

COMMITTENTE:

Comune di Sarezzo
Piazza Cesare Battisti, 4
25068 - Sarezzo (BS)

REGIONE LOMBARDIA

Provincia di BRESCIA

Comune di SAREZZO

PROGETTISTA:

Ing. Giovanni Bono

CONSULENZA GEOLOGICA:

Geol. Luca M. Albertelli

Geol. Iuri Dino Tagliaferri

PROGETTO ESECUTIVO

*Ulteriori opere di mitigazione del rischio da caduta massi in
località Noboli – Lotto 2 a*



N° Titolo

02

RELAZIONE GEOLOGICO GEOTECNICA

**STUDIO PROGETTAZIONE
BENGINEERING STUDIO ASSOCIATO**

UFFICI SEDE OPER.: Via Gera 29, 25050 Niardo (BS)



UFFICI SEDE OPER.: Via Montegrappa, 41 – 24060 Rogno (BG)
SEDE LEGALE: Via Manifattura 29/G
25047 DARFO B.T.(BS)
Tel. Tel. 0354340011 fax. 0354340011
P.IVA 03480990989
www.cogeo.info

Maggio 2024

Indice

PREMESSA	3
INQUADRAMENTO TERRITORIALE	5
INQUADRAMENTO GEOLOGICO GEOMORFOLOGICO IDROGEOLOGICO	7
SOPRALLUOGO	10
QUADRO NORMATIVO.....	17
QUADRO VINCOLISTICO	18
PAI.....	18
Fattibilità.....	19
FRANOSITÀ DEI SITI E STUDI PREGRESSI.....	21
EVENTO DEL 2011.....	21
EVENTO DEL 2018.....	22
INTERVENTI DI MITIGAZIONE RISCHIO CADUTA MASSI IN LOCALITÀ NOBOLI DEL 2020	23
ULTERIORI OPERE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA CADUTA MASSI IN LOCALITÀ NOBOLI DEL 2022	24
Rilievi geomeccanici.....	25
Definizione delle forme di instabilità	31
Suddivisione delle pareti rocciose con definizione delle aree omogenee.....	31
Definizione dei volumi rocciosi unitari (VRU)	33
Caratterizzazione del versante di caduta.....	33
Simulazione di caduta massi e pericolosità.....	34
Modellazione 3D (RockyFor3D).....	36
CARATTERIZZAZIONE DEI SUOLI	43
INDAGINI ESEGUITE	43
SISMICITA'	45
DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI FRANOSITA'	52
CARATTERISTICHE DEI DEPOSITI E DEGLI AMMASSI ROCCIOSI	52
SUDDIVISIONE DELLE AREE E VOLUMI DI RIFERIMENTO	53
MODELLAZIONE DI CADUTA MASSI.....	54
SINTESI DEI RISULTATI	57
CARATTERISTICHE TECNICHE DEI MEZZI GEOLOGICI	57
SINTESI SIMULAZIONI DI CADUTA MASSI.....	58
INDICAZIONI PROGETTUALI.....	61

PREMESSA

La presente relazione GEOLOGICA è stata commissionata alla scrivente società dal Comune di Sarezzo al fine di raccogliere dati geologici di approfondimento a supporto dei nuovi progetti di mitigazione dal rischio di crolli e caduta massi dalle pareti rocciose e dai pendii sovrastanti via San Bernardino.

Le aree sono state nel tempo soggette a fenomeni di caduta massi e conseguenti interventi di somma urgenza e progetti di mitigazione: si tratta quindi di zone in cui il rischio di caduta massi e crollo è noto e in cui il fenomeno è ancora attivo.

In data 09/06/2011, a seguito di intense precipitazioni meteorologiche, è avvenuto lo smottamento di alcuni massi di varie dimensioni dal versante sovrastante la strada comunale di via San Bernardino. Nel luglio 2011 l'Amministrazione comunale è intervenuta con lavori di pronto intervento, localizzati in due punti distinti uno a nord e uno a sud della via. Tali interventi sono consistiti nella pulizia e disgaggio del fronte interessato e successiva posa di rete addossata su fronte, per un totale di circa 804 mq nella zona nord e 103,50 mq nella zona sud; in quest'ultima si è inoltre effettuata la posa di una barriera paramassi KJ 2000 dell'altezza di 4 mt su un fronte di 30 mt (circa 120 mq).

A febbraio 2015 si è verificato il distacco parziale della parete rocciosa lungo la pista ciclo pedonale in località Gelé a Ponte Zanano. Gli interventi sono consistiti nella pulizia e disgaggio delle pareti interessate e successiva posa di rete metallica a doppia torsione addossata su fronte per un totale di circa 450 mq.

Infine, in data 22/03/2018 si è verificata un'ulteriore caduta massi in via San Bernardino (Località Noboli), tra i civici 40 e 48, a seguito di intense precipitazioni. Alcuni massi hanno colpito un'auto in sosta, altri sono stati bloccati dalla vegetazione, in parte abbattuta dall'evento, restando tuttavia pericolanti. In seguito, è stata effettuata la pulizia e disgaggio del versante, la messa in posa di barriere paramassi per uno sviluppo di 40 m e un'altezza di 5 m di tipo 2000 KJ e la realizzazione di pannelli di fune metallica per 153 mq e rete metallica per 252 mq.

Tra giugno e agosto 2020 è stata realizzata una nuova barriera paramassi sul fianco orientale di Costa Gelé, al fine di mitigare il rischio di caduta massi. Tale intervento è consistito in operazioni di disgaggio del versante, posa di barriere paramassi alte 4 m tipo 2000kJ e placcatura degli ammassi rocciosi con reti in aderenza ed ancoraggi puntuali (*"Mitigazione del rischio di caduta massi in Località Noboli"* Dr. Stefano Morandi, giugno 2020).

Infine, nel gennaio 2022 è stato consegnato il progetto esecutivo *"Ulteriori opere di mitigazione del rischio da caduta massi in località Noboli"*, progettista Ing. Giovanni Bono e con consulenza geologica fornita dalla scrivente società. Nella fase preliminare e definitiva questo progetto ha compreso un'analisi geologica dell'intero versante a nord e a sud dell'abitato di Noboli, comprendendo anche le aree del presente progetto e suddividendo l'intera area in lotti funzionali. Nell'ambito di quel progetto si passò poi alla progettazione esecutiva del lotto 1.

La presente relazione prende quindi in considerazione le caratteristiche geologiche e geomorfologiche dei siti di progetto compresi nel 2° lotto, partendo dalla base definita nel progetto del 2022, verificata e approfondita in sito, in modo da supportare la progettazione degli interventi di prossima realizzazione.

La presente relazione geologica ha lo scopo di definire i caratteri geologici, geomorfologici ed idrogeologici delle aree interessate dagli interventi, secondo quanto contenuto nella normativa vigente, con particolare riferimento a:

- O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 *"Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*.
- O.P.C.M. 28.04.2006 N°3519 *"Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"*.
- D.M. 18 gennaio 2018 *Norme Tecniche per le costruzioni*.
- D.G.R. 11 luglio 2014 n.2129 *"aggiornamento delle zone sismiche di Regione Lombardia"*.

In riferimento alla normativa sopra richiamata, il presente documento analizza gli aspetti geologici finalizzati all'individuazione del modello geologico "semplificato" di sito, secondo quanto specificato nelle NTC 2018 § 6.2.1 e § 6.2.1 della Circolare esplicativa delle NTC 2018.

A supporto dello studio del 2022 sono stati effettuati numerosi sopralluoghi in sito, che hanno consentito di prendere diretta visione di parte dei versanti oggetto di studio, anche se l'accessibilità si è dimostrata limitata in conseguenza dell'asperità dei siti e della loro intensa vegetazione, soprattutto nelle parti alte del versante che nono comprese nell'analisi di seguito descritta.

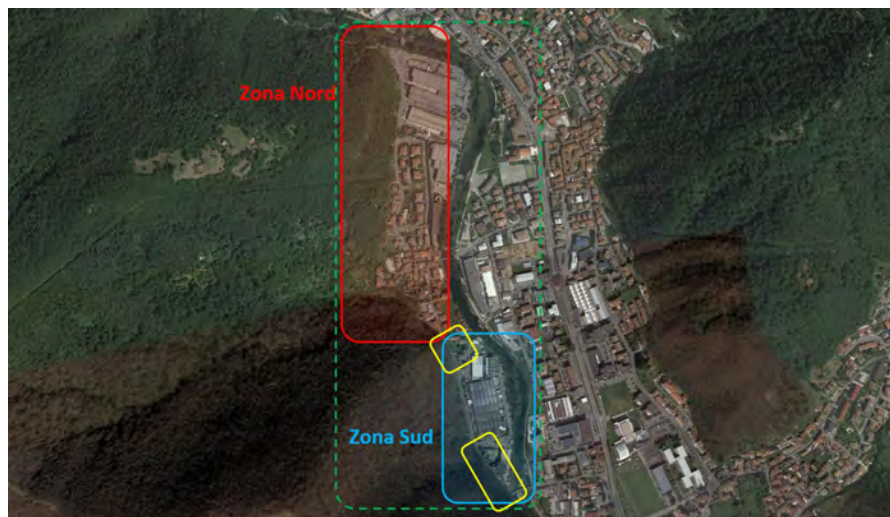
A questi rilievi sono state affiancate campagne fotografiche con drone, che hanno consentito in parte di integrare quanto osservato di persona, anche se l'intensa vegetazione ha nuovamente limitato le informazioni utili che sono state estratte dalle immagini.

La base topografica di partenza è stata il volo aerofotogrammetrico comunale, in scala 1:5000, che è stato utilizzato come riferimento per la realizzazione delle planimetrie e degli elaborati grafici, nonché come dato di partenza per l'esecuzione delle simulazioni di caduta massi 3D e l'estrapolazione dei profili topografici per le sezioni di calcolo 2D. Non erano disponibili basi topografiche di maggior dettaglio. Per cercare di supportare l'ubicazione degli elementi esistenti e di progetto, le fotografie acquisite da drone sono state rielaborate per ottenere una ortofoto speditiva, che non ha valore di rilievo topografico, ma che è stata utile per meglio visualizzare le caratteristiche dei siti. La zona di rilievo comprende quindi l'area identificata nello studio geologico come zona soggetta a crolli (si veda paragrafi successivi) ma non si esclude che si possano verificare fenomeni di crollo anche dalle porzioni più elevate del pendio difficilmente raggiungibili.

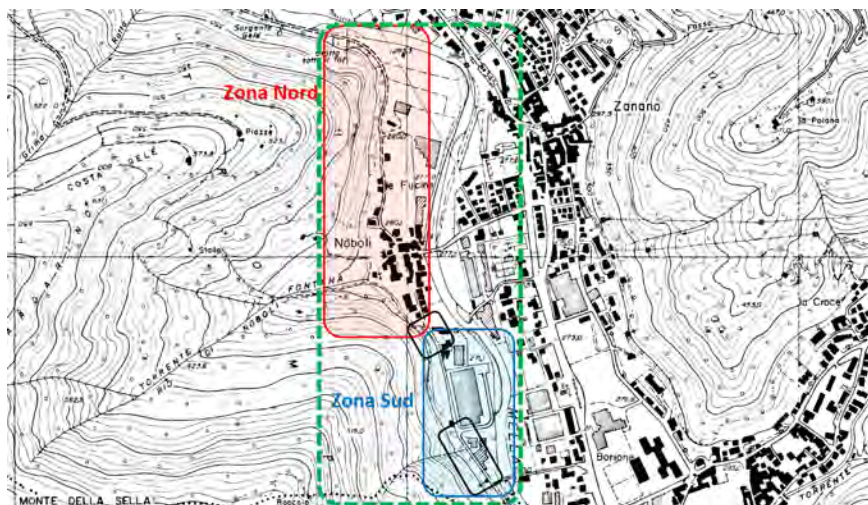
INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area di studio è collocata nel settore centro-occidentale dell'abitato comunale di Sarezzo (BS) lungo Via San Bernardino.

Questo tratto si inserisce nella Zona Sud identificata nel progetto del 2022, che si estende dal Rio di Noboli sino al Ponte Noboli di via San Bernardino. La Zona Nord è stata coinvolta dall'evento di crollo del 2015 (ciclabile Gelé) e dall'intervento di mitigazione del rischio caduta massi del 2021. La Zona Sud invece comprende gli eventi di crollo del 2011 e 2018. Le aree di distacco si collocano a monte delle suddette strade ed interessano le principali pareti rocciose, caratterizzate da una fitta stratificazione, (che costituisce di fatto una delle principali famiglie di discontinuità, congiuntamente ad ulteriori set di fratture) e i piccoli affioramenti presenti lungo il versante. Secondariamente i crolli possono coinvolgere anche parte del detrito di versante, costituito a sua volta da blocchi di grandi dimensioni, i quali possono essere mobilitati in occasione di crolli a monte e/o di intense precipitazioni.



Stralcio dell'ortofoto che inquadra l'area di studio, suddivisa in Zona Nord e Zona Sud, con sovrapposte in giallo le aree comprese nel lotto 2a – non in scala



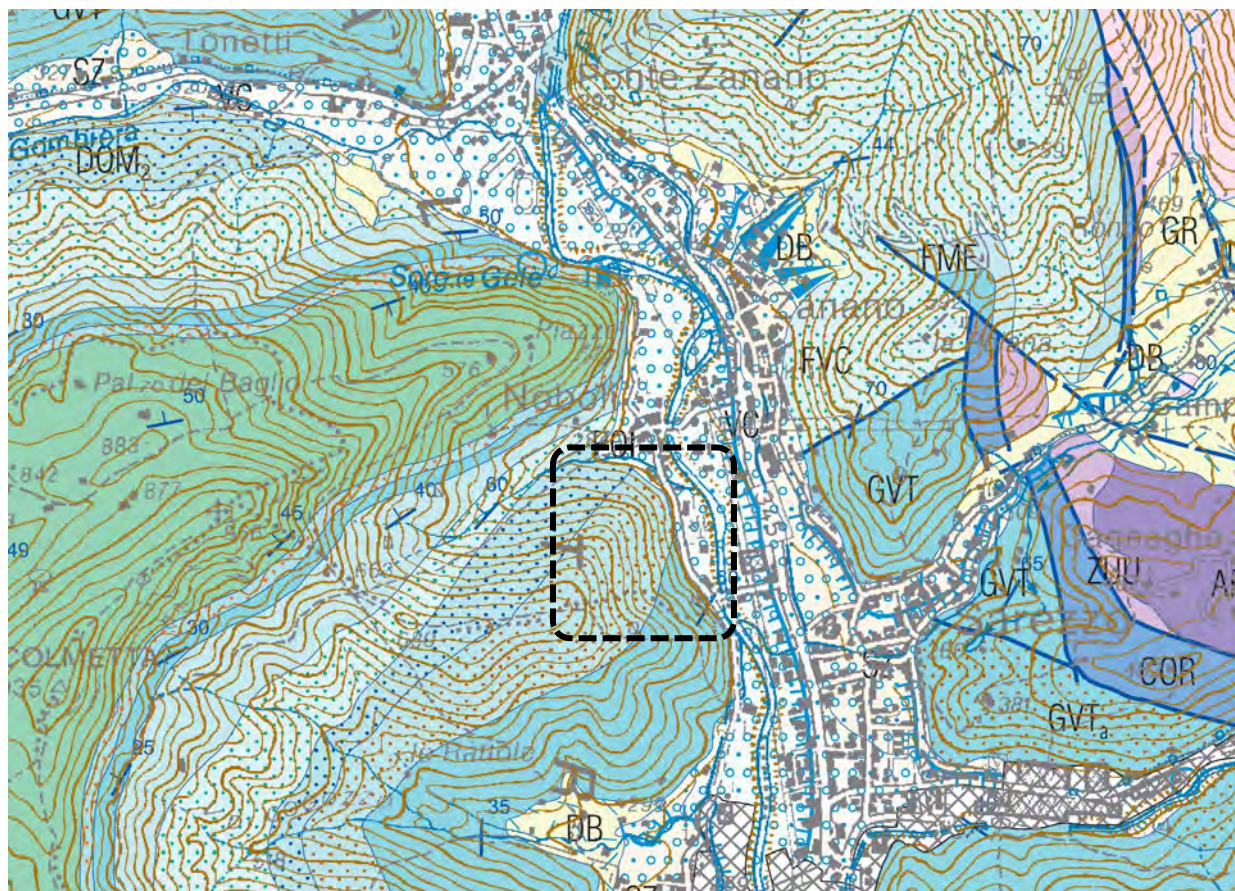
Stralcio della CTR di Regione Lombardia che inquadra l'area di studio, suddivisa in Zona Nord e Zona Sud, con sovrapposte in nero le aree comprese nel lotto 2a – non in scala

Il comune di Sarezzo è caratterizzato da un tipico paesaggio di ambiente prealpino. Nell'area d'esame le altimetrie variano da circa 300 m nel fondovalle sino a circa 670 m s.l.m. La topografia locale è caratterizzata dalla presenza di modeste pareti rocciose che delimitano la strada, e che affiorano lungo i versanti del Monte della Sella, alternate a porzioni boscate.

Localmente queste pareti raggiungono altezze anche di una decina di metri e, specialmente quelle lungo strada, sono per la maggiore coperte da reti in aderenza o barriere paramassi. L'elemento più evidente e importante, per estensione e sviluppo altimetrico, è senza dubbio la parete rocciosa presente a monte di Via Fratelli Capponi.

L'assetto generale del pendio è quello di un ripido versante senza importanti riduzioni di pendenza e con locali affioramenti e subaffioramenti rocciosi che occasionalmente costituiscono piccole pareti rocciose, o aree di diffuso affioramento che costituiscono aree origine di crolli diffusi. Sul versante si sviluppa un bosco continuo e fitto di giovani latifoglie, che introduce un elemento di protezione per la viabilità e le infrastrutture a valle. Diversi impluvi solcano il pendio e accumulano discrete quantità di detriti, che durante eventi meteorici avversi e di una certa entità risultano a tutti gli effetti mobilizzabili, con la conseguente formazione di piccoli conoidi detritico-alluvionali.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO GEOMORFOLOGICO IDROGEOLOGICO



Stralcio della carta geologica dell'area di interesse (foglio CARG 099 – Iseo) – non in scala.

Dal punto di vista geologico, il territorio in esame si inquadra nel Bacino Triumplino-Sebino, ovvero la parte orientale del Bacino Lombardo. Nel dettaglio, il versante interessato dai crolli presenta delle pareti affioranti in modo discontinuo lungo tutto il pendio, dove le formazioni rocciose presenti appartengono alla successione sedimentaria giurassica del Bacino Lombardo orientale.

A partire dall'Hettangiano, si depositano nel Bacino Triumplino-Sebino le facies pelagiche ed emipelagiche del Gruppo del Medolo (Calcare di Gardone Val Trompia e Calcare di Domaro), e della Formazione di Concesio (Calcare di Villa Carcina e Calcarei Medoloidi). Nel corso del Calloviano l'interruzione dell'attività tettonica, che aveva provocato già a partire dall'Hettangiano lo smantellamento delle piattaforme carbonatiche (Albenza, Corna e Calcare di Sedrina), porta alla deposizione delle Radiolariti del Selcifero Lombardo. Le condizioni bacinali che seguono nel Giurassico superiore e nel Cretacico inferiore determinano la deposizione del Rosso ad Aptici e della Maiolica.

Le formazioni sopra citate costituiscono il substrato roccioso del versante, la cui instabilità è oggetto del presente studio; di seguito vengono descritte nel dettaglio procedendo da Sud verso Nord.

Le pareti della Zona Sud sono formate dai membri del Gruppo del Medolo: il Calcare di Gardone Val Trompia e il Calcare di Domaro. Il primo è costituito da calcari quasi puri, da chiari a nerastri, selciosi, ben stratificati, con interstrati marnoso-argillosi, mentre il Calcare di Domaro, consiste in calcari più o meno marnosi, da grigi a bruni o biancastri, talora selciosi e con intercalazioni di marne e argilliti. Il limite superiore è con le formazioni del Gruppo di Concesio. Di quest'ultimo affiorano nell'area di interesse la Formazione di Villa Carcina e i Calcarei Medoloidi. La prima è caratterizzata da calcari marnosi, talvolta arenacei, da nocciola chiaro a grigi, ben stratificati, con selci talora policrome in letti e lenti e con intercalazioni marnose grigio-verdine. I calcari Medoloidi invece sono costituiti da calcari, spesso molto marnosi, di colore grigiastro, con selci, ben stratificati, separati da giunti marnoso argillosi fogliettati. Il limite inferiore è dato dal Medolo e quello superiore dal Selcifero Lombardo con cui risulta concordante. Quest'ultimo affiora nella Zona Nord dell'area in esame ed è costituito da due sotto unità: Radiolariti, con selci policrome (rossastre in prevalenza) e Rosso ad Aptici, con marne e calcari marnosi o calcari selciosi, ben stratificati, frequentemente accompagnate da interstrati marnosi o argillosi. Il limite superiore con la Maiolica è netto e concordante così come il passaggio alla base con la Formazione di Concesio. Procedendo sempre verso nord, le pareti rocciose divengono in Maiolica, consistente in calcari biancastri, compatti, a frattura concoide, ben stratificati, con suture stilolitiche, con presenza di selci bionde o azzurre; tale facies passa verso l'alto a calcari marnosi, grigiastri, con selci scure, che si alternano con marne fogliettate verdi e grigio scure. Nell'area in esame, queste unità sono coinvolte in una struttura a piega sinclinale che determina la ripetizione delle dette unità lungo i due fianchi di Costa Gelé e ne conferisce un aspetto più fratturato man mano che ci si avvicina verso l'asse di piega. Spesso alla base dei versanti sono presenti depositi detritici originati dal distacco di massi e/o da crolli; in alcuni casi tali detriti, in falde e più raramente in coni di detrito, sono colonizzati e quindi non attivi o quiescenti. In altri casi sono attivi e sono collegati a fenomeni di caduta massi. Si tratta in prevalenza di un deposito eterometrico con blocchi di volume anche significativo (fino a circa 1,5 mc) immersi in un sedimento costituito da ghiaia, blocchetti e blocchi di varie dimensioni, messi in posto nel tempo per l'attività di crollo e caduta massi dalle pareti a monte.

