto	108.291 m
Ascissa massima raggiunta	175.924 m

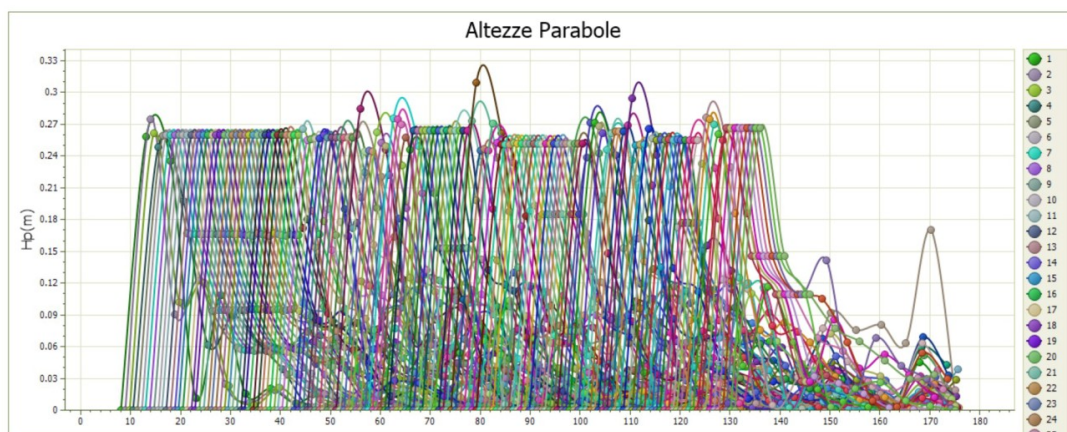


Messa in sicurezza versante montano a tutela del sottostante percorso faunistico che congiunge Via Marconi con la posta ciclabile di Gardone V.T. in sponda idraulica sinistra del Fiume Mella – Comune di Sarezzo (BS)

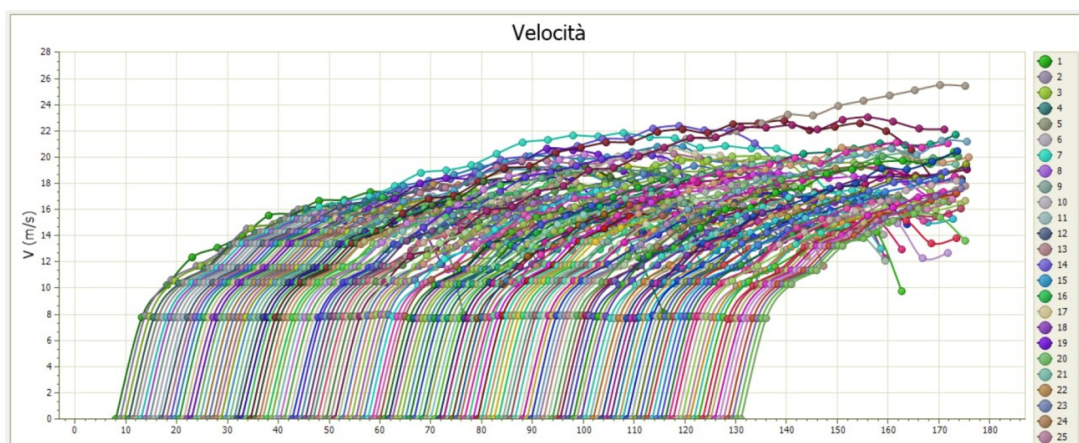
Allegati



Inviluppo energia di tutte le traiettorie



Inviluppo altezze di tutte le traiettorie



Inviluppo velocità di tutte le traiettorie

SEZ 01 N - estratto Simulazione 2

CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	1.0 m/s
Velocità iniziale in y	-1.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

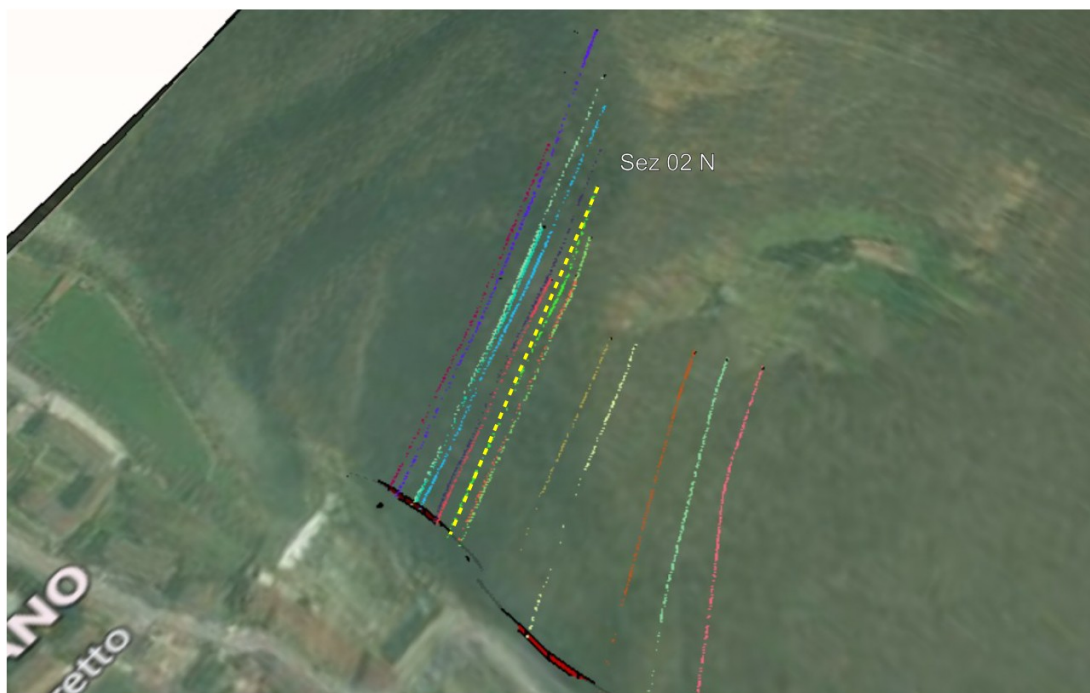
(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 0	175.919	362.411	0.019	18.652	341.346

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	20.33 m/s
Velocità minima	4.213 m/s
Velocità media	13.185 m/s
Scarto quadratico medio	2.829 m/s
Energia massima pre-impatto	351.453 KJ
Energia media pre-impatto	154.317 KJ
Scarto quadratico energia	60.403 KJ
Ascissa media di arresto	121.824 m
Ascissa massima raggiunta	175.929 m

