

	REGIONE LOMBARDIA - PROVINCIA DI BRESCIA COMUNE DI PISOGNE					
OGGETTO:	MESSA IN SICUREZZA STRADA PER SONVICO A SEGUITO DEL CROLLO DELLA GALLERIA DI PROTEZIONE. LOTTO 2: STRADA ALTERNATIVA TEMPORANEA, SMARINO DEL MATERIALE, ULTERIORE DISGAGGI E SISTEMA DI MONITORAGGIO CUP: D57G26000120006.					
COMMITTENTE:	Comune di Pisogne Viale Vallecamonica 2 25055 - Pisogne - BS					
COMMESSA:	L.431.26	ELABORATO:	L.431.26.PFTE.E.400	DATA:	GIUGNO 2026	
TITOLO:	RELAZIONE GEOLOGICA			SCALA:	Doc.	
VERSIONE:	DATA	DESCRIZIONE		RED.	VER.	APP.
SPAZIO RISERVATO ALL'UFFICIO TECNICO:				PROGETTO:	TECNICO INCARICATO PER LO STUDIO GEOLOGICO: Geol. Iuri Dino Tagliaferri Via A. Caprani, 6 25053 - Malegno (Brescia) tel. 333.2707462 - iuri.tagliaferri@gmail.com pec iuri.tagliaferri@pec.epap.it p.iva 03975330980 - c.f. TGLRDN92H11B149Y	
IL R.U.P.:						
IL SINDACO:						
TOLLERANZE:	TUTTE LE MISURE SI INTENDONO +/- 0.01 MT, SE NON DIVERSAMENTE SPECIFICATO					
La proprietà di questi disegni è riservata, a termine di legge, allo studio d'ingegneria Luca Vitali. E' fatto divieto di riprodurlo o renderlo noto a terzi senza precisa autorizzazione						

Indice

PREMESSA	2
INQUADRAMENTO.....	4
INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	4
INQUADRAMENTO GEOLOGICO	6
EVENTO DI DISSESTO DEL DICEMBRE 2025	9
DESCRIZIONE DEL PROGETTO	16
FASE DI INDAGINE.....	21
BASE TOPOGRAFICA DI RIFERIMENTO	21
STATO DEI LUOGHI E INDAGINI ESEGUITE.....	22
<i>Rilievo geologico di dettaglio.....</i>	<i>23</i>
<i>Tomografia sismica in onde P.....</i>	<i>29</i>
<i>Sismica passiva HVSR.....</i>	<i>32</i>
<i>Dettaglio affioramento roccioso presso il tornante 1 (tavola grafica E.404).....</i>	<i>44</i>
<i>Valutazione del volume di materiale roccioso accumulato sulla strada</i>	<i>49</i>
FASE DI ELABORAZIONE E INTERPRETAZIONE DEI DATI.....	52
VINCOLI GEOLOGICI.....	52
<i>Fattibilità.....</i>	<i>52</i>
<i>PAI-PGRA (Piano di Assetto Idrogeologico e Piano Gestione Rischio Alluvioni).....</i>	<i>53</i>
<i>IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia).....</i>	<i>54</i>
<i>CLPV (Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe)</i>	<i>55</i>
<i>Pericolosità Sismica Locale (PSL).....</i>	<i>56</i>
CARATTERI SISMICI DEL SITO.....	57
CONSIDERAZIONE IN MERITO ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI	59
FASE DI SINTESI.....	60
MODELLO GEOLOGICO SEMPLIFICATO DI RIFERIMENTO (MGR).....	60
<i>Tracciato della strada di bypass.....</i>	<i>60</i>
<i>Tornante tra le sezioni di progetto 109 e 113.....</i>	<i>63</i>
<i>Settore della frana di Sonvico</i>	<i>66</i>

PREMESSA

La presente relazione GEOLOGICA è stata commissionata allo scrivente come supporto geologico al progetto di *“Messa in sicurezza strada per Sonvico a seguito del crollo della galleria di protezione – Lotto 2: strada alternativa temporanea, smarino del materiale, ulteriori disaggi e sistema di monitoraggio”*, di cui compone lo studio geologico assieme alle associate tavole grafiche, come da elenco elaborati di seguito riportato:

E - STUDIO GEOLOGICO						
L	.431	.26	.PFTE	.E	.400	Relazione geologica
L	.431	.26	.PFTE	.E	.401	Tavola fotografica
L	.431	.26	.PFTE	.E	.402	Tavola delle indagini e del rilevamento geologico
L	.431	.26	.PFTE	.E	.403	Tavola geologica interpretativa
L	.431	.26	.PFTE	.E	.404	Dettaglio geologico tornante fra le sez. 109 e 113
L	.431	.26	.PFTE	.E	.405	Dettaglio geologico frana Sonvico

A seguito dell'evento di crollo del 27 dicembre 2025 che ha comportato l'interruzione della viabilità di collegamento con le frazioni montane di Sonvico e Fraine, il Comune di Pisogne ha predisposto una serie di azioni e interventi volti a ripristinare il collegamento tra le frazioni e il fondovalle.

Il primo passo ha visto la demolizione con esplosivo di una porzione di versante in condizioni di precaria stabilità nella zona della frana, operazione propedeutica a ripristinare un seppur minimo livello di stabilità e sicurezza per le aree, condizione necessaria all'ipotesi di portare maestranze nella zona per liberare il materiale e, successivamente, consentire le azioni di messa in sicurezza che verranno valutate in dedicata sede. Queste attività sono state finalizzate dopo che il Comune di Pisogne ha, congiuntamente definito con Regione Lombardia e con UTR di Brescia, le fasi operative e funzionali per la risoluzione di una problematica così complessa.

Il presente progetto contempla quindi il secondo step delle azioni condivise con gli enti, ovvero la realizzazione della viabilità alternativa temporanea tramite l'adeguamento dell'esistente pista che collega l'abitato di Sonvico a Via Ronchi, bypassando la zona di frana. La viabilità esistente è sostanzialmente una mulattiera, sterrata o acciottolata, ad oggi solo in parte percorribile in auto, comunque con attenzione e in condizioni di scarsa sicurezza; il tratto terminale, compreso tra l'abitato di Sonvico e il ponte sul Torrente Valle San Martino, è invece troppo ripido, stretto e tortuoso, e può essere percorso solamente a piedi, in motocicletta o con piccoli mezzi quali quad o piccoli trattori, anche in questo caso con una certa difficoltà in coincidenza degli stretti tornanti che ne caratterizzano il tracciato, e comunque in condizioni di scarsa sicurezza. Oltre all'adeguamento di questa carrareccia, che prevedrà variazioni di tracciato per adeguare larghezza, livelletta e raggi di curvatura, il progetto si occupa della fase di sgombero del materiale roccioso depositato sulla viabilità principale a seguito della frana e delle operazioni di disaggio e demolizione con esplosivo, con l'obiettivo di rendere la viabilità principale transitabile per i soli mezzi di soccorso ed eccezionalmente per i mezzi il cui transito sulla viabilità temporanea non è possibile. Il progetto prevede inoltre l'ampliamento del sistema di monitoraggio e allerta esistente, che sarà utilizzato per gestire il transito lungo la strada principale una volta sgomberata. Transito solo di carattere occasionale, in emergenza, per mezzi di soccorso dei Vigili del Fuoco e Sanitari.

Resterà quindi in capo a successivi studi e progetti la definizione delle condizioni di stabilità residua dell'ammasso roccioso nella zona di frana, tramite apposite e approfondite modellazioni da cui deriveranno le indicazioni per gli interventi di messa in sicurezza dell'area di frana per l'eventuale ripristino della viabilità principale. Sulla base di questi studi andranno anche definite le soglie di deformazione su cui si baserà il sistema di allerta la cui installazione è prevista in questo progetto, ma che nel frattempo funzionerà con un semplice criterio "acceso-spento".

La presente relazione, assieme ai dedicati elaborati grafici, costituisce lo studio geologico a supporto del progetto e come tale s'incentra principalmente sulla valutazione dei caratteri geologici del tracciato della viabilità alternativa temporanea di progetto, integrata, dove logisticamente possibile, dall'esecuzione di indagini geofisiche e dedicate approfondimenti geomeccanici; sono inoltre riportate delle valutazioni per l'area di frana, riguardanti principalmente la stima dei volumi di materiale presenti sulla sede stradale.

La presente relazione geologica ha pertanto lo scopo di definire i caratteri geologici, geomorfologici e 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 e relativa circolare esplicativa.
- D.G.R. 11 luglio 2014 n.2129 "aggiornamento delle zone sismiche di Regione Lombardia"

Con 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 finalizzato alla realizzazione delle opere.

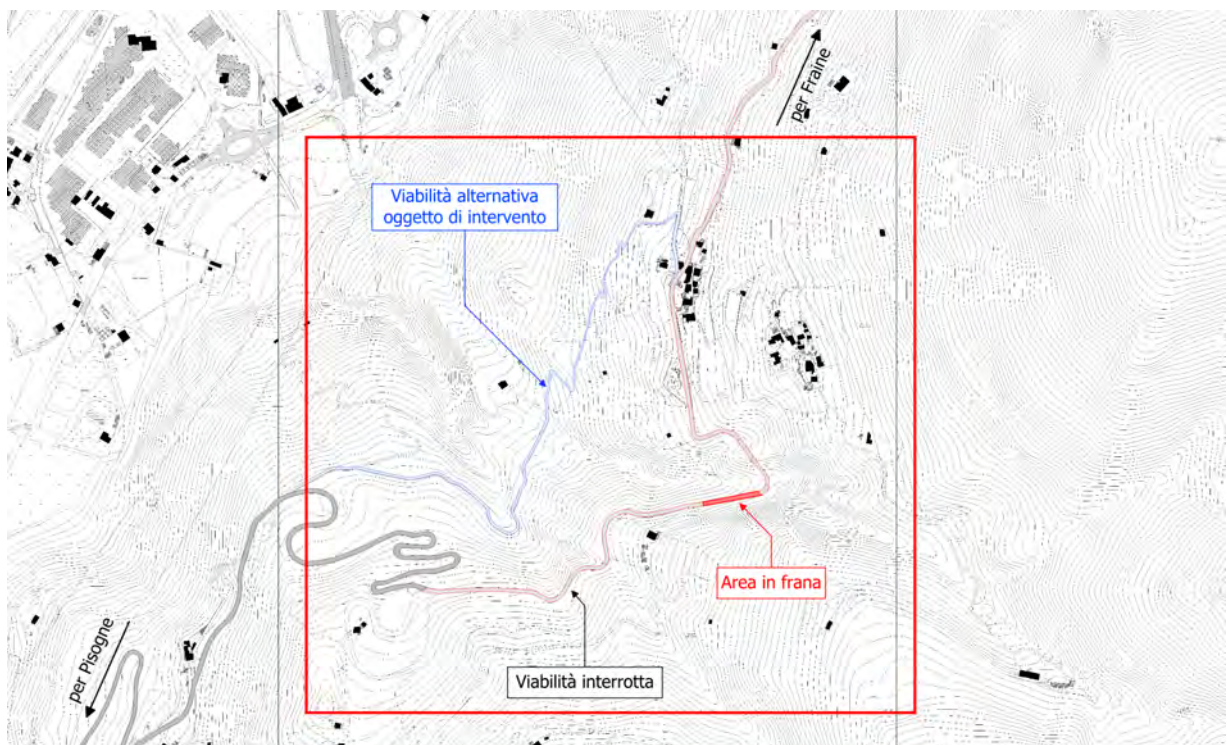
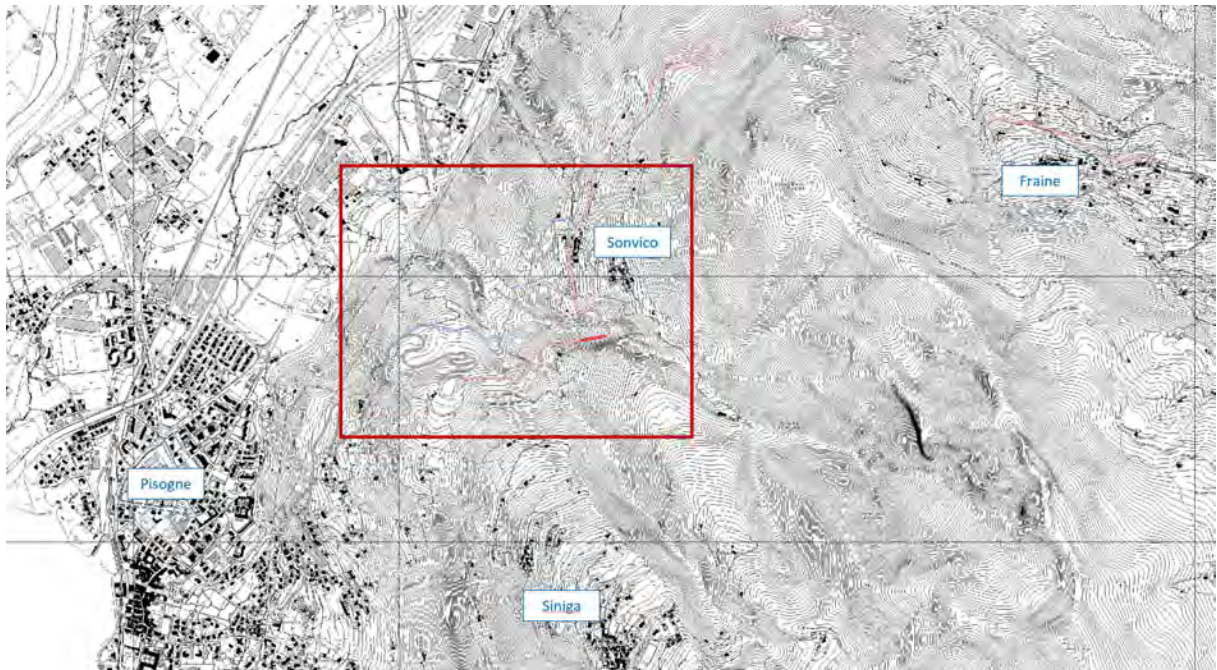
La presente relazione è inoltre da intendersi quale esclusivo svincolo alla fattibilità dell'intervento, non prendendo in considerazione gli aspetti geotecnici delle opere, che sono disciplinati dalla normativa di settore (D.M. 2018 § 6.2.2 e § 6.2.2 della Circolare) e trattati nella fase di progettazione geotecnica/strutturale sviluppata nella progettazione.

L'incarico affidato prevede anche l'esecuzione di indagini in sito che, per difficoltà operative evidenti di cantieristica e accessibilità dei luoghi e per ristrettezza dei tempi disponibili per la chiusura dello studio, si sono concretizzate in indagini geofisiche di tomografia sismica e acquisizioni di indagini sismica passiva con metodo HVSr.

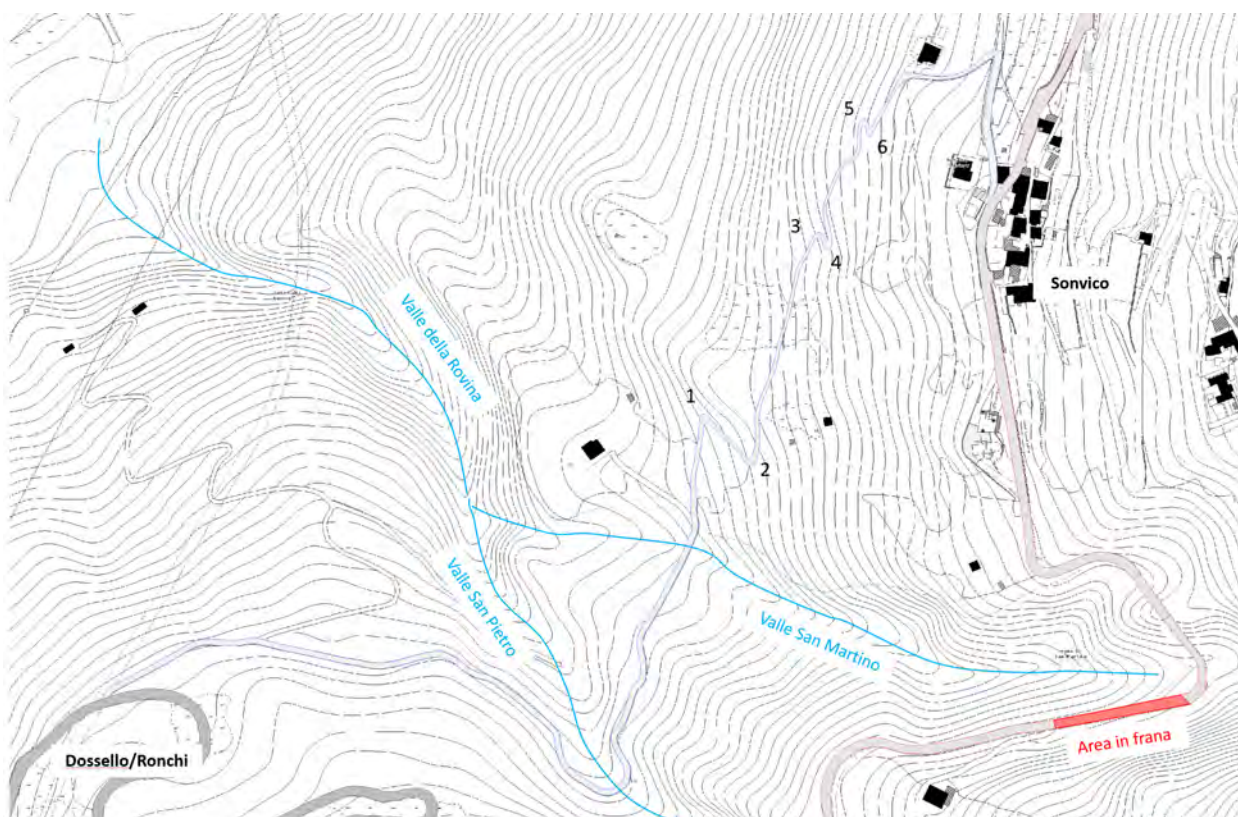
INQUADRAMENTO

Inquadramento territoriale

L'area oggetto di analisi è ubicata nel territorio comunale di Pisogne (BS), sul versante montano orientale dell'abitato, compresa indicativamente tra le località di Sonvico, Dosello e Siniga. L'area si estende tra quote comprese approssimativamente fra 300 e 700 m s.l.m. e costituisce il versante che raccorda il fondovalle del Lago d'Iseo con i rilievi montuosi che si sviluppano verso est.



Ubicazione dell'area di progetto rispetto



Planimetria schematica con evidenziato il tracciato della carrareccia esistente, sovrapposto al numero di riferimento dei tornanti e ai toponimi principali per l'area di progetto.