Alcune di tali situazioni, soprattutto dove interessano vie di comunicazione o centri abitati, sono state bonificate mediante disgaggi periodici (o conseguenti a episodi di crollo) e messa in opera di reti o barriere paramassi.

Tali depositi si alternano talora a coperture di carattere colluviale costituite da coltri di materiale detritico, generalmente fine (sabbie e limi) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità (subordinata), con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati.

A livello geomorfologico e idrografico, l'elemento dominante in grado di influenzare e modellare le forme del territorio circostante l'area di progetto è rappresentato dal Fiume Mella, oltre che dai suoi affluenti che scorrono lungo i versanti laterali sottoforma di torrenti. Tra essi il Rio di Noboli è sul versante oggetto di studio.

SOPRALLUOGO

L'area in esame comprende i versanti in destra idrografica del fiume Mella nel comune di Sarezzo, in località Noboli. Come accennato precedentemente, all'interno dell'area di interesse sono state distinte due diverse aree di studio: la Zona Nord si estende dalla pista ciclo pedonale in Località Gelé sino al Rio di Noboli e comprende le porzioni inferiori, limitrofe al centro abitato, del versante di Costa Gelé e del Dardarino; la Zona Sud, invece, si estende dal limite della Zona Nord sino al Ponte Noboli di via San Bernardino e comprende la base del versante culminante nel Pizzo Cornacchia e nel Monte della Sella. Le aree di progetto si inseriscono in questa zona.

Nell'ambito del progetto del 2022 sono stati eseguiti diversi sopralluoghi in sito, durante i quali sono stati osservati i caratteri salienti del contesto geologico-geomorfologico in cui è inserita l'area in esame e le relative criticità. I rilievi sono stati chiaramente condizionati da questioni logistiche, in particolare solo limitate zone dei versanti sono risultate perlustrabili direttamente a causa delle elevate pendenze e della fitta vegetazione che ricopre i pendii in esame e vi è pertanto un certo margine di incertezza nelle analisi svolte, soprattutto per la parte alta del versante. Dove non è stato possibile raggiungere fisicamente la zona di interesse, sono state eseguite osservazioni tramite volo con drone; tali analisi hanno in parte permesso di raccogliere informazioni su zone non raggiungibili, chiaramente con limiti dati dalla fitta vegetazione che copre il pendio e che rende pertanto difficilmente osservabili eventuali ammassi e/o zone di subaffioramento e di detrito. Si descrivono di seguito i risultati ottenuti da questa fase di osservazione dei siti, sarà cura e fase importante, nella cantierizzazione delle opere, eseguire dei sopralluoghi mirati e più approfonditi con l'impresa incaricata dell'esecuzione delle opere.

La Zona Sud è caratterizzata per lo più dalla presenza di diverse pareti rocciose a bordo strada e depositi, anche con grossi blocchi, e piccoli affioramenti distribuiti lungo il versante a quote maggiori. L'intero versante è sovente solcato da impluvi, che ospitano corsi d'acqua di natura effimera, la cui attività è strettamente correlata ad eventi meteorici significativi. La porzione più a nord in quest'area è caratterizzata da un versante con morfologia convessa e pendenze non eccessive, si presenta inoltre colonizzato da fitta vegetazione. Il deposito che si può osservare sul pendio è composto da un insieme eterogeneo e eterometrico di depositi di versante e depositi colluviali, in cui sono frequenti blocchi di dimensioni notevoli associati a un detrito sensibilmente più sottile e, frequentemente, soffice e cedevole. Isolati volumi si possono osservare appoggiati ai più grandi alberi o ai più folti gruppi di giovani latifoglie. I volumi medi dei singoli blocchi si attestano attorno a circa 0,2 – 0,3 mc, mentre i massimi misurati raggiungono 1,2 mc.

Procedendo poi verso sud, i depositi ospitano una quantità sostanziale di massi di dimensioni anche notevoli. Inoltre, vi sono spesso piccoli affioramenti e/o zone di subaffioramento del substrato roccioso, costituito dalle formazioni del Medolo e di Concesio. Alla base del versante gli affioramenti risultano nettamente più evidenti, dove di fatto costituiscono piccole pareti localizzate a bordo strada, alcune di queste con reti in aderenza a protezione della viabilità. Generalmente l'ammasso roccioso in tali affioramenti risulta interessato da diverse famiglie di discontinuità, fra le quali spicca la stratificazione, ben distinta e sufficientemente fitta, con strati di spessori di circa 0,20 m.



Parete rocciosa con reti in aderenza affiorante a bordo strada.





Zone di subaffioramento e depositi con grossi blocchi distribuiti lungo il versante.



Esempio di grossi blocchi sparsi sul pendio, immersi nel detrito di versante e nel deposito colluviale.

Nella porzione centrale e quella meridionale del versante le pendenze sono invece elevate ed il versante è caratterizzato diffusamente da zone di subaffioramento e da piccole pareti, localizzate sia a bordo strada che a quote maggiori. Anche in questo caso il deposito che ricopre il pendio ospita grossi blocchi di dimensioni analoghe a quelle delle porzioni più settentrionali. I blocchi maggiori si trovano in modo sparso lungo il versante, localmente a gruppi ma più frequentemente come blocchi singoli immersi nel deposito più sottile.

I numerosi impluvi che solcano questa parte di pendio accumulano discrete quantità di detriti, che durante eventi meteorici avversi di una certa entità risultano a tutti gli effetti mobilizzabili, con la conseguente formazione di piccoli conoidi detritico-alluvionali. Di fatto, alla base del pendio, sono state installate diverse reti di sbarramento allo sbocco di tali canali, per impedire la caduta di materiale lungo la strada posizionata alla base del versante.

Ciò non impedisce che i blocchi possano localmente raggiungere le aree verdi immediatamente limitrofe alla strada, come osservato allo sbocco della valle che delimita a sud il sito di analisi e progetto, dove sono visibili diversi blocchi rocciosi con dimensioni di alcuni decimetri di lato.

Anche in questa zona le pareti affioranti lungo strada sono caratterizzate da una fitta stratificazione, che costituisce di fatto una delle principali famiglie di discontinuità, congiuntamente ad ulteriori set di fratture. Parte delle pareti affioranti sono ricoperte da reti in aderenza o ospitano barriere paramassi.

Di queste, la più prossima alla strada risulta in parte riempita di materiale e fortemente infestata dalla vegetazione e andrebbe quindi svuotata.



Deposito di conoide detritico-alluvionale allo sbocco di un impluvio nella pozione centrale del versante.



Esempio di impluvio nella porzione centrale del versante (foto a sinistra), con rete di sbarramento a bordo strada (foto a destra).



Blocchi e massi sparsi allo sbocco di un impluvio



Barriera paramassi esistente



Parete affiorante a bordo strada con rete in aderenza.



Alcune pareti e affioramenti nell'area di progetto

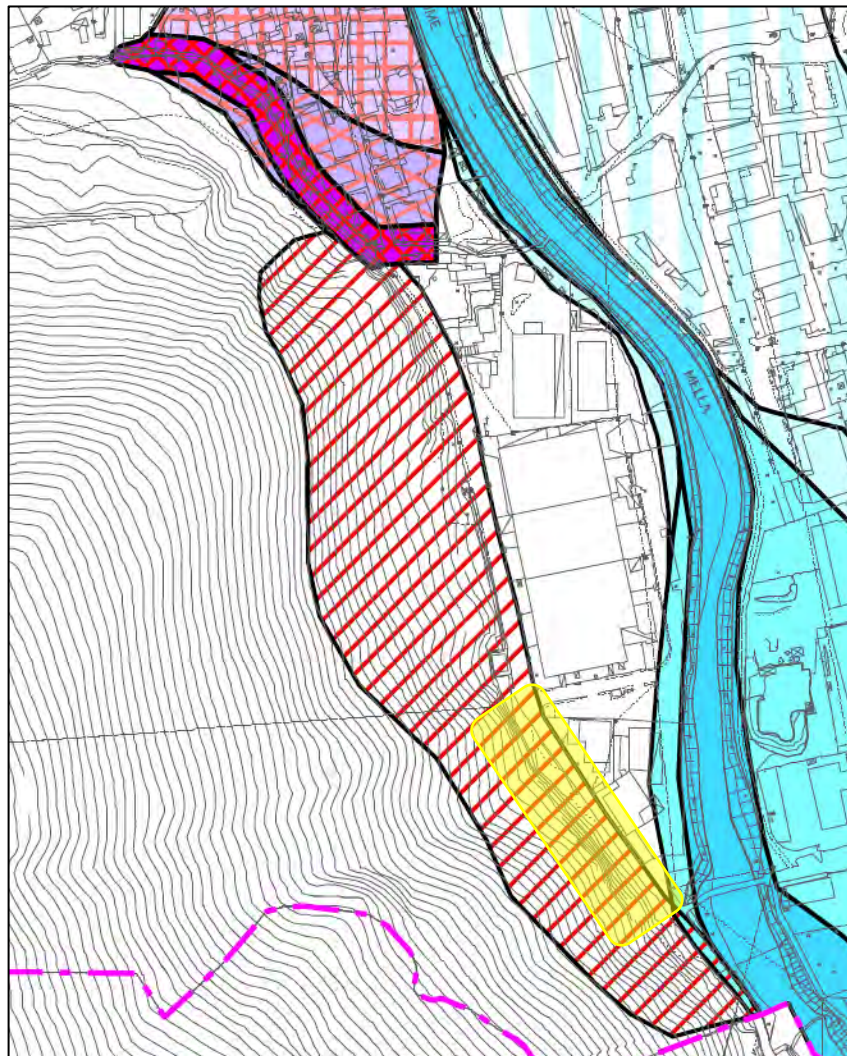
QUADRO NORMATIVO

Il progetto è stato predisposto considerando i seguenti riferimenti normativi:

1. Norma UNI 11211-4 dell'Ottobre 2018 *Opere di difesa dalla caduta massi – Parte 4: Progetto definito ed esecutivo.*
2. Norma UNI 11211-3 del Giugno 2018 *Opere di difesa dalla caduta massi – Parte 3: Progetto Preliminare.*
3. Norma UNI 11211-4 del Gennaio 2012 *Opere di difesa dalla caduta massi.*
4. Normativa Etag *Guida per il benessere tecnico europeo di sistemi di protezione paramassi.*
5. *Linee guida per la redazione di capitolati per l'impiego di rete metallica a doppia torsione* Maggio 2006.
6. D. M. 17 Gennaio 2018 *Aggiornamento delle "Norme Tecniche delle Costruzioni".*
7. D.P.R. n. 207 del 5 Ottobre 2010: *Regolamento di esecuzione ed attuazione del D.L. 12 Aprile 2006 n. 163 recante "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE.*
8. Decreto legislativo 18 Aprile 2016, n. 50, «Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture».

QUADRO VINCOLISTICO

PAI



LEGENDA

VINCOLI DERIVANTI DALLA PIANIFICAZIONE DI BACINO AI SENSI DELLA L.183/89

Quadro del dissesto PAI

FRANE



Area di frana attiva (Fa)

Stralcio delle perimetrazioni PAI nell'area di studio. Il lotto 2a è evidenziato in giallo – non in scala

Il PAI riporta alcune perimetrazioni di aree di frana attiva (Fa) corrispondenti alle pareti origine di crollo, a testimoniare che si tratta di un processo noto e continuo, che non ha ragione di esaurirsi nel tempo e, quindi, continuerà in futuro.

“Rientrano in questa classe le aree soggette ad una forte restrizione della fattibilità nelle quali sono escluse nuove edificazioni ad eccezione delle opere tese alla sistemazione idrogeologica per la messa in sicurezza dei siti. [...] All'interno di tali aree valgono le norme contenute nell'art.9, comma 2 delle Norme di Attuazione del PAI. Saranno consentiti solo gli interventi migliorativi e di bonifica dei dissesti e/o recupero ambientale. Sono previste le seguenti indagini di approfondimento: indagini geologiche, geotecniche, idrogeologiche e idrauliche che dimostrino la compatibilità degli interventi previsti con la situazione di rischio presente. [...]”.

FRANOSITÀ DEI SITI E STUDI PREGRESSI

Le informazioni in seguito descritte, relative agli aventi di franosità susseguirsi nell'area di studio tra il 2011 e il 2018, si rifanno alla relazione tecnico-illustrativa del 2011, alle relazioni geologica e tecnico-descrittiva dell'evento di febbraio 2015, alla relazione dettagliata del pronto intervento del 2018 e alla relazione tecnica e di calcolo per la mitigazione del rischio caduta massi di giugno 2020.

Evento del 2011

Si riporta in seguito una sintesi dell'evento di frana che ha coinvolto la strada comunale di via San Bernardino in data 09/06/2011. A seguito di intense precipitazioni meteorologiche, è avvenuto lo smottamento di alcuni massi di varie dimensioni (da 0,001 mc a un massimo di 0,06 mc) dal versante sovrastante la strada comunale di via San Bernardino. L'evento di frana ha in parte coinvolto lo strato superficiale del deposito di versante con contestuale coinvolgimento dei massi in esso inglobati e in parte le pareti rocciose soprastanti il marciapiede.

A luglio 2011 l'Amministrazione comunale è intervenuta con lavori di pronto intervento, localizzati in due punti distinti uno a nord e uno a sud della via, per la messa in sicurezza di detto versante. Tali interventi sono consistiti in:

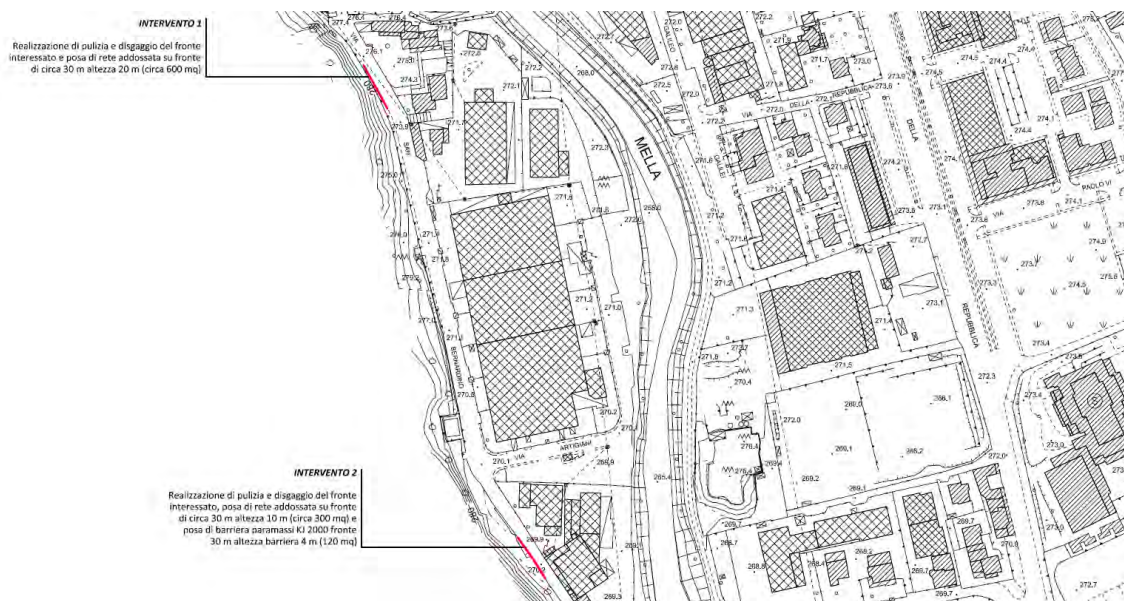
- Zona Nord: pulizia e disgaggio del fronte interessato e successiva posa di rete addossata su un fronte di 36 m con altezza variabile da 15 a 25 m, per un totale di circa 804 mq;
- Zona Sud: pulizia e disgaggio del fronte interessato, posa di rete addossata su un fronte di 16 m con altezza variabile da 5,70 a 7,50 m per un totale di circa 103,50 mq e posa di barriera paramassi 2000 KJ dell'altezza di 4 m su un fronte di 30 m (circa 120 mq).



Zona di intervento Nord (Giugno 2011)



Zona di intervento Sud (Giugno 2011)



Estratto aerofotogrammetrico con individuazione delle zone di intervento (Giugno 2011) – non in scala

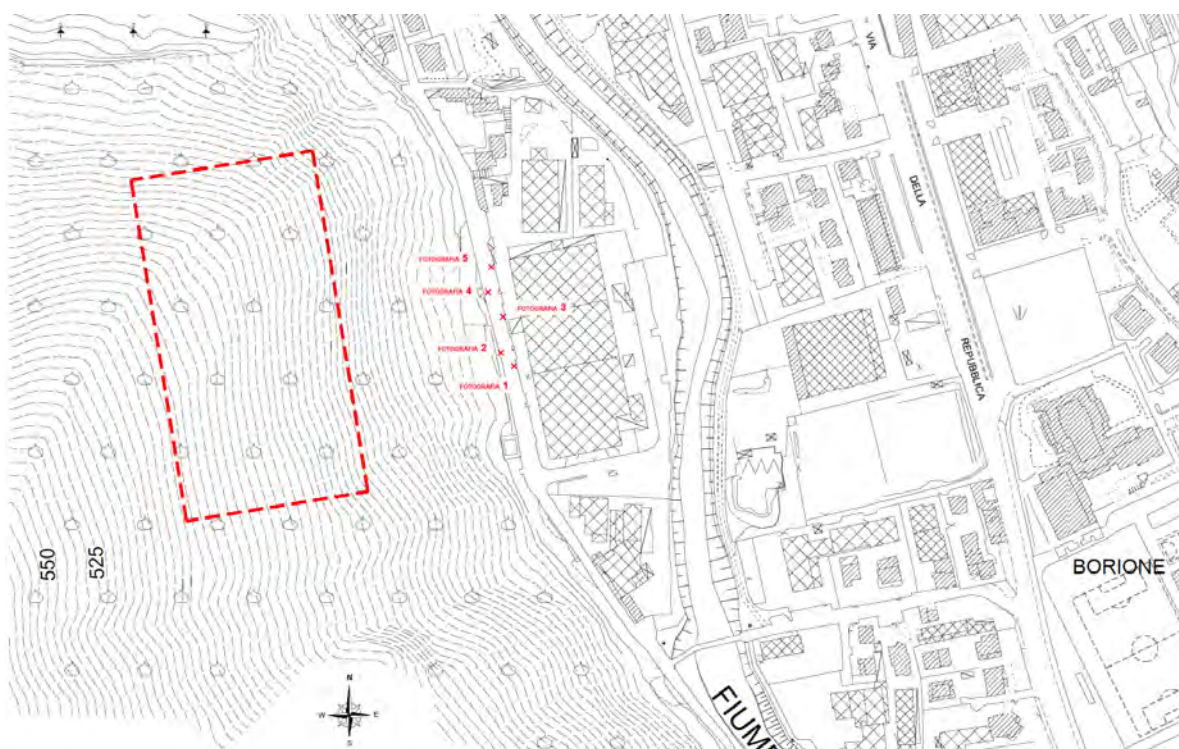
Evento del 2018

Infine, in data 22/03/2018 si è verificata un'ulteriore caduta massi (dimensioni variabili da 0,05 a 0,25 mc) in via San Bernardino (Località Noboli), tra i civici 40 e 48, a seguito di intense precipitazioni. Alcuni massi hanno colpito un'auto in sosta, altri sono stati bloccati dalla vegetazione, in parte abbattuta dall'evento, restando tuttavia pericolanti.

In seguito, è stata effettuata la pulizia e disgaggio del versante, la messa in posa di barriere paramassi per uno sviluppo di 40 m e un'altezza di 5 m di tipo 2000 KJ e la realizzazione di pannelli di fune metallica per 153 mq e rete metallica per 252 mq.