Sez 02N



CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

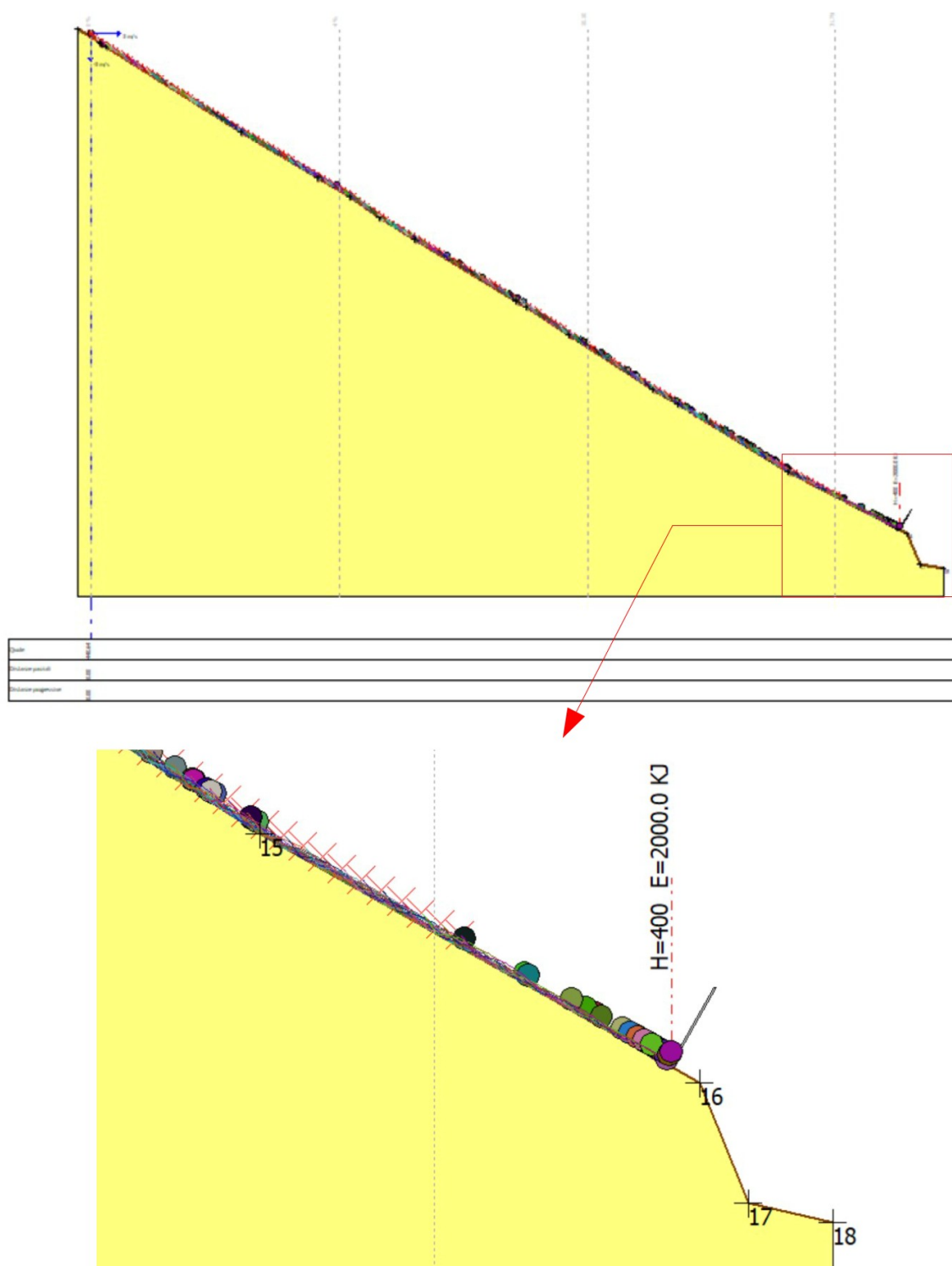
Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	3.0 m/s
Velocità iniziale in y	-3.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

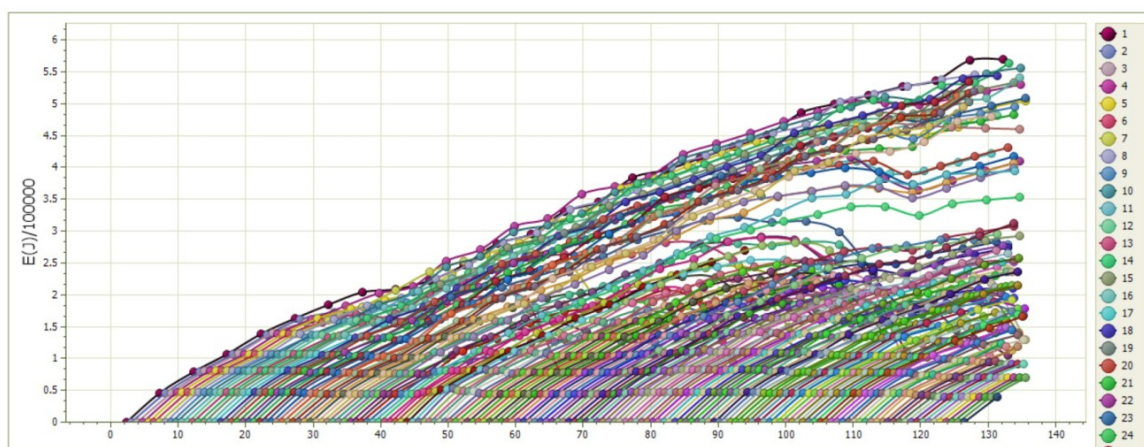
(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 0	135.704	352.592	0.23	27.329	608.228

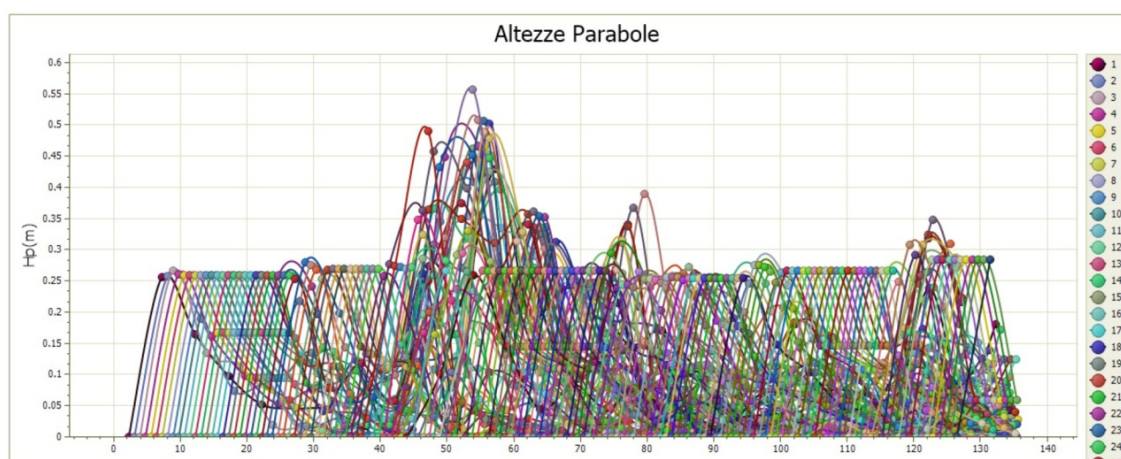
ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	27.095 m/s
Velocità minima	6.089 m/s
Velocità media	14.426 m/s
Scarto quadratico medio	3.921 m/s
Energia massima pre-impatto	573.565 KJ
Energia media pre-impatto	177.423 KJ
Scarto quadratico energia	98.783 KJ
Ascissa media di arresto	123.567 m
Ascissa massima raggiunta	135.778 m