Inquadramento geologico

Dal punto di vista geologico l'area ricade nel settore meridionale del Foglio CARG n. 078 "Breno", appartenente al dominio delle Alpi Meridionali Lombarde. Il substrato geologico è costituito prevalentemente da successioni sedimentarie e vulcanico-sedimentarie di età permiana e triassica, interessate da deformazioni tettoniche alpine e successivamente modellate dall'azione glaciale quaternaria. Le unità litostratigrafiche presenti nell'area comprendono:

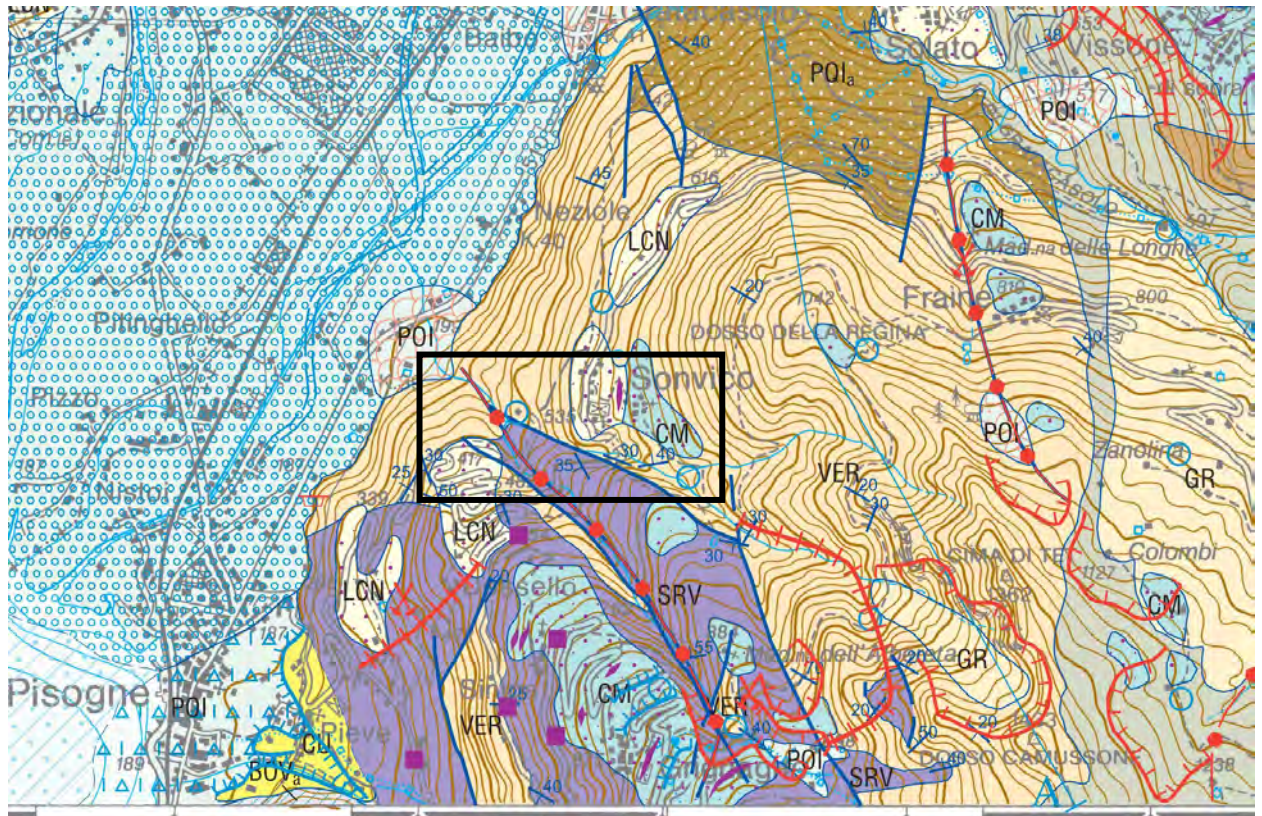
- Depositi quaternari: rappresentano le coperture superficiali maggiormente diffuse e comprendono depositi colluviali di versante, accumuli detritici gravitativi, depositi eluviali derivanti dall'alterazione del substrato, depositi glaciali e fluvioglaciali riferibili alle glaciazioni pleistoceniche. Tali depositi presentano spessori variabili e costituiscono il principale materiale di copertura dei versanti boscati.
- Verrucano Lombardo: costituito da conglomerati, arenarie e subordinatamente peliti di colore rossastro, rappresenta una delle principali unità del substrato permiano presente nel settore. Le rocce mostrano generalmente una buona resistenza meccanica ma possono essere interessate da intensa fratturazione lungo le principali discontinuità tettoniche.
- Formazione del Servino: costituita prevalentemente da arenarie quarzose, siltiti e livelli pelitici, rappresenta la successione di transizione verso le unità triassiche. L'alterazione superficiale può generare coperture detritiche e colluviali localmente significative.
- Carniola di Bovegno: Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari o giallastri, localmente vacuolari e farinosi; sono presenti livelli di brecce carbonatiche, marne, marne argillose e siltiti varicolori. Localmente presenti lenti e livelli di gessi e anidriti.

Nell'area di progetto e di frana le unità rocciose sono interessate dalla presenza di lineamenti tettonici che disturbano l'assetto stratigrafico, portando localmente alla giustapposizione di unità non in continuità stratigrafica o alla ripetizione parziale della sequenza, come dettagliato nei successivi capitoli riguardanti l'assetto geologico di dettaglio dell'area di progetto.

Di tali lineamenti tettonici, uno interessa direttamente l'area di innesco della frana, in cui la fratturazione indotta dalla presenza di tale struttura ha probabilmente giocato un ruolo molto importante nella dinamica del crollo del dicembre 2025, come evidenziato dai risultati dei primi sopralluoghi e analisi condotti dai tecnici individuati dal Comune di Pisogne nel post-evento.

Il tracciato ipotizzato per la viabilità di bypass attraversa aree impostate in Verrucano Lombardo, Servino e Carniola di Bovegno, mantellati da depositi quaternari glaciali e glaciali frammisti a detrito di versante, in spessori globalmente ridotti, ma che localmente formano terrazzi morfologici in cui lo spessore può aumentare.

Le giaciture di strato individuate dal CARG variano notevolmente, con immersioni comprese tra SO, NO e NE e inclinazioni generalmente moderate, comprese tra 20° e 40°.

**CARNIOLA DI BOVEGNO**

Dolomie e calcari dolomitici da grigio-chiari a giallastri, talora vacuolari e farinosi, a stratificazione poco o punto evidente. I vacuoli, di dimensioni da pochi mm a 2-3 cm, sono di forma generalmente irregolare ed angolare, e contengono spesso materiale calcareo-argilloso giallastro, spugnoso, terroso, molto friabile. Possono inoltre associarsi breccie con frammenti prevalentemente carbonatici, nonché marne, marne argillose e siltiti varicolori.

Locali lenti di evaporiti (BOV_v): molto potenti le anidriti presso Costa Volpino e i gessi presso Castelfranco. Ambiente litorale marino o di bassa profondità, fino a lagune isolate tipo *sakha*. Spessore massimo 80 m. **TRIASSICO INFERIORE sommitale - ANISICO INFERIORE**

SERVINO

Peliti, arenarie e marne di vario colore, spesso micacee e suddivise in lamine, con frequenti variazioni granulometriche laterali e verticali, ben stratificate; sono associati livelli carbonatici, in genere inquinati da terrigeni e dolomitizzati. Si segnalano quarzareniti basali e intercalazioni di calcareniti bioclastiche e oolitiche in banchi, ricche di bivalvi e gasteropodi ("Oolite a Gasteropodi" Auct., nella parte mediana) nonché livelli calcarenitici, marnosi e siltosi ("Strati a *Myophoria*"). Strati mineralizzati a barite e siderite manganesifera. Ricca fauna fossile con *Claraia clara*, *C. aurita*, *Natiria costata*, *Neoschizodus ovatus*. Ambiente litorale marino o di bassa profondità. Spessore massimo 150 m.

INDUANO - OLENEKIANO SUPERIORE

SUCCESSIONE VULCANO - SEDIMENTARIA PERMIANA DELLE ALPI MERIDIONALI**VERRUCANO LOMBARDO**

Arenarie prevalenti, conglomerati arenacei, arenarie conglomeratiche e siltiti di colore rossastro, a clasti di quarzo, porfidi quarziferi e raramente di basamento metamorfico, in banchi plurimetriaci spesso a base erosionale, a gradazione normale o inversa o a laminazioni incrociate. Ambiente alluvionale. Spessore fino a 600 m. **PERMIANO SUPERIORE P.P.**

UNITÀ DEL BACINO DELL'ADDA-OGGIO**SUPERSISTEMA DEI LAGHI**

Diamicton a supporto di matrice sabbiosa con clasti da centimetrici sino a blocchi metrici da subangolosi a subarrotondati (*till* d'ablazione); diamicton massivi a supporto di matrice limosa con sparsi clasti sagomati e striati (*till* d'alloggiamento); ghiaie a supporto clastico, matrice sabbiosa e clasti arrotondati, intercalazioni sino a metriche di sabbie laminate e gradate (depositi alluvionali e di contatto glaciale); diamicton massivi a supporto di matrice e clasti di alimentazione locale (depositi da *debris-flow*). Clasti silicatici e/o carbonatici, dal bacino a monte. Profilo di alterazione poco evoluto, colore della matrice 10YR, clasti non alterati; morfologia ben conservata.

Sistema di Cantù (LCN): superficie limite superiore caratterizzata da morfologia ben conservata, copertura loessica assente, profilo di alterazione con profondità inferiore a 1,2 m, colore della matrice da 7.5YR a 10YR influenzato dalle caratteristiche del *parent material*, clasti calcarei con *cortex*, silicoclasti inalterati o con *cortex* millimetrico. **PLEISTOCENE SUPERIORE**



	Traccia di superficie di distacco gravitativo		Stratificazione diritta
	Trincea di deformazione gravitativa profonda di versante		Faglia certa, incerta o sepolta
	Orlo di scarpata di frana		

Stralcio della cartografia CARG – foglio 078 Breno – in nero la zona di interesse

Geomorfologicamente, il tracciato di progetto attraversa aree globalmente stabili, con diffuso affiorare o subaffiorare del substrato, il quale mostra spesso morfologie a dosso montonato tipiche dell'ambiente glacializzato. Gli affioramenti rocciosi possono essere sede di distacco di blocchi o sezioni di ammasso nelle loro porzioni più articolate, che generalmente non sono però presenti per l'area di progetto. Nelle zone di non affioramento, i depositi glaciali e glaciali frammentari a versante si presentano generalmente stabili, con situazioni di movimenti di versante localizzati nelle aree di diffusa circolazione idrica superficiale o sotterranea, particolarmente presenti in prossimità della Valle di San Pietro e nel tratto rettilineo tra i tornanti 2 e 3.

L'area di frana è chiaramente caratterizzata da processi di crollo e caduta massi diffusi e attivi, che hanno nel tempo caratterizzato questo tratto di viabilità e che non hanno ragione di esaurirsi nel prossimo futuro.

Il tracciato della strada di progetto attraversa due torrenti: la già citata Valle di San Martino, in cui l'attraversamento avviene per mezzo di un imponente ponte in muratura fondato su spalle costituite da Verrucano Lombardo (che sarà oggetto di adeguamento per il transito dei veicoli) e, verso loc. Ronchi, la Valle di San Pietro, il cui attraversamento avviene attualmente per mezzo di un piccolo ponticello, che sarà strutturalmente adeguato al transito dei mezzi. Non si hanno notizie dirette riguardanti la dinamica morfologica di questi due torrenti, che al momento dei sopralluoghi presentavano una portata liquida ridotta. Si ritiene che la possibilità di interazione tra la viabilità e la Valle San Martino sia trascurabile, vista la quota di transito della strada sul ponte, mentre è molto probabile che, nel tempo, si presentino situazioni di interazione tra la strada e la Valle di San Pietro, dato che in questo punto l'attraversamento avviene tramite un piccolo tombotto, poco più di un guado.

Evento di dissesto del dicembre 2025

Nella notte fra il 26 e il 27 dicembre 2025, il distacco e conseguente franamento verso valle di un importante volume roccioso ha coinvolto la strada che collega la frazione di Sonvico nel tratto immediatamente precedente il ponte sul Torrente Valle di San Martino, demolendo le opere di protezione esistenti, danneggiando la strada e interrompendo la viabilità.



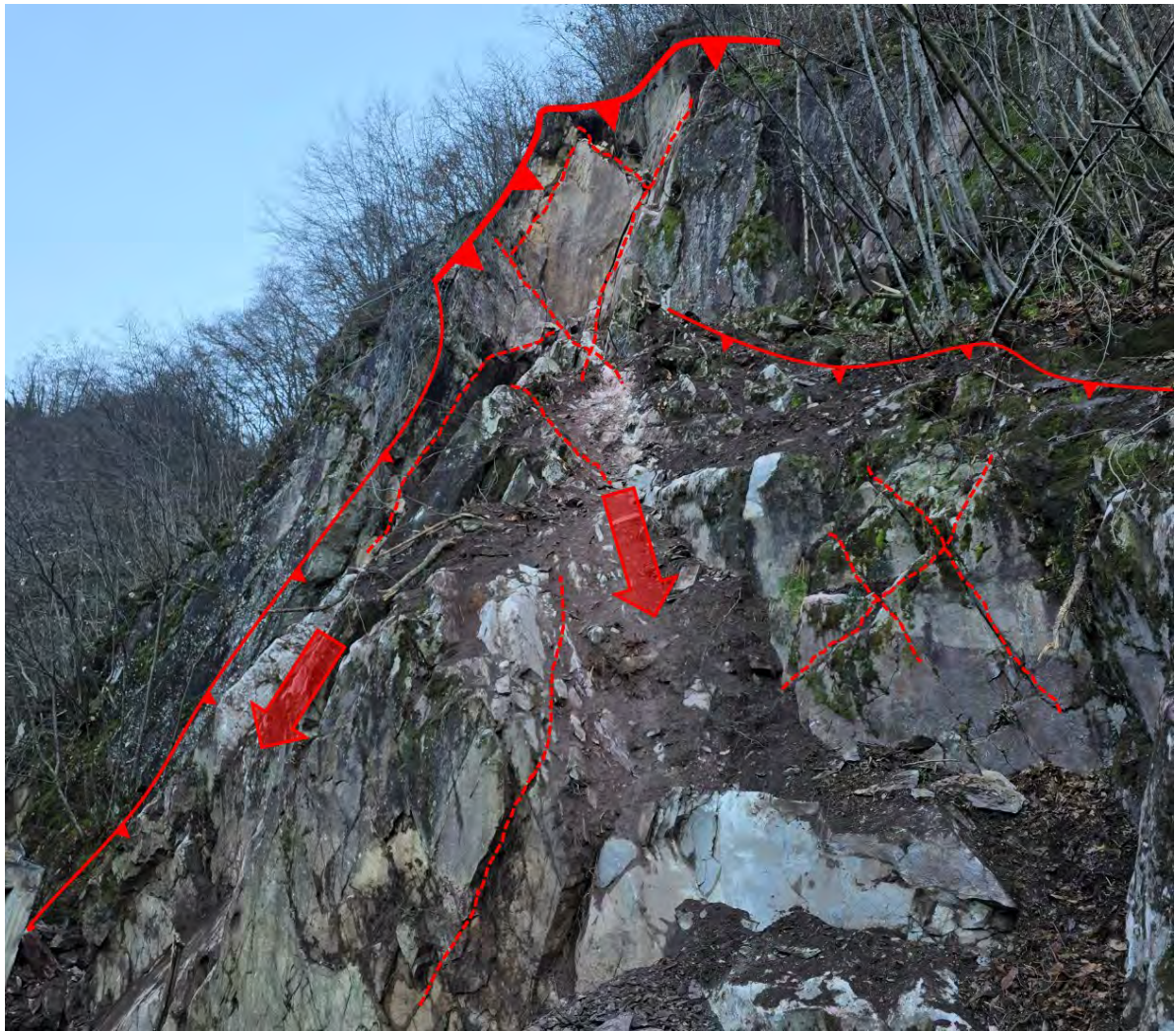
INQUADRAMENTO

Vista frontale della parete rocciosa con evidenziata l'area di frana e le principali direttrici di propagazione.

La frana si è innescata alcune decine di metri a monte della strada: il movimento è stato guidato dalle discontinuità presenti nell'ammasso roccioso ed è plausibilmente iniziato come ribaltamento diretto di uno o più conci, evolvendo rapidamente come scivolamento planare su una superficie circa parallela all'andamento della parete stessa. Il volume dei singoli blocchi coinvolti è dell'ordine di decine di m³, mentre il volume di frana è nell'ordine di diverse centinaia di metri cubi.



Vista dell'area sorgente dalla strada per Sonvico, a valle della frana; si evidenzia il blu il muro di monte della galleria paramassi, abbattuto.



Vista dalla base della parete della nicchia di distacco; sono evidenziate le principali fratture visibili nell'ammasso roccioso.

Nello scivolamento, i blocchi hanno svincolato ulteriore materiale; si sono quindi in parte frammentati raggiungendo la strada e demolendo completamente la vetusta galleria artificiale presente in questo tratto. La frana in roccia ha quindi proseguito a valle, lungo la scarpata dell'incisione torrentizia, sino a raggiungere il torrente stesso. I volumi maggiori (decine di m³) sono anche quelli che hanno percorso la distanza maggiore. Una frazione consistente del volume di frana si è deposita sulla strada, complice anche il fatto che la sezione di galleria coinvolta è collassata su sé stessa, con la soletta superiore che si è appoggiata sugli elementi verticali ribaltati verso valle, formando così un piano di appoggio leggermente inclinato verso monte e favorevole all'accumulo del deposito di frana.

Dai sopralluoghi eseguiti dai tecnici individuati dal Comune di Pisogne nel periodo immediatamente successivo all'evento, il materiale dell'accumulo di frana appariva costituito da una miscela di blocchi di dimensioni metriche e forma appiattita o allungata, con abbondante frazione ghiaiosa. Localmente, presso la parete si individua con abbondanza materiale sabbioso e arricchito in terreno vegetale di colore scuro, osservato anche entro le fratture beanti presenti nella porzione sommitale della parete. Non avendo a disposizione una topografia di dettaglio pre-evento, si è stimato il volume sulla base dell'andamento della strada e del pendio, identificando un valore globale di circa 1.500 m³, di cui circa 150-200 m³ rappresentato da due-tre grossi volumi rimasti integri.



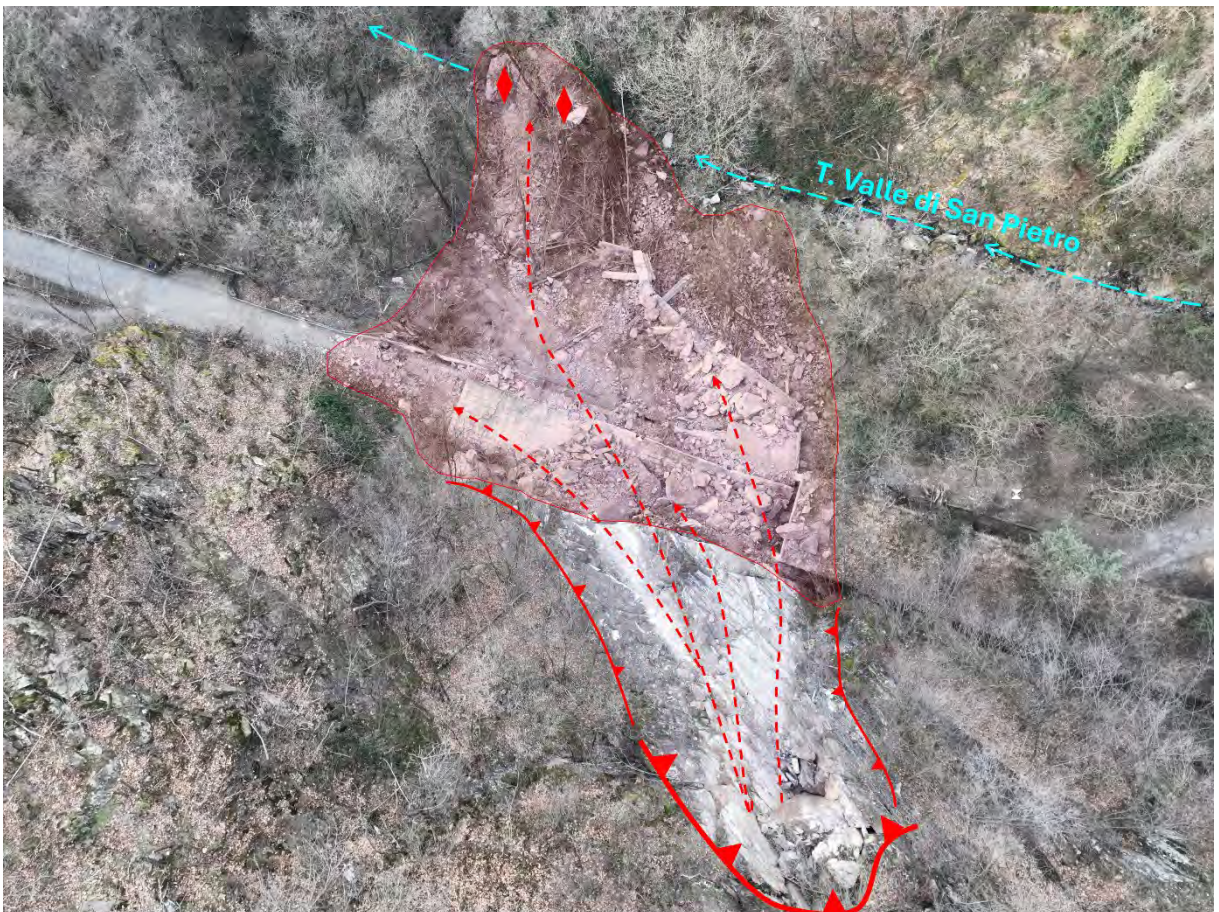
(Sopra) Dettaglio dall'alto della nicchia di frana, con evidenziate le fratture aperte delimitanti blocchi potenzialmente instabili. (Sotto) panoramica dell'area di frana: si evidenziano le fratture in rosso e le vecchie pannellature in rete di fune rimaste sulla parete (azzurro).

Riguardo allo stato delle opere di protezione esistenti nell'area, sulla base delle informazioni disponibili si è ricostruito come la galleria artificiale sia stata realizzata negli anni '70 e avesse lo scopo di proteggere la viabilità da distacchi di singoli blocchi e massi di volumi di modesta entità (sicuramente $< 1 \text{ m}^3$), occasionalmente rilasciati dalla parete a monte. Su di questa, inoltre, sono state notate alcune pannellature in rete di fune, aventi lo scopo di

contenere il rilascio di volumi rocciosi dalla porzione sommitale della parete. Uno dei blocchi coinvolti nel rilascio del dicembre 2025 era imbragato da questi pannelli.



Vista dell'accumulo di frana sulla strada e verso valle, sulla scarpata del vicino torrente; è evidenziata la posizione dei massi di dimensioni maggiori, in posizione distale.



Vista aerea dell'area di frana, con la nicchia in basso, l'accumulo sulla strada e sulla scarpata e la posizione dei blocchi di dimensioni maggiori, sul fondovalle presso il torrente.

Sulla base di quanto riscontrato dati tecnici individuati dal Comune di Pisogne nei sopralluoghi eseguiti nel periodo immediatamente successivo all'evento e a seguito dei rilievi eseguiti dagli stessi nella prima metà del gennaio 2026, la situazione generatasi a seguito dello sviluppo della frana è apparsa ancora instabile e pericolosa.