Caduta massi lungo la Via San Bernardino (Marzo 2018)



Planimetria e individuazione dell'area di intervento (Marzo 2018) – non in scala

Interventi di mitigazione rischio caduta massi in Località Noboli del 2020

In seguito al susseguirsi degli eventi sopra descritti, l'amministrazione comunale ha convenuto che la messa in sicurezza del versante di Costa Gelé fosse una priorità ed ha dunque impegnato risorse economiche e richiesto il cofinanziamento della spesa a Regione Lombardia allo scopo di metter in sicurezza i versanti montani in corrispondenza delle infrastrutture per la mobilità in Località Noboli (Via Fratelli Capponi). Nel 2020 è stata

Rilievi geomeccanici

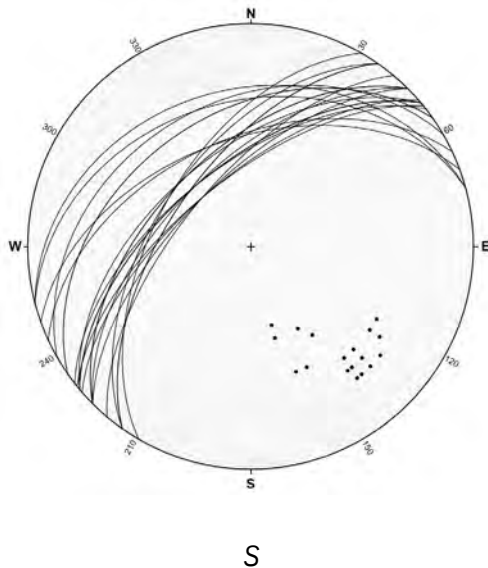
Per caratterizzare dal punto di vista meccanico l'ammasso roccioso presente in sito, sono stati eseguiti n. 5 rilievi geomeccanici per il progetto del 2022, con la finalità di analizzare le discontinuità presenti, di cui i primi 4 insistenti nella Zona Sud

I rilievi geomeccanici (R1 e R2) sono stati eseguiti in Località Noboli, il terzo e il quarto (R3 e R4) nella porzione meridionale della Zona Sud, il quinto rilievo (R5) è stato eseguito nei pressi di Località Fucine (quindi zona Nord, esclusa dal presente progetto).

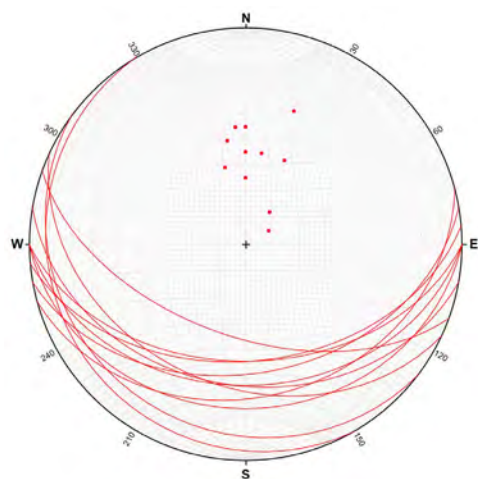
L'ammasso roccioso appare globalmente mediocre interessato da diverse discontinuità, in aggiunta alla stratificazione: i rilievi hanno messo in evidenza la presenza di n. 4 principali famiglie di fratture (K1, K2, K3, e K4), le cui intersezioni sono in grado di generare blocchi potenzialmente instabili e mobilitabili.

In generale, è possibile notare che la discontinuità più persistente riscontrata in tutti i punti di rilievo è rappresentata dalla stratificazione (S) di giacitura 315/60. Secondariamente, nella Zona Sud l'ammasso risulta interessato da fratture appartenenti alle famiglie K1, K2 e K3, rispettivamente di giaciture 193/33, 067/60 e 205/85 che diventano più caotiche e persistenti nella zona di piega (Zona Nord) alle quali si aggiungono anche fratture appartenenti alla famiglia K4 di giacitura 143/60. Particolarmente in quest'ultima zona le famiglie di discontinuità, più caotiche e pervasive, tendono ad isolare blocchi potenzialmente instabili.

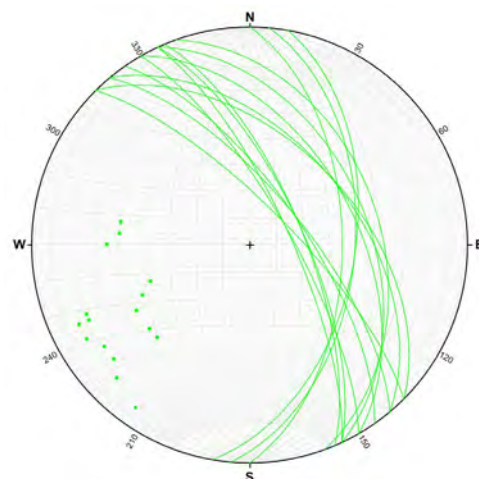
In generale le fratture raggiungono aperture di massimo 5 mm, inoltre sono leggermente rugose o lisce.



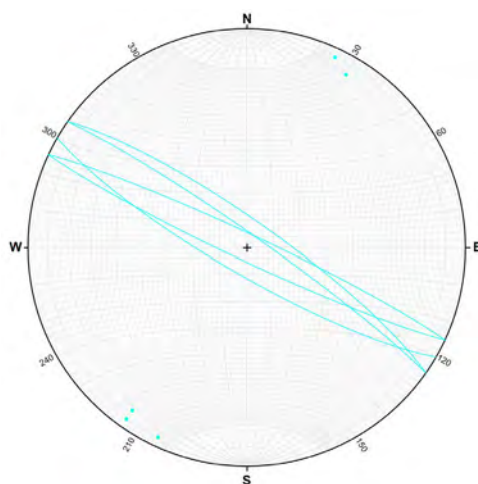
Ammasso roccioso con evidente stratificazione



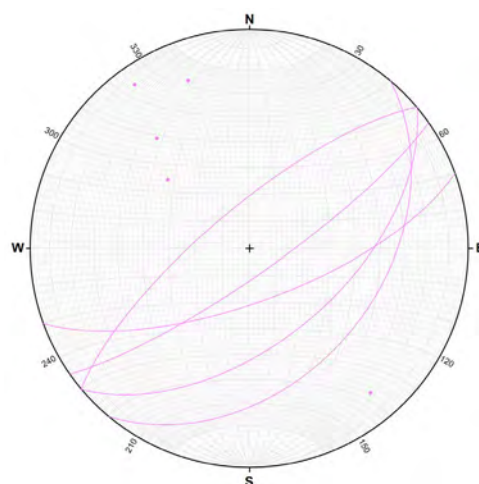
K1



K2



K3



K4



Stratificazione intersecata alla fratturazione (Zona Sud)



Blocco isolato (Zona Sud)



Ammasso roccioso prossimo alla zona di piega, interessato da intensa fratturazione che porta all'isolamento di grossi blocchi (Zona Nord)

Sulla base dei dati raccolti, è stato possibile descrivere l'ammasso roccioso (Zona Sud e Zona Nord) tramite la classificazione di Beniauwsky, che consente di ottenere informazioni dettagliate sulle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso interessato alla progettazione.

La classificazione di Beniauwsky si basa sul rilievo, in campagna o in laboratorio, di sei parametri:

- A1 = resistenza a compressione uniassiale;
- A2 = Rock Quality Designation Index (Indice RQD);
- A3 = spaziatura delle discontinuità;
- A4 = condizioni delle discontinuità;
- A5 = condizioni idrauliche;
- A6 = orientamento delle discontinuità.

Da questi sei parametri si ricava l'Rock Mass Rating (RMR).

L'RMR, nella pratica, viene differenziato come:

$$\text{RMR di base} = \text{RMR}_b = A1 + A2 + A3 + A4 + A5$$

$$\text{RMR corretto} = \text{RMR}_c = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) + A6$$

Attribuiti tutti i coefficienti, sulla base del valore RMR_c calcolato si identificano 5 intervalli a cui corrispondono 5 classi di ammasso roccioso e altrettante valutazioni di qualità della roccia:

RMR_c	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	≤ 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Molto scadente

Dal valore di RMR_b si derivano i parametri caratteristici dell'ammasso, che secondo Beniauskas assumono il valore:

$$\text{coesione di picco } c_p \text{ (kPa)} = 5 \text{ RMR}_b$$

$$\text{angolo di attrito di picco } \Phi_p = 0,5 \text{ RMR}_b + 5$$

$$\text{modulo di deformazione } E \text{ (GPa)} = 2 \text{ RMR}_b - 100$$

I valori della coesione residua e dell'angolo di attrito residuo si ricavano introducendo nelle formule sopra indicate un valore di RMR_b modificato secondo la:

$$\text{RMR}_b = \text{RMR}_b(\text{originario}) - [0,2 \times \text{RMR}_b(\text{originario})] \text{ (Priest, 1983)}$$

La formula di E è però da considerare valida per valori di RMR superiori di 50, mentre per valori inferiori si utilizza la formula di Serafim e Pereira (1983):

$$E \text{ (GPa)} = 10(\text{RMR}_b - 10 / 40)$$

Il valore di GSI (Geological Strength Index) viene ricavato dalla:

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5$$

dove RMR viene calcolato tenendo conto dei punteggi assegnati ai primi quattro parametri e assumendo condizioni idrauliche asciutte ($A5 = 15$). Tale relazione è da ritenersi valida per $\text{RMR} > 23$.

Nel caso specifico per i rilievi R1, R2 e R3 (Zona Sud) è stata ottenuta la seguente caratterizzazione dell'ammasso roccioso:

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
57.12	57.12	Terza	Mediocre

Classificazione ammasso roccioso R1, R2, R3

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strenght Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
14.24	52.12	285.60	33.56	228.48	27.85

Classificazione geomeccanica ammasso roccioso R1, R2, R3

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA (RMR)		
Parametro	Descrizione	Punteggio
A1 - Resistenza roccia intatta	25 MPa	4
A2 - Numero fratture	15 per metro	11.12
A3 - Spaziatura discontinuità	Spaziatura della famiglia più influente = 0.2 metri	8
A4 - Condizioni discontinuità	Giunti tra 10-20 m, con apertura tra 0.1-1 mm, leggermente rugosi, pareti leggermente alterate, con riempimento assente	19
A5 - Condizioni idrauliche	Asciutta	15
Punteggio finale	57.12	
Classe	Terza	
Qualità	Mediocre	

il rilievo R4 (Zona Sud) ha prodotto la seguente classificazione dell'ammasso roccioso:

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
52.12	52.12	Terza	Mediocre

Classificazione ammasso roccioso R4

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strenght Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
4.24	47.12	260.60	31.06	208.48	25.85

Classificazione geomeccanica ammasso roccioso R4

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA (RMR)		
Parametro	Descrizione	Punteggio
A1 - Resistenza roccia intatta	25 MPa	4
A2 - Numero fratture	15 per metro	11.12
A3 - Spaziatura discontinuità	Spaziatura della famiglia più influente = 0.2 metri	8
A4 - Condizioni discontinuità	Giunti tra 10-20 m, con apertura tra 1-5 mm, liscio, pareti leggermente alterate, con riempimento assente	14
A5 - Condizioni idrauliche	Asciutta	15
Punteggio finale	52.12	
Classe	Terza	
Qualità	Mediocre	

Per quanto concerne la Zona Nord invece il rilievo R5 ha portato alla seguente classificazione dell'ammasso roccioso:

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
60.44	60.44	Terza	Mediocre

Classificazione ammasso roccioso R5

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strenght Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
20.88	55.44	302.20	35.22	241.76	29.18

Classificazione geomeccanica ammasso roccioso R5

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA (RMR)		
Parametro	Descrizione	Punteggio
A1 - Resistenza roccia intatta	50 MPa	7
A2 - Numero fratture	10 per metro	14.44
A3 - Spaziatura discontinuità	Spaziatura della famiglia più influente = 0.3 metri	9
A4 - Condizioni discontinuità	Giunti tra 10-20 m, con apertura tra 1-5 mm, liscio, pareti non alterate, con riempimento assente	15
A5 - Condizioni idrauliche	Asciutta	15
Punteggio finale	60.44	
Classe	Terza	
Qualità	Mediocre	

Da tale classificazione emerge che l'ammasso roccioso della Zona Nord è qualitativamente migliore rispetto a quello nella Zona Sud. Questo potrebbe apparire contrastante rispetto a quanto descritto sinora, infatti in corrispondenza dell'asse di piega ci si aspetterebbe un substrato più nettamente fratturato rispetto a quello che costituisce i fianchi della piega. In realtà, il rilievo R5 è collocato in corrispondenza di un affioramento di Maiolica, caratterizzato da strati più spessi. Per questo motivo, complessivamente le discontinuità hanno un peso minore sulla globale qualità dell'ammasso roccioso, risultando apparentemente meno pervasive. Tuttavia, allo stesso tempo la stratificazione in banchi più spessi si traduce nella maggior possibilità di distacco di blocchi di grandi dimensioni.

Per quanto riguarda i blocchi presenti lungo il versante e alla base dello stesso, l'analisi eseguita in sito ha permesso di individuare una certa variabilità nelle dimensioni, riportata nelle tabelle di seguito, e di determinare come nella Zona Nord siano presenti blocchi di maggiori dimensioni (volume massimo rilevato circa 1,7 mc). La media del volume dei blocchi rilevati nella Zona Nord corrisponde a circa 1,15 mc, mentre nella Zona Sud si attesta attorno a 0,74 mc.

Zona Nord – rilievi 2021	
N° blocco	Volume [mc]
1	0,16
2	1,8
3	1,68
4	1,768
5	0,36

Zona Sud – rilievi 2021	
N° blocco	Volume [mc]
1	1,28
2	0,24
3	0,24
4	1,2

Definizione delle forme di instabilità

Le forme di instabilità individuate per l'area di studio sono sostanzialmente 2: distacco di blocchi dalle pareti, con conseguente rotolamento a valle, e ri-mobilizzazione di blocchi rocciosi presenti lungo il versante e/o immersi nel deposito (e relativa propagazione a valle). Entrambe le forme d'instabilità sono possibili e all'atto pratico entrambi i meccanismi possono essere descritti con le medesime modalità e simulazioni: quindi, di fatto, il meccanismo di instabilità si riduce alla movimentazione e propagazione di blocchi rocciosi. Esiste poi la possibilità che si verifichino frane di crollo di intere porzioni di parete rocciosa la cui modellazione diviene molto complessa e di difficile trattazione. Per questi fenomeni è pressoché impossibile definire la probabilità di accadimento poiché la stabilità dell'intera parete è funzione della presenza di ponti di roccia ovvero parti di roccia intatta che offrono le resistenze necessarie alla stabilità del volume. Quando questi ponti di roccia perdono la loro resistenza di fatto si genera il franamento.

Per quanto riguarda i blocchi immersi nel deposito, o trattenuti dagli alberi, si possono riassumere le seguenti caratteristiche. Il meccanismo di distacco è riconducibile allo scalzamento del blocco dal deposito in cui è immerso. Questa situazione può verificarsi sia per la lenta e progressiva esumazione del blocco (continua erosione del deposito circostante) sia per il coinvolgimento in altri fenomeni: impatti con blocchi destabilizzati a monte o caduta degli alberi che trattenevano i blocchi. Entrambi i processi descritti possono generare distacchi di blocchi multipli in zone particolarmente ricche di massi.

Per quanto riguarda i distacchi da parete, questi sono guidati dalla complessa struttura delle fratture dell'ammasso.

Suddivisione delle pareti rocciose con definizione delle aree omogenee

In base a quanto descritto nei precedenti capitoli di questo studio, le pareti rocciose presenti in questa zona possono essere suddivise in due macro-aree omogenee, che coincidono sostanzialmente con le due diverse zone identificate: Zona Nord e Zona Sud.

Per entrambe le macro-aree è possibile definire determinate forme di instabilità, suddividendole a loro volta in differenti aree omogenee caratterizzate da diverse criticità.

Ci si concentra nel seguito solamente sulle aree omogenee definite nella Zona Sud, in cui si inserisce il lotto 2a.

In questa zona il versante può essere discretizzato in quattro settori, dei quali il VII e VIII interessano le aree di progetto.

- **Area omogenea VII:** quest'area risulta caratterizzata da zone sorgenti diffuse e ben sviluppate lungo il pendio, costituite essenzialmente da piccole pareti affioranti e parecchi blocchi potenzialmente instabili all'interno del deposito. Anche in questo caso sono individuabili diversi elementi in grado di concentrare il materiale instabile; inoltre, negli impluvi che solcano il versante, sono favoriti in caso di forti piogge anche

trasporti in massa prevalentemente ghiaiosi, con sviluppo di conoidi detritico-alluvionali alla base del pendio.

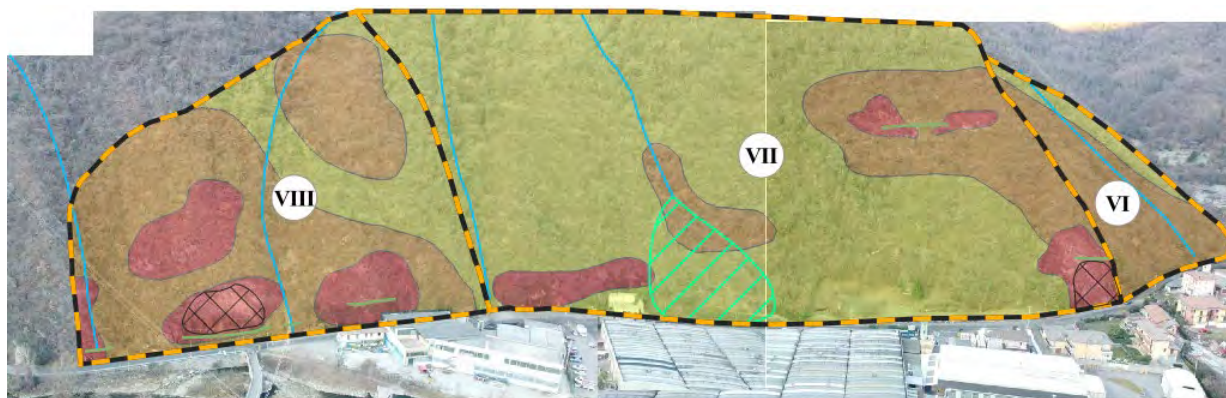
I volumi medi dei singoli blocchi raggiungono dimensioni di circa 0,5 mc, mentre i massimi misurati, per cui sono frequenti le forme a lastra, raggiungono 1 – 1,2 mc. In questo caso, i principali elementi a rischio sono costituiti dalla strada alla base del versante e da fabbricati industriali e qualche abitazione.

Per quest'area sono noti eventi pregressi di caduta massi, di fatto sono state installate una barriera paramassi a seguito di un evento di distacco di blocchi da una delle pareti affioranti nella porzione alta del pendio, nel 2018, e reti in aderenza a seguito di instabilità che hanno coinvolto nel 2011 la parete alla base del pendio.

- **Area omogenea VIII:** area caratterizzata da affioramenti diffusi lungo il pendio, con sviluppo di pareti rocciose anche a bordo strada; quest'ultima costituisce di fatto uno degli elementi a rischio in questa zona, congiuntamente a fabbricati industriali in aree limitrofe.

Gli affioramenti in quest'area generalmente sono caratterizzati da distacchi di blocchi di dimensioni contenute, a monte di questa zona sussistono in ogni caso condizioni analoghe a quelle che contraddistinguono l'area VII, benché con pendii meno estesi in quota e, quindi, aree di distacco più limitate.

Anche in quest'area sono noti eventi pregressi, sono infatti presenti diverse reti in aderenza a ridosso delle pareti alla base del pendio e reti lungo i principali impluvi; sono presenti inoltre barriere paramassi, installate a seguito di eventi di instabilità verificatisi nel 2011.



Suddivisione della Zona Sud in aree omogenee, con diversa estensione delle aree potenziali origine di crollo.

- Aree omogenee
 - Barriere esistenti
 - Reti in aderenza esistenti
 - Impluvi
 - Conoidi detritico-alluvionale
- Mappatura delle aree sorgenti
- Pareti rocciose
 - Versante con piccole pareti e subaffioramenti rocciosi
 - Prevalente deposito con molti blocchi

Definizione dei volumi rocciosi unitari (VRU)

In base alla suddivisione illustrata in precedenza e alla distribuzione dei volumi misurati (bloccometria illustrata nei paragrafi precedenti) è possibile definire, per ogni zona, il volume roccioso unitario. Per schematizzare e cercare di sintetizzare la complessa situazione che caratterizza queste aree, si sono scelti dei volumi di riferimento generali che vengono di volta in volta declinati nelle differenti zone. Si tratti di valori presi in relazione a quanto è stato possibile osservare in sito, in un'area molto ampia come questa e difficilmente raggiungibile e pertanto non è possibile a priori escludere che si possano verificare crolli con volumi maggiori anche se storicamente non sono stati ritrovati.