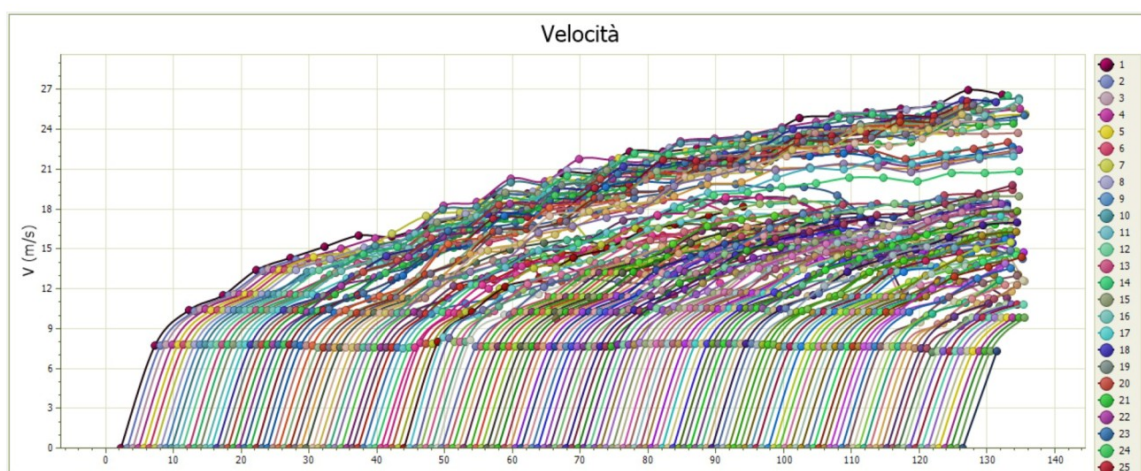




Inviluppo energia di tutte le traiettorie



Inviluppo altezze di tutte le traiettorie



Inviluppo velocità di tutte le traiettorie

SEZ 02 N - estratto Simulazione 2

CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	1.0 m/s
Velocità iniziale in y	-1.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 0	135.704	352.592	0.248	23.876	479.497

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	27.021 m/s
Velocità minima	4.075 m/s
Velocità media	13.315 m/s
Scarto quadratico medio	3.91 m/s
Energia massima pre-impatto	564.415 KJ
Energia media pre-impatto	153.446 KJ
Scarto quadratico energia	90.006 KJ
Ascissa media di arresto	119.005 m
Ascissa massima raggiunta	135.755 m

Sez 03S



CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

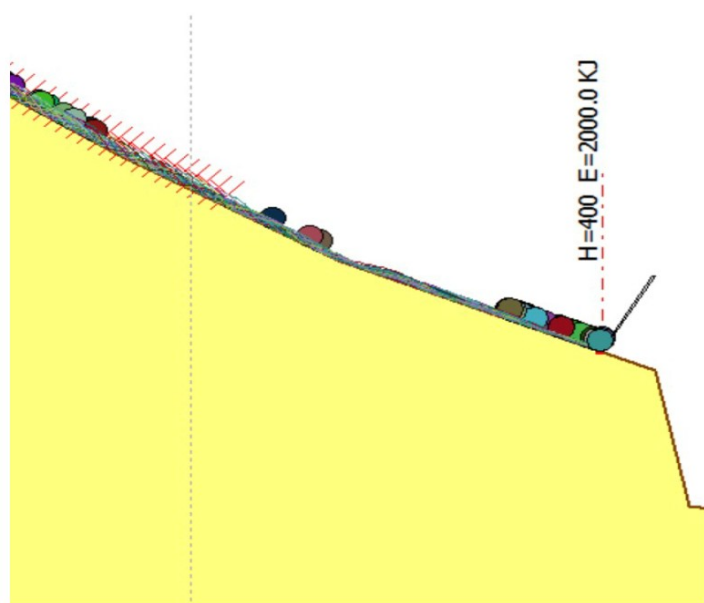
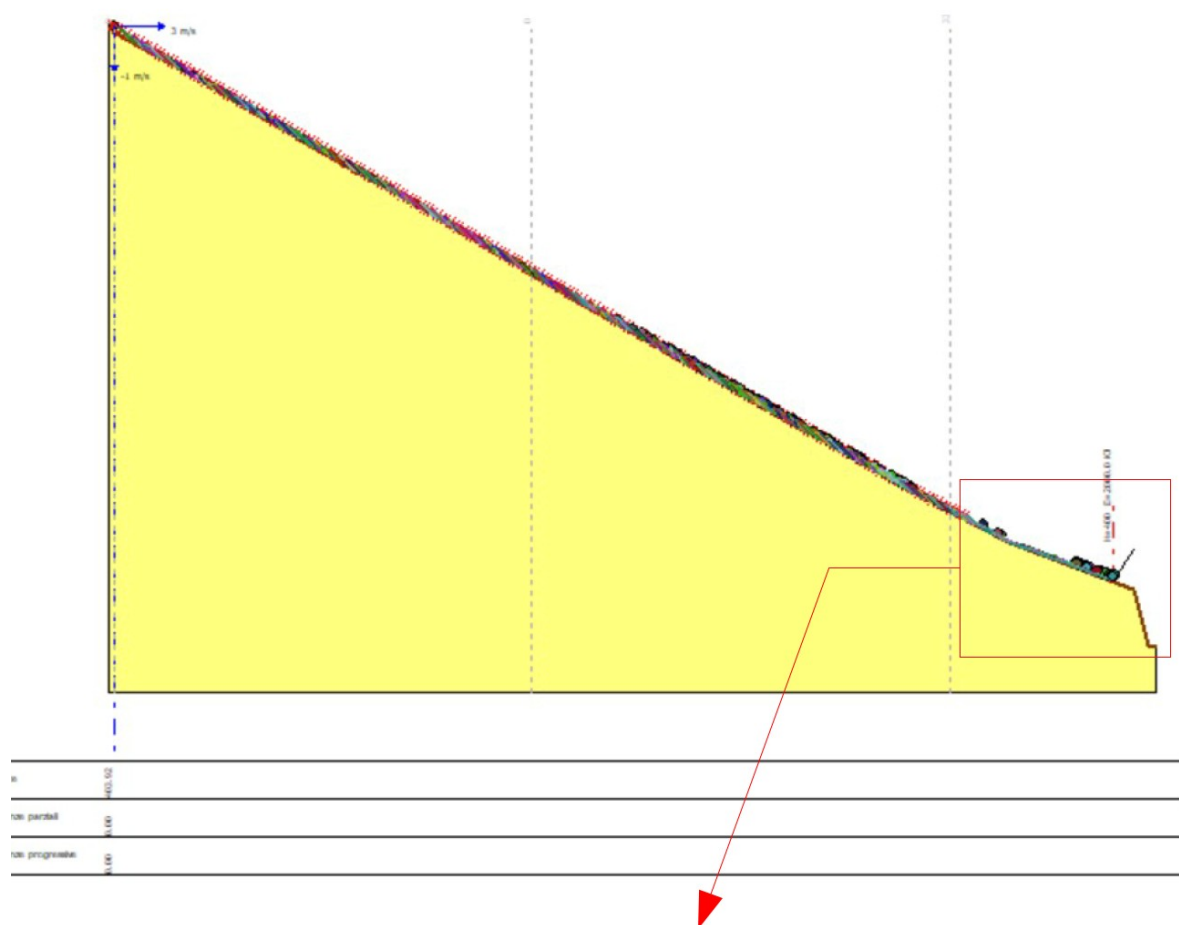
Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	3.0 m/s
Velocità iniziale in y	-1.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