Al fine di eliminare il pericolo più immediato, rappresentato da importanti porzioni di ammasso ai limiti della stabilità, e per alleggerire il versante, il Comune di Pisogne ha affidato alla società SIAG s.r.l. il progetto e l'esecuzione di un intervento di demolizione mediante esplosivi. L'intervento è stato anticipato da un primo disgaggio superficiale e dall'installazione di un primo sistema di allerta basato su estensimetri, fessurimetri e sirene, al fine di garantire un livello minimo di sicurezza durante la fase di realizzazione delle perforazioni necessarie per la successiva demolizione, che è stata eseguita in data 3 marzo 2026; nei giorni successivi si è quindi proceduto al disgaggio della parete. Il risultato dell'intervento è stata la rimozione della porzione di ammasso corrispondente al fianco destro della frana.

L'abbattimento con esplosivo ha movimentato un ulteriore importante volume di roccia, stimabile nello stesso ordine di grandezza dell'evento franoso, parte del quale si è arrestato sul piano viario dopo aver abbattuto un ulteriore tratto di galleria, nella zona del fianco destro della frana.

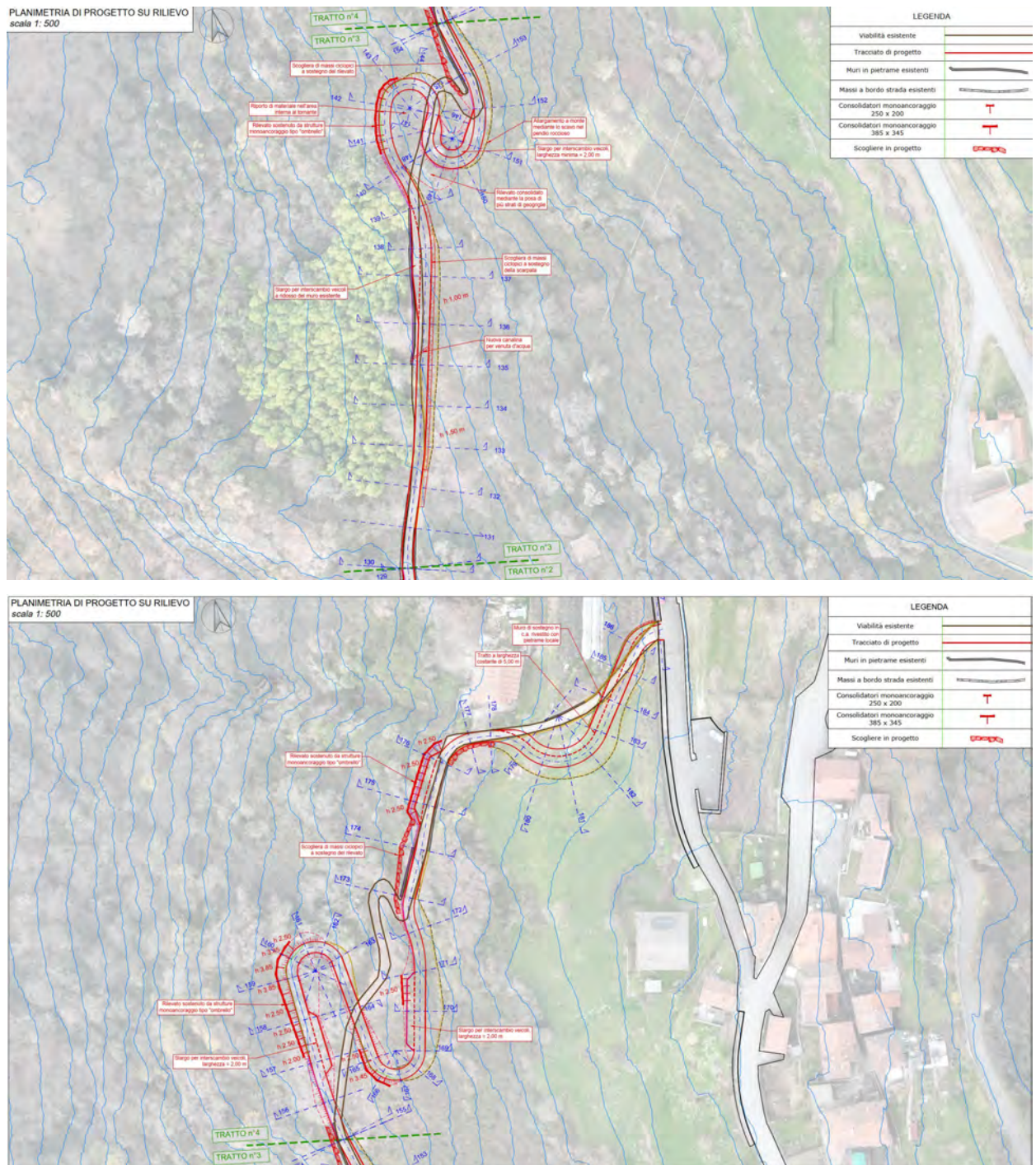
La situazione topografica post-demolizione è stata catturata da dedicato rilievo fotogrammetrico, commissionato e messo a disposizione degli scriventi dal Comune di Pisogne. Di seguito alcune immagini che mostrano lo stato dei luoghi post-demolizione, come si presentano ora.



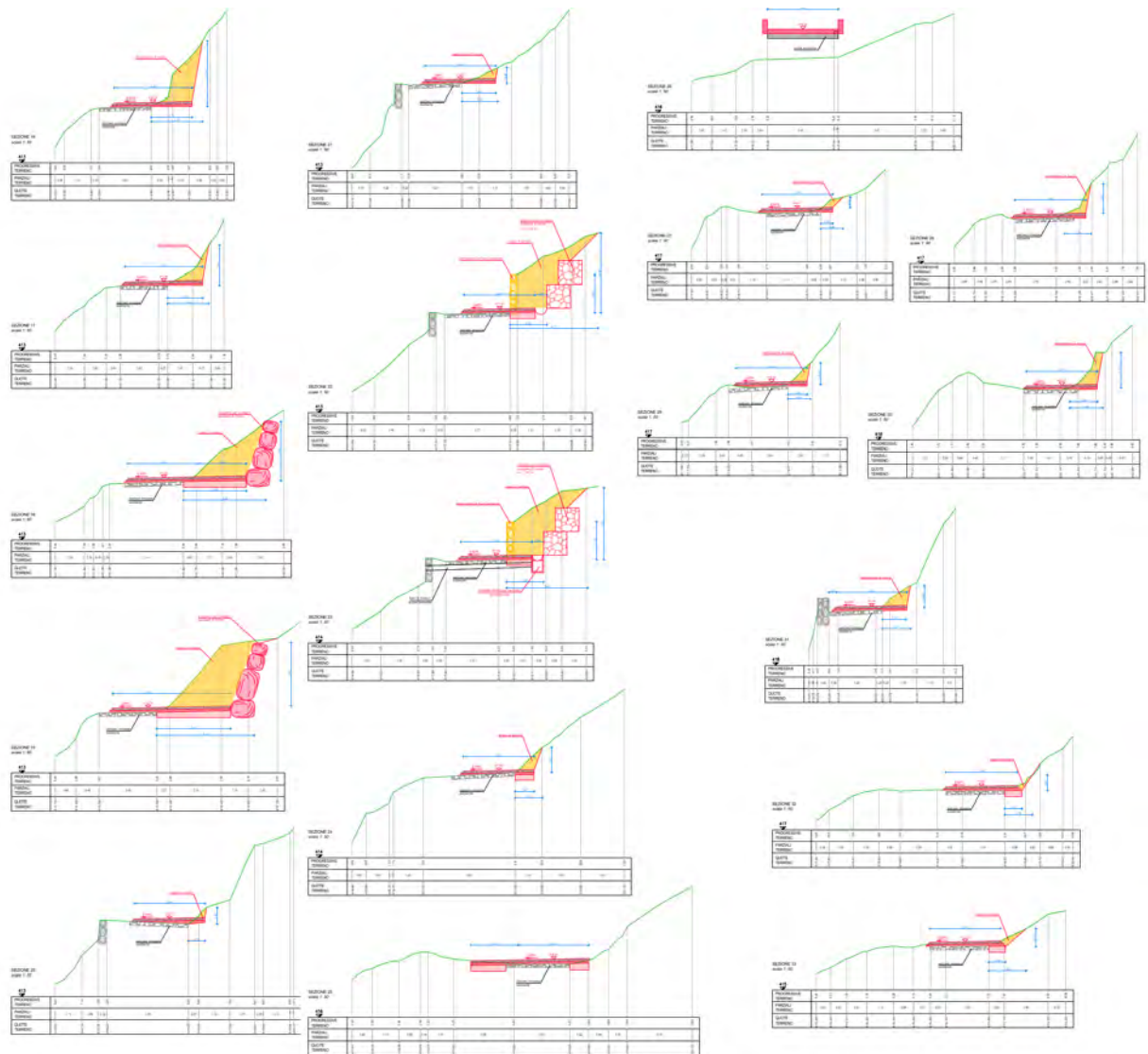
Vista dell'accumulo di detrito sulla sede stradale, visto dall'imbocco della galleria in destra idrografica rispetto alla Valle di San Pietro



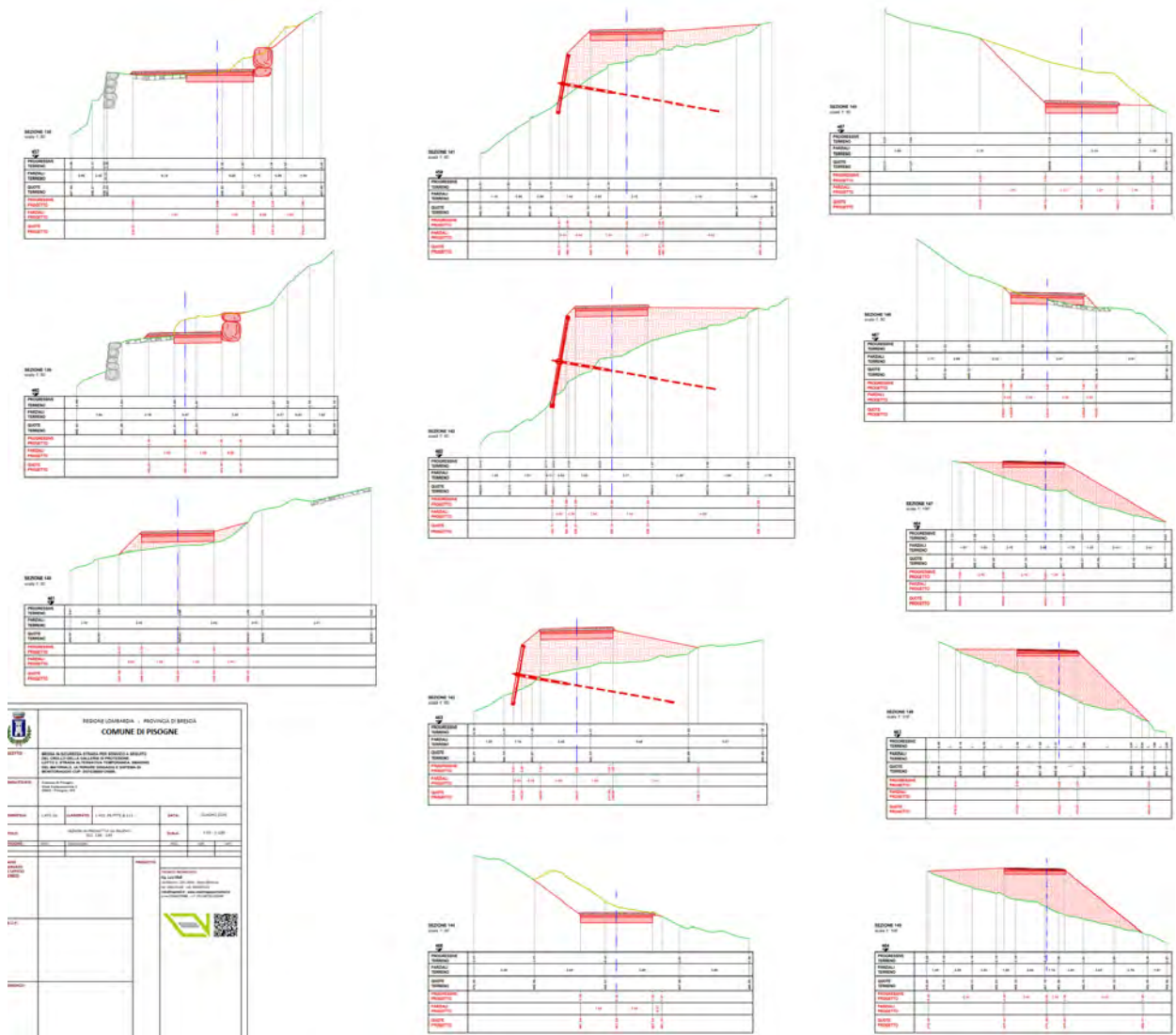
Viste aeree dell'accumulo di detrito sulla strada



Stralcio della planimetria di progetto nel tratto terminale



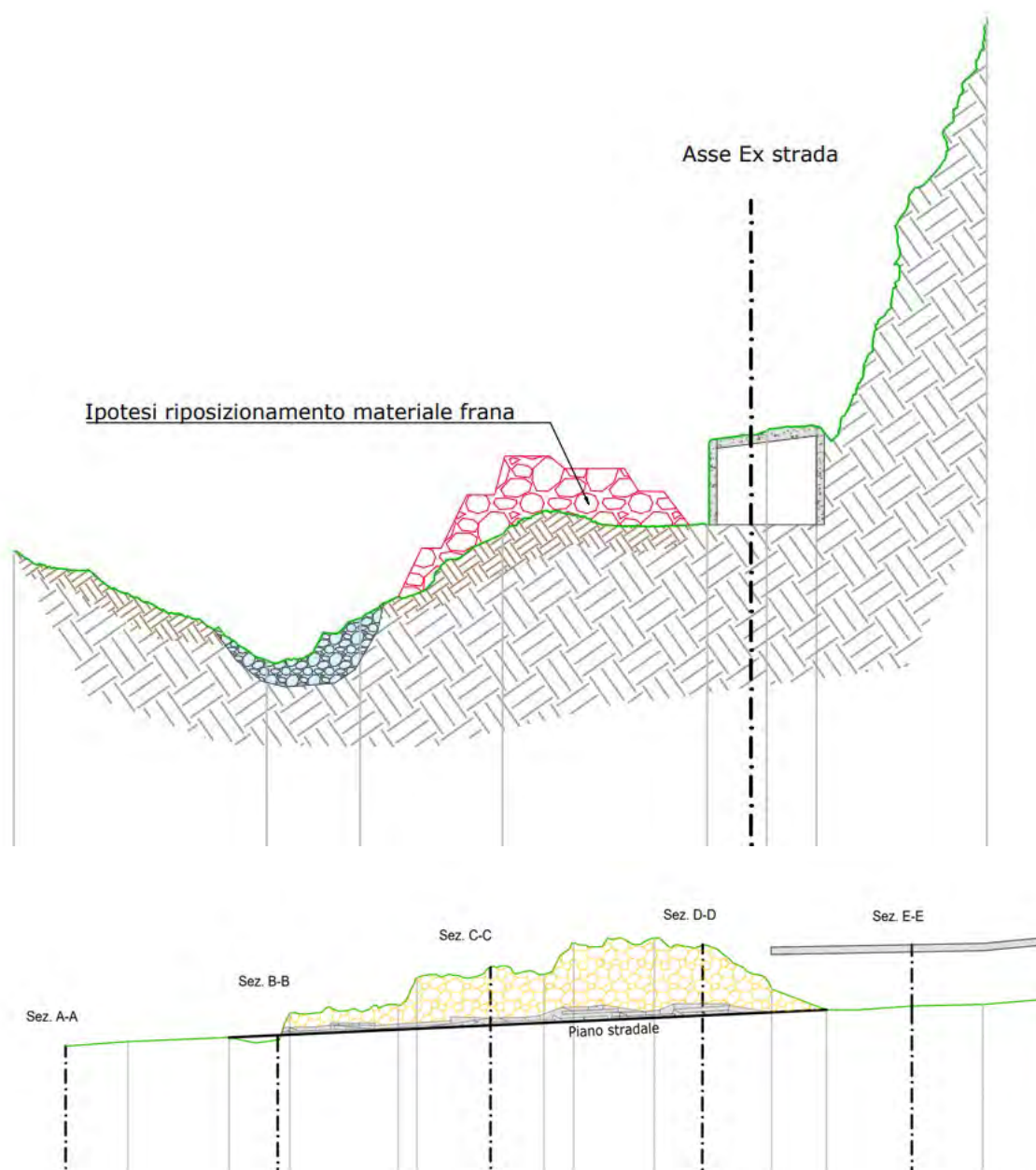
Stralci esemplificativi della tipologia di interventi previsti nel tratto precedente la Valle San Martino



Stralci esemplificativi della tipologia di interventi previsti nel tratto successivo la Valle San Martino

Per ottenere questo nuovo tracciamento saranno necessarie diffuse operazioni di riporto e, in misura minore, di scavo. I fronti di scavo e riporto verranno in generale sostenuti da consolidatori monoancoraggio. Il nuovo tracciato sarà associato alla realizzazione di canalette e opere di intercettazione e smaltimento delle acque provenienti dal versante, fenomeno importante soprattutto a monte del secondo tornante oltre il ponte sulla Valle San Martino.

Il progetto contempla anche le operazioni di sgombero del materiale roccioso presente sulla sede stradale nella zona di frana, in modo da consentire il transito esclusivo dei mezzi di emergenza, che non potranno utilizzare la strada provvisoria, che sarà gestito con un sistema di interruzione della viabilità connessa a dedicato sistema di monitoraggio. Il materiale movimentato sarà in parte riutilizzato nella realizzazione della strada di bypass e in parte accatastato in prossimità della zona di frana, lungo il versante e in coincidenza di esistenti spiazzi o zone pianeggianti.



Stralci delle sezioni di progetto previste per la zona della frana.

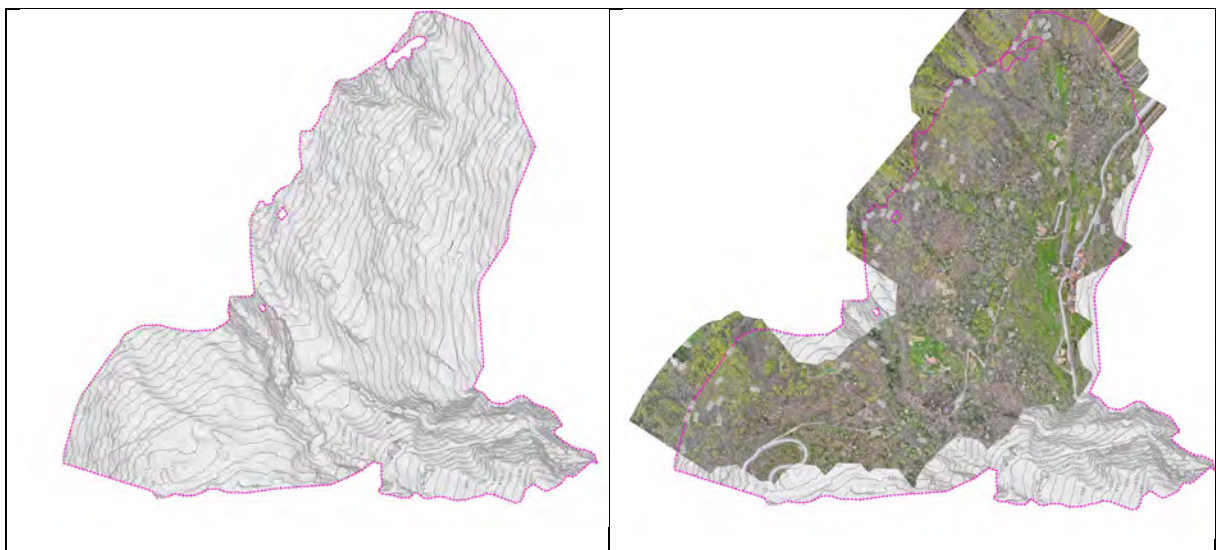
FASE DI INDAGINE

Base topografica di riferimento

Il rilievo del versante è stato eseguito da Tecno Proget s.r.l. tramite Laser Scanner montato su drone (APR). Si tratta di una tecnica che consente di coprire aree molto ampie in tempi relativamente brevi, che consentono, entro certi limiti, di bypassare anche la copertura vegetale e ricostruire l'andamento del terreno, con precisioni a terra certamente soddisfacenti per la scala di analisi del problema in oggetto (rumore sul singolo punto nell'ordine di 5 – 7 cm).

La georeferenziazione del risultato è stata garantita con l'utilizzo di misure GNSS statiche di precisione per la correzione delle coordinate GPS del drone stesso, tramite post elaborazione ancorata a capisaldi a coordinate note. Ulteriore calibrazione è stata ottenuta utilizzando una stazione totale per battere punti di controllo locali. La quota è stata convertita da ellissoidica a geodetica utilizzando gli appositi grigliati IGM.