Le dimensioni sono chiaramente condizionate dalla predisposizione delle diverse pareti al rilascio di blocchi, per cui il fattore principale è la spaziatura delle discontinuità. Come accennato nei capitoli dedicati, la discontinuità fondamentale in grado di svincolare massi dagli ammassi in sito è rappresentata dalla stratificazione, che appare molto pervasiva e ha spaziature inferiori al metro, precisamente nella Zona Sud ha valori tipici di circa 0.20 m. Questo influisce significativamente sulla volumetria dei materiali mobilizzabili; di fatto nella Zona Sud, essendo la stratificazione molto fitta, è verosimile che i blocchi svincolabili siano di dimensioni tendenzialmente contenute, anche se sussiste la possibilità di avere il distacco di grossi blocchi discoidali, diffusamente osservati sul versante. In virtù di quanto sopradescritto, è possibile ipotizzare due diversi scenari di caduta massi:

- **Scenario 1:** rappresenta la condizione di franosità ordinaria del sito, con blocchi fino a 0,5 mc di volume che possono distaccarsi da tutte le aree. Nel seguito ci si riferirà a questo volume caratteristico come **V1**.
- **Scenario 2:** rappresenta una condizione di franosità meno frequente dello scenario 1, descritta con un volume di 1,5 mc per la Zona Sud. Questi valori rappresentano i volumi maggiori misurati durante i sopralluoghi, arrotondati per eccesso in modo da considerare eventuali variabilità, in favore di sicurezza. Nel seguito ci si riferirà a questi volumi caratteristici come **V2**.

Caratterizzazione del versante di caduta

Per le caratteristiche del versante di caduta si può fare riferimento a quanto riportato nel paragrafo sui sopralluoghi eseguiti. Le informazioni salienti sono di seguito sintetizzate.

Generalmente, i pendii sono caratterizzati da pendenze elevate e da morfologie variabili da concave a convesse a seconda della zona; sono presenti diversi impluvi in grado di fungere da direttrici preferenziali per la caduta massi, in quanto tendono a favorire l'accumulo e il rotolamento di massi e blocchi all'interno dei canali, ma in genere sono assenti morfologie a grande scala in grado di concentrare le traiettorie dei blocchi in modo significativo.

La Zona Sud è caratterizzata da pendenze sensibilmente elevate, attorno ai 40° su tutto il pendio. Le aree affioranti sono di dimensioni in genere contenute: non sono infatti presenti evidenti pareti ben sviluppate e prevalgono di fatto le zone di subaffioramento del substrato. Il pendio è generalmente ricoperto da un insieme eterogeneo ed eterometrico di depositi di versante, in cui sono frequenti blocchi di dimensioni notevoli associati a un detrito sensibilmente più sottile e, frequentemente, soffice e cedevole, fittamente vegetato.

Queste valutazioni, assieme alla carta geologica disponibile, sono servite come base per la mappatura e la definizione delle caratteristiche dei materiali di simulazione, che di fatto costituiscono, assieme alla topografia e alle dimensioni dei blocchi, l'input di base per il processo di modellamento.

Chiaramente la perimetrazione ottenuta è affetta da un certo margine di semplificazione: l'impossibilità di mappare precisamente situazioni circoscritte preclude una perimetrazione di dettaglio.

Simulazione di caduta massi e pericolosità

Per la descrizione del fenomeno di caduta massi in questo settore di versante, si sono condotte nell'ambito del progetto 2022 modellazioni numeriche con approccio 3D estese su entrambe le macro-aree di analisi e utilizzate per una prima valutazione della distribuzione delle traiettorie e delle energie e, di conseguenza, della pericolosità locale. Sulla scorta di questi primi risultati si sono individuate aree a diversa criticità che hanno guidato la scelta e la priorità dei lotti di progetto. Tutte queste valutazioni sono state mutate anche nel presente progetto.

In seconda fase, si sono realizzate tre sezioni di simulazione 2D concentrate nella zona di progetto del lotto 2°, per avere una prima verifica delle condizioni cinematiche.

Entrambe le modellazioni hanno seguito un approccio suddiviso in varie fasi, ripetute per entrambe le simulazioni e con il seguente schema generale:

- Ottenimento della topografia di base. Per questo aspetto si è fatto riferimento all'esistente volo aerofotogrammetrico comunale, che è stato processato in ambiente GIS ottenendo un modello digitale del terreno (DTM o DEM, nel seguito). La risoluzione del prodotto finale dipende direttamente dalla scala nominale del file di partenza: in questo caso, partendo da un rilievo al 1:5.000, si è ritenuto di poter raggiungere una risoluzione di cella pari a 5x5 m. Si tratta di una precisione che, alla scala dell'intero versante, fornisce senza dubbio risultati soddisfacenti, ma che per valutazioni puntuali può implicare evidenti limitazioni nelle precisioni delle valutazioni finali. Le sezioni di calcolo 2D sono state ottenute anch'esse da questo DEM di base.
- Definizione della distribuzione dei materiali in modo da rispecchiare il più possibile la situazione di sito, pur necessariamente semplificandola rispetto alla realtà.
- Calibrazione dei parametri da assegnare ai materiali individuati al precedente punto, eseguendo una simulazione usando come blocco un volume di 0.35mc per la zona nord e 0.25 per la zona sud, coincidente con il blocco ordinario effettivamente osservato lungo il pendio. Non è stato possibile basare il vincolo di calibrazione sulla distribuzione delle aree di arresto dei blocchi, non essendo stato possibile osservare in sito evidenti zone di deposito da utilizzare in tal senso. Ci si è quindi basati su alcune considerazioni qualitative che hanno consentito una taratura soddisfacente, benché non totalmente robusta, del modello.

Questi criteri sono stati, in sintesi:

- o Ci si aspetta che i blocchi di dimensioni minori tendano comunque ad arrestarsi in modo sparso lungo il pendio, anche senza produrre evidenti punti di accumulo (in accordo con le pendenze sempre elevata della topografia), per effetto della presenza di locali piccoli pianori, dell'influenza della vegetazione ecc...
- o Ci si aspetta una fascia di arresto preferenziale nelle aree pianeggianti localmente presenti alla base dei versanti, soprattutto nelle aree omogenee 4 e 5 e, in misura minore, 6. Chiaramente in questo caso la bontà della calibrazione è direttamente collegata alla bontà del rilievo topografico di base.

- o Limitatamente alla zona sud, dove sono noti e documentati eventi pregressi, i blocchi simulati che raggiungono la strada dovevano avere energie non particolarmente elevate: i fenomeni di Via San Bernardino, infatti, hanno sì provocato danni alle strutture e agli oggetti impattati, ma comunque localizzati e generalmente non pervasivi.
- Sviluppo della simulazione utilizzando i due volumi rocciosi di simulazione indicati in precedenza (V1 e V2). In questo caso, il software 3D consente la simulazione contemporanea dei due volumi, quando diversi da zona a zona, lanciati dalle rispettive aree di origine. In questo caso, per entrambe le zone il volume V1 è stato posto pari a 0.5mc, mentre il volume V2 è stato posto pari a **1.5 mc per l'area sud**. Per il calcolo 2D si è eseguita una simulazione per ogni sezione e per ogni scenario.
- Valutazione dei risultati: di particolare interesse preliminare i dati da modello 3D, che sono stati utilizzati per la valutazione delle principali direttrici di caduta (zonazione pericolosità, posizione planimetrica barriere e ubicazione sezioni di calcolo) e la distribuzione delle energie cinetiche lungo il pendio, per ottenere poi una carta della pericolosità, come meglio dettagliato nei successivi paragrafi. La simulazione 2D, oltre a confermare quanto ottenuto dal 3D, risulta di maggiore importanza progettuale per la valutazione puntuale delle altezze di rimbalzo dei blocchi e, di riflesso, per la valutazione dell'altezza della barriera.

Come accennato in premessa, la base topografica comunale è stata elaborata a ottenere un DEM con risoluzione 5x5m: va sottolineato che il dato topografico così ottenuto, pur essendo il migliore a disposizione, introduce necessariamente delle semplificazioni della topografia reale, che viene generalmente "lisciata". Si perdono quindi alcune caratteristiche della micro-topografia (come, ad esempio, la presenza di terrazzamenti o pareti e/o piccoli impluvi con ridotta continuità longitudinale) che non vengono quindi comprese nella simulazione.

Si sottolinea inoltre come le simulazioni di caduta massi, per loro natura intrinseca, non possono valutare scenari di caduta e propagazione di blocchi multipli, ma si limitano a ripetere un certo numero di lanci di blocchi singoli, le cui forma e dimensione restano costanti lungo tutta la propagazione. Non sono quindi considerati fenomeni di interazione tra blocchi in contemporanea discesa o influenze dovute alla frammentazione del blocco in propagazione.

Si noti altresì che le simulazioni eseguite non contemplano la presenza degli edifici e il loro effetto sulla propagazione dei blocchi: queste influenze verranno prese in conto al momento della redazione della carta di suscettività, come spiegato nei capitoli dedicati.

Per entrambi i modelli si è considerato un peso di volume della roccia intatta pari a 2500 kg/mc, compatibile con un calcare mediamente compatto.

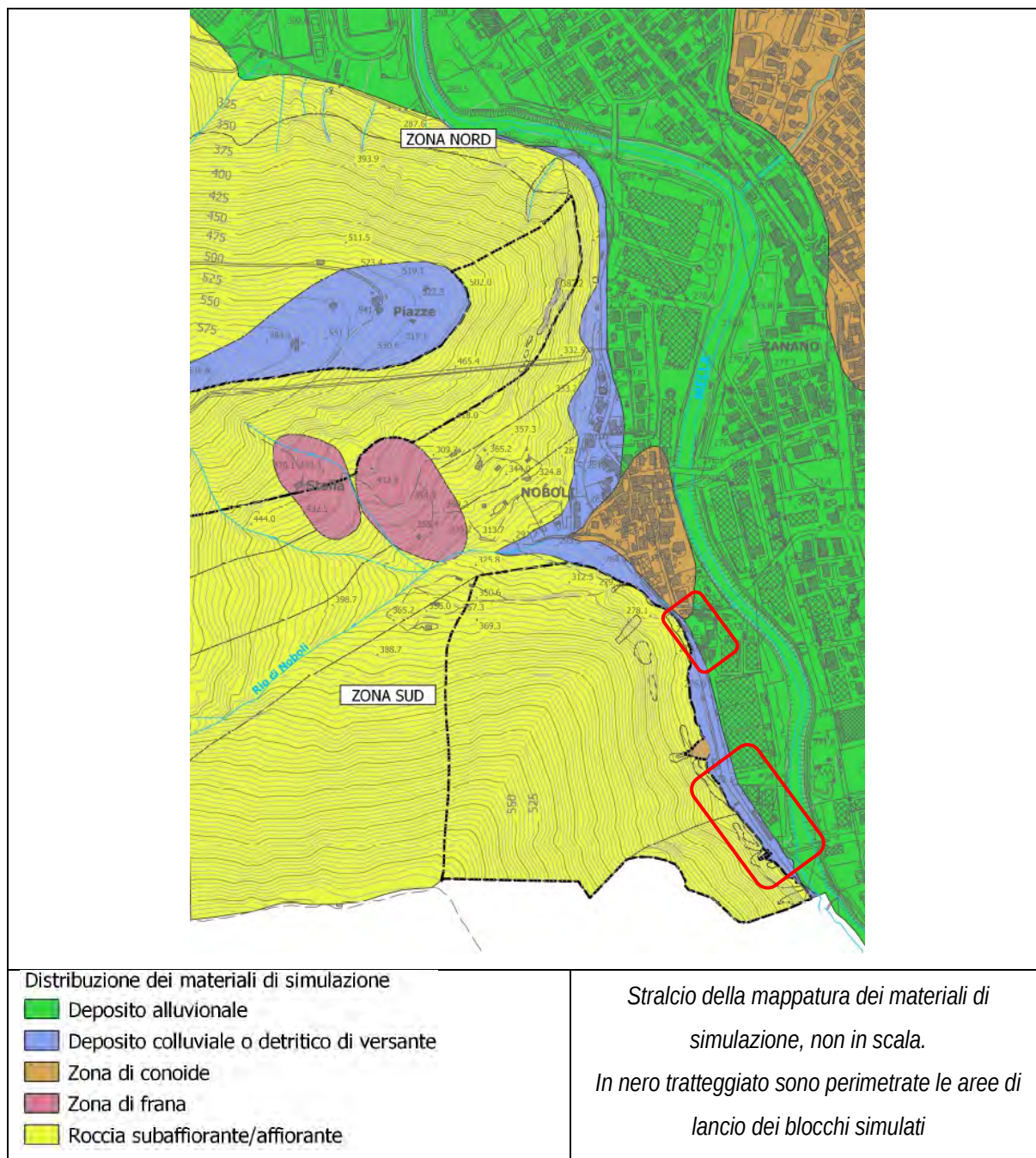
Per tutti gli scenari si sono eseguiti 100 lanci per pixel nel modello 3D, 1000 lanci in linea per il modello in 2D.

Si descrivono nel seguito le operazioni di simulazione e i principali risultati ottenuti, che sono riportati anche nelle tavole grafiche dedicate (tavola 17 per le simulazioni 3D e pericolosità, tavola 19 per le simulazioni 2D).

Modellazione 3D (RockyFor3D)

Distribuzione dei materiali di simulazione e risultati del calcolo

La perimetrazione dei materiali di simulazione è stata derivata direttamente dalla distribuzione dei materiali geologici rappresentata in tavola 15. Si riporta nel seguito uno stralcio che rappresenta la distribuzione dei materiali di simulazione e i parametri di calcolo derivati dalla simulazione di taratura.



Materiale	RG70	RG20	RG10	Soiltype	Rn
Deposito alluvionale	0.03	0.03	0.03	2	0.28
Deposito colluviale e detrito di versante	0.03	0.03	0.03	2	0.28

Zona di conoide	0.03	0.03	0.03	2	0.28
Zona di frana	0.03	0.03	0.03	2	0.28
Roccia subaffiorante e affiorante	0.05	0.1	0.1	4	0.38

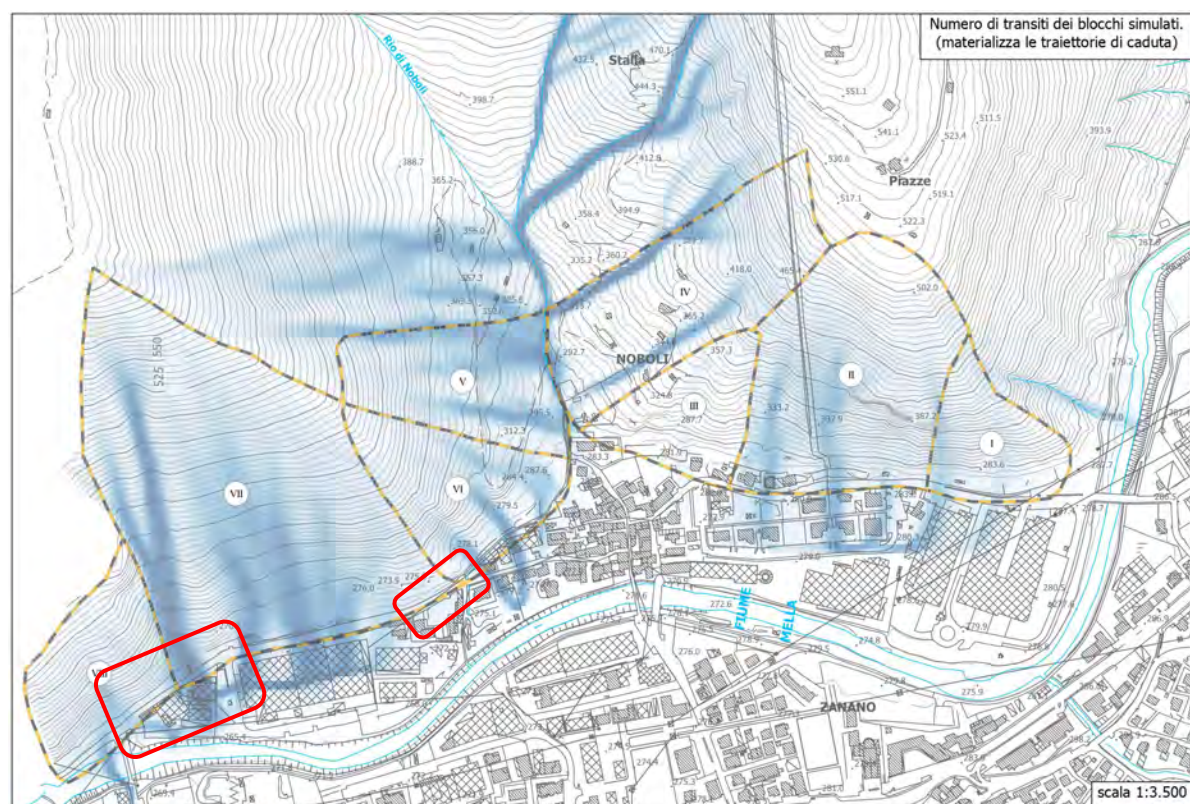
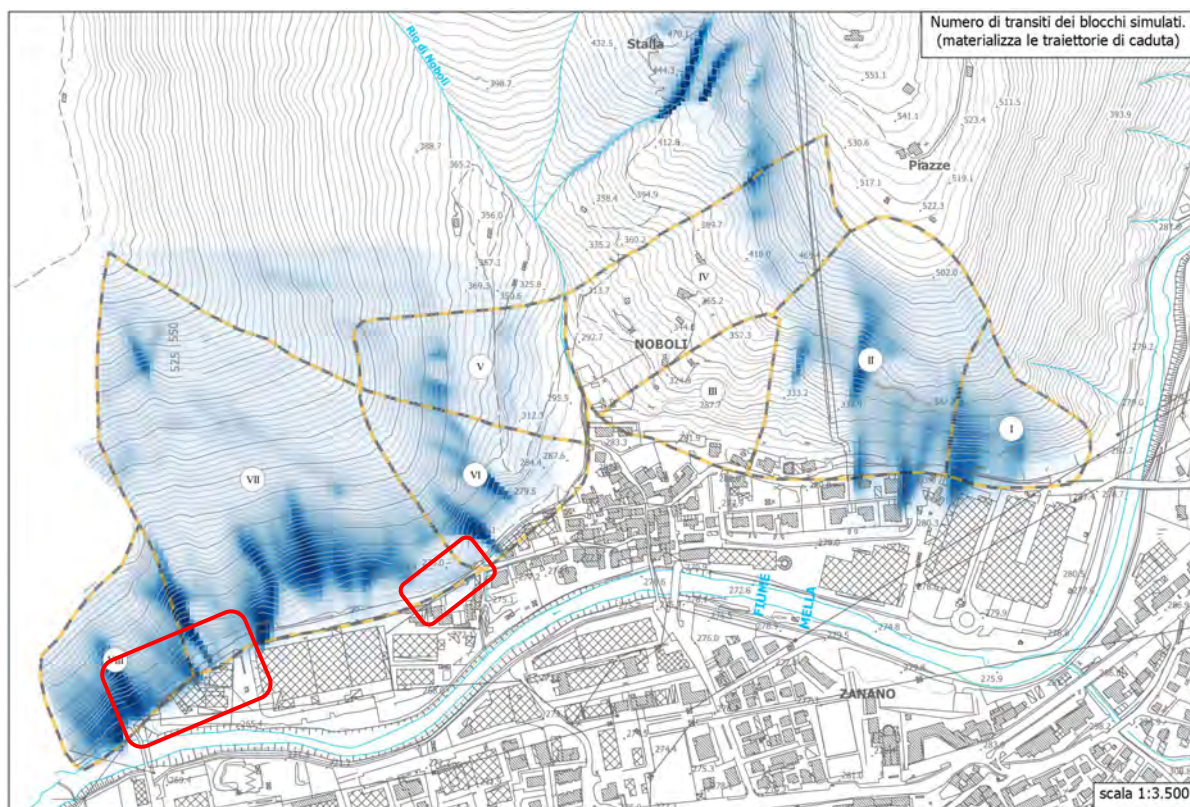
Parametri di calcolo derivati dalla fase di taratura. Particolare importanza riveste l'ultima serie di parametri (roccia) che corrispondono al materiale arealmente più presente nelle simulazioni

Nella tabella precedente le sigle si riferiscono ai seguenti parametri:

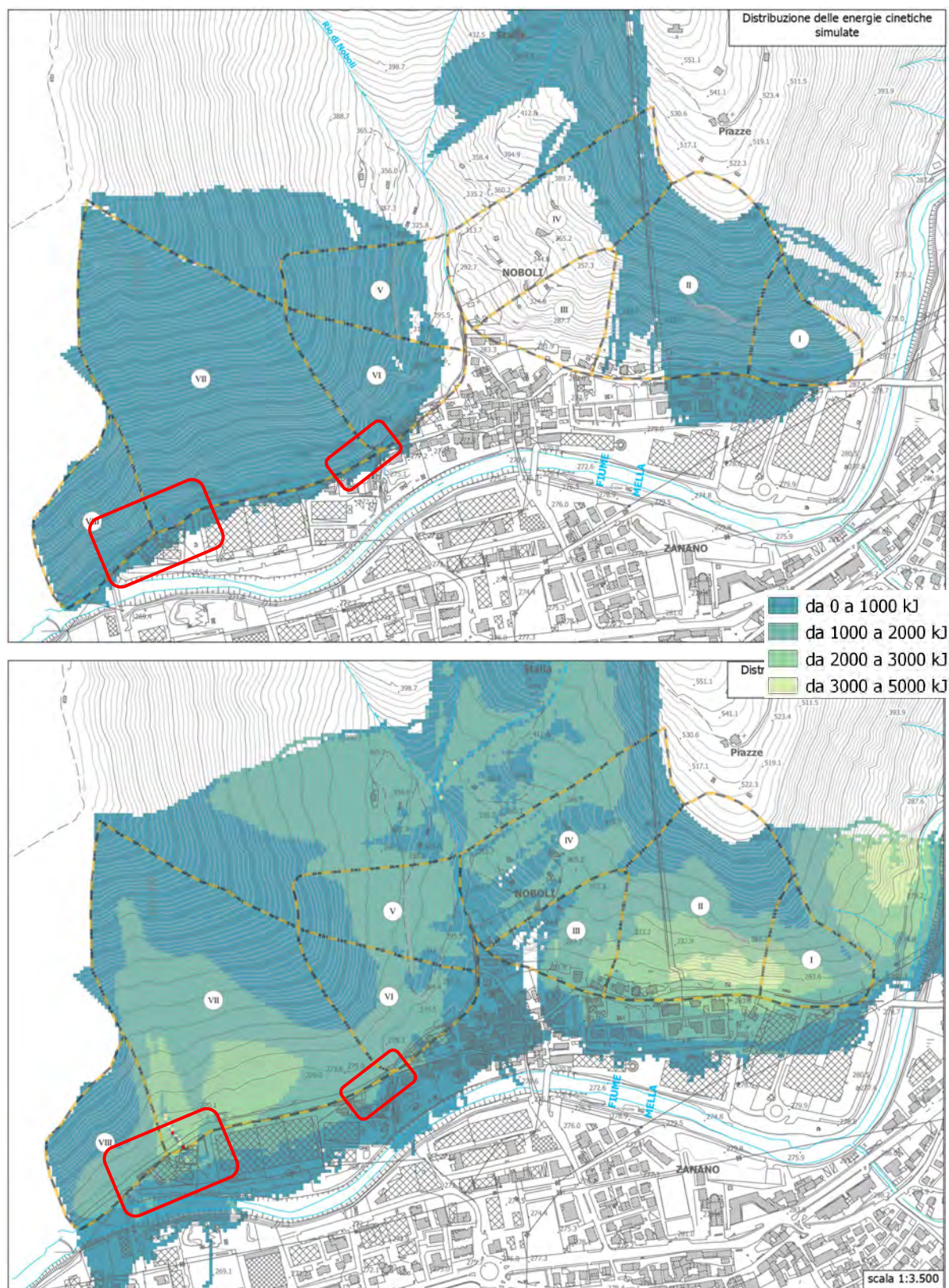
- Rg70, Rg20 e Rg10: dimensione, in metri, dell'asperità che il blocco ha il 70%, 20% e 10% rispettivamente di incontrare nella sua propagazione a valle, misurata lungo la direzione di propagazione del blocco stesso, quindi da monte a valle. Indicano in sostanza la rugosità del pendio, suddivisa in un ostacolo frequente (rg70), uno poco frequente (rg20) e uno raro (rg10). Questo parametro influenza la distribuzione delle traiettorie e la perdita di velocità e energia tangente al pendio computata per ogni impatto.
- Soiltype: indica la tipologia di suolo incontrata dal blocco simulato. Il software collega il codice riportato a un valore di Rn (parametro di restituzione dell'energia normale alla superficie di rimbalzo), in modo tale che depositi con soiltype minore assorbono più energia di quelli con soiltype maggiore. In questo caso, il valore 2 è riconducibile alla presenza di un mix di sabbie e ghiaie nella zona pedemontana o alla presenza di una copertura in materiale fine e cedevole nelle zone con copertura eluvio-colluviale. Il valore 4 è invece riconducibile alla presenza di un deposito mediamente compatto con grossi frammenti litici, come è stato osservato su gran parte del pendio di analisi.

Si riportano nel seguito degli stralci significativi dei risultati ottenuti, in termini di frequenze di transito e energie dei blocchi simulati (queste ultime mostrate come l'intervallo di confidenza al 95% della distribuzione delle massime energie simulate per i blocchi transitati su quel pixel), per i due scenari di calcolo ipotizzati e illustrati nei capitoli precedenti.

Si può notare come la topografia locale non favorisca la concentrazione dei blocchi lungo direttrici ben definite, se non in limitate situazioni concentrate principalmente nelle aree omogenee 4 e 5. Globalmente, quindi, il versante non offre particolari punti privilegiati su cui intervenire, in termini di concentrazione delle traiettorie. Discorso differente per la distribuzione delle energie simulate, che indicano chiaramente la presenza di maggiori energie nella zona nord, aree omogenee 1 e 2, come ci si può intuitivamente aspettare dalla morfologia di questa zona, che vede la presenza di una importante parete rocciosa in corrispondenza della quale i blocchi in caduta possono acquisire grandi velocità. Le energie sono comunque significative anche nella zona meridionale, data l'elevata pendenza dei siti.



Numero di passaggi per ogni pixel: colori più intensi indicano maggior frequenza di passaggio. Sopra: scenario di calcolo modale (V1); sotto: scenario di calcolo con blocco maggiore (V2)



Energie cinetiche simulate. Sopra: scenario di calcolo modale (V1); sotto: scenario di calcolo con blocco maggiore (V2)

Probabilità di propagazione e carte della pericolosità preliminari

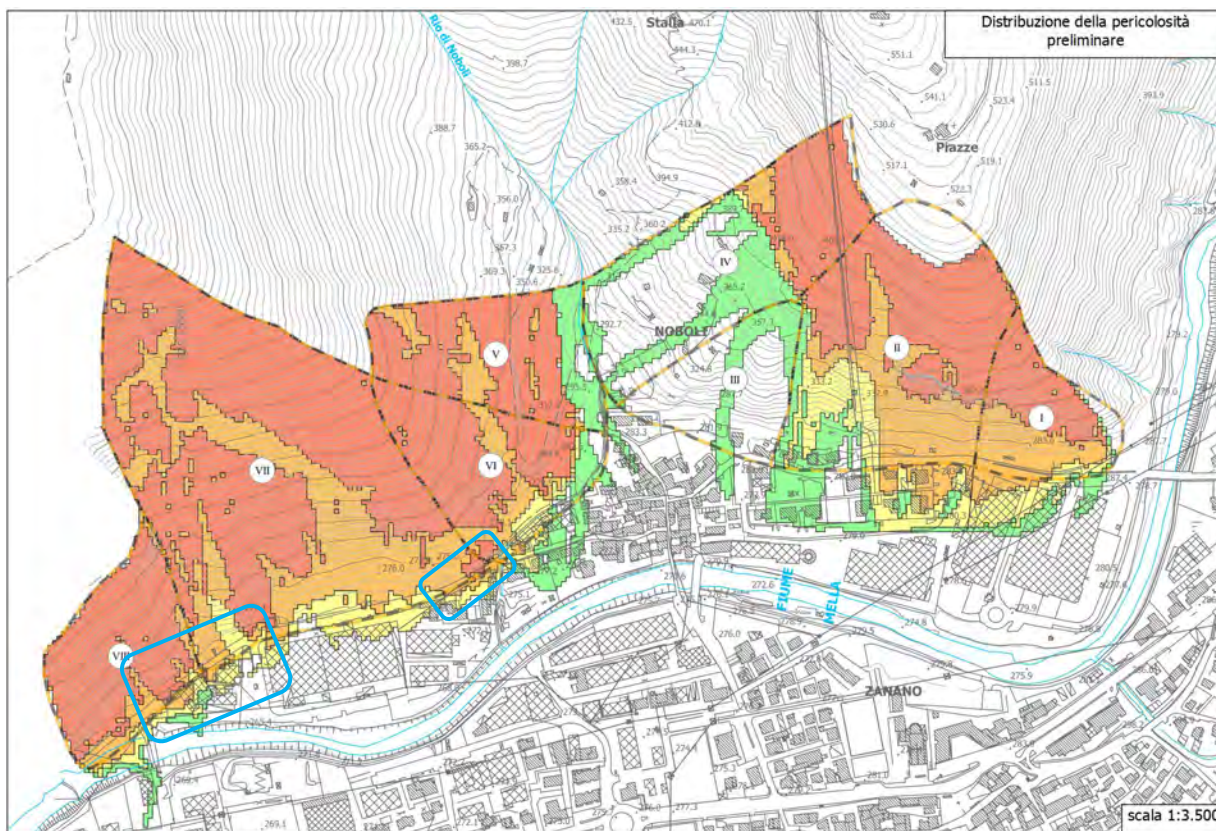
Il software di calcolo, sulla base del numero blocchi effettivamente transitati su un certo pixel rapportato al numero di blocchi simulati che possono raggiungere lo stesso pixel senza considerare le perdite di energia, fornisce pixel per pixel la probabilità di ogni punto di simulazione di essere interessato dal transito di un blocco in propagazione dall'alto.

Questo parametro, valutato sul blocco modale, è un dato complementare alla probabilità di arresto, che è il parametro di normativa su cui si valuta la pericolosità preliminare per i fenomeni di caduta massi secondo l'approccio RHAP adottato da Regione Lombardia, secondo il seguente schema:

Probabilità di transito calcolata	Percentuale di arresto da normativa	Pericolosità preliminare
30	70	H4
5	95	H3
0	100	H2

Si ottiene quindi una prima perimetrazione della pericolosità, che viene estesa inserendo un'ulteriore area, con pericolosità H1, che comprende la massima distanza di arresto del blocco maggiore simulato.

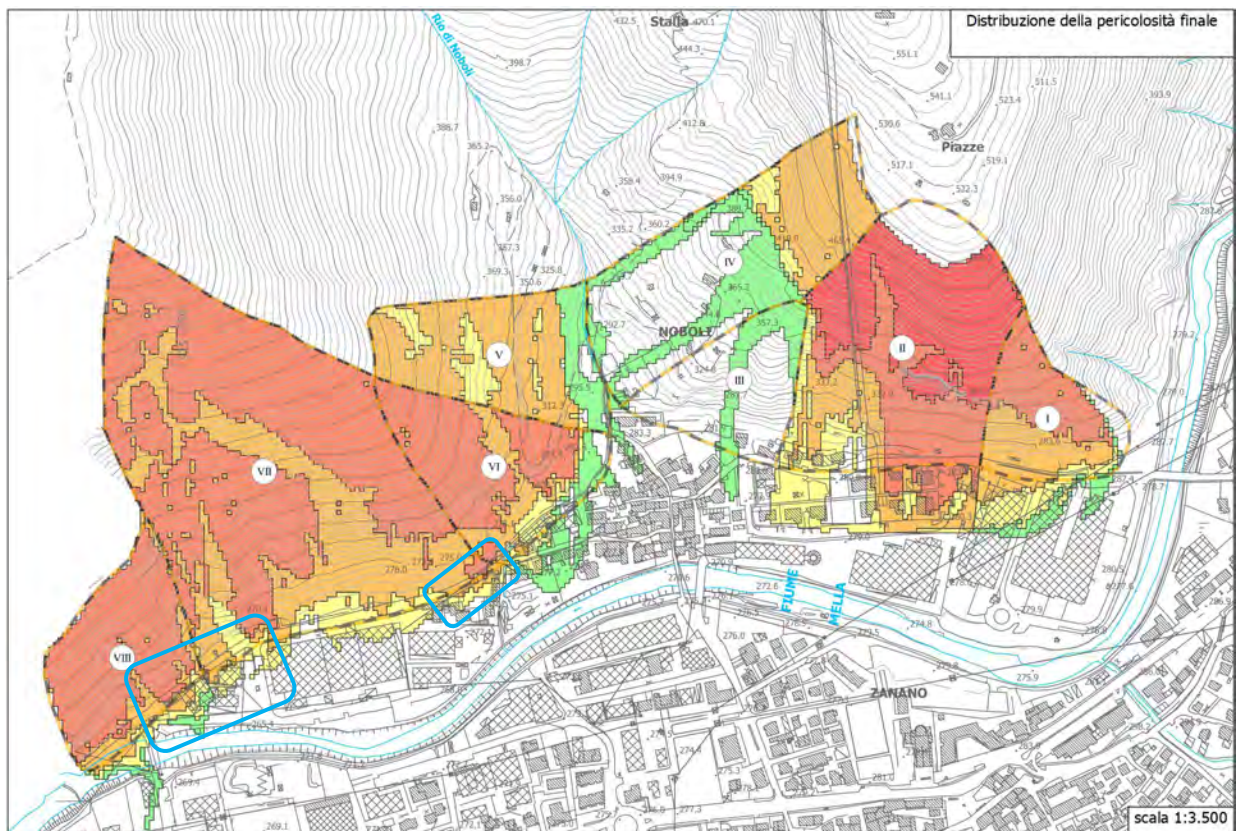
La planimetria risultante, nel caso del progetto in analisi, è la seguente, in cui i colori dal rosso al verde indicano le 4 classi a pericolosità decrescente.



Perimetrazione della pericolosità preliminare – non in scala

Questa carta preliminare viene poi tradotta in una carta definitiva considerando le caratteristiche delle aree sorgenti dei fenomeni di crollo: zone con elevata propensione al distacco (che quindi presentano indici quali strutture instabili, evidenze di crolli recenti, morfologie che possono produrre crolli in massa, zona con evidente alterazione e/o circolazione idrica) producono un aumento della pericolosità di 1 classe su tutta la perimetrazione. Di contro, zone senza particolari indici di attività possono comportare una riduzione di una classe di pericolosità.

Nel caso di studio, l'area omogenea 2 ha subito un aumento di pericolosità in virtù dell'elevata propensione a generare distacchi lungo tutta la parte alta del versante e a causa della presenza della parete rocciosa più volte citata; viceversa, si è operata una riduzione della pericolosità nelle aree omogenee 4 e 5, come evidente nello stralcio sotto riportato.



Perimetrazione della pericolosità definitiva – non in scala

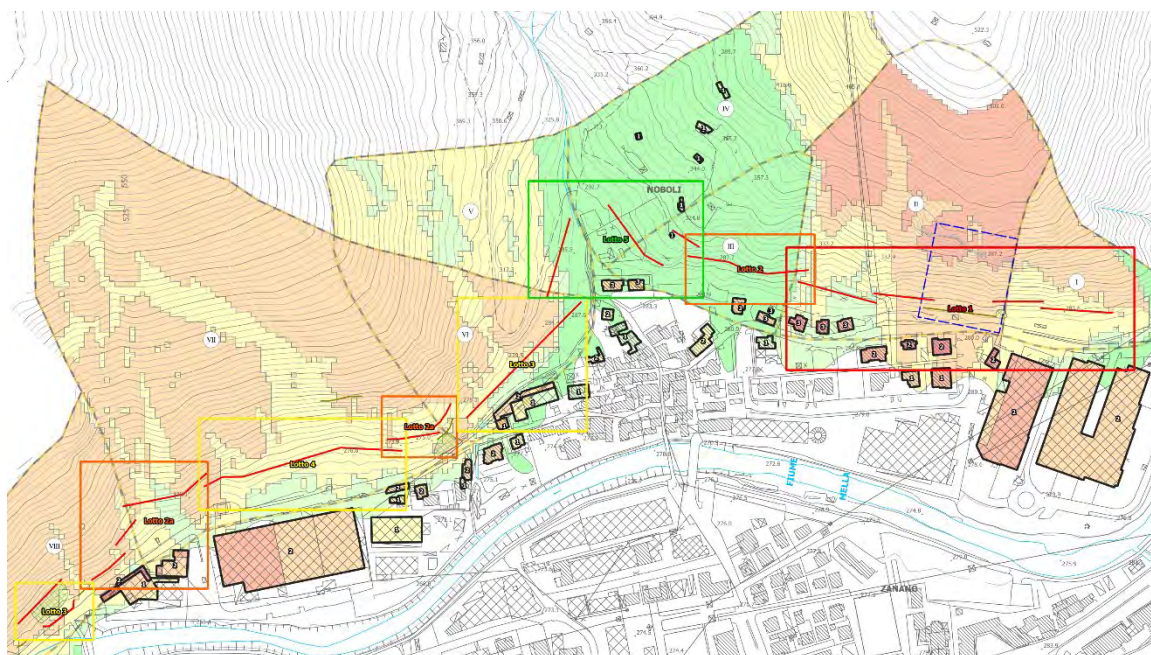
Carta della suscettività

Dalle carte di pericolosità preliminare e finale illustrate nei capitoli precedenti è stata prodotta un'ulteriore elaborazione, questa volta in termini meno quantitativi e più qualitativi, che ha l'obiettivo di aggiungere alla semplice pericolosità di base dei siti anche un'ulteriore componente, legata alla presenza di elementi sensibili e alla loro esposizione al fenomeno.

In primo luogo, è stata introdotta una certa ripermetrazione delle aree di pericolosità, limitandone l'estensione verso valle (togliendo quindi le aree in cui era chiaramente inverosimile che un blocco potesse giungere, considerando la presenza degli edifici) e ampliandole nelle zone di versante, nelle situazioni in cui il modello aveva lasciato dei "buchi" chiaramente dovuti a semplificazioni di calcolo.

In secondo luogo si sono isolati gli edifici e le costruzioni intersecati da questa nuova perimetrazione, cui è stato assegnato un valore di esposizione in base alla posizione rispetto al versante: strutture poste alla base del versante hanno ricevuto un valore elevato (3), strutture parzialmente protette (da strade o da costruzioni poste tra queste e il versante) hanno ricevuto un valore intermedio (2) e strutture protette da almeno due elementi di mitigazione (strada + altri edifici o due file di edifici ecc...) hanno ricevuto il valore minimo (1). Valore minimo è stato assegnato anche agli edifici rurali presenti lungo il versante, che non vedono la presenza continuativa di persone. La perimetrazione finale è stata ottenuta sommando questo valore di esposizione del singolo edificio al valore di pericolosità di base massimo che interseca l'edificio, anche solo parzialmente.

Quindi un edificio non immediatamente alla base del versante (esposizione 2) coinvolto in parte da perimetrazione H3 e in parte da H2, avrà un risultato finale di 5. Di seguito si riporta uno stralcio della perimetrazione ottenuta, riportata anche come base in tavola 18.



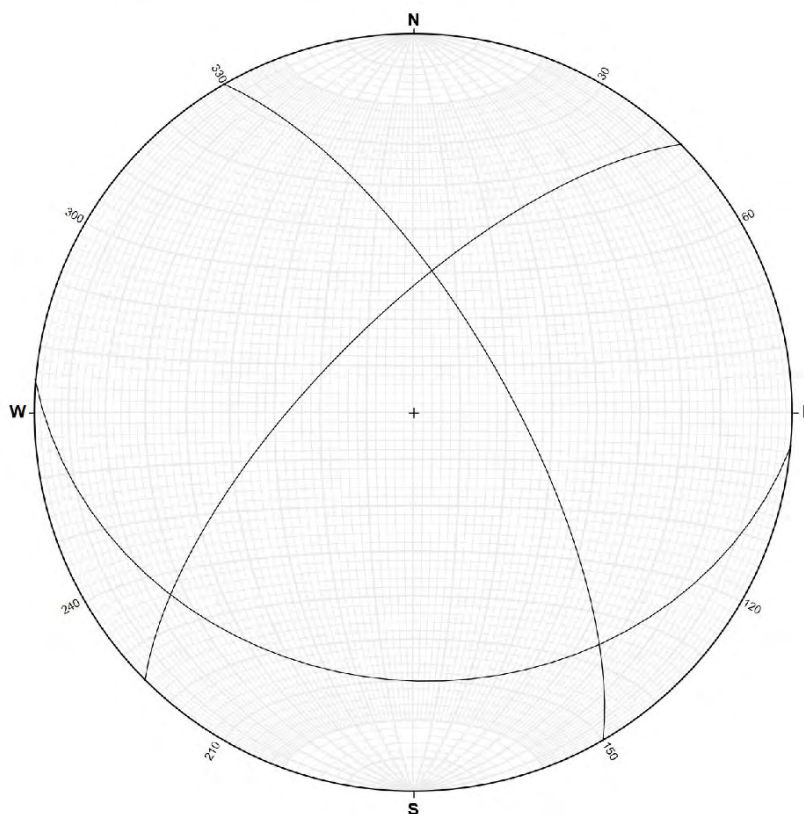
Questo dato è stato utilizzato come input di base per la definizione dei lotti funzionali di intervento.

CARATTERIZZAZIONE DEI SUOLI

Indagini eseguite

Per il presente lavoro non sono state richieste indagini per la descrizione del sito di intervento, identificato come R6 per rispettare la numerazione esistente. Si è di fatto mutuato quanto contenuto nel progetto del 2022, integrando con un dedicato rilievo geomeccanico realizzato lungo le pareti rocciose affioranti a bordo strada poco a nord del Ponte Noboli, in cui si sono osservate, oltre alla stratificazione, 2 delle 4 discontinuità principali (K1 e K2).

Rilievo R6



A livello di classificazione, il rilievo R6 (Zona Sud) ha prodotto i seguenti valori, in linea con i rilievi esistenti.