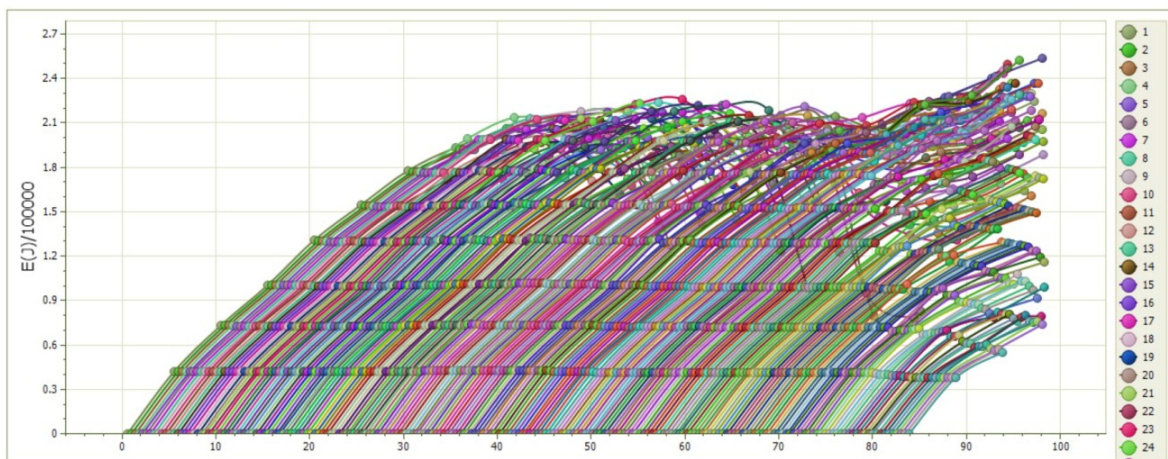
(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 0	98.373	342.404	0.17	17.907	262.006

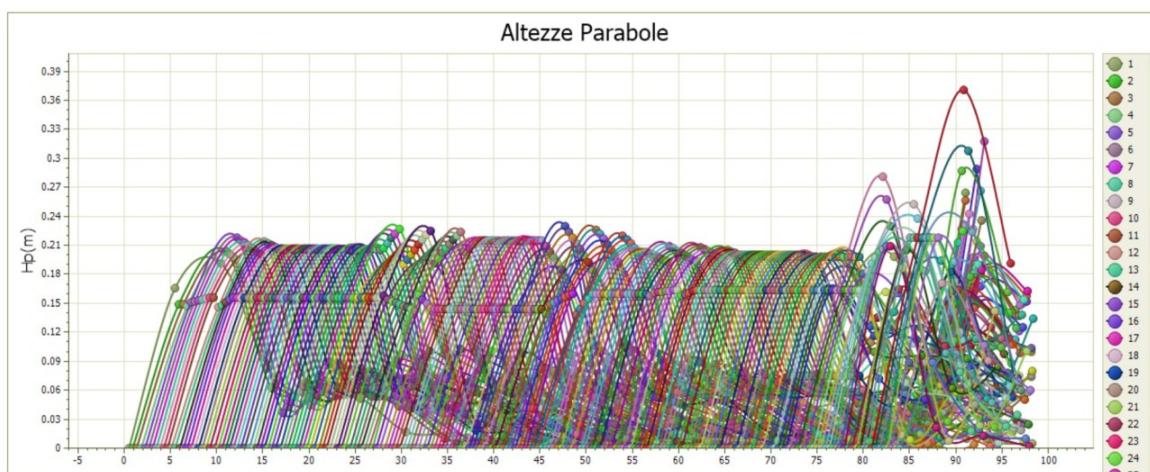
ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	18.42 m/s
Velocità minima	5.293 m/s
Velocità media	13.273 m/s
Scarto quadratico medio	2.671 m/s
Energia massima pre-impatto	259.017 KJ
Energia media pre-impatto	145.835 KJ
Scarto quadratico energia	54.826 KJ
Ascissa media di arresto	86.881 m
Ascissa massima raggiunta	98.458 m

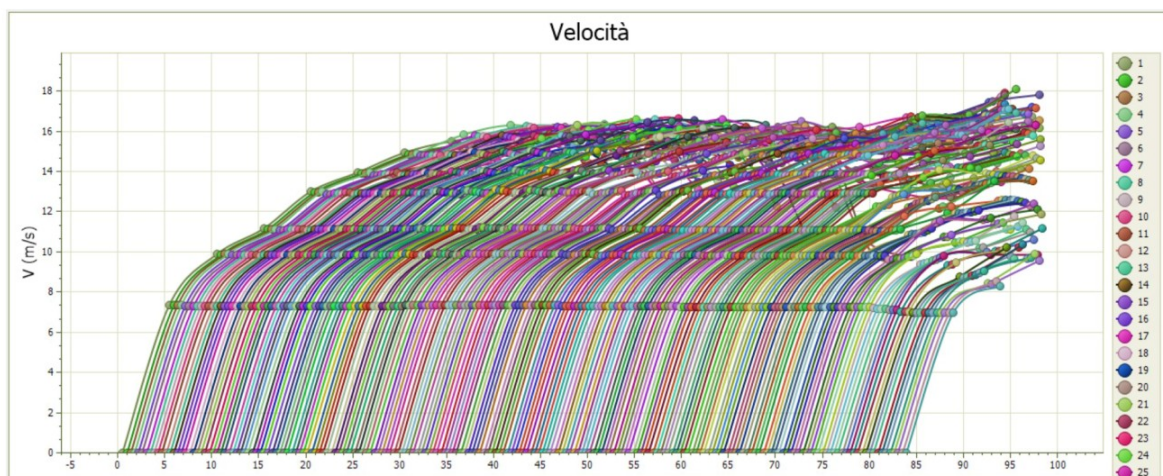




Inviluppo energia di tutte le traiettorie



Inviluppo altezze di tutte le traiettorie



Inviluppo velocità di tutte le traiettorie

SEZ 03 S - estratto Simulazione 2

CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	1.0 m/s
Velocità iniziale in y	-1.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

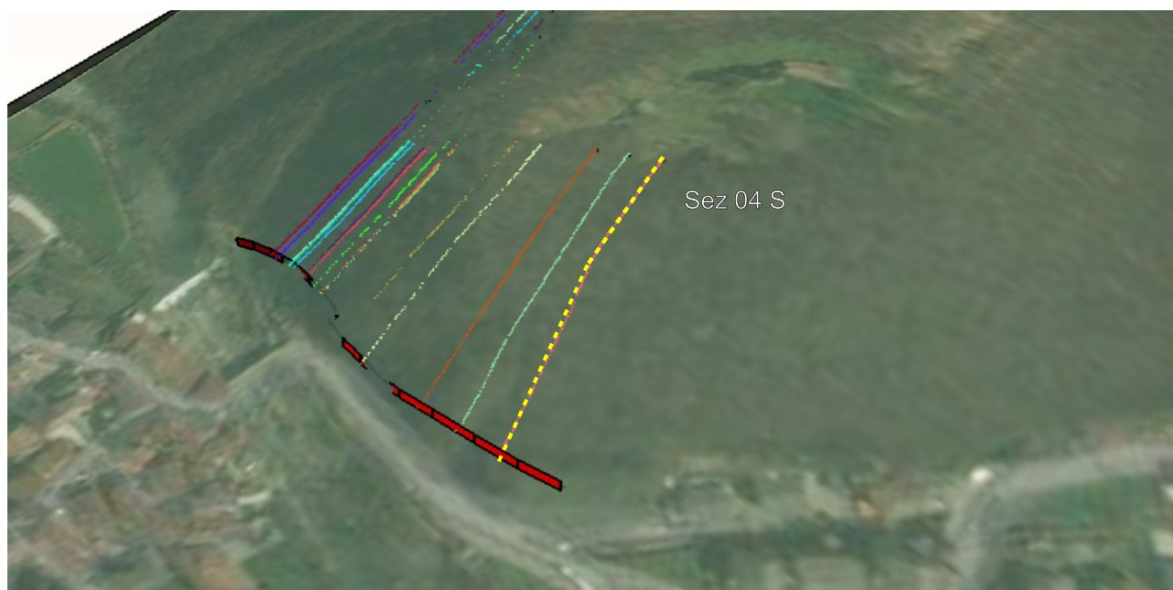
(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	V max (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 0	98.373	342.404	0.17	17.907	262.006