Il prodotto finale del rilievo con LiDAR da drone è una nuvola di punti non colorata, che può essere visualizzata con una sorta di "bianco-nero" in cui le tonalità più chiare indicano una maggiore intensità del segnale di ritorno, e corrispondono quindi a superfici solide e lisce, in grado di riflettere senza eccessiva dispersione del segnale. L'opposto è vero per le aree scure. Dalla nuvola viene quindi estratto un DEM con passo 0,30 m, da cui sono state estratte le isoipse e l'ombreggiatura. Congiuntamente, è stata fornita l'ortofoto georeferenzata per tutta l'estensione della carrareccia esistente. La stessa società aveva prodotto anche i rilievi topografici di dettaglio della zona di frana, sia pre- sia post- demolizione con esplosivo, il che ha consentito di montare tutte le basi esistenti su un unico livello, adottato come base di riferimento per le valutazioni geo-morfologiche condotte nel seguito.



FASE DI INDAGINE

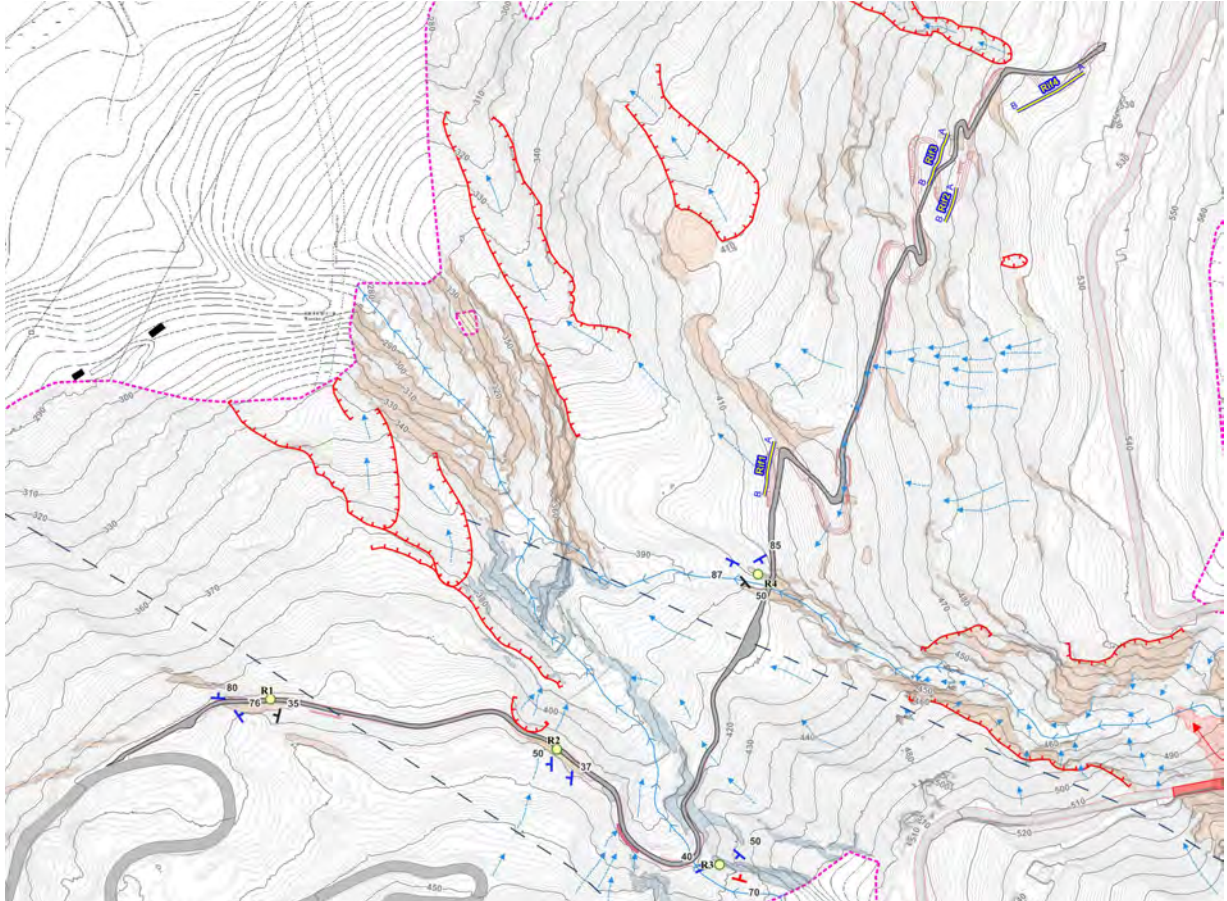
*A sinistra: vista dell'ombreggiatura ottenuta dal DEM di dettaglio da rilievo LiDAR;
a destra: sovrapposizione tra il rilievo ombreggiato e l'ortofoto.*

Stato dei luoghi e indagini eseguite

Per il presente progetto sono state realizzate le seguenti indagini geofisiche lungo la carrareccia esistente:

- N° 4 Tomografia sismica in onde P;
- N° 4 acquisizioni di sismica passiva HVSR.

Di seguito è riportata la planimetria delle indagini. Per una vista di dettaglio, che raccoglie anche la parte grafica delle indagini, si rimanda alla tavola E.402.



L'ubicazione delle indagini, in particolare degli stendimenti sismici, è stata fortemente condizionata dalla possibilità di accesso e percorribilità del versante esternamente alla carrareccia, per la maggior parte colonizzato da vegetazione arbustiva e spinosa sostanzialmente impenetrabile, che chiaramente non consente il posizionamento e l'esecuzione degli stendimenti sismici, i quali sono stati quindi ubicati nelle aree liberate dalla vegetazione in coincidenza dei punti di maggior interesse progettuale.

Alle indagini geofisiche è stata associata una campagna di rilevamento geologico volto a ricostruire la distribuzione di dettaglio degli affioramenti e, in seguito, produrre una carta geologica interpretativa con indicazione delle aree di maggiore o minore presenza del substrato roccioso a basse profondità.

È stata riservata una analisi di particolare dettaglio all'ammasso roccioso insistente sul primo tornante, unica parete rocciosa veramente notevole presente lungo il percorso della strada di bypass, in modo da fornirne una descrizione schematica utile a individuare in prima battuta le possibili opere di mitigazione e difesa nei confronti di processi di caduta massi.

Infine, si sono rielaborati i rilievi topografici di dettaglio messi a disposizione per l'area della frana, in modo da produrre una valutazione di massima dei volumi di detriti rocciosi presenti sulla strada e oggetto di smarino e sgombero.

Segue una descrizione delle modalità di acquisizione e interpretazione dei dati presentati, uniti a una descrizione sintetica dei principali risultati.

Rilievo geologico di dettaglio.

Sono stati eseguiti rilievi geologici di dettaglio lungo il tracciato della carrareccia esistente, nei suoi dintorni interessati dal tracciato di progetto e nelle zone di versante accessibili a piedi comprese tra la carrareccia e la zona della frana. I dati raccolti sono stati confrontati e integrati con quanto previsto dalla cartografia geologica ufficiale (CARG, foglio 076 – Breno) e ulteriormente integrati tramite valutazioni morfologiche tratte dall'elaborazione del rilievo topografico di dettaglio.

I principali risultati sono illustrati nelle tavole grafiche E.401 e E.402, cui si rimanda per i dettagli grafici.

Seguendo una descrizione che origina da loc. Dossello e prosegue verso Sonvico, gli elementi salienti emersi dal rilevamento geologico sono i seguenti:

- Il tratto iniziale della carrareccia si presenta fiancheggiato da rocce del Verrucano Lombardo a monte e a valle, particolarmente evidenti tra 70 e 120 m dalla strada principale. Oltre i 120m gli affioramenti non sono più direttamente visibili, sostituiti da detriti glaciali frammisti a versante, sotto cui si intuisce localmente la presenza di strutture potenzialmente riconducibili al substrato, che si ritiene quindi in buona parte subaffiorante.



- Avvicinandosi all'incisione della Valle San Pietro si osserva un tratto di affioramento di Carniola di Bovegno, che non è stratigraficamente in continuità con il Verrucano Lombardo, il che porta a supporre la presenza di un contatto tettonico tra le due unità. In questo tratto si osserva la presenza di piccoli scivolamenti o fenomeni di reptazione e soliflusso, indotti dalle elevate pendenze.



- Poco oltre, nell'ambito del solco morfologico della Valle San Pietro, si osservano affioramenti abbastanza estesi di Servino, associati, in sinistra idrografica, alla presenza di importanti direttrici di ruscellamento e diffusi punti di risorgiva e emergenza idrica.





- Uscendo dall'impluvio della Valle di San Pietro non si osservano affioramenti rocciosi direttamente lungo la carrareccia, benché le morfologie portano a ipotizzare la presenza di substrato a ridotte profondità.
- Il solco morfologico della Valle di San Martino è impostato in Verrucano Lombardo. Il contatto tra Verrucano e Servino è verosimilmente di natura tettonica, come suggerito dal CARG e come verificato in sito, sia lungo la strada interrotta dalla frana, sia lungo il versante sinistro della valle. In coincidenza del ponte di attraversamento della mulattiera entrambe le sponde sono in Verrucano Lombardo, su cui poggia direttamente il ponte stesso. Da qui in avanti il tracciato della carrareccia è interamente impostato in Verrucano Lombardo, come evidenziato dai diffusi piccoli affioramenti presenti lungo la mulattiera stessa. Di particolare nota l'esteso affioramento roccioso presente in coincidenza del tornante 1, analizzato più nel dettaglio nel seguito della relazione.





- Tra i tornanti 2 e 3 si osserva la presenza di deflussi idrici su versante, che all'altezza della strada spagliano sulla stessa, invadendone la sede, per essere poi indirizzate nel bosco a valle o contro i muretti di monte, per scaricare poi in coincidenza del tornante 2.

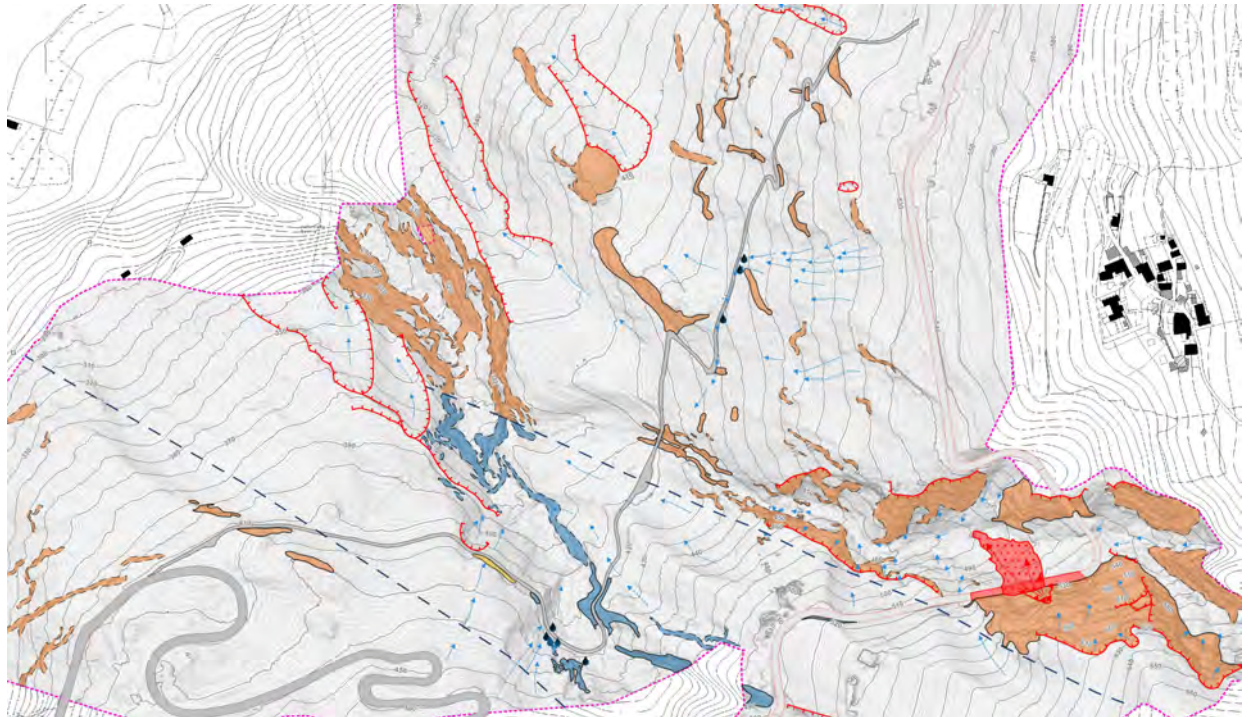


- Non è stato in genere possibile prendere diretta visione dei depositi nelle zone di non affioramento, stante l'intensa vegetazione che infesta i versanti e l'assenza di taglio o scarpate che consentano di osservare la struttura dei depositi. La presenza di diffusi grossi blocchi, spesso levigati e tondeggianti, ne indica una prima origine glaciale, verosimilmente rimaneggiata da processi gravitativi e di versante. Si osserva la presenza di un cordone morfologico nei pressi del termine del tracciato, sul lato di monte, ben visibile nel prato che fiancheggia la mulattiera attuale, che mostra la presenza in superficie di materiale roccioso. Dai soli dati di superficie non è evidente se si tratta di affioramento roccioso o di una catasta di blocchi, anche se i risultati

delle indagini sismiche (paragrafo successivo) indica la presenza di velocità sismiche non particolarmente elevate, che fanno propendere a questa seconda ipotesi.

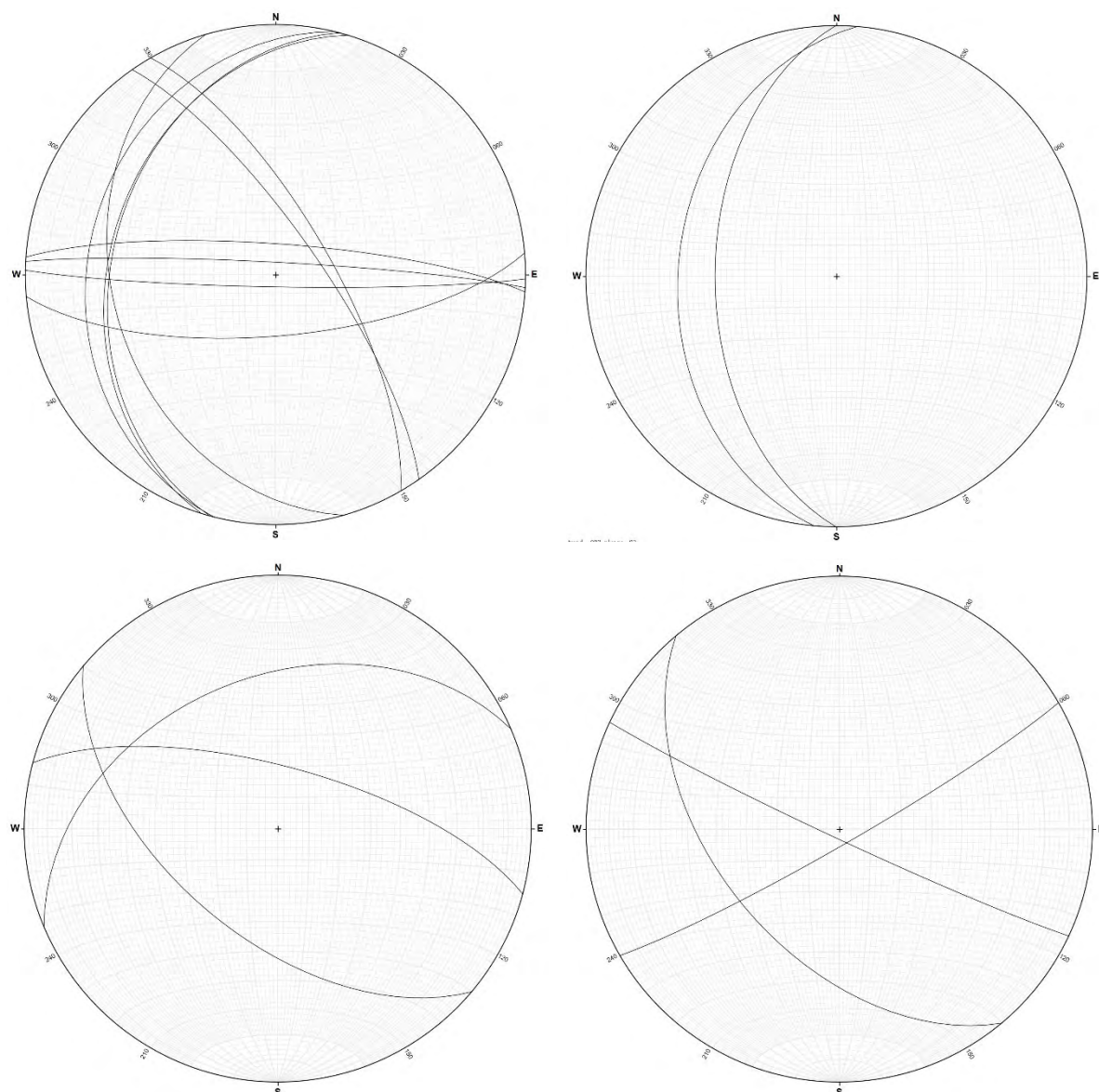


L'estensione delle aree di affioramento è stata ampliata su base morfologica, distinguendo le aree così definite tramite apposito tratteggio.



Stralcio della distribuzione delle aree di affioramento verificate (contorno continuo) o ipotizzate su base morfologica (contorno tratteggiato). Le linee tratteggiate indicano gli ipotetici contatti tettonici.

Durante i rilievi geologici, in coincidenza dei principali affioramenti accessibili, sono state misurate speditivamente le orientazioni delle principali discontinuità osservate, di cui si riportano di seguito gli stereogrammi.



Stereogrammi delle giaciture misurate, da R1 a R4 in ordine di lettura.

Tomografia sismica in onde P

Nel sito di progetto sono state acquisite n°4 linee di acquisizione sismica, ubicate nei pressi del tornante 1 (rif1), del tornante 5 (rif2 e rif3) e sul prato a monte della strada nel tratto terminale della stessa, a Sonvico (rif4).

Le indagini sono state eseguite utilizzando 24 geofoni verticali da 14 Hz con passo variabile tra 1m e 2m a seconda della lunghezza totale compatibile con l'assetto dei luoghi; l'energizzazione è stata eseguita con mazza sismica, realizzando 9 punti di energizzazione per le rifrazioni 1, 3 e 4 e 5 per la rifrazione 2. L'acquisizione è stata eseguita con un'unità di acquisizione DMT Summit One X.

I dati ottenuti sono poi stati elaborati tramite tecnica tomografica, un processo di inversione che permette di ottenere una sezione 2D del sottosuolo dove viene mostrato il modello delle velocità sismiche (onde P), che può essere interpretato riconducendo le variazioni di velocità alle caratteristiche del sito.



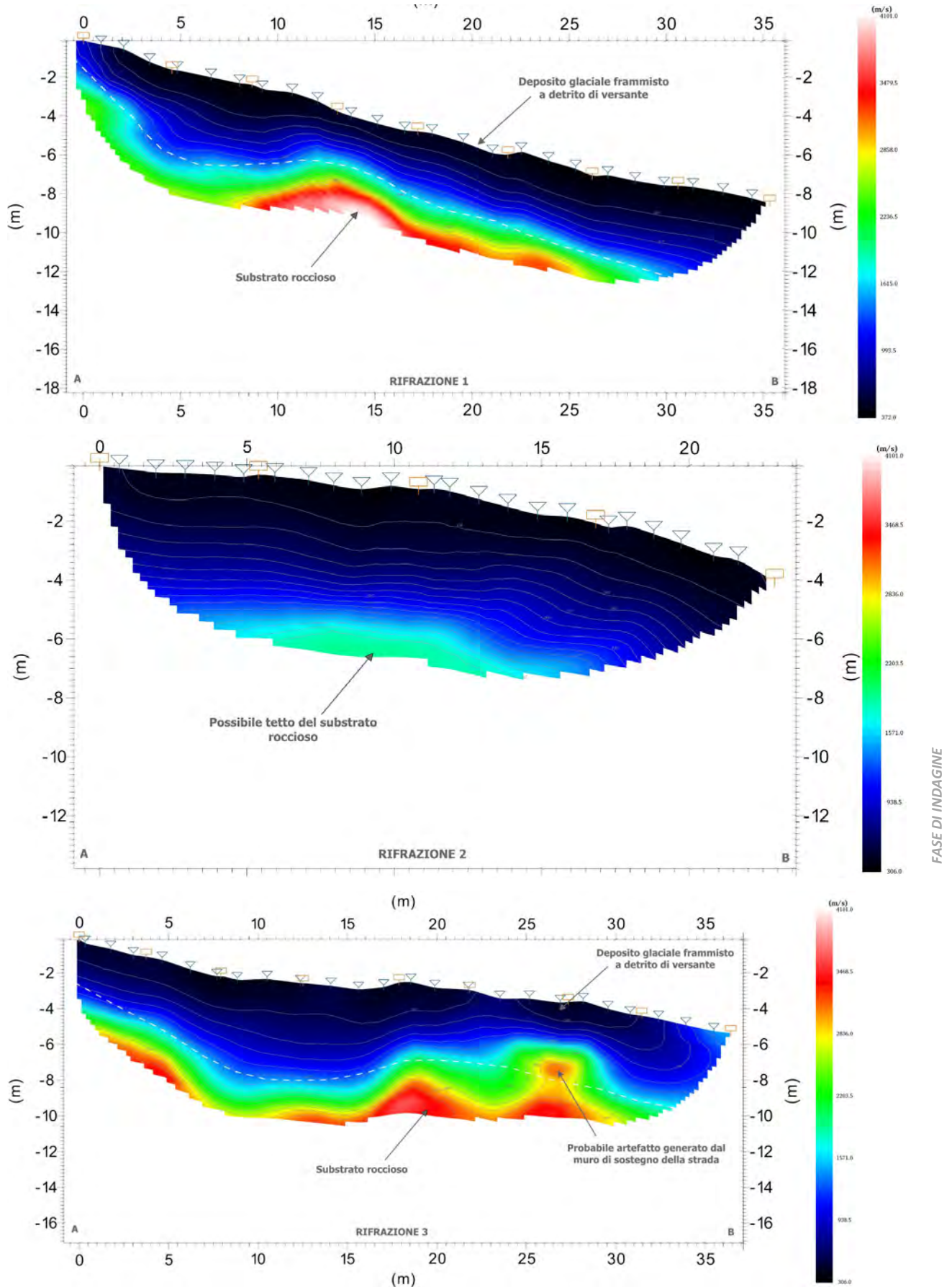
Sistema di acquisizione per le linee sismiche.