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
52.12	52.12	Terza	Mediocre

Classificazione ammasso roccioso R4

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strenght Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
4.24	47.12	260.60	31.06	208.48	25.85

Classificazione geomeccanica ammasso roccioso R4

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA (RMR)		
Parametro	Descrizione	Punteggio
A1 - Resistenza roccia intatta	25 MPa	4
A2 - Numero fratture	15 per metro	11.12
A3 - Spaziatura discontinuità	Spaziatura della famiglia più influente = 0.2 metri	8
A4 - Condizioni discontinuità	Giunti tra 10-20 m, con apertura tra 1-5 mm, liscio, pareti leggermente alterate, con riempimento assente	14
A5 - Condizioni idrauliche	Asciutta	15
Punteggio finale	52.12	
Classe	Terza	
Qualità	Mediocre	

È stata inoltre osservata una zona, circa in corrispondenza del ponte di Via San Bernardino, dove una vallecchia tende a concentrare numerosi blocchi, che si osservano a bordo strada. Di questi blocchi è stato possibile prendere un certo numero di misure di dimensione, che risultano in volumi in genere ridotti, inferiori a 0.2 mc, sintetizzati nella tabella successiva.

Si osserva inoltre come sui versanti siano presenti massi con dimensioni molto maggiori di quelle osservabili alla base dei pendii, come dimostrato dai dati del 2022.

Zona Sud – rilievi 2024				
N° blocco	D1	D2	D3	Vol [mc]
1	0.6	0.5	0.3	0.09
2	0.6	0.4	0.18	0.04
3	0.4	0.4	0.2	0.03
4	0.6	0.4	0.3	0.07
5	0.6	0.5	0.2	0.06
6	0.4	0.3	0.3	0.04
7	0.6	0.6	0.5	0.18
8	0.6	0.3	0.5	0.09
9	0.4	0.3	0.15	0.02
10	0.4	0.4	0.3	0.05
11	0.2	0.3	0.1	0.006

SISMICITA'

Nell'ambito della redazione del PGT di Sarezzo è stata effettuata la valutazione del rischio sismico in base all'analisi della pericolosità sismica locale (I e II livello), in relazione alle condizioni geologiche geomorfologiche del territorio esaminato, come indicato nelle direttive regionali (All. 5 della D.G.R. 8/7374/08).

Analisi di I livello

L'analisi di I livello ha permesso di individuare, per il territorio del comune di Sarezzo, effetti di instabilità (movimenti franosi o rischio frane), sia effetti dovuti ad amplificazione topografica, sia effetti dovuti ad amplificazione litologica, in quanto sono stati riconosciuti i seguenti scenari:

- Z1a - Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi;
- Z1b - Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti;
- Z1c - Zona potenzialmente franosa o esposta a rischi frana;
- Z3b - Zona di cresta e/o cucuzzolo;
- Z4a - Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi;
- Z4b - Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale.

In particolare, l'area di intervento risulta ricadere nella "Zona Z4b" (Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale). In seguito è stata applicata la procedura di II livello.

Analisi di II livello

Sempre nell'ambito della redazione del PGT di Sarezzo si è proceduto ad effettuare una caratterizzazione semiquantitativa degli effetti di amplificazione sismica locale in termini di Fattore di Amplificazione (Fa). L'applicazione del II livello permette quindi di valutare se la normativa nazionale (D.M. 14/01/08) è sufficiente a salvaguardare gli effetti di amplificazione sismica locale ($Fa_{calcolato} < Fa_{di\ soglia\ comunale}$, come calcolato dal Politecnico di Milano per la Regione Lombardia).

La procedura, come indicato nelle direttive regionali (All.5 della D.G.R. 8/7374/08), prevede la stima quantitativa della risposta sismica locale dei terreni in termini di Fattore di Amplificazione (Fa) dell'impulso sismico. Le indagini e le analisi sono state condotte con metodi quantitativi semplificati e hanno permesso di effettuare una zonazione del territorio in esame in funzione del fattore di amplificazione calcolato.

Amplificazione morfologica

Nel Comune di Sarezzo si può osservare, in corrispondenza dei rilievi montuosi essenzialmente lo scenario di cresta rocciosa e/o cocuzzolo. Facendo riferimento alle relative schede per gli effetti morfologici riportate nell'allegato 5 sono stati ottenuti i fattori di amplificazione (Fa) che dovranno essere utilizzati per valutare il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica nazionale vigente. Per gli effetti morfologici la procedura fornisce il valore di Fa solamente per l'intervallo di periodo 0.1-0.5 s. Nel caso si prevedano costruzioni con strutture flessibili e sviluppo verticale compreso tra 5 e 15 piani, in presenza di scenari Z3a e Z3b, è necessario effettuare analisi di approfondite (III livello) in fase progettuale.

I valori di F_a ottenuti dalle schede di valutazione sono stati poi confrontati con il valore di ST delle Norme Tecniche per le Costruzioni riportate in tabella 3.2.VI del D.M. 14 gennaio 2008, che rappresenta il valore di soglia oltre il quale lo spettro proposto dalla normativa nazionale non è sufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione topografica presente nel sito. Rispetto al valore di soglia, viene considerata una variabilità di $+0.1$ che tiene conto della variabilità del valore di F_a ottenuto dalla procedura semplificata.

Sono state quindi tracciate alcune sezioni significative, lungo le quali sono state condotte le verifiche di carattere geometrico richieste dalla metodologia. Per la consultazione di rimanda alla cartografia allegata al PGT.

Nelle aree montane i valori di F_a calcolati risultano sempre minori dei valori di soglia nell'ambito degli scenari "Z3b - Zona di cresta e/o cucuzzolo". All'interno di queste aree la normativa tecnica nazionale (D.M. 14/01/08) risulta sufficiente a tenere in conto i possibili effetti di amplificazione morfologica.

Amplificazione litologica

Il valore di F_a calcolato si riferisce agli intervalli di periodo tra 0,1-0,5 s e 0,5 -1,5 s, in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie più rappresentate sul territorio. Per stimare gli effetti litologici i parametri da prendere in considerazione sono:

- litologia prevalente;
- stratigrafia del sito;
- spessore degli strati;
- andamento delle V_s con la profondità fino a $V_s > 800$ m/s;
- modello geotecnico e geofisico del sito.

La litologia prevalente e la stratigrafia di alcuni siti rappresentativi del territorio comunale sono stati ricostruiti sulla base dei dati esistenti, anche da indagini geognostiche, studi geologici precedenti. Sono stati scelti alcuni siti di indagine ritenuti rappresentativi di alcuni scenari geologici individuati nell'analisi sismica di I livello; in particolare si è scelto di analizzare le litologie corrispondenti a:

- *Depositi alluvionali fondovalle;*
- *Depositi di conoide alluvionale;*
- *Detrito di versante, accumuli di frana stabilizzati.*

Depositi alluvionali fondovalle:

Sulla scorta dei valori delle onde di taglio (V_s) ricavati nell'indagine eseguita dai ricercatori del Politecnico di Milano (prove *down-hole*) ai terreni ricompresi nell'area di fondovalle di natura alluvionale è possibile assegnare una categoria di sottosuolo B ($V_{s30} = 551$ m/s). Il modello geofisico del sottosuolo ha permesso di calcolare il periodo proprio (T) dei depositi presenti nell'area pari a 0.156 s. Utilizzando la scheda relativa alla litologia ghiaiosa (Allegato 5 della D.G.R. n.8/7374 del 28 maggio 2008) il fattore di amplificazione risulta:

	F_a	soglie	B	C	D	E
Intervallo 0.1-0.5 s	1,27		1,4	1,8	2,2	2,0
Intervallo 0.5-1.5 s	1,08		1,7	2,4	4,2	3,1

Depositi di conoide alluvionale:

Si fa riferimento ad indagini sismiche (onde superficiali, MASW, ReMI, ecc.) da cui si ricavano valori di $V_{s30} = 290 \div 345$ m/s, a cui corrisponde una categoria di sottosuolo tipo C. Utilizzando la scheda relativa alla litologia limoso argillosa tipo 2 (Allegato 5 della D.G.R. n.8/7374/08), il fattore di amplificazione risulta:

	Fa	soglie	B	C	D	E
Intervallo 0.1-0.5 s	1,8		1,4	1,8	2,2	2,0
Intervallo 0.5-1.5 s	1,2		1,7	2,4	4,2	3,1

Detrito di versante, accumuli di frana stabilizzati:

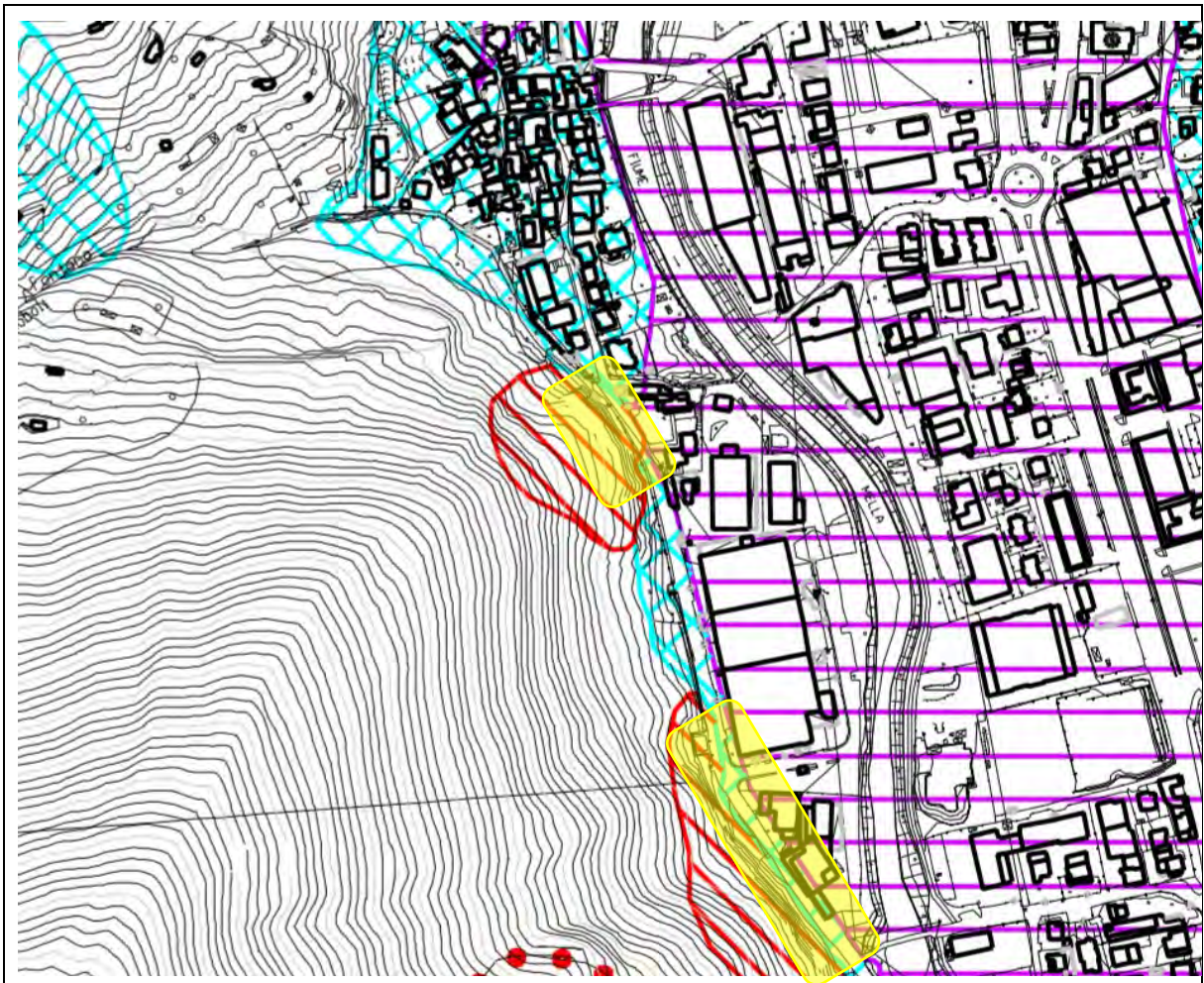
Si fa riferimento ad indagini sismiche (onde superficiali, MASW, ReMI, ecc.) da cui si ricavano valori di $V_s = 350$ m/s entro i primi 10 m e valori di $V_s > 800$ m/s, corrispondenti al substrato, a tali valori corrisponde una categoria di sottosuolo tipo E. Utilizzando la scheda relativa alla litologia limoso argillosa tipo 2 (Allegato 5 della D.G.R. n.8/7374/08), il fattore di amplificazione risulta:

	Fa	soglie	B	C	D	E
Intervallo 0.1-0.5 s	1.1		1,4	1,8	2,2	2,0
Intervallo 0.5-1.5 s	2.0		1,7	2,4	4,2	3,1

Per quanto riguarda l'amplificazione litologica, la procedura semiquantitativa di II livello evidenzia che per gli scenari identificati (Z4a e Z4b) i valori del fattore di amplificazione sismica calcolati risultano inferiori o uguali ai valori di soglia forniti dalla Regione Lombardia (rispetto al valore di soglia, viene considerata una variabilità di +0.1 che tiene conto della variabilità del valore di F_a ottenuto dalla procedura semplificata).

Quindi l'applicazione dello spettro previsto dalla normativa per la categoria di sottosuolo identificata (D.M. 14/01/08) risulta sufficiente a tenere in conto dei reali effetti di amplificazione litologica.

Sulla base dei dati calcolati, è stata costruita la Carta di Pericolosità Sismica di II Livello (di cui in seguito si riporta uno stralcio), nella quale è stata eseguita una zonazione per aree omogenee a uguale $F_{a\ 0.1-0.5}$.



SCENARI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

EFFETTI DI INSTABILITA'

-  Z1a - ZONA CARATTERIZZATA DA MOVIMENTI FRANOSI ATTIVI
-  Z1b - ZONA CARATTERIZZATA DA MOVIMENTI FRANOSI QUIESCENTI
-  Z1c - ZONA POTENZIALMENTE FRANOSA O ESPOSTA A RISCHIO DI FRANA

CEDIMENTI E/O LIQUEFAZIONI

-  Z2 - ZONA CON TERRENI DI RIPIERTO

AMPLIFICAZIONI TOPOGRAFICHE

-  Z3b - ZONA DI CRESTA E/O COCUZZOLO

AMPLIFICAZIONI LITOLOGICHE E GEOMETRICHE

-  Z4a - ZONA DI FONDOVALLE CON PRESENZA DI DEPOSITI ALLUVIONALI E/O FLUVIOGLACIALI GRANULARI E/O COESIVI
-  Z4b - ZONA PEDEMONTANA DI FALDA DI DETRITO, CONOIDE ALLUVIONALE

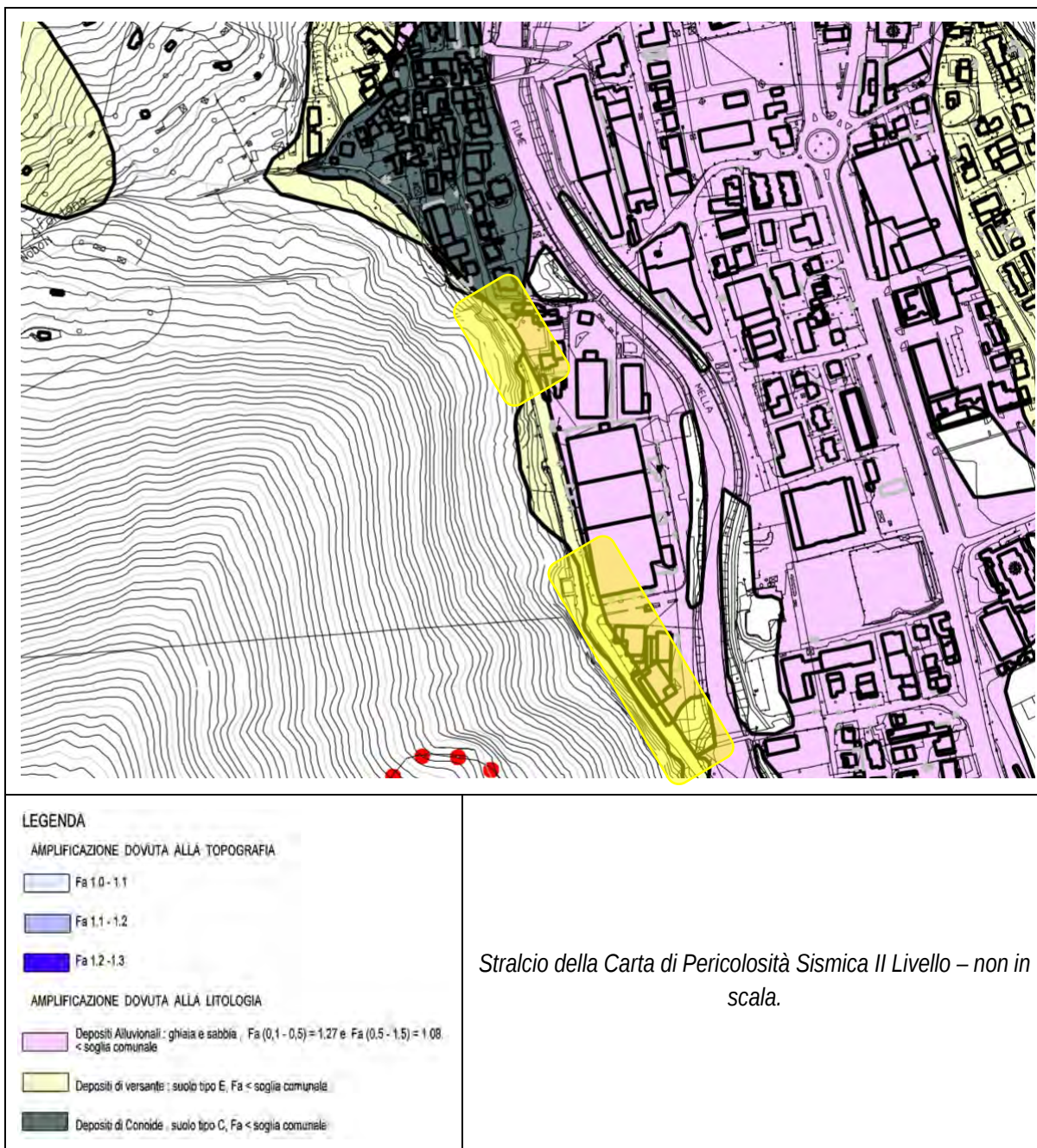
COMPORTAMENTI DIFFERENZIALI

-  Z5 - ZONA DI CONTATTO STRATIGRAFICO E/O TETTONICO TRA LITOTIPI CON CARATTERISTICHE FISICO - MECCANICHE MOLTO DIVERSE

EFFETTI DI BORDO

-  VALLI ALLUVIONALI

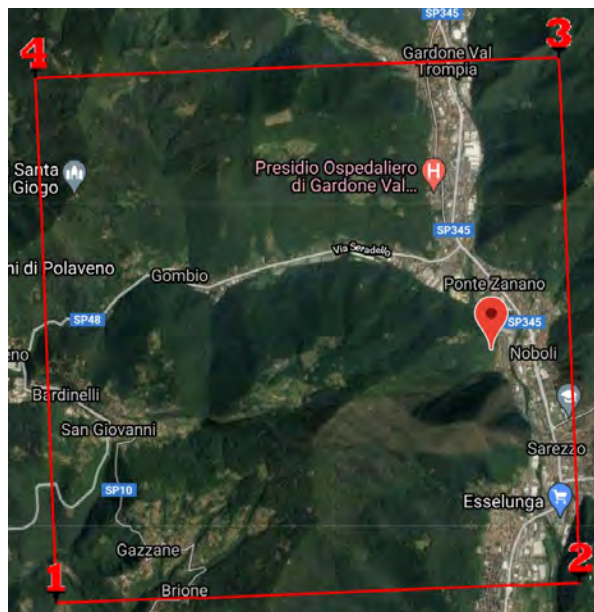
Stralcio della Carta di Pericolosità Sismica I Livello. In giallo le aree comprese nel lotto 2a – non in scala



Compatibilmente con quanto emerso dalle sopradescritte analisi, le aree di intervento ricadono per lo più in corrispondenza di “Depositi di versante: suolo tipo E, $Fa < \text{soglia comunale}$ ” e fuori dalle perimetrazioni di amplificazione litologica. Poiché gli ancoraggi delle strutture previste possono ragionevolmente interessare il substrato roccioso, nella definizione dei caratteri sismici del sito si considera, oltre alla categoria E, anche la categoria A (ammassi rocciosi affioranti).