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	18.42 m/s
Velocità minima	5.293 m/s
Velocità media	13.273 m/s
Scarto quadratico medio	2.671 m/s
Energia massima pre-impatto	259.017 KJ
Energia media pre-impatto	145.835 KJ
Scarto quadratico energia	54.826 KJ
Ascissa media di arresto	86.881 m
Ascissa massima raggiunta	98.458 m

Sez 04S



CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

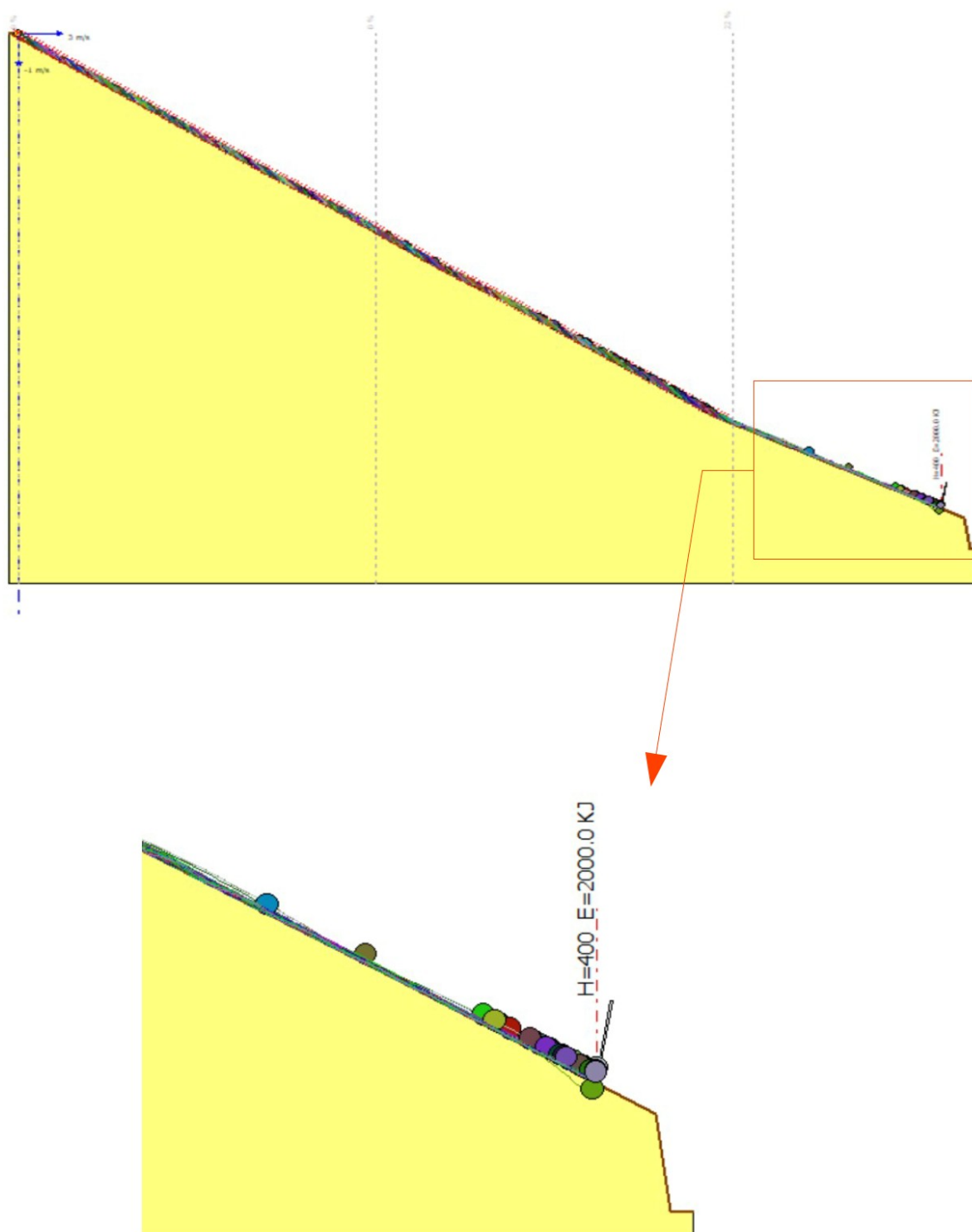
Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	3.0 m/s
Velocità iniziale in y	-1.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

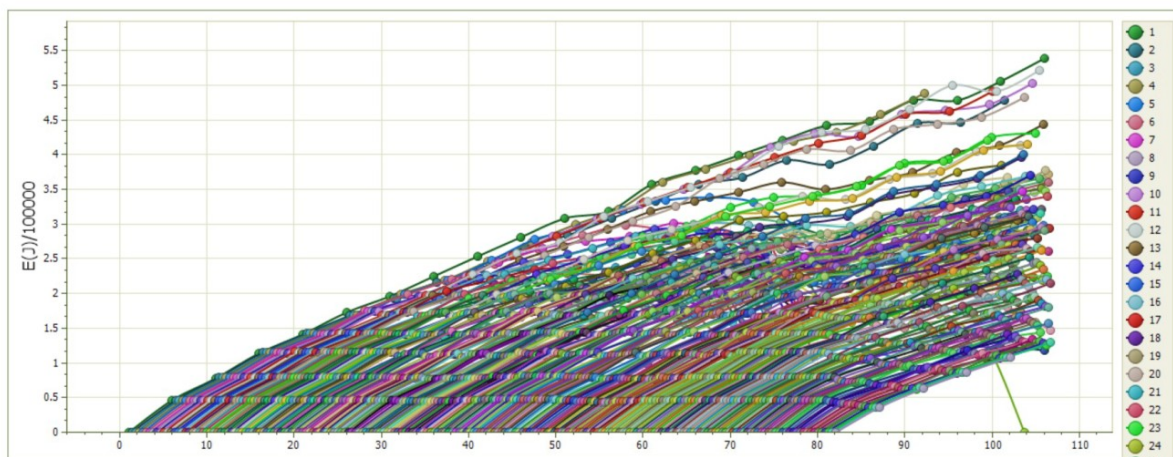
(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	Vmax (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 1	106.753	327.732	0.802	26.345	576.025