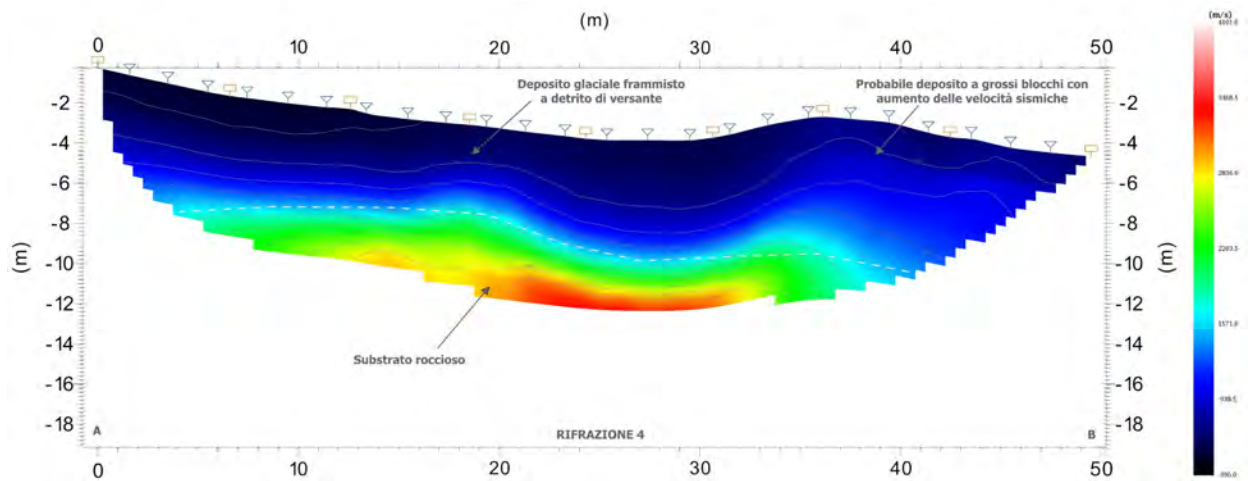


Immagine degli stendimenti sismici, numerati da rif1 a rif4 nel senso di lettura

In generale, gli stendimenti mostrano la presenza di un livello superficiale a ridotte velocità sismiche, riconducibile ai depositi glaciali frammisti a detrito di versante, per uno spessore massimo di 4-6m, localmente fino a 8m per la rifrazione 4; sotto questo livello si assiste a un brusco salto delle velocità sismiche, con valori che rapidamente salgono oltre i 1500-2000 m/s, con punte fino oltre 3000 m/s nelle porzioni più profonde. Fa eccezione la rifrazione 2, il cui stendimento, molto corto, ha impedito una penetrazione dell'indagine oltre i 6-7m dal piano campagna,

profondità a cui comunque si intuisce un certo gradiente di velocità che potrebbe essere tentativamente condotto al tetto del substrato roccioso.





Sismica passiva HVSR

L'indagine HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) consiste nella misura del rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre. Esso è prodotto sia da fenomeni naturali che dall'attività antropica. Il rumore sismico ambientale viene anche chiamato microtremore, poiché costituito da oscillazioni di ampiezza molto ridotta. La prova è dunque di natura passiva, poiché il rumore registrato non viene generato artificialmente. La metodologia HVSR, introdotta da Nakamura (1989), permette la determinazione delle frequenze di risonanza dei terreni e la stima dell'amplificazione sismica locale. Un suolo vibra con maggiore ampiezza a specifiche frequenze (frequenze di risonanza) indipendentemente dall'origine e tipologia di tremore. Questo fa sì che la misura delle frequenze di risonanza dei terreni sia possibile ovunque e in modo semplice. La frequenza fondamentale di risonanza (f) dello strato del n -esimo strato di terreno è data dalla formula:

$$f_{(n)} = V_s / 4h$$

dove V_s è la velocità media delle onde di taglio nello strato n ; H è lo spessore dello strato n .

L'equazione permette di comprendere come la tecnica H/V possa fornire indicazioni di carattere stratigrafico: a partire da una misura di microtremore che fornisce f e nota la V_s delle coperture, si può stimare la profondità dei riflettori sismici principali o viceversa. La prova consiste nella misura dei microtremori ambientali nelle tre dimensioni spaziali (x, y, z) e la sua elaborazione consente di analizzarne gli spettri di frequenza, restituendo un grafico del rapporto in ampiezza tra le due componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V). Questo rapporto permette di ricavare la frequenza alla quale il moto del terreno viene amplificato per risonanza (frequenza fondamentale). Il picco principale e l'eventuale presenza di picchi secondari, qualora ritenuti di origine stratigrafica, possono essere attribuibili a un contrasto di impedenza sismica tra i depositi di copertura e il sottostante substrato geologico.

Ciò può essere utilizzato per determinare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s e quindi il tipo di suolo sismico di riferimento (A, B, C, D, E) previsto dalle normative tecniche vigenti.

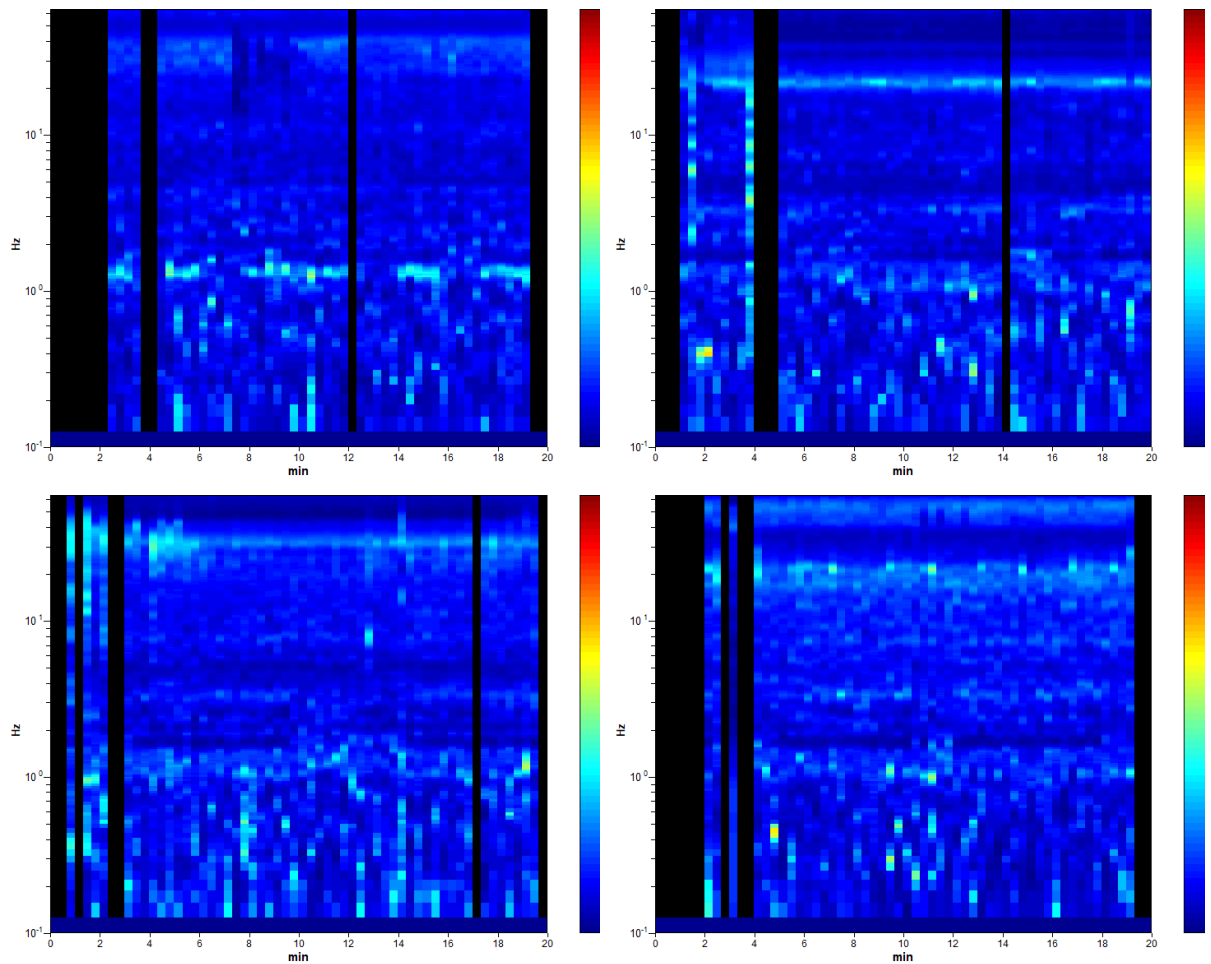
Per ciascuna delle acquisizioni eseguite lo strumento è stato collocato al centro del rispettivo stendimento di sismica a rifrazione.



Vista delle postazioni di acquisizione HVSR, da 1 a 4 secondo il senso di lettura

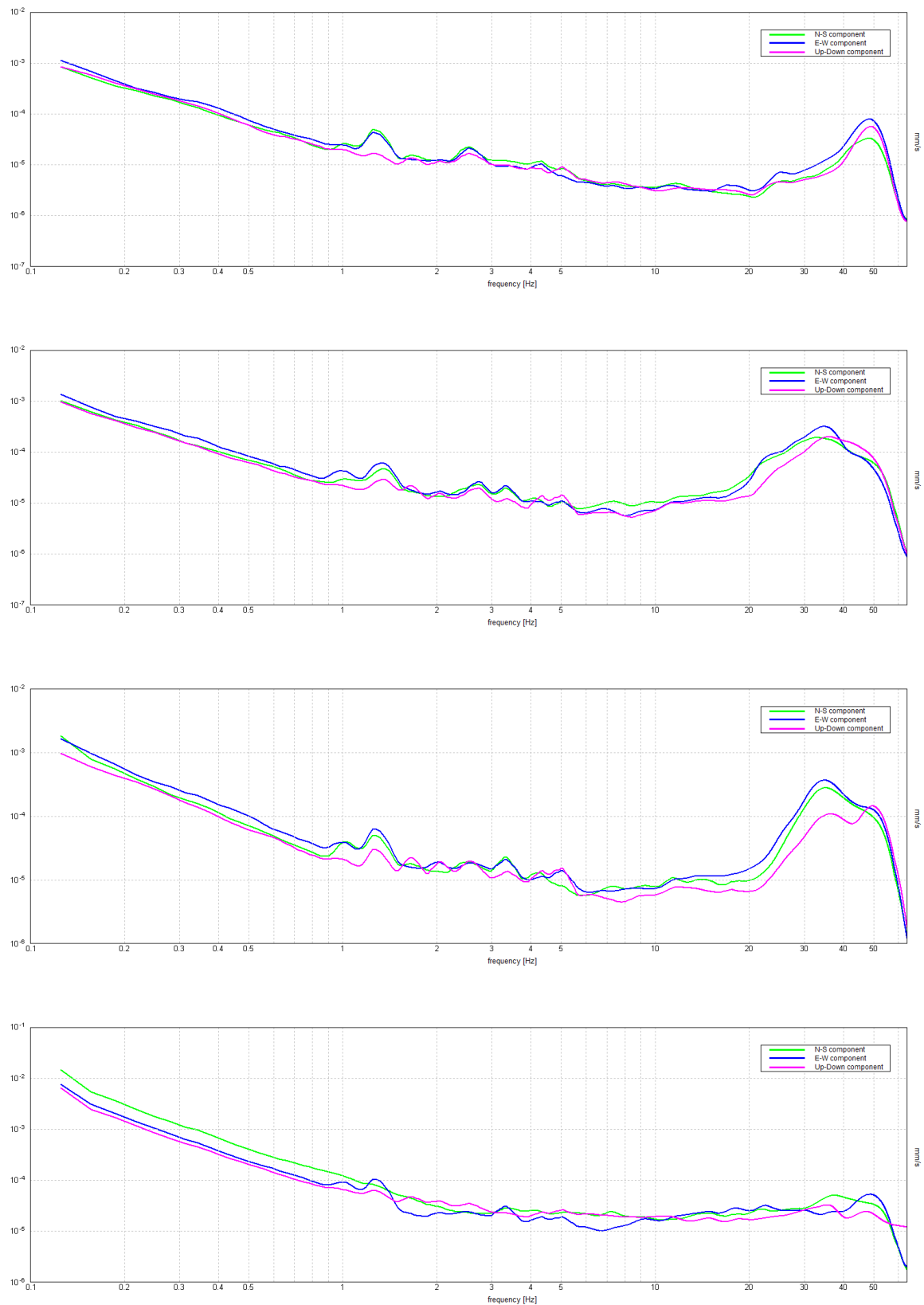
L'elaborazione delle tracce registrate e successiva analisi del rapporto spettrale fra la componente orizzontale e quella verticale dei microtremori sono state eseguite tramite il software *Grilla*, mediante i seguenti step:

- Pulizia delle tracce e selezione della finestra di interesse per il segnale (in modo da escludere eventuali disturbi);
- Elaborazione delle tracce per ottenere gli spettri delle singole componenti e del rapporto spettrale H/V;
- Identificazione, tramite interpretazione degli spettri, dei picchi di natura stratigrafica;
- Applicazione del processo d'inversione e valutazione del modello di sottosuolo risultante.



FASE DI INDAGINE

Spettri registrati con eliminazione del disturbo per le prove HVSr da 1 a 4 in ordine di lettura.



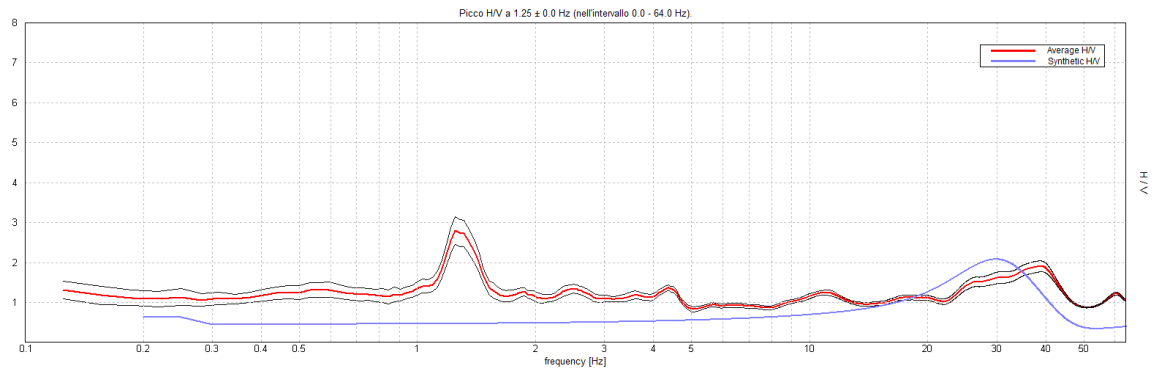
Spettro delle singole componenti misurate, due orizzontali e una verticale, per gli HVSr eseguiti (da 1 a 4 scendendo)



Rapporto spettrale H/V delle HVSR eseguite, da 1 a 4 scendendo

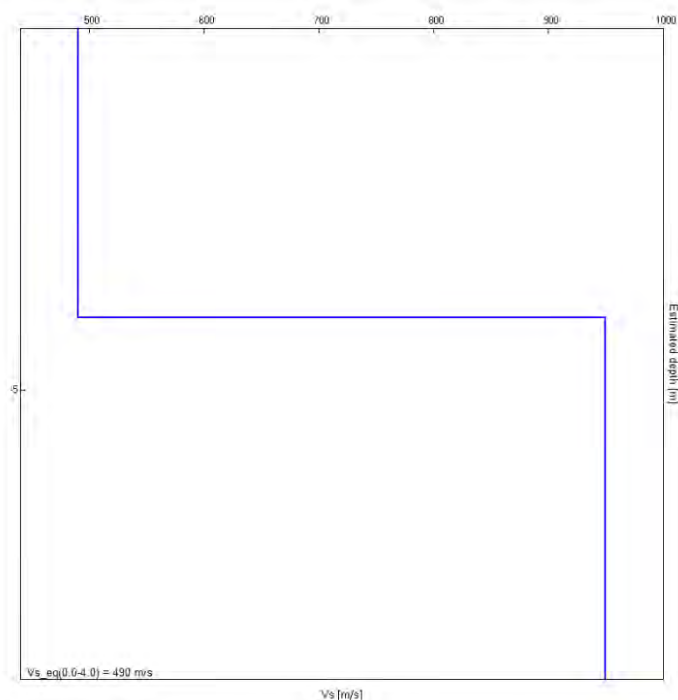
HVSR-1

Nel caso della prova HVSR-1, il grafico del rapporto H/V mostra un picco a circa 30 Hz, che coincide con una marcata differenza fra le componenti orizzontali e quella verticale (come si può notare sul grafico delle singole componenti); in virtù di questa configurazione tale picco è giudicato di natura stratigrafica e quindi utilizzato per ricostruire l'andamento delle Vs con la profondità.



La curva rossa rappresenta l'andamento del rapporto H/V ricavato dal segnato registrato, mentre la curva blu rappresenta l'andamento sintetico generato dal codice di calcolo, tramite cui il software restituisce il profilo delle Vs.