Caratteri sismici del sito

Regione Lombardia, con D.g.r. 11 luglio 2014 – n.° X/2129 pubblicata sul BURL n° 29 Serie Ordinaria del 16 luglio 2014, ha aggiornato la classificazione sismica dei comuni lombardi: tale classificazione è in vigore, dopo alcune proroghe, dall'aprile 2016 e prevede ora, per il comune di Sarezzo, la zona sismica 3. Mediante un'estensione del Software GeoStru (GeoStru PS) è possibile avere i parametri sismici generali di una qualsiasi zona, con riferimento ad un substrato rigido orizzontale (classe di sottosuolo A). Il software si basa sulla posizione geografica dell'area per la definizione dell'accelerazione sismica prevista; questa a sua volta è definita in determinati punti che formano una maglia di valori di accelerazione estesa a tutto il territorio nazionale. Per la zona di interesse, i dati di accelerazione che si ottengono sono riportati nella figura soprastante. Alla situazione semplificata così ottenuta, bisogna aggiungere le caratteristiche del sito, in particolare l'amplificazione stratigrafica causata dai depositi (dove presenti) e quella topografica. Per valutare questi due aspetti si sono utilizzati **un suolo di categoria "E" e "A" e una categoria topografica T2**, che rispecchiano una situazione di pendio con inclinazione media $i > 15^\circ$ con depositi di versante, accumuli di frana stabilizzati e ammassi rocciosi affioranti.



Sopra l'ubicazione del sito rispetto alle maglie di calcolo del software;

A destra l'output del software Geostru PS



Classe Edificio

II. Affollamento normale. Assenza di funz. pubbliche e sociali...



Vita Nominale

50



Interpolazione

Media ponderata

CU = 1

Stato Limite	Tr [anni]	a_g [g]	F_o	T_c^* [s]
Operatività (SLO)	30	0.039	2.470	0.211
Danno (SLD)	50	0.052	2.415	0.231
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.141	2.423	0.278
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.181	2.453	0.287
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	50			

 Cat. Sottosuolo

A

 Cat. Topografica

T2

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,00	1,00	1,00	1,00
CC Coeff. funz categoria	1,00	1,00	1,00	1,00
ST Amplificazione topografica	1,20	1,20	1,20	1,20

☐ Acc.ne massima attesa al sito [m/s²]

 0.6

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.009	0.013	0.046	0.059
kv	0.005	0.006	0.023	0.029
Amax [m/s²]	0.460	0.617	1.656	2.125
Beta	0.200	0.200	0.270	0.270

Parametri di calcolo: suolo **A**, categoria topografica **T2** per stabilità dei pendii e fondazioni

 Cat. Sottosuolo

E

 Cat. Topografica

T2

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,60	1,60	1,60	1,51
CC Coeff. funz categoria	2,14	2,07	1,92	1,89
ST Amplificazione topografica	1,20	1,20	1,20	1,20

☐ Acc.ne massima attesa al sito [m/s²]

 0.6

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.015	0.020	0.065	0.079
kv	0.008	0.010	0.032	0.039
Amax [m/s²]	0.736	0.987	2.650	3.209
Beta	0.200	0.200	0.240	0.240

Parametri di calcolo: suolo **E**, categoria topografica **T2** per stabilità dei pendii e fondazioni

DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI FRANOSITA'

Anche in questo caso di fatto si sono mutate le considerazioni condotte nel 2022, che si sintetizzano nel seguito.

Modello geotecnico del terreno

Come accennato in precedenza, i rilievi svolti sono stati condizionati da questioni logistiche. Infatti, non tutte le zone dei versanti sono risultate perlustrabili sia direttamente che tramite volo con drone; infatti le elevate pendenze e la fitta vegetazione che ricopre i pendii in esame rendono difficilmente raggiungibili ed osservabili eventuali ammassi e/o zone di subaffioramento e di detrito. Ciò nonostante, alla luce dei suddetti rilievi, è stato possibile eseguire una discreta caratterizzazione geologica, che ha consentito di individuare, lungo il versante, due grossi domini:

ZONA SUD

- Detrito di versante: deposito composto da un insieme eterogeneo e eterometrico di depositi di versante e depositi colluviali, in cui sono frequenti blocchi di dimensioni notevoli associati a un detrito sensibilmente più sottile e, frequentemente, soffice e cedevole. Isolati volumi si possono osservare appoggiati ai più grandi alberi o ai più folti gruppi di giovani latifoglie. I volumi medi dei singoli blocchi raggiungono dimensioni di circa si attestano attorno a 0.25 – 0.35 mc, mentre i massimi volumi misurati raggiungono circa 1,2 – 1,3 mc.

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche di tali depositi, si considerano i seguenti parametri tratti da PGT:

- o $\phi = 30-35^\circ$;
- o $c = 0 \text{ KPa}$;
- o $\gamma = 18-20 \text{ KN/m}^3$.
- Substrato affiorante/subaffiorante: lungo il versante compreso nella Zona Sud spesso il substrato roccioso si presenta subaffiorante e/o sottoforma di piccoli affioramenti ed è costituito dalle litologie del Medolo e della formazione di Concesio. Alla base del versante gli affioramenti risultano nettamente più evidenti, dove di fatto costituiscono piccole pareti localizzate a bordo strada, alcune di queste con reti in aderenza a protezione della viabilità. Generalmente l'ammasso roccioso in tali affioramenti risulta interessato da diverse famiglie di discontinuità (S, K1, K2, K3), fra le quali spicca la stratificazione, ben distinta e sufficientemente fitta.

I parametri caratteristici equivalenti dell'ammasso roccioso determinati dai rilievi effettuati in sito, sono i seguenti:

- o RMR: 52-55
- o Angolo di attrito di picco ($^\circ$): 30-34
- o Angolo di attrito residuo ($^\circ$): 25-28
- o Coesione di picco (kPa): 260-290
- o Coesione residua (kPa): 210-230

Suddivisione delle aree e volumi di riferimento

Raccogliendo i dati acquisiti si è proposta una suddivisione in aree di analisi in zone omogenee, per ognuna delle quali è possibile identificare dei volumi di riferimento per gli eventi di instabilità.

I volumi di riferimento sono stati definiti sulla base dei blocchi misurati in sito e da volumi stimati da eventi storicamente registrati, con il limite che per le zone alte del versante non si hanno dati in quanto aree molto difficili da raggiungere e fittamente vegetate. Sono anche aree esterne alle zone identificate dal PAI e dallo studio geologico come zone di crollo e per le quali non vi è storico di fenomeni accaduti, rimangono comunque aree che introducono una certa incertezza nel modello.

Si sono quindi individuati 2 volumi indice di caduta massi caratteristico di queste zone e, quindi, utilizzati nelle simulazioni:

- V1 (ordinario): pari a 0.5mc;
- V2 (poco frequente): pari a 1.5 mc.

Non è possibile a priori escludere che si possano verificare eventi con volumi anche più elevati di cui non si ha storico di eventi accaduti e, nelle aree di rilievo, non si sono ritrovati elementi.

È stata quindi eseguita una suddivisione dei pendii in aree omogenee, di cui quelle coinvolte nel progetto sono la 7 e la 8:

- Area 7: zona molto ampia sia in senso orizzontale che in quota, caratterizzata dalla diffusa presenza di piccoli affioramenti e di blocchi sparsamente immersi nel deposito superficiale. Volumi di riferimento V1 e V2 con origine lungo tutto il pendio, il quale ha pendenze elevate e conduce a una zona di falda di detrito a pendenze minori, prima di raggiungere Via San Bernardino. Presenza di impluvi che possono concentrare le traiettorie e essere sede di trasporto di materiale in caso di forti piogge.
- Area 8: area meridionale in cui sono evidenti modeste pareti a ridosso di Via San Bernardino, localmente sovrastate da ulteriori pareti rocciose, di entità sempre ridotta. Presenza di impluvi in roccia che trasportano materiale solido in caso di forti piogge. Volumi di riferimento V1 e V2 con origine dalle

MODELLAZIONE DI CADUTA MASSI

Come approfondimento di quanto contenuto nel progetto del 2022 è stata condotta una modellazione di caduta massi bidimensionale su tre sezioni dedicate al sito di progetto, si tratta di sole tre sezioni e quindi non di tutta l'area che è molto ampia e difficilmente può essere ricompresa tutta con elevate analisi.

Il profilo delle sezioni è stato ottenuto utilizzando l'esistente DEM 5x5 costruito per il modello 3D estese sino alle aree perimetrate come zone di crollo del PAI e dello studio geologico comunale, ovvero le zone soggette a vincolo geologico. Le sezioni non coprono la parte alta del pendio.

Le sezioni ottenute sono integralmente riportate nella tavola grafica dedicata, assieme ai principali grafici riassuntivi dei risultati.

I parametri di simulazione utilizzati sono stati mutuati dalla taratura del 2022, e si riportano nel seguito.

Descrizione	Rn (min/max)	Rt (min/max)	Rugosità (m)
Roccia integra	0.9	0.8	0
Roccia alterata	0.7	0.7	0.2
Sabbia	0.4	0.6	0
Detrito	0.6	0.6	0
Detrito fino	0.32	0.82	0
Detrito vegetato	0.29	0.8	0
Detrito con arbusti	0.3	0.7	0.3
Terreno o prato	0.31	0.79	0.1
Superficie pavimentata	0.4	0.9	0

Materiali utilizzati:

- Roccia alterata → subaffioramento e affioramento roccioso
- Detrito con arbusti → deposito di falda in zona pedemontana
- Terreno o prato → zona della piana (inserito solamente per consentire l'arresto dei blocchi)

Con questi settaggi si è proceduti alla simulazione, per ogni sezione, della caduta dei due volumi di riferimento. Le aree di lancio sono state fatte coincidere con le quelle definite per le simulazioni 3D.



Ubicazione delle sezioni di calcolo – non in scala

L'estensione verso monte delle sezioni è stata in parte limitata dalla distribuzione del dato topografico, come ad esempio per la sezione 1, ma in genere si è scelto di andare a dettagliare il tratto terminale del versante, come detto, nelle aree PAI e di crollo dello studio geologico comunale.

Oltre a questo, non è stato possibile raccogliere dati descrittivi esaustivi per la parte più alta del pendio, principalmente per problematiche di accessibilità dei siti e di copertura boscosa che ha limitato la possibilità di compensare con fotografie da drone: di fatto quindi non si hanno elementi per caratterizzare compiutamente le informazioni di base da inserire nelle simulazioni, quali ad esempio aree sorgente di crollo, forma e dimensione dei massi. A questo si aggiunge anche il fatto che la topografia di base, a bassa risoluzione, non consente di cogliere gli aspetti di microtopografia che possono condizionare l'andamento planimetrico e i rimbalzi delle traiettorie: di fatto quindi, simulare la caduta massi per distanze così elevate con questo fattore di incertezza produce dei risultati che non sono ben controllabili e questo potrebbe introdurre grossi errori di valutazione.

Le incertezze appena espresse si traducono nella possibilità che vi siano situazioni con propagazione di blocchi dalle parti più elevate del versante che potrebbero non essere ben descritte dalle analisi 2D che potrebbero presentarsi come eventi con energie e soprattutto altezze di rimbalzo anomale, anche maggiori rispetto a quelle calcolate per cui nel dimensionamento delle barriere sarà necessario introdurre un certo margine di sicurezza rispetto ai risultati delle simulazioni.

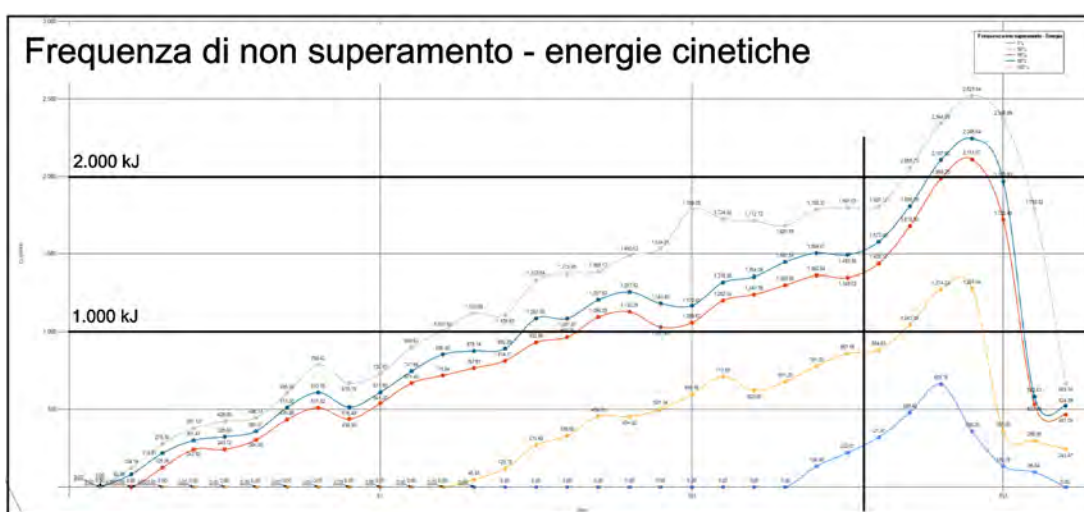
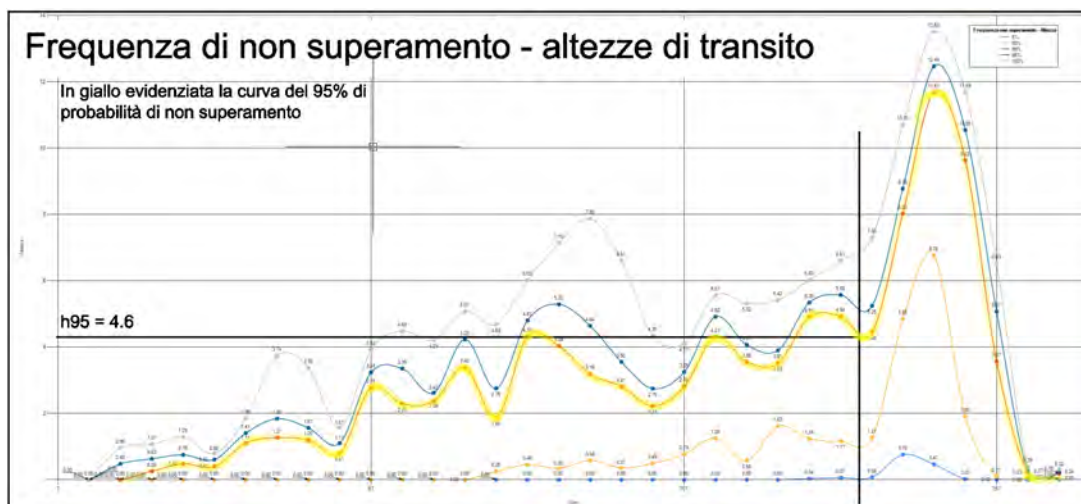
A livello pratico, per ogni simulazione sono stati eseguiti 1000 lanci. Per far lavorare correttamente l'algoritmo di calcolo del modello (CRSP – Colorado Rockfall Simulation Program) si è assegnata ai blocchi una velocità iniziale di 3 m/s sia in orizzontale che in verticale.

Per ogni scenario calcolato sono stati valutati:

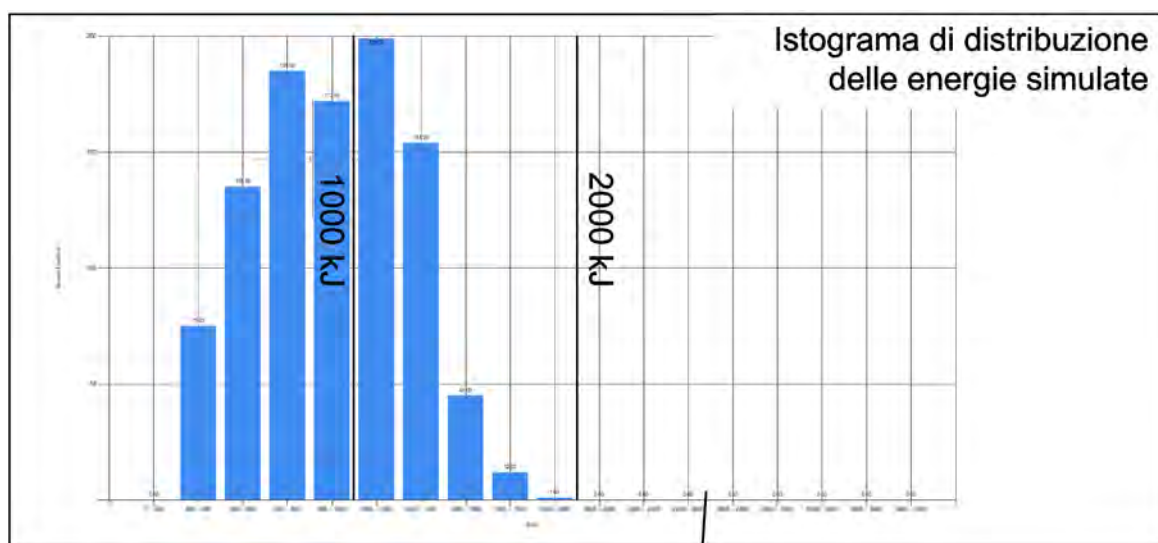
- andamento dell'energia cinetica lungo la traiettoria (esempio nello stralcio sottostante, scenario M2);
- altezza dei rimbalzi lungo la traiettoria (esempio nello stralcio sottostante, scenario M2);

Il software fornisce come risultato dei grafici che mostrano, lungo tutta la sezione, **le probabilità di non superamento** del parametro analizzato per dei percentili significativi: 0%, 50%, 95%, 98% e 100%. In sostanza, considerando ad esempio il grafico delle altezze, fissata una certa progressiva lungo la sezione e riportata in ascissa del grafico, il 95% dei blocchi simulati non supera l'altezza indicata dalla linea 95%, mentre la metà non supera l'altezza indicata dalla linea 50% e, infine, la simulazione non ha ottenuto valori superiori a quelli riportati alla linea 100%. Di particolare interesse in questo senso sono i valori riferiti alla linea del 95%, in particolare per le altezze di rimbalzo.

Si riportano nel seguito gli esempi dei grafici delle altezze e delle energie riferiti alla sezione 1, scenario 2, in cui la linea evidenziata nel grafico delle altezze corrisponde alla probabilità di non superamento del 95%, ovvero il parametro h95.



Il software di calcolo consente inoltre di valutare puntualmente le energie in una precisa progressiva di interesse, nella forma di un istogramma di frequenza con ampiezza della classe definita dall'utente. Si riporta nel seguito uno stralcio di esempio tratto sempre dalla sezione 1, scenario 2.



SINTESI DEI RISULTATI

Caratteristiche tecniche dei mezzi geologici

Come descritto nei precedenti paragrafi, è possibile individuare le seguenti caratteristiche riferite ai mezzi geologici coinvolti dalle opere di progetto

- Detrito di versante: deposito composto da un insieme eterogeneo e eterometrico di depositi di versante e depositi colluviali, in cui sono frequenti blocchi di dimensioni notevoli associati a un detrito sensibilmente più sottile e, frequentemente, soffice e cedevole. Isolati volumi si possono osservare appoggiati ai più grandi alberi o ai più folti gruppi di giovani latifoglie. I volumi medi dei singoli blocchi raggiungono dimensioni di circa si attestano attorno a 0.25 – 0.35 mc, mentre i massimi volumi misurati raggiungono circa 1,2 – 1,3 mc.