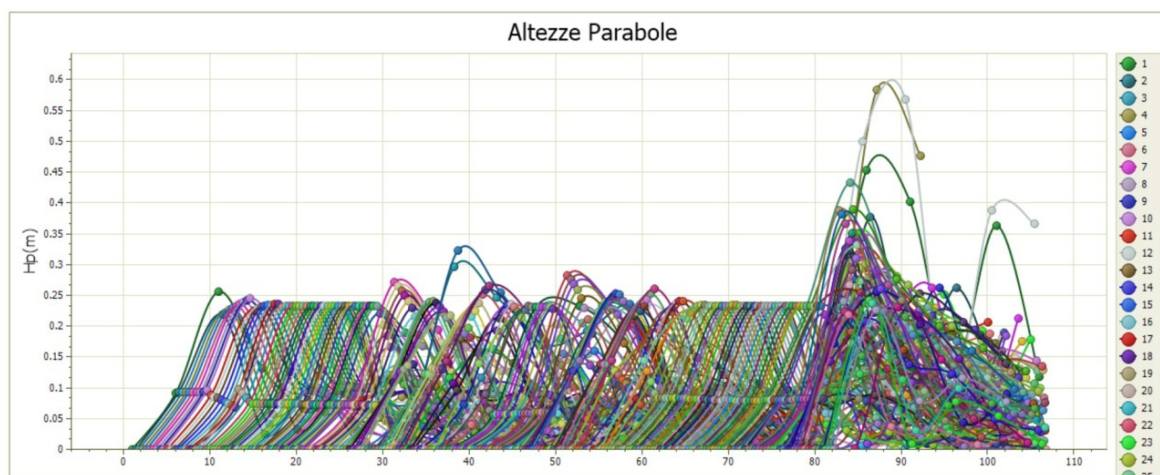
ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	25.949 m/s
Velocità minima	5.822 m/s
Velocità media	14.395 m/s
Scarto quadratico medio	3.398 m/s
Energia massima pre-impatto	517.094 KJ
Energia media pre-impatto	175.087 KJ
Scarto quadratico energia	79.781 KJ
Ascissa media di arresto	98.331 m
Ascissa massima raggiunta	106.798 m

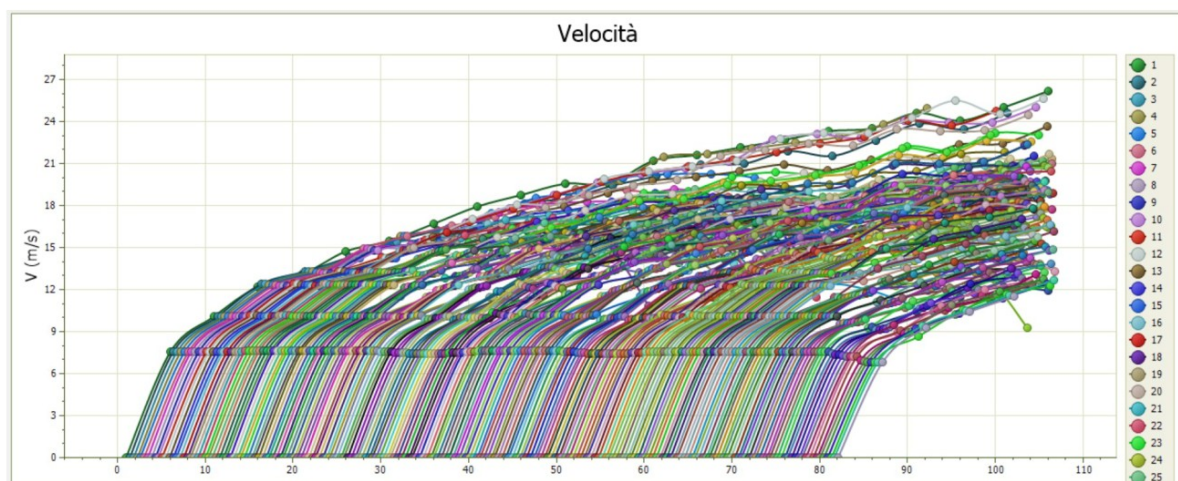




Involuppo energia di tutte le traiettorie



Involuppo altezze di tutte le traiettorie



Involuppo velocità di tutte le traiettorie

SEZ 04 S - estratto Simulazione 2

CARATTERISTICHE DEL BLOCCO

Forma del blocco	Disco
Densità	2300.0 Kg/m ³
Elasticità	98066.0 kPa
Velocità iniziale in x	1.0 m/s
Velocità iniziale in y	-1.0 m/s
Velocità limite di arresto	0.01 m/s
Diametro	1.0 m
Spessore disco	0.6 m

(HpMax) Altezza massima, (Vmax) Velocità massima, (Emax) Energia massima del masso sulla barriera.

Descr.	Xb (m)	Yb(m)	HpMax (m)	V max (m/s)	Emax (KJ)
Barriera 1	106.753	327.732	0.837	24.02	490.017

ELABORAZIONI STATISTICHE

Velocità massima	24.416 m/s
Velocità minima	4.025 m/s
Velocità media	13.266 m/s
Scarto quadratico medio	3.467 m/s
Energia massima pre-impatto	468.905 KJ
Energia media pre-impatto	151.375 KJ
Scarto quadratico energia	73.407 KJ
A scissa media di arresto	94.769 m
A scissa massima raggiunta	106.778 m

Output foglio di calcolo per Debris Flow

Zona PAI 2

Type and density of the debris flow					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Type of debris flow (granular or mud flow)	Type	granular	granular	mud flow	
Density of the debris flow material	$\rho =$	2270	1960	1820	kg/m ³
Specific weight of the debris flow material	$\gamma =$	22.3	19.2	17.9	kN/m ³
Water content	$W =$	0.23	0.42	0.50	-

Debris flow volume and number of surges					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Total debris flow volume (incl. water)	$V_{tot} =$	2000	2000	2000	m ³
Number of surges	$N =$	3	3	3	
Volume per surge (average)	$V_s =$	667	667	667	m ³
Volume of first surge (recommended)	$V_{N1,rec} =$	1,000	1,000	1,000	m ³
Volume of first surge (chosen)	$V_{N1} =$	1000	1000	1000	m ³

Peak discharge					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Peak discharge (acc. to Rickenmann)	$Q_{D,rec} =$	29.5	29.5	29.5	m ³ /s
Peak discharge (chosen)	$Q_D =$	30	30	30	m ³ /s

Safety factor					
Global safety factor	SF =	1			-

Summary of Results					
Multi-level debris flow protection system	No.	Safety Factor	Proof	Retention volume	
GEOBRUGG VX140-H4	No. 1 Barriera PAI 2	1.27	fulfilled !	2,068.0 m ³	

Retention volume					
Total retention volume	$V_{tot} =$	2,068	m ³		
Required retention volume	$V_{tot,max} =$	2000	m ³		
Reserve	$V_{reserve} =$	68	m ³		
Proof of retention volume			fulfilled !		
Proof of overall system				fulfilled !	

Barrier Location No. 1

System height	$H_{s,1} =$	3	m
Width of torrent on the level of the top support ropes	$b_{s,1} =$	10	m
Width of torrent on the level of the bottom support ropes	$b_{b,1} =$	5	m
Distance to the next barrier upstream	$L_{s,1} =$	500	m



Torrent inclination and retention volume

System height of the filled barrier	$H_{s,1} =$	2.3	m
Average torrent inclination upstream of the barrier	$I_{s,1} =$	55	%
Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann)	$I'_{s,1,rec} =$	36.7	%
Deposition inclination of filled barrier (chosen)	$I'_{s,1} =$	54	%
Angle between ring net and river bed		66.2	°
Length of deposited material behind barrier	$L_1 =$	267.9	m
Retention volume	$V_{s,1} =$	2,068.0	m ³

Front velocity and flow height

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Front velocity (acc. to Rickenmann)	$v_{1,base} =$	5.9	5.9	5.9	m/s
Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$)	$v_{str} =$	7.2	7.2	7.2	m/s
Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value)	$v_1 =$	5.9	5.9	7.2	m/s
Flow height	$h_{s,1} =$	1.0	1.0	0.8	m
Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler)	$h_{b,1} =$	0.6			m

Flexible, permeable debris flow protection system

System type	Type	GEOBRUGG VX140-H4		
Max. system height	$H_{s,max} =$	4	m	
Max. system width above	$b_{s,max} =$	15	m	
Max. system width below	$b_{b,max} =$	8	m	
Proof of system height and system width		fulfilled !		