L'andamento delle velocità permette di riconoscere sostanzialmente una sola forte variazione di velocità localizzata a circa 4 m di profondità, dove le velocità passano da 490 m/s a 950 m/s, un assetto compatibile con quanto osservato dalla rifrazione 1: il salto di velocità osservato è quindi correlabile con la presenza di substrato roccioso. Dal punto di vista sismico, la prova HVSR-1 ha raggiunto il substrato, registrando velocità maggiori a 800 m/s a partire da 4 m di profondità. Il valore di $V_s(eq)$, calcolato sui primi 7 m di profondità è pari a 490 m/s e permette di identificare una categoria di suolo B per le opere che si intestano sulla superficie topografica e una **categoria A** per le opere che si intestano ad ameno un metro di profondità dal piano campagna

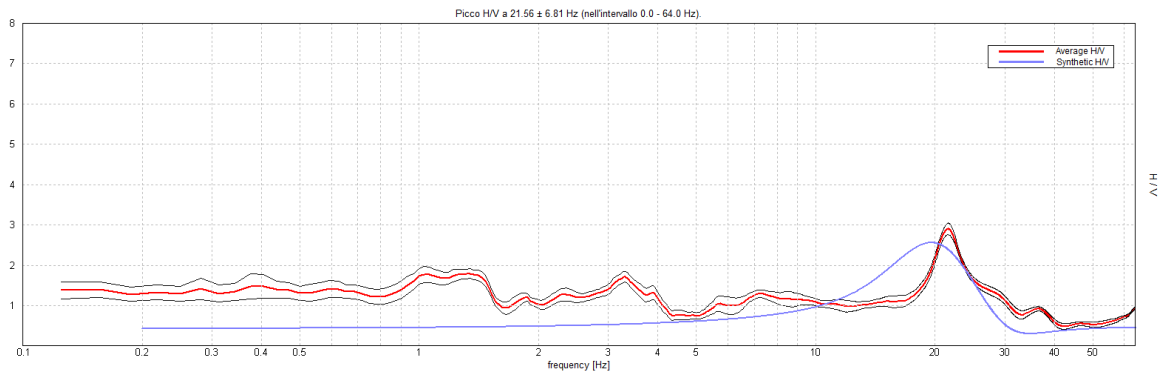


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
4.00	4.00	490	0.40
inf.	inf.	950	0.35

$$V_{s_eq}(0.0-4.0) = 490 \text{ m/s}$$

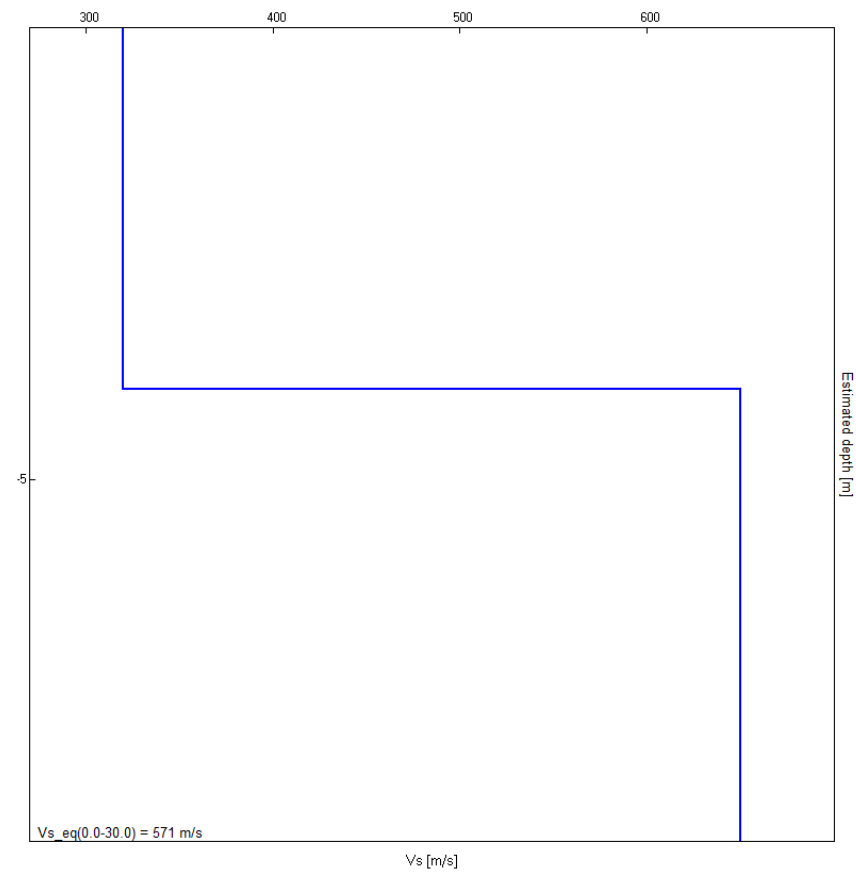
HVSR-2

Per la prova HVSR-2, il grafico del rapporto H/V mostra un picco evidente a circa 20-25 Hz, che coincide con un massimo nelle componenti orizzontali e un minimo in quella verticale (come si può notare sul grafico delle singole componenti); in virtù di questa configurazione tale picco è giudicato di natura stratigrafica e quindi usato per ricostruire l'andamento delle Vs con la profondità.



La curva rossa rappresenta l'andamento del rapporto H/V ricavato dal segnato registrato, mentre la curva blu rappresenta l'andamento sintetico generato dal codice di calcolo, tramite cui il software restituisce il profilo delle Vs.

L'andamento delle velocità mostra un andamento simile a quello osservato per HVSR 1 ma con un contrasto meno pronunciato, dove il primo livello, di circa 4m di spessore, è caratterizzato da velocità di 320 m/s ed è seguito da un livello a 650 m/s. Benché tale valore non sia esplicitamente classificabile come substrato sismico, l'assetto generale dell'area permette di ipotizzare la presenza di substrato roccioso a profondità non eccessive, come in parte ricavato dalla rifrazione 2. La ridotta profondità di indagine della rifrazione 2 e la natura dell'analisi HVSR, molto dipendente dalla presenza di dati di vincolo su cui appoggiarsi, lasciano comunque un certo margine di incertezza nell'interpretazione. Come detto, si ritiene che in coincidenza di RIF+HVSR 2 il substrato roccioso possa presentarsi attorno a 6-7m di profondità, ma non è in realtà escludibile a priori la possibilità che in realtà il salto delle velocità sismiche sia indotto dalla presenza di un primo livello più compatto tra i depositi superficiali e il sottostante substrato. Il valore di $V_s(eq)$, calcolato sui primi 30 m di profondità è pari a 571 m/s e permette di identificare una categoria di suolo B.



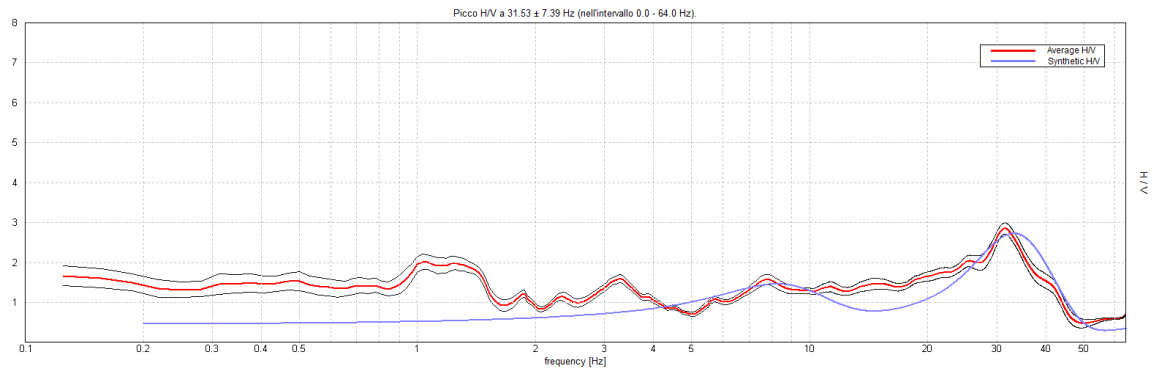
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
4.00	4.00	320	0.42
inf.	inf.	650	0.40

Vs_eq(0.0-30.0) = 571 m/s

FASE DI INDAGINE

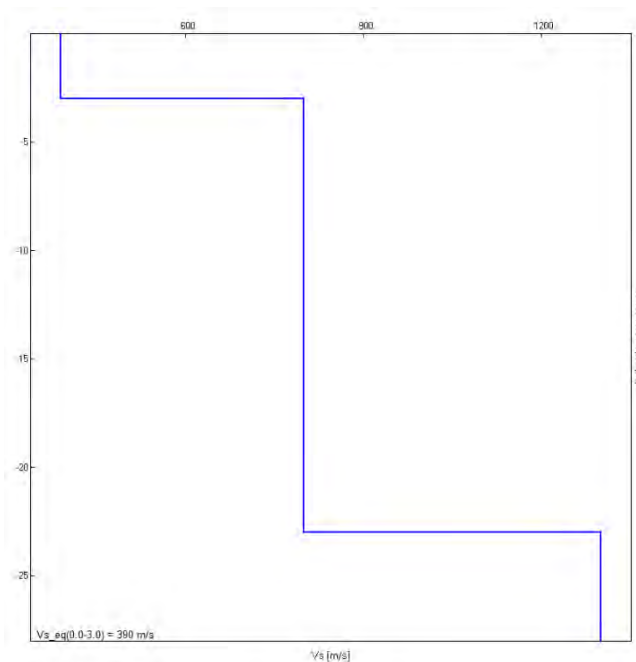
HVSR-3

Nel caso della prova HVSR-3, il grafico del rapporto H/V mostra un primo forte picco a circa 35 Hz, seguito da un picco secondario a circa 8 Hz; entrambi coincidono con un massimo nelle componenti orizzontali e un minimo in quella verticale (come si può notare sul grafico delle singole componenti); in virtù di questa configurazione tali picchi sono stati giudicati di natura stratigrafica e quindi usati per ricostruire l'andamento delle Vs con la profondità.



La curva rossa rappresenta l'andamento del rapporto H/V ricavato dal segnato registrato, mentre la curva blu rappresenta l'andamento sintetico generato dal codice di calcolo, tramite cui il software restituisce il profilo delle Vs.

L'andamento delle velocità permette di riconoscere una prima forte variazione localizzata a circa 3 m di profondità, dove le velocità passano da 390 m/s a 800 m/s; a circa 8,50 m di profondità, poi, si ha un secondo incremento significativo di velocità delle onde S, che raggiunge i 1300 m/s. L'andamento delle velocità è compatibile con quanto ottenuto dalla rifrazione 3 e il primo salto di velocità può essere considerato indice del passaggio al substrato roccioso. In virtù di questa configurazione, la prova HVSR3 porta a indicare la presenza di un suolo di **categoria A**, dato che la profondità del substrato sismico è inferiore o uguale a 3m. Qualora il substrato fosse a profondità maggiori, è comunque valido l'uso di una categoria B in relazione alle velocità del primo strato (390 m/s).

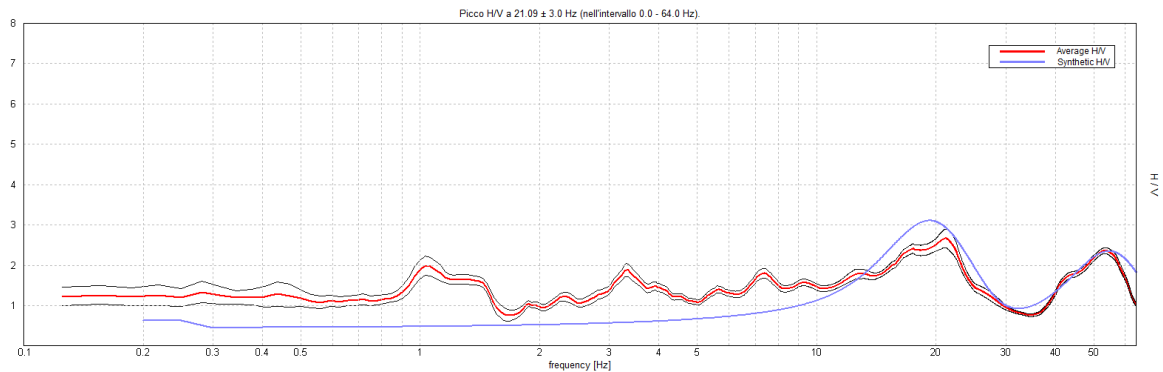


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
3.00	3.00	390	0.42
23.00	20.00	800	0.38
inf.	inf.	1300	0.35

$$V_{s_eq}(0.0-3.0) = 390 \text{ m/s}$$

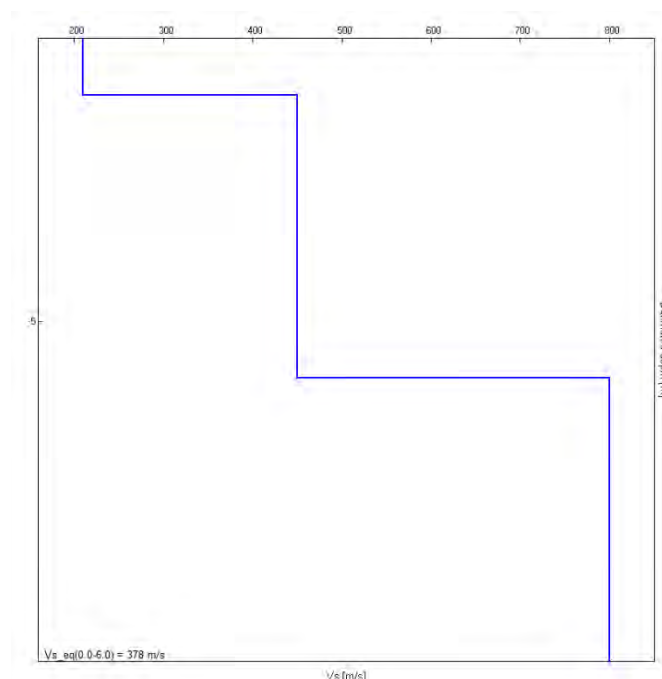
HVSR-4

Nel caso della prova HVSR-4, il grafico del rapporto H/V mostra un primo picco a circa 50 Hz e un secondo picco a circa 20 Hz; entrambi coincidono con un massimo nelle componenti orizzontali e un minimo in quella verticale (come si può notare sul grafico delle singole componenti); in virtù di questa configurazione tali picchi sono giudicati di natura stratigrafica e quindi usati per ricostruire l'andamento delle Vs con la profondità.



La curva rossa rappresenta l'andamento del rapporto H/V ricavato dal segnato registrato, mentre la curva blu rappresenta l'andamento sintetico generato dal codice di calcolo, tramite cui il software restituisce il profilo delle Vs.

L'andamento delle velocità permette di riconoscere una prima variazione localizzata a circa 1 m di profondità, dove le velocità passano da 210 m/s a 450 m/s; a circa 6 m di profondità, poi, si ha un secondo incremento significativo di velocità delle onde S, che raggiunge i 800 m/s. Tale andamento è compatibile con quanto ottenuto dalla rifrazione 4. Dal punto di vista sismico, la prova HVSR-4 ha raggiunto il substrato, registrando velocità pari a 800 m/s. Il valore di $V_{s(eq)}$, calcolato sui primi 6 m di profondità è pari a 378 m/s e permette quindi di identificare una categoria di suolo B.

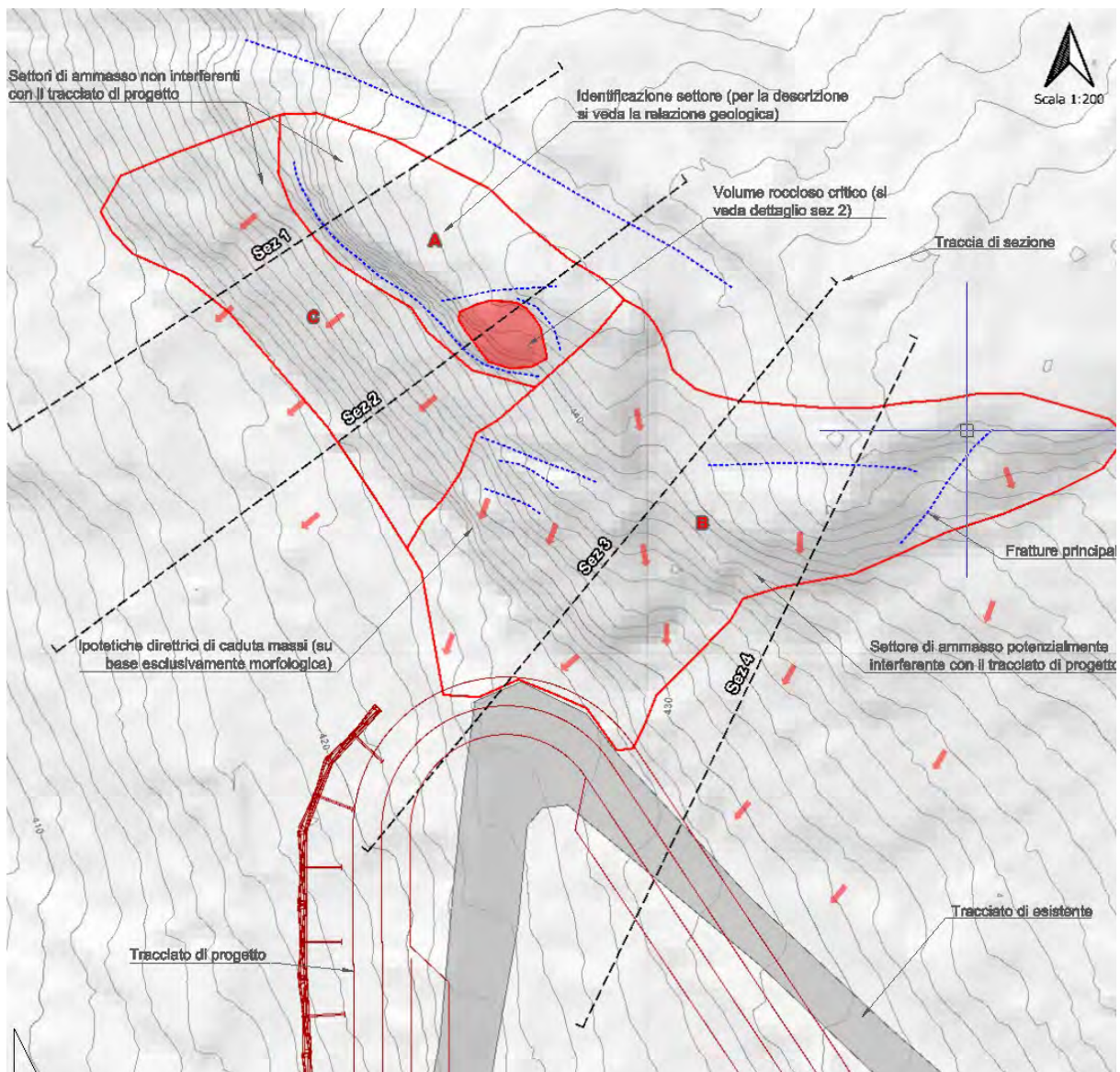


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.00	1.00	210	0.42
6.00	5.00	450	0.40
inf.	inf.	800	0.35

$$Vs_{eq}(0.0-6.0) = 378 \text{ m/s}$$

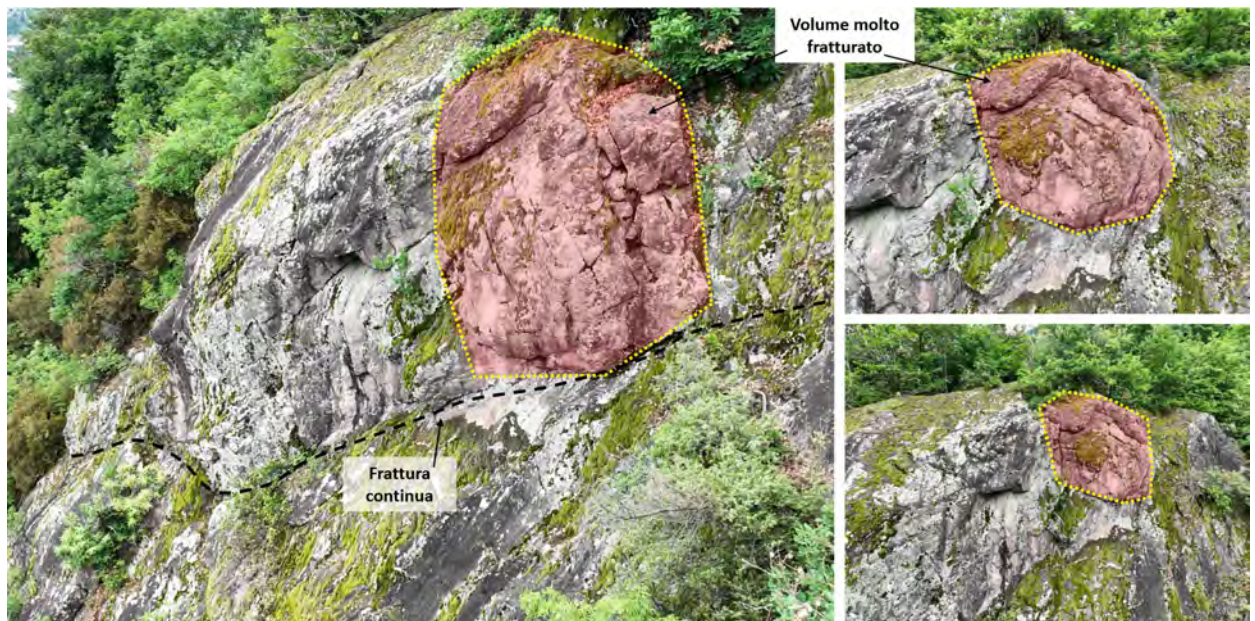
Dettaglio affioramento roccioso presso il tornante 1 (tavola grafica E.404)

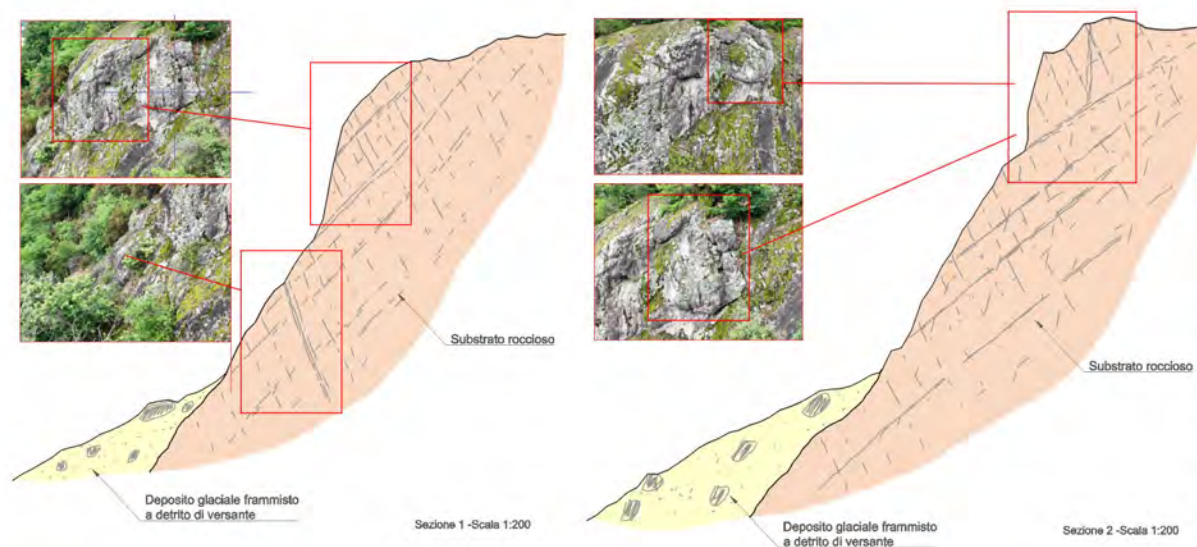
La parete in oggetto può essere schematicamente divisa in 3 aree, identificate come A B e C.