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche di tali depositi, si considerano i seguenti parametri tratti da PGT:

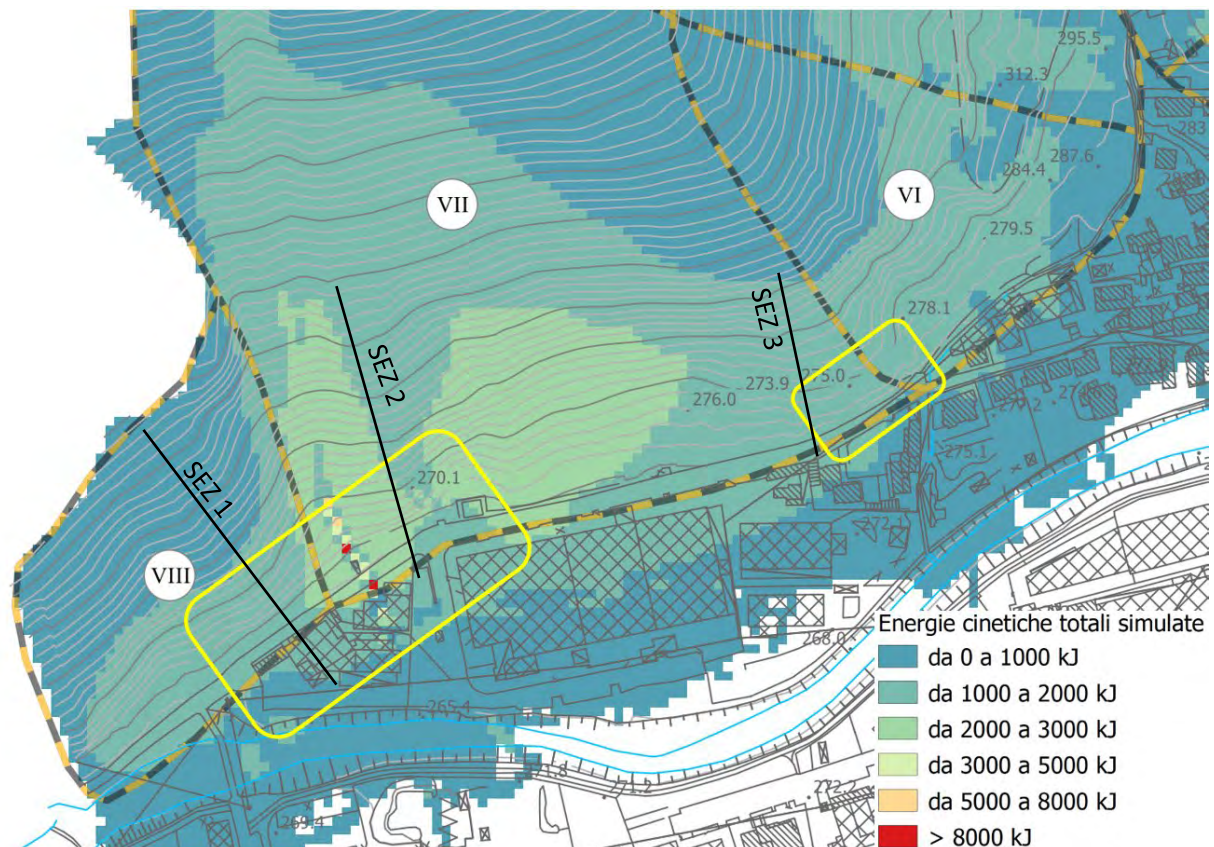
- o $\phi = 30-35^\circ$;
 - o $c = 0$ KPa;
 - o $\gamma = 18-20$ KN/m³.
-
- Substrato affiorante/subaffiorante: lungo il versante compreso nella Zona Sud spesso il substrato roccioso si presenta subaffiorante e/o sottoforma di piccoli affioramenti ed è costituito dalle litologie del Medolo e della formazione di Concesio. Alla base del versante gli affioramenti risultano nettamente più evidenti, dove di fatto costituiscono piccole pareti localizzate a bordo strada, alcune di queste con reti in aderenza a protezione della viabilità. Generalmente l'ammasso roccioso in tali affioramenti risulta interessato da diverse famiglie di discontinuità (S, K1, K2, K3), fra le quali spicca la stratificazione, ben distinta e sufficientemente fitta.
- I parametri caratteristici equivalenti dell'ammasso roccioso determinati dai rilievi effettuati in sito, sono i seguenti:

- o RMR: 52-55
- o Angolo di attrito di picco ($^\circ$): 30-34
- o Angolo di attrito residuo ($^\circ$): 25-28
- o Coesione di picco (kPa): 260-290
- o Coesione residua (kPa): 210-230

Sintesi simulazioni di caduta massi

Per la valutazione delle energie di progetto il blocco dimensionante è quello di volume maggiore (1.5 mc), per cui nelle seguenti descrizioni si fa implicitamente riferimento a questo scenario.

Le simulazioni 3D condotte nel 2022 forniscono una prima indicazione circa la distribuzione delle energie cinetiche attese per i siti di progetto, come da stralcio di seguito riportato.

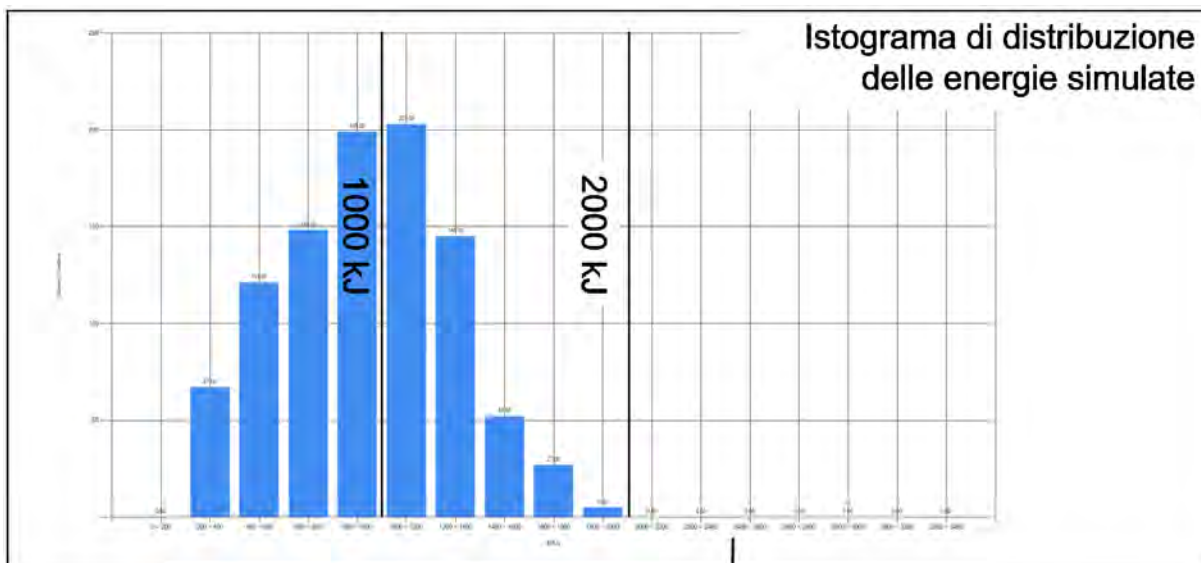
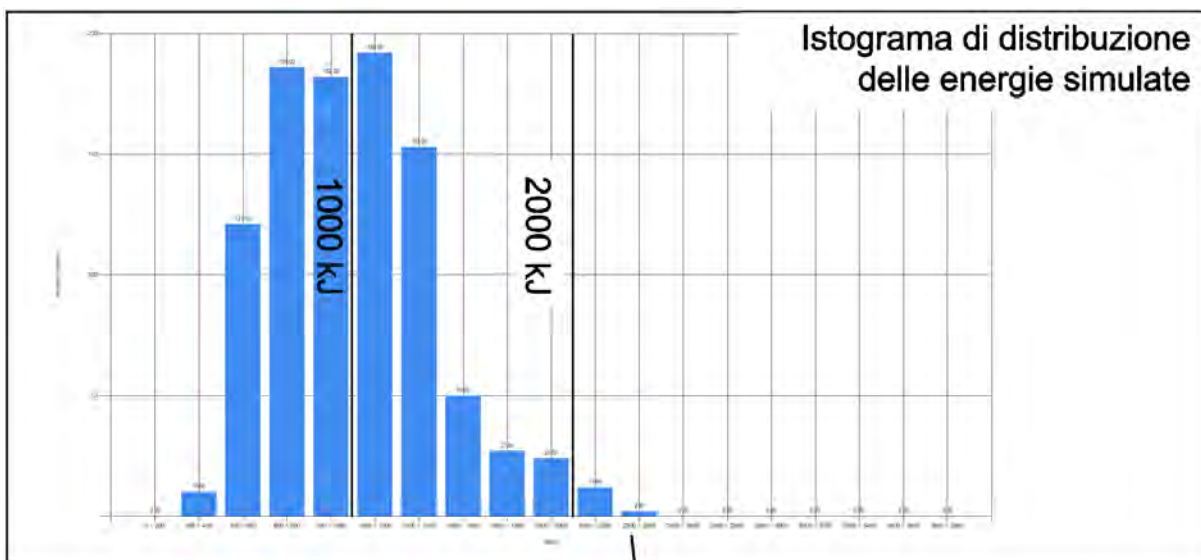
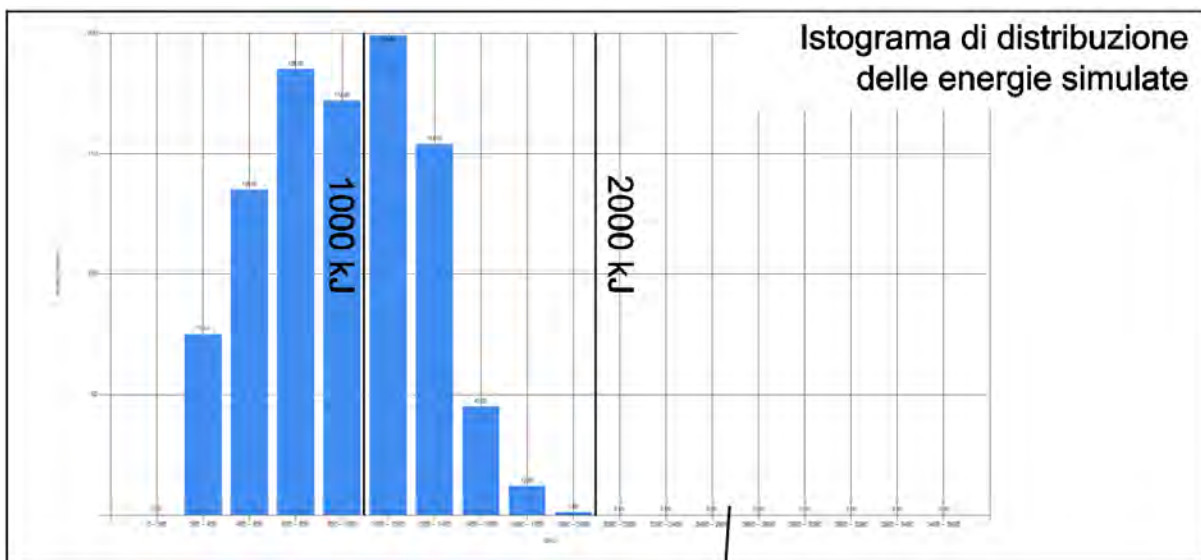


I valori ottenuti da queste simulazioni indicano energie comprese tra 1000 e 2000 kJ per gran parte delle aree, con però le zone centrali del settore meridionale che mostrano valori tra 2000 e 3000 kJ.

Tali risultati sono in parte ripresi dalle simulazioni bidimensionali, in cui in genere i valori di energia risultano minori, spesso compresi nei 2000 kJ, ma con valori occasionali molto prossimi o superiori, specie nel caso della sezione 2 che si sviluppa nell'area dove anche il 3D indica energie maggiori. Nella zona a nord le energie tendono a essere complessivamente più ridotte.

Questa situazione è compatibile con la ridotta estensione delle sezioni di simulazione bidimensionale, che considerando tratti di minore estensione portano globalmente a energie leggermente inferiori. Tuttavia, l'ordine di grandezza dei due risultati è certamente comparabile e porta a indicare una concreta possibilità di avere blocchi con energie tra 2.000 e 3.000 kJ all'altezza delle opere di progetto.

Si riportano nella pagina successiva stralci della distribuzione delle energie calcolate in corrispondenza delle opere di progetto.



Istogrammi di frequenza delle energie simulate all'altezza delle barriere di progetto. Da sopra a sotto: sezione 1, sezione 2 e sezione 3.

In queste aree si rende quindi necessario installare barriere paramassi con capacità di assorbimento nell'ordine dei 3000 kJ.

La valutazione delle altezze di rimbalzo è molto complessa e non comprende eventuali blocchi che si possono staccare dalla parte alta del pendio ed è stata eseguita esclusivamente tramite le sezioni di calcolo bidimensionali, più affidabili in questo senso rispetto al 3D. Di particolare interesse è l'andamento della curva del 95% di probabilità di non superamento, che indica l'andamento del parametro h_{95} . Di seguito stralci dei grafici che rappresentano questi valori, per le tre sezioni. In questo caso il blocco dimensionante è spesso quello di minore dimensione, che mostra una maggiore propensione al rimbalzo. L'andamento delle altezze non mostra particolari punti di collocazione preferenziale delle barriere, che dovranno essere poste a monte del salto topografico prossimo alla strada, ma in genere collocate in sito in base alle irregolarità locali evidenziate a seguito della pulizia dalla vegetazione. Rimane, come già più volte espresso, un livello di incertezza del dato di altezza massima che, per blocchi che si dovessero distaccare dalla parte alta del pendio potrebbe essere anche diverso da quello calcolato. Questa incertezza è difficilmente eliminabile tanto è che le opere che si realizzano sono da intendersi come opere di mitigazione del rischio e non certo di sua eliminazione. In sostanza si ritiene che non si possano e debbano modificare i vincoli geologici delle aree di dissesto anche in presenza delle opere che, per loro natura, sono opere che subiscono importanti danni all'impatto dei massi.

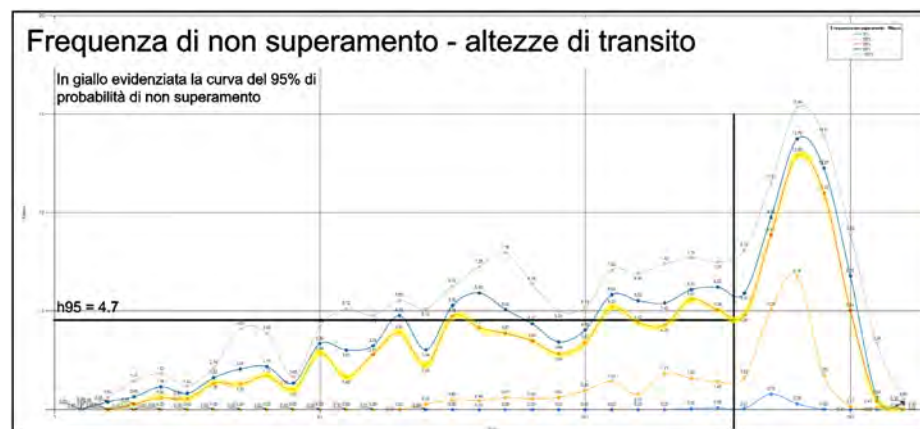


Grafico delle frequenze di non superamento per le altezze, con evidenziata la curva del 95%. Sezione 1.

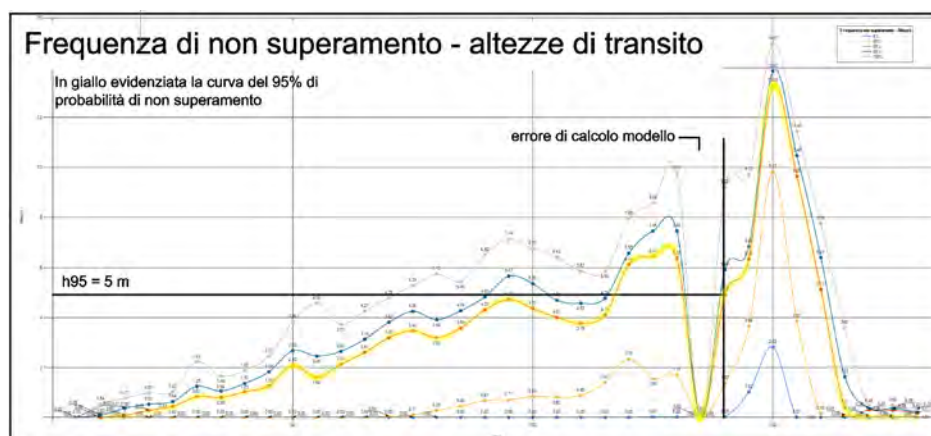


Grafico delle frequenze di non superamento per le altezze, con evidenziata la curva del 95%. Sezione 2

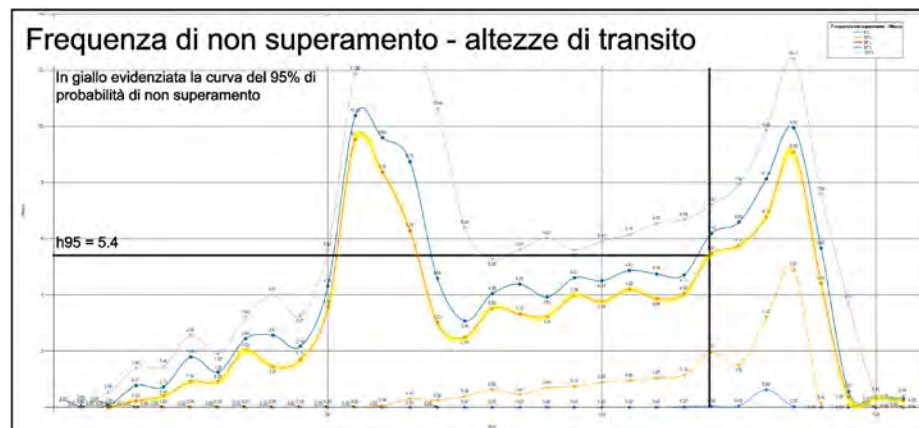


Grafico delle frequenze di non superamento per le altezze, con evidenziata la curva del 95%. Sezione 3.

Indicazioni progettuali

In considerazione di quanto riportato nei precedenti paragrafi e capitoli di questa relazione, si possono fornire le seguenti indicazioni progettuali.

Data la tipologia di fenomeno in sito, si ritiene che il miglior approccio di mitigazione sia costituito dall'utilizzo di opere di difesa passive, nella forma di barriere paramassi ad elevato assorbimento, di cui si possono definire alcune caratteristiche salienti:

- La barriera esistente è da considerarsi non adeguata alla magnitudo dei fenomeni attesi, anche a seguito di pulizia della stessa. Questa struttura dovrà quindi essere coperta a monte da una barriera più performante.
- L'altezza delle barriere dovrà essere valutata a partire dal parametro h_{95} , applicando un fattore di sicurezza adeguato (generalmente assunto pari a 1.2) e aggiungendo un franco pari al raggio del blocco di progetto, comunque non inferiore a 0.5m. Il valore risultante dovrà quindi essere considerato, in associazione al livello energetico richiesto, nel dimensionamento delle opere, tenendo chiaramente conto del fatto che ci sono dei limiti tecnici all'altezza delle barriere oltre i quali non si può andare. Vi è infatti un certo margine di incertezza per eventi di crollo dalla parte alta dei versanti che potrebbero produrre altezze di rimbalzo anche molto diverse da quelle considerate. Si tratta di eventi che non hanno riscontro nello storico e che non sono considerati nel PAI e nello studio geologico comunale. Le aree di crollo verificate con modello riprendono difatti le zone perimetrate nello studio geologico come zone di crollo dei massi (cfr. paragrafi precedenti).
- Benché le simulazioni bidimensionali condotte indichino energie dei blocchi generalmente inferiori a 2.000 kJ, la presenza di alcuni valori maggiori di tale soglia e la distribuzione delle energie ottenuta dalle simulazioni 3D del 2022 porta a ritenere più adeguata la scelta di una barriera da 3.000 kJ, anche in considerazione delle incertezze connesse al processo di simulazione, esposte nei capitoli dedicati.
- L'andamento delle energie e delle altezze di rimbalzo non pone particolari vincoli al posizionamento planimetrico delle barriere se non quello di mantenersi a monte delle pareti rocciose presenti a lato strada.

L'esatta ubicazione della linea dovrà quindi essere stabilita direttamente in sito in funzione di ostacoli e vincoli locali e della necessità di sovrapporre tra loro le diverse barriere.

- Gli affioramenti rocciosi che si sviluppano a valle delle barriere dovranno essere coperti da reti in aderenza, in modo da evitare il distacco di blocchi da queste aree. La barriera esistente potrà in questo caso essere svuotata in modo che funga da trattenuta per i piccoli blocchi distaccatisi a valle della nuova barriera, consentendo di non installare le reti in aderenza in quel tratto.

Si vuole sottolineare in chiusura come quelle previste in progetto sono opere di **mitigazione del rischio**: questo significa che non lo annullano completamente, pur apportando evidenti e consistenti benefici alle aree sottostanti.

Il livello di incertezza riferito ad eventi di crollo da parti alte del versante (non raggiungibile ed analizzabile) impone che si debbano mantenere i vincoli geologici delle aree di dissesto anche dopo l'esecuzione delle opere che sono appunto intese come opere di mitigazione del rischio.

In particolare, alcuni fattori possono portare a problemi non previsti alle strutture:

- distacco di blocchi multipli o eventi di franosità superficiale nella parte alta del versante: le barriere paramassi lavorano dissipando l'energia del blocco tramite la deformazione di alcuni appositi componenti. A seconda dell'energia di impatto, la barriera può deformarsi al punto di non essere più in grado di trattenere ulteriori blocchi: nel caso di crolli che producono blocchi multipli ciò può tradursi in impatti consecutivi sulla struttura, potenzialmente portandola in crisi. Questo scenario non è da escludere in generale lungo il pendio di analisi, e questo concorre a giustificare l'utilizzo di strutture ad elevate prestazioni in grado di assorbire impatti multipli con energie maggiori rispetto a strutture meno performanti;
- scarsa manutenzione delle strutture: per lo stesso processo di deformazione descritto in precedenza, le barriere possono perdere efficienza nel tempo, se non correttamente mantenute, al punto che possono cedere a seguito di impatti meno energetici rispetto a quelli di progetto. In questo senso l'installazione di sistemi di allerta (che è comunque un requisito prescritto dalla normativa) è decisamente utile per migliorare la resa della struttura a lungo termine e per intervenire tempestivamente in caso di necessità di manutenzione dopo impatti significativi.
- frammentazione dei blocchi o rimbalzi anomali dovuti a microtopografia non correttamente colta dalla base disponibile: in questi casi si possono indurre rimbalzi anomali che possono portare a scavalcare la struttura. Queste situazioni sono mitigate dall'approccio di simulazione statistico e dall'utilizzo di adeguati fattori di sicurezza in fase progettuale.

Lo scrivente resta disponibile per eventuali sopralluoghi in sito in fase di realizzazione dell'opera

Darfo Boario Terme, maggio 2024

Geol. Luca Maffeo Albertelli