Proof of max. dynamic loading (stopping)				
		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Width factor (width at barrier location to standard width)	$BF_v =$	0.65		
Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler)	$MD_{dyn,1} =$	172	149	85 kN/m ² h_{t1}
Resistance against dynamic loading	$RD_{dyn,1} =$	218	218	179 kN/m ² h_{t1}
Safety factor	$SF_{dyn,1} =$	1.27	1.47	2.11
Proof of max. dynamic loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !

Proof of max. static loading (overflowing)				
		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability)	$HF =$	1.0		
Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler)	$MD_{stat,1} =$	62	53	46 kN/m ²
Resistance against static loading	$RD_{stat,1} =$	215	215	215 kN/m ²
Safety factor	$SF_{stat,1} =$	3.48	4.03	4.65
Proof of max. static loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !
Proof barrier 1				fulfilled !

Zona PAI 3

Type and density of the debris flow

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Type of debris flow (granular or mud flow)	Type	granular	granular	mud flow	
Density of the debris flow material	$\rho =$	2270	1960	1820	kg/m ³
Specific weight of the debris flow material	$\gamma =$	22.3	19.2	17.9	kN/m ³
Water content	$W =$	0.23	0.42	0.50	-

Debris flow volume and number of surges

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Total debris flow volume (incl. water)	$V_{tot} =$	2000	2000	2000	m ³
Number of surges	$N =$	3	3	3	
Volume per surge (average)	$V_s =$	667	667	667	m ³
Volume of first surge (recommended)	$V_{s1,rec} =$	1,000	1,000	1,000	m ³
Volume of first surge (chosen)	$V_{s1} =$	1000	1000	1000	m ³

Peak discharge

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Peak discharge (acc. to Rickenmann)	$Q_{r,rec} =$	29.5	29.5	29.5	m ³ /s
Peak discharge (chosen)	$Q_s =$	30	30	30	m ³ /s

Safety factor

Global safety factor	$SF =$	1		-
----------------------	--------	---	--	---

Summary of Results

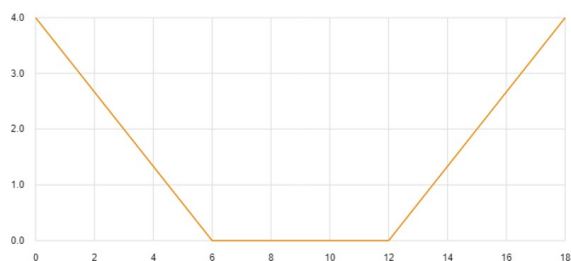
Multi-level debris flow protection system	No.	Safety Factor	Proof	Retention volume
GEOBRUGG VX140-H4	No. 1 Barriera PAI 3	1.20	fulfilled !	2,205.8 m ³

Retention volume

Total retention volume	$V_{s1,ret} =$	2,206	m ³
Required retention volume	$V_{s1,req} =$	2000	m ³
Reserve	$V_{reserve} =$	206	m ³
Proof of retention volume		fulfilled !	
Proof of overall system			fulfilled !

Barrier Location No. 1

System height	$H_{b,1} =$	3	m
Width of torrent on the level of the top support ropes	$b_{u,1} =$	10	m
Width of torrent on the level of the bottom support ropes	$b_{b,1} =$	6	m
Distance to the next barrier upstream	$L_{b,1} =$	500	m



Torrent inclination and retention volume

System height of the filled barrier	$H_{b,1} =$	2.3	m
Average torrent inclination upstream of the barrier	$I_{u,1} =$	55	%
Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann)	$I'_{a,1,acc} =$	36.7	%
Deposition inclination of filled barrier (chosen)	$I'_{u,1} =$	54	%
Angle between ring net and river bed		66.2	°
Length of deposited material behind barrier	$L_1 =$	267.9	m
Retention volume	$V_{r,1} =$	2,205.8	m ³

Front velocity and flow height

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Front velocity (acc. to Rickenmann)	$v_{f,bar} =$	5.9	5.9	5.9	m/s
Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$)	$v_{str} =$	6.7	6.7	6.7	m/s
Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value)	$v_1 =$	5.9	5.9	7.2	m/s
Flow height	$h_{b,1} =$	0.8	0.8	0.7	m
Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler)	$h_{b,1} =$	0.5			m

Flexible, permeable debris flow protection system

System type	Type	GEOBRUGG VX140-H4		
Max. system height	$H_{b,max} =$	4	m	
Max. system width above	$b_{a,max} =$	15	m	
Max. system width below	$b_{b,max} =$	8	m	
Proof of system height and system width		fulfilled !		

Proof of max. dynamic loading (stopping)

		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Width factor (width at barrier location to standard width)	$BF_1 =$	0.70		
Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler)	$MD_{dyn,1} =$	142	123	70 kN/m ² h_b
Resistance against dynamic loading	$RD_{dyn,1} =$	171	171	140 kN/m ² h_b
Safety factor	$SF_{dyn,1} =$	1.20	1.39	2.00
Proof of max. dynamic loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !

Proof of max. static loading (overflowing)

		Load case 1	Load case 2	Load case 3
Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability)	$HF =$	1.0		
Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler)	$MD_{stat,1} =$	58	50	44 kN/m ²
Resistance against static loading	$RD_{stat,1} =$	201	201	201 kN/m ²
Safety factor	$SF_{stat,1} =$	3.48	4.03	4.61
Proof of max. static loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !
Proof barrier 1				fulfilled !

Zona PAI 4

Type and density of the debris flow

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Type of debris flow (granular or mud flow)	Type	granular	granular	mud flow	
Density of the debris flow material	$\rho =$	2270	1960	1820	kg/m ³
Specific weight of the debris flow material	$\gamma =$	22.3	19.2	17.9	kN/m ³
Water content	W =	0.23	0.42	0.50	-

Debris flow volume and number of surges

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Total debris flow volume (incl. water)	$V_{tot} =$	2000	2000	2000	m ³
Number of surges	N =	3	3	3	
Volume per surge (average)	$V_N =$	667	667	667	m ³
Volume of first surge (recommended)	$V_{N1,rec} =$	1,000	1,000	1,000	m ³
Volume of first surge (chosen)	$V_{N1} =$	1000	1000	1000	m ³

Peak discharge

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Peak discharge (acc. to Rickenmann)	$Q_{rec} =$	29.5	29.5	29.5	m ³ /s
Peak discharge (chosen)	$Q_N =$	30	30	30	m ³ /s

Safety factor

Global safety factor	SF =	1			-
----------------------	------	---	--	--	---

Summary of Results

Multi-level debris flow protection system	No.	Safety Factor	Proof	Retention volume
GEOBRUGG VX140-H4	No. 1 Barriera PAI 4	1.20	fulfilled !	2,205.8 m ³

Retention volume

Total retention volume	$V_{tot} =$	2,206	m ³
Required retention volume	$V_{tot,rec} =$	2000	m ³
Reserve	$V_{reserve} =$	206	m ³
Proof of retention volume		fulfilled !	
Proof of overall system			fulfilled !