L'area A è quella che mostra le caratteristiche più critiche in termini di possibilità di caduta massi, in quanto è delimitata da una frattura basale evidentemente persistente e uscente dal versante, che predispone allo scivolamento di volumi rocciosi. La struttura massiccia dell'ammasso a monte di questa frattura in parte mitiga la criticità, individuando singoli blocchi con forme a lastra appoggiate sulla frattura basale, soggette prevalentemente a scivolamento; resta tuttavia un settore di ammasso molto disarticolato al margine sinistro (orografico) dell'area. Si tratta di un volume a elevata fratturazione, con discontinuità sia a tergo sia laterali che di fatto lo isolano dal versante e appoggiato alla frattura basale. Si tratta in sostanza di un elemento roccioso, dal volume stimabile nell'ordine di circa 20 mc, che può potenzialmente destabilizzarsi per scivolamento o ribaltamento.



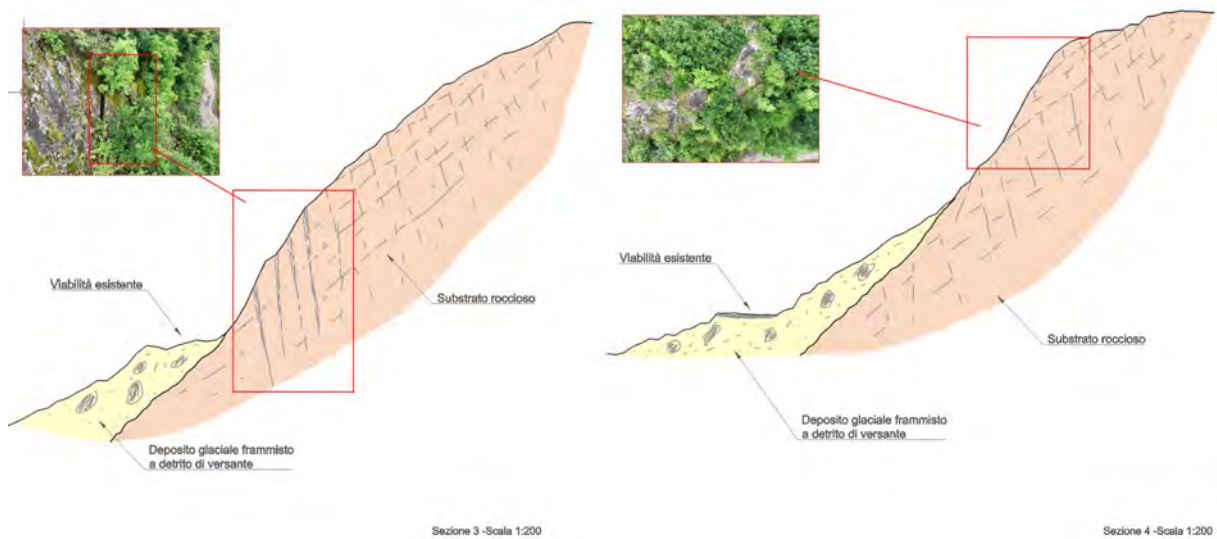


Il limitrofo settore B è in gran parte soffocato dalla vegetazione e non visibile, per cui è difficile individuarne in modo compiuto le caratteristiche di fratturazione e possibili stili di instabilità. È stato possibile raggiungere a piedi l'estremità sinistra (orografica) dell'affioramento, dove si è osservato un volume roccioso singolo disarticolato dal versante, di dimensioni indicative di 1.5x0.8x0.5 m. la geometria lisciata e bombata dell'affioramento globale, tipica dei dossi montonati, non mette in evidenza aree particolarmente disturbate o complesse dell'ammasso, che appare, per quanto visibile, caratterizzato da una struttura a blocchi, senza elementi evidentemente critici come quello descritto per l'area A.



FASE DI INDAGINE

Alla base del versante sono percepibili, tra la fitta vegetazione, delle lastre rocciose di spessore metrico al massimo, chiaramente separate dal versante, di cui però non è stato possibile osservare il piede e di cui non è possibile definire compiutamente la geometria e l'assetto statico.



Il settore C si presenta molto omogeneo, con fratture parallele alla superficie topografica, probabilmente originate da tipici meccanismi di rilascio tensionale conseguenti il ritiro glaciale; tali fratture hanno la caratteristica di non emergere dal versante e, quindi, difficilmente si prestano a giocare il ruolo di superfici di base per scivolamenti.



In termini di priorità, il settore B insiste direttamente sulla strada di progetto e dovranno quindi essere necessariamente considerate delle opere di mitigazione e protezione della strada. Date le caratteristiche generali dell'ammasso roccioso, si propone la posa di pannelli in rete di fune sul settore di affioramento che insiste sulla viabilità di progetto. Al momento, data l'impossibilità di osservare in modo compiuto l'affioramento, non è possibile formulare indicazioni di maggior dettaglio, per esempio escludere determinati settori dal rivestimento con pannelli sostituendoli con semplice disgaggio e chiodatura puntuale. Tali valutazioni potranno quindi essere condotte in un secondo momento, una volta che la parete rocciosa sia pulita e resa visibile. Per le lastre presenti alla base del versante, si suggerisce di prevedere la loro chiodatura con ancoraggi profondi, anche in questo caso da verificare compiutamente una volta che sono rese visibili.

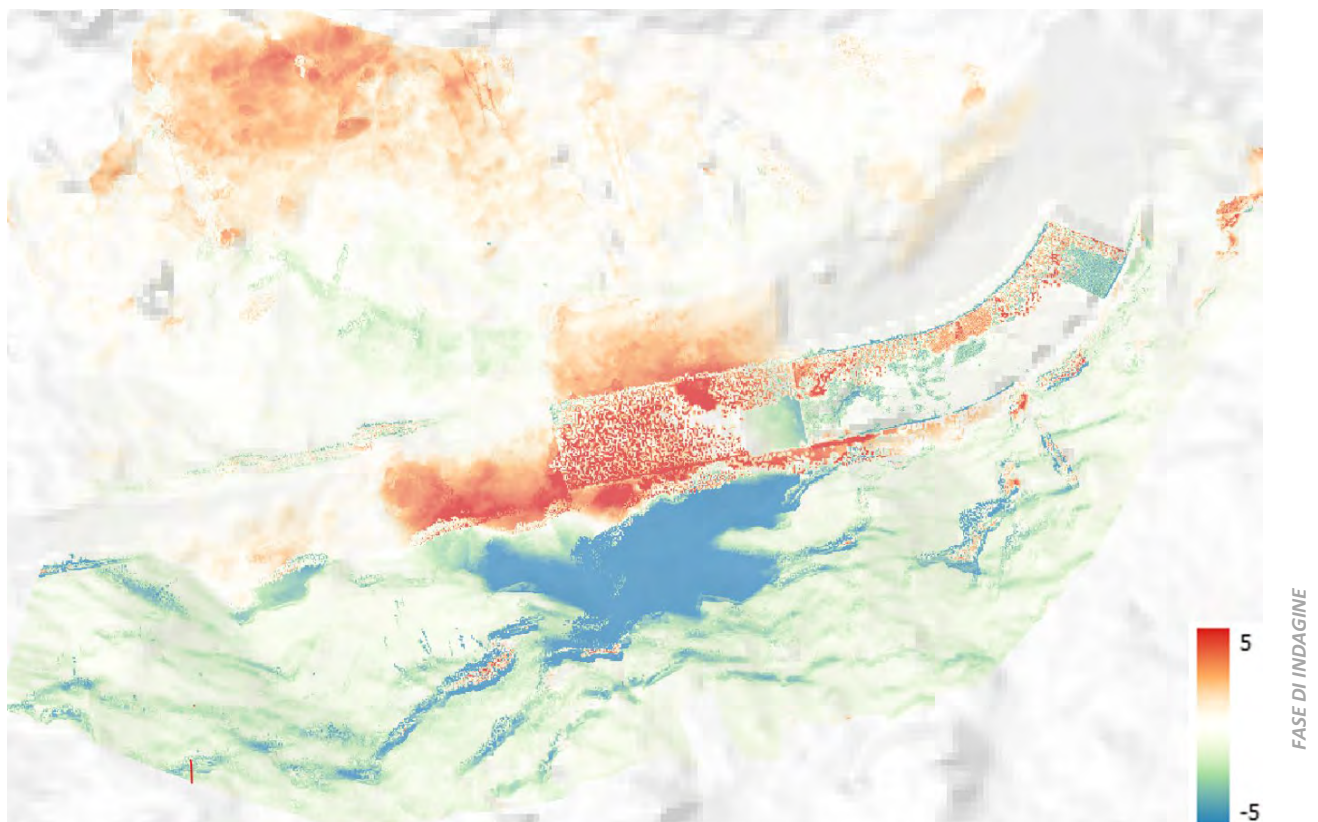
Le zone A e C non insistono direttamente sul tracciato di progetto e possono quindi essere considerate non prioritarie. Intervenire nella zona A dovrebbe prevedere, oltre alle pannellature in rete di fune, anche la realizzazione di un piccolo contrafforte al piede del settore di ammasso più fratturato. Per il settore C sarebbe sufficiente il solo rivestimento.

Valutazione del volume di materiale roccioso accumulato sulla strada

La stima del volume movimentato dall'evento di frana del dicembre 2025 e del susseguente intervento di demolizione con esplosivo si è basata sul dato topografico messo a disposizione dal Comune di Pisogne.

Per l'area sono stati resi disponibili un dato topografico post-frana e un rilievo post-demolizione di dettaglio. Escludendo il DTM regionale 5x5 m in quanto troppo poco dettagliato per le necessità del presente studio, non risulta disponibile un rilievo topografico pre-frana.

Confrontando il dato topografico 3D (nuvola di punti) post-frana con il dato post-demolizione è possibile mappare le aree dove la quota topografica è aumentata o diminuita in occasione della demolizione. Il calcolo del volume derivante dalla differenza fra le due topografie corrisponde al calcolo del volume coinvolto nella demolizione con esplosivo e successivo disaggio in parete.



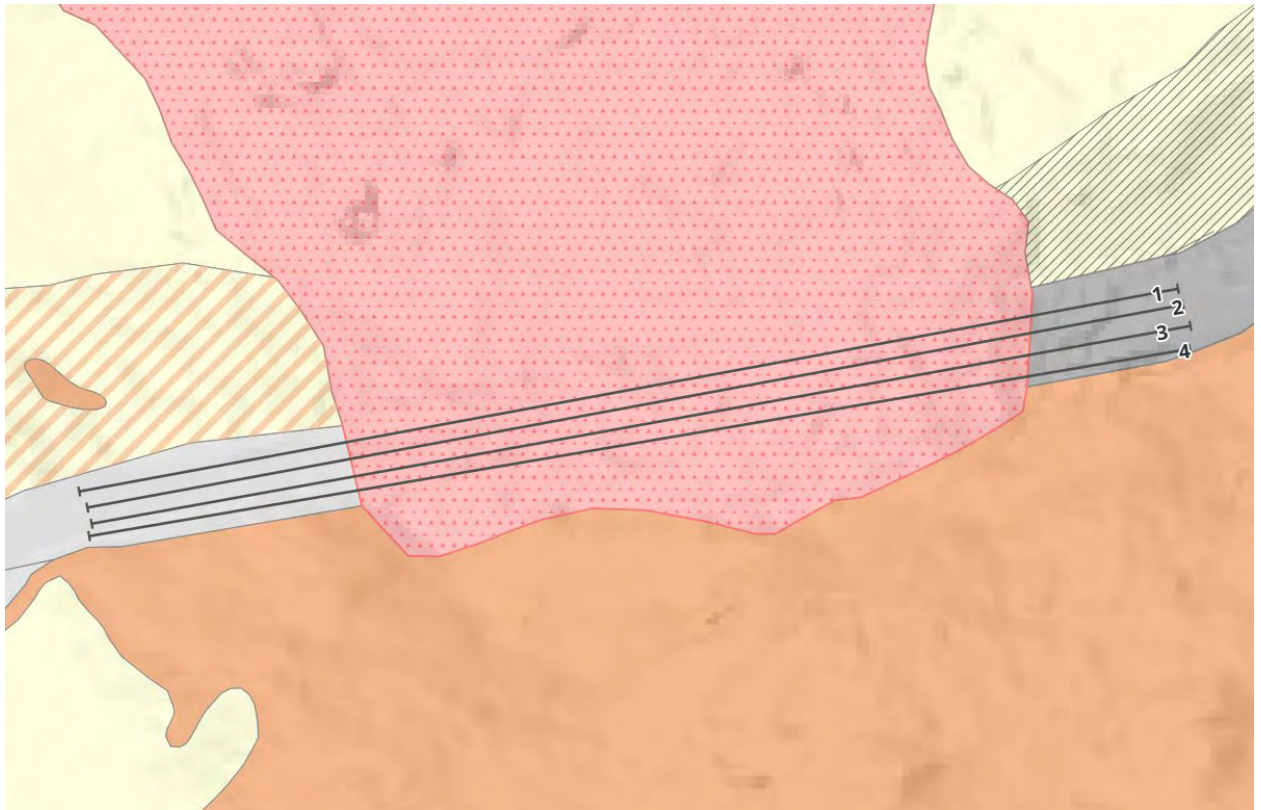
Vista planimetrica della differenza fra la topografia 3D post-frana e quella post-demolizione – legenda in metri – non in scala.

Come si può notare dall'immagine precedente, si ha una marcata diminuzione della topografia sulla porzione della parete a monte della strada, dove la demolizione ha rimosso la porzione di ammasso sul fianco destro della frana (colori blu). Viceversa, si osserva un incremento della quota topografica sulla strada e alla base del versante, dove si è accumulato il deposito prodotto dalla demolizione (in rosso). Ben visibile l'effetto dell'abbattimento del tratto centrale della galleria paramassi esistente.

Considerando esclusivamente la porzione di accumulo presso la strada, è possibile calcolare il volume dei depositi accumulato moltiplicando il valore di ciascuna cella della griglia per la sua area (pari a 0,01 m²) e sommando tutti i

valori per l'area considerata. Si ottiene così un valore di circa 500 m³ di depositi prodotti dalla demolizione, compresa la presenza degli elementi del tratto di galleria demolito. Una prima stima cautelativa per il volume totale considera che il volume di sedimenti prodotti dalla frana e accumulati sulla strada sia simile a quello prodotto dalla demolizione: si ottiene quindi un valore totale dei depositi presenti sulla strada pari a circa 1.000 m³.

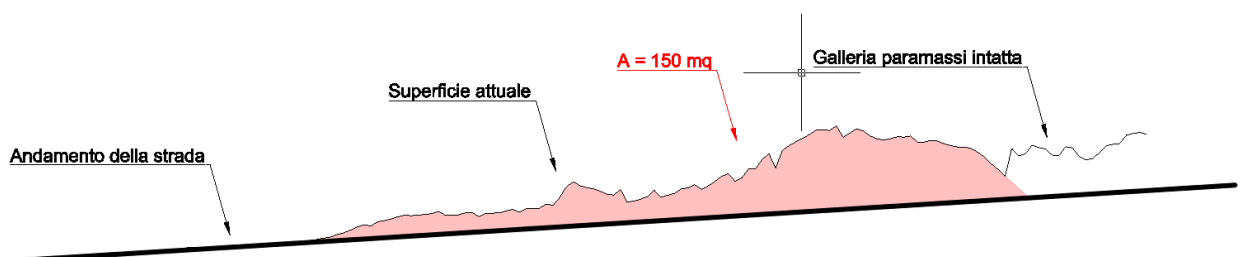
Un approccio alternativo consiste nell'estrazione di quattro sezioni topografiche dell'area d'interesse, disposte circa parallelamente all'andamento della strada.



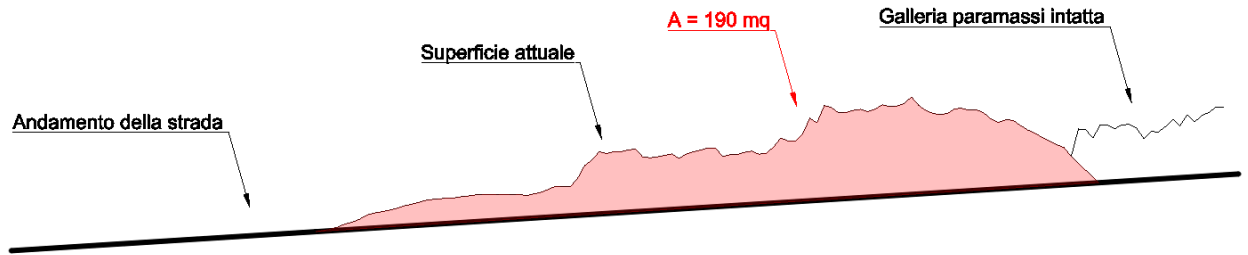
Posizione delle sezioni topografiche utilizzate – non in scala.

Essendo ipotizzabile l'andamento della superficie topografica originale, approssimato dall'andamento regolare della strada stessa, è possibile calcolare la superficie totale di depositi presenti in ciascuna sezione. Poiché le sezioni sono spaziate di circa 1 m fra loro, la somma delle aree ottenute corrisponde al volume di depositi presenti.

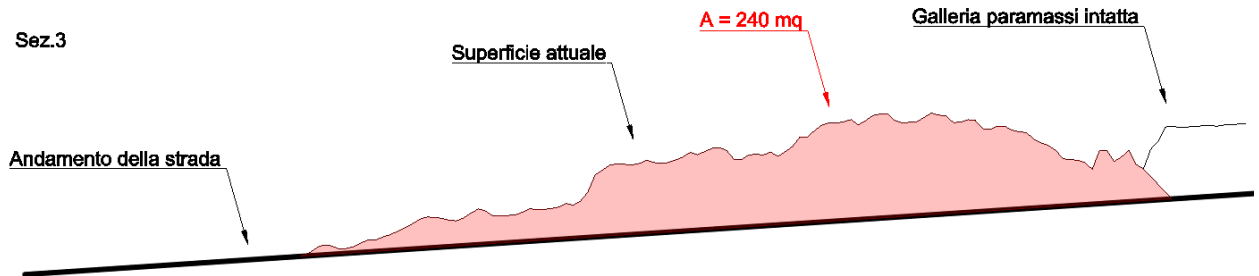
Sez.1



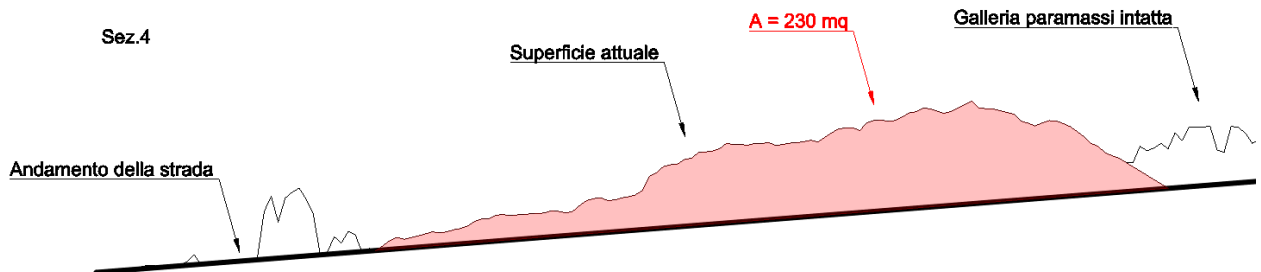
Sez.2



Sez.3



Sez.4



Immagini delle sezioni con evidenziate le aree corrispondenti ai depositi di frana e demolizione – non in scala.

Si ottiene in questo modo un valore del volume di depositi presenti sulla strada di 800 – 900 m³, che appare in linea con la stima precedente.

Il volume di materiale lapideo presente sulla superficie della strada è quindi stimabile in 800-1000 m³.