Barrier Location No. 1

System height	$H_{s1} =$	3	m
Width of torrent on the level of the top support ropes	$b_{s1} =$	10	m
Width of torrent on the level of the bottom support ropes	$b_{b1} =$	6	m
Distance to the next barrier upstream	$L_{s1} =$	500	m



Torrent inclination and retention volume

System height of the filled barrier	$H_{f1} =$	2.3	m
Average torrent inclination upstream of the barrier	$I_{a1} =$	55	%
Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann)	$I'_{s1,acc} =$	36.7	%
Deposition inclination of filled barrier (chosen)	$I'_{s1} =$	54	%
Angle between ring net and river bed		66.2	°
Length of deposited material behind barrier	$L_1 =$	267.9	m
Retention volume	$V_{r1} =$	2,205.8	m ³

Front velocity and flow height

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Front velocity (acc. to Rickenmann)	$v_{f,base} =$	5.9	5.9	5.9	m/s
Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$)	$v_{str} =$	6.7	6.7	6.7	m/s
Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value)	$v_i =$	5.9	5.9	7.2	m/s
Flow height	$h_{f1} =$	0.8	0.8	0.7	m
Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler)	$h_{s1} =$	0.5			m

Flexible, permeable debris flow protection system

System type	Type	GEOBRUGG VX140-H4		
Max. system height	$H_{f,max} =$	4	m	
Max. system width above	$b_{a,max} =$	15	m	
Max. system width below	$b_{b,max} =$	8	m	
Proof of system height and system width		fulfilled !		

Proof of max. dynamic loading (stopping)

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Width factor (width at barrier location to standard width)	$BF_1 =$	0.70			
Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler)	$MD_{dyn,1} =$	142	123	70	$kN/m \cdot h_b$
Resistance against dynamic loading	$RD_{dyn,1} =$	171	171	140	$kN/m \cdot h_b$
Safety factor	$SF_{dyn,1} =$	1.20	1.39	2.00	
Proof of max. dynamic loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !	

Proof of max. static loading (overflowing)

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability)	$HF =$	1.0			
Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler)	$MD_{stat,1} =$	58	50	44	kN/m^2
Resistance against static loading	$RD_{stat,1} =$	201	201	201	kN/m^2
Safety factor	$SF_{stat,1} =$	3.48	4.03	4.61	
Proof of max. static loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !	
Proof barrier 1				fulfilled !	

Zona PAI 5

Type and density of the debris flow					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Type of debris flow (granular or mud flow)	Type	granular	granular	mud flow	
Density of the debris flow material	$\rho =$	2270	1960	1820	kg/m ³
Specific weight of the debris flow material	$\gamma =$	22.3	19.2	17.9	kN/m ³
Water content	$W =$	0.23	0.42	0.50	-

Debris flow volume and number of surges					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Total debris flow volume (incl. water)	$V_{tot} =$	2000	2000	2000	m ³
Number of surges	$N =$	3	3	3	
Volume per surge (average)	$V_n =$	667	667	667	m ³
Volume of first surge (recommended)	$V_{n1,rec} =$	1,000	1,000	1,000	m ³
Volume of first surge (chosen)	$V_{n1} =$	1000	1000	1000	m ³

Peak discharge					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Peak discharge (acc. to Rickenmann)	$Q_{DRC} =$	29.5	29.5	29.5	m ³ /s
Peak discharge (chosen)	$Q_p =$	30	30	30	m ³ /s

Safety factor					
Global safety factor	$SF =$	1			-

Summary of Results					
Multi-level debris flow protection system	No.	Safety Factor	Proof	Retention volume	
GEOBRUGG UX120-H6	No. 1 Barriera PAI 5	1.07	fulfilled !	2,933.7 m ³	

Retention volume					
Total retention volume	$V_{tot} =$	2,934	m ³		
Required retention volume	$V_{ret,max} =$	2000	m ³		
Reserve	$V_{r,reserve} =$	934	m ³		
Proof of retention volume			fulfilled !		
Proof of overall system				fulfilled !	

Barrier Location No. 1

System height	$H_{s,1}$ =	4	m
Width of torrent on the level of the top support ropes	$b_{s,1}$ =	18	m
Width of torrent on the level of the bottom support ropes	$b_{u,1}$ =	6	m
Distance to the next barrier upstream	$L_{s,1}$ =	500	m



Torrent inclination and retention volume

System height of the filled barrier	$H_{s,1}$ =	3.0	m
Average torrent inclination upstream of the barrier	$I_{s,1}$ =	54	%
Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann)	$I'_{s,1/rec}$ =	36.0	%
Deposition inclination of filled barrier (chosen)	$I'_{s,1}$ =	52	%
Angle between ring net and river bed		66.6	°
Length of deposited material behind barrier	L_1 =	177.6	m
Retention volume	$V_{r,1}$ =	2,933.7	m ³

Front velocity and flow height

		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Front velocity (acc. to Rickenmann)	$v_{1,base}$ =	5.9	5.9	5.9	m/s
Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$)	v_{str} =	6.7	6.7	6.7	m/s
Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value)	v_1	5.9	5.9	7.2	m/s
Flow height	$h_{f,1}$ =	0.8	0.8	0.7	m
Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler)	$h_{u,1}$ =	0.5			m

Flexible, permeable debris flow protection system

System type	Type	GEOBRUGG UX120-H6		
Max. system height	$H_{s,max}$ =	6	m	
Max. system width above	$b_{s,max}$ =	24	m	
Max. system width below	$b_{u,max}$ =	12	m	
Proof of system height and system width		fulfilled !		

Proof of max. dynamic loading (stopping)					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Width factor (width at barrier location to standard width)	$BF_1 =$	0.67			
Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler)	$MD_{dyn,1} =$	142	123	70	$kN/m \cdot h_b$
Resistance against dynamic loading	$RD_{dyn,1} =$	153	153	125	$kN/m \cdot h_b$
Safety factor	$SF_{dyn,1} =$	1.07	1.24	1.79	
Proof of max. dynamic loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !	

Proof of max. static loading (overflowing)					
		Load case 1	Load case 2	Load case 3	
Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability)	$HF =$	1.0			
Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler)	$MD_{stat,1} =$	75	64	57	kN/m^2
Resistance against static loading	$RD_{stat,1} =$	180	180	180	kN/m^2
Safety factor	$SF_{stat,1} =$	2.41	2.80	3.16	
Proof of max. static loading		fulfilled !	fulfilled !	fulfilled !	
Proof barrier 1				fulfilled !	

Committente:

Località: Sarezzo Via Marconi

Data: Maggio 2021

Rilievo

Campione

Calcare

N	D (mm)	I (mm)	L (mm)	F (kN)	L/D (1 - 3)	I/D (1 - 3)	Is ₅₀ (MPa)	note
1	35	85	70	15	2,43	2,00	4,39	
2	32	48	70	7	1,50	2,19	3,37	
3	32	75	43	12	2,34	1,34	4,13	
4	30	90	65	11	3,00	2,17	3,47	
5	30	56	80	9	1,87	2,67	4,05	
6	31	55	105	20	1,77	3,39	8,89	
7	30	48	70	15	1,60	2,33	7,57	
8	33	65	80	10	1,97	2,42	3,74	
9	35	55	85	9	1,57	2,43	3,65	
10	35	47	60	10	1,34	1,71	4,57	
11	45	65	68	15	1,44	1,51	4,45	
12	43	55	70	22	1,28	1,63	7,65	
13	32	58	78	15	1,81	2,44	6,26	
14	43	45	80	15	1,05	1,86	6,07	
15	42	58	60	13	1,38	1,43	4,42	

Indice di resistenza al Point - Load medio	Is ₅₀ =	5,11 (MPa)
Indice di anisotropia	Ia =	n.d.
Resistenza a trazione media	r.t. =	4,60 (MPa)
Resistenza a compressione monoassiale med.	r.c.m.=	122,705 (MPa)