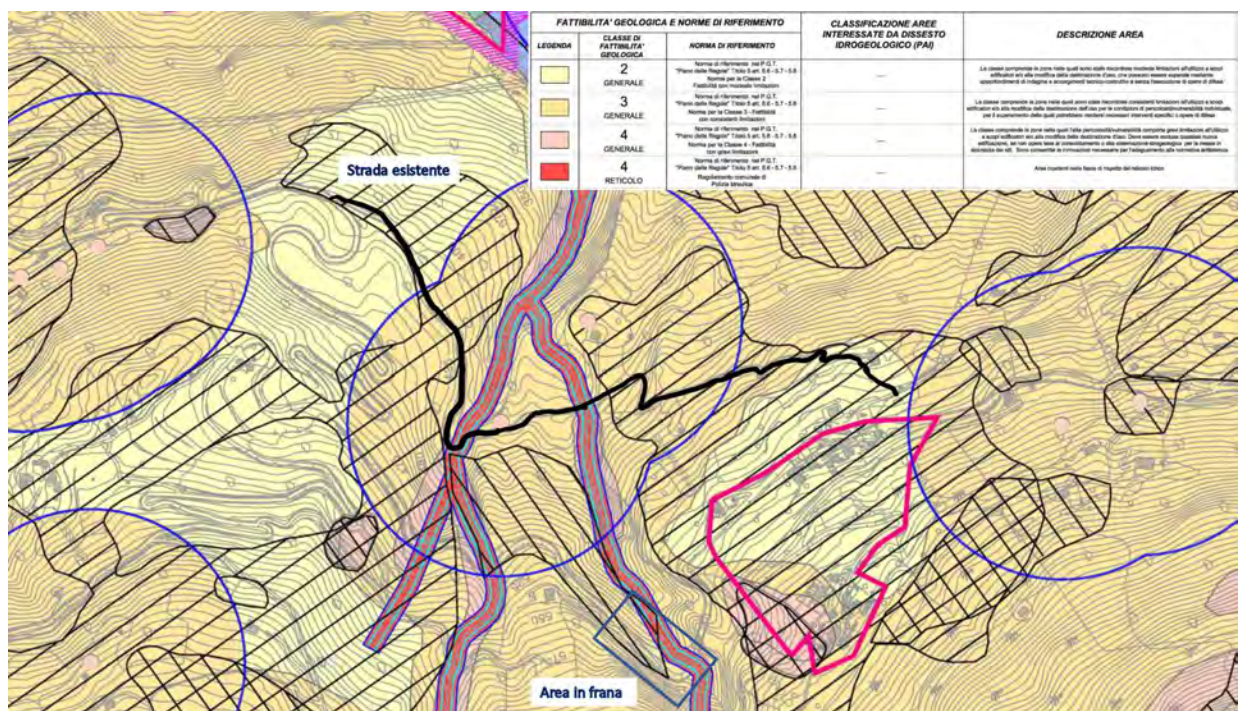
FASE DI ELABORAZIONE E INTERPRETAZIONE DEI DATI

Vincoli geologici

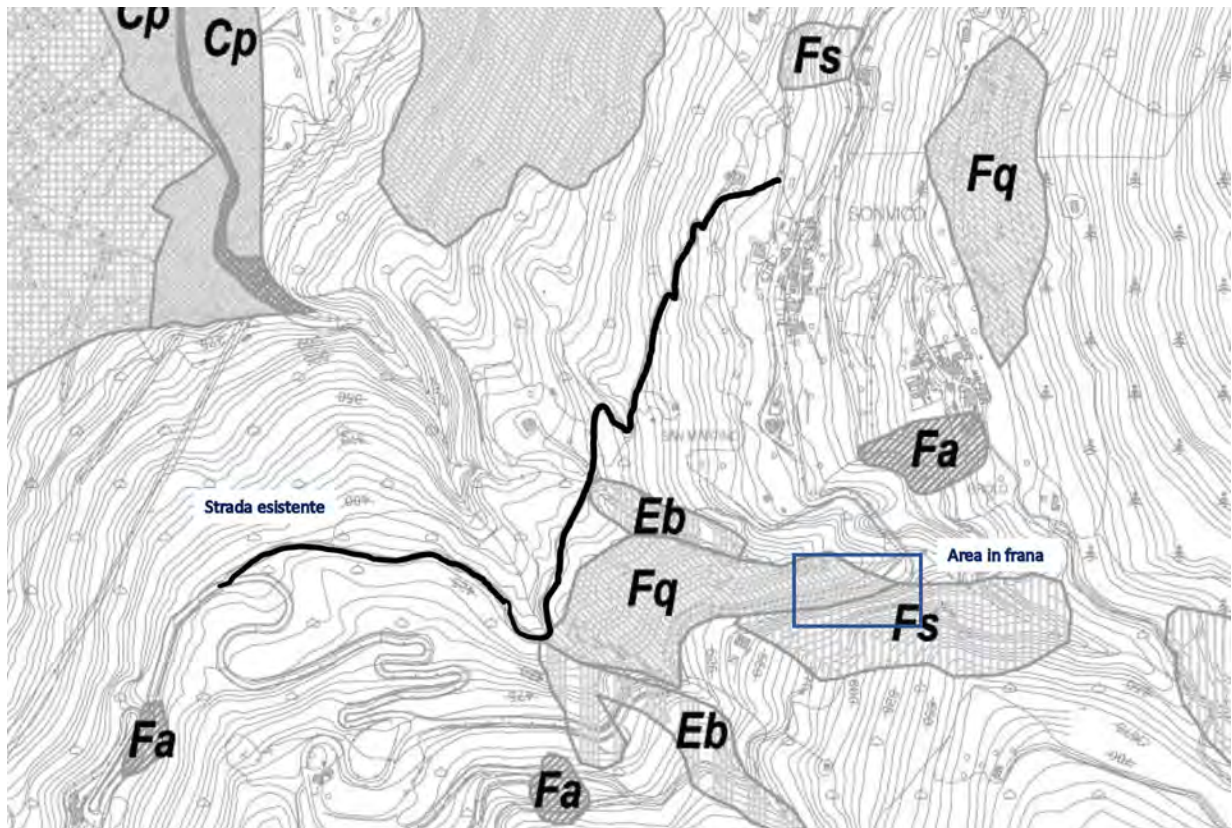
Fattibilità

La strada di progetto, che ricalca in gran parte l'andamento della strada esistente, attraversa classi di fattibilità geologica 2 (tratti iniziale e finale della strada), di fattibilità geologica 3 (gran parte della zona centrale) e, in coincidenza degli impluvi, classe geologica 4 per la presenza delle fasce di rispetto reticolo idrico minore o per la presenza di processi torrentizi connessi alle valli San Martino e San Pietro. La porzione centrale del tracciato è inoltre compresa in perimetrazioni di rispetto per la presenza di captazioni ad uso idropotabile.

Anche la zona della frana è compresa in classi di fattibilità 3 e 4, per la presenza di fenomeni franosi quiescenti e processi torrentizi della Valle di San Pietro.



Stralcio Carta di fattibilità tratta dal PGT comunale vigente.

PAI-PGRA (Piano di Assetto Idrogeologico e Piano Gestione Rischio Alluvioni)

Stralcio della carta PAI tratta dal PGT comunale vigente

Compatibilmente con quanto riportato dalla carta di fattibilità, il tracciato della strada di progetto è sostanzialmente esterno da perimetrazioni di dissesto, essendo solo marginalmente lambito da perimetrazioni per esondazione a carattere torrentizio con pericolosità elevata (Eb) e per frane quiescenti (Fq); queste ultime caratterizzano anche le aree di innesco della frana del dicembre 2025.

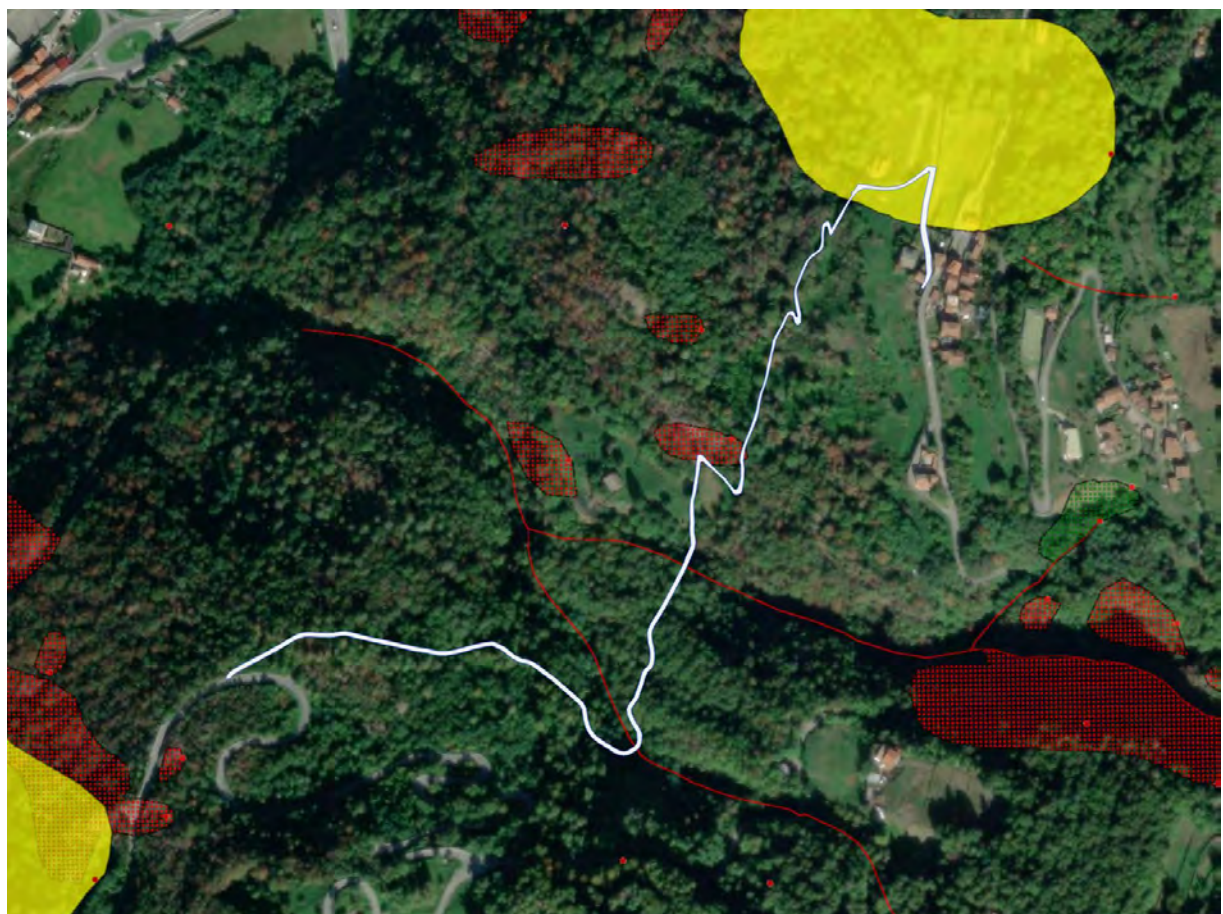
Non sono presenti perimetrazioni PGRA in grado di interferire con le opere in progetto.

IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia)

La carta dei fenomeni IFFI segnala, per il tracciato esistente della carrareccia, un'area di crollo e ribaltamento diffuso in coincidenza del primo tornante, come osservato in sopralluogo; viene inoltre riportata la presenza di un corpo di frana di scivolamento rotazionale/traslattivo nella porzione terminale della strada, indicato con stato di attività quiescente. Per questo dissesto, la consultazione dei dati di interferometria satellitare forniti dall'EGMS ha fornito un solo punto di valutazione degli spostamenti del terreno, che ha fornito valori di spostamento pressoché nulli nella finestra di validità del dato.

L'area della frana insiste su una perimetrazione per area soggetta a crolli/ribaltamenti diffusi.

In generale, i dati IFFI non sono connessi a vincoli normativi specifici, ma testimoniano la presenza di localizzati elementi di attenzione di cui tenere conto.

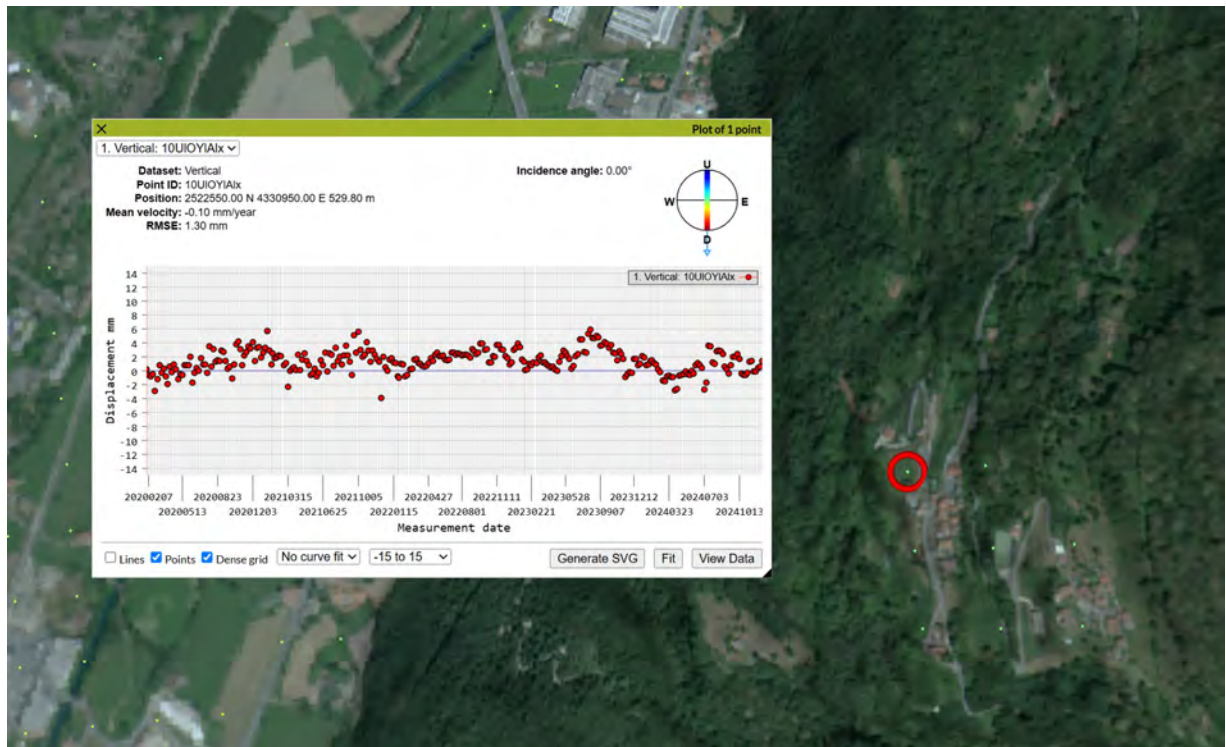
**Aree a franosità diffusa**

-  Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi
-  Aree soggette a frane superficiali diffuse
-  Aree soggette a sprofondamenti diffusi

Frane poligonali

-  Scivolamento rotazionale/traslattivo
-  Conoidi detritico-alluvionali

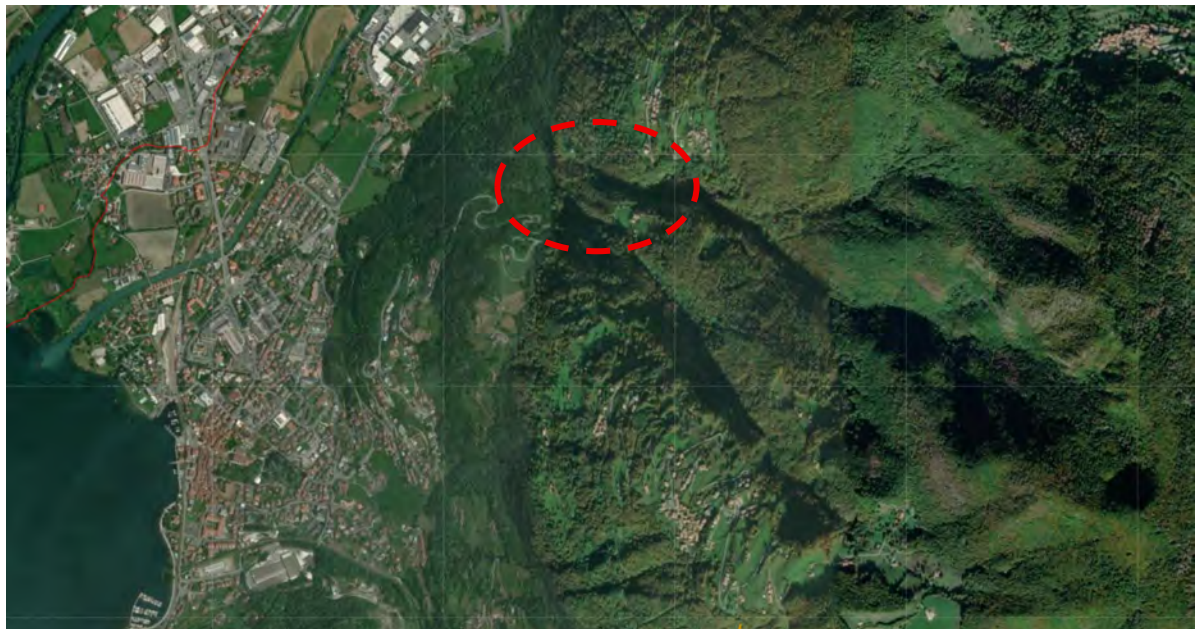
Stralcio della carta IFFI da geoportale di Regione Lombardia; in rosso l'area in esame - non in scala.



Punto di consultazione EGMS

CLPV (Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe)

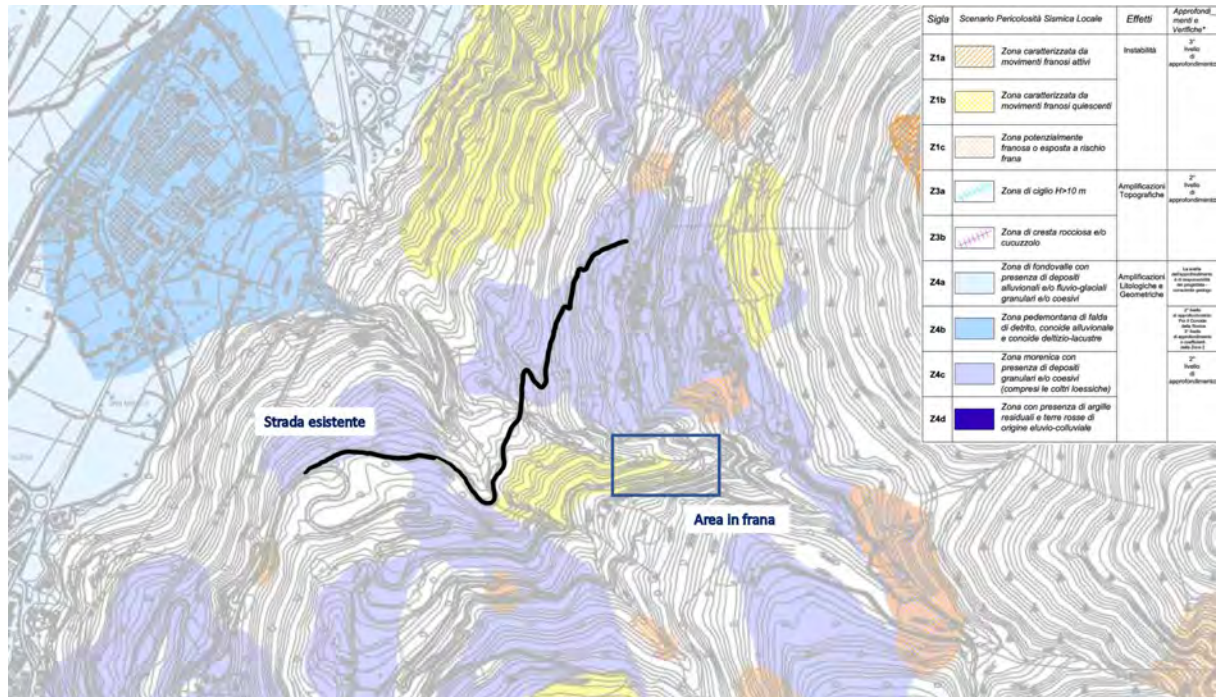
La carta CLPV non segnala fenomeni in grado di interessare l'area di progetto.



Stralcio della carta CLPV da geoportale di Regione Lombardia

Pericolosità Sismica Locale (PSL)

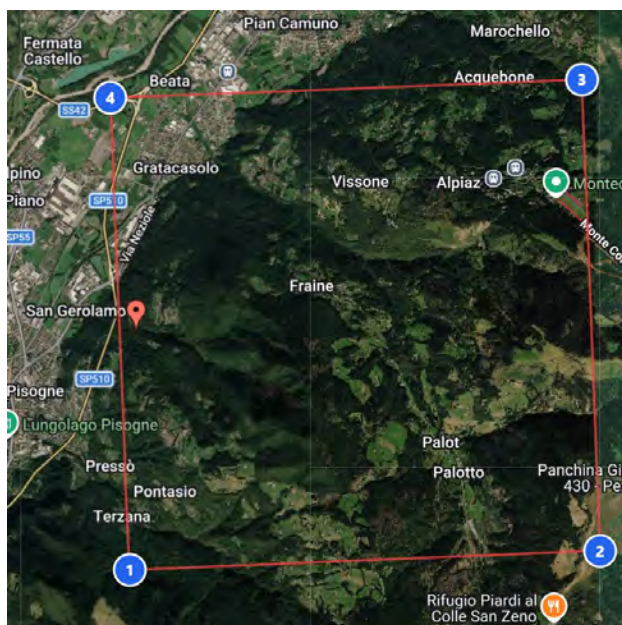
Stando a quanto riportato dal PGT vigente del comune di Pisogne, il tracciato di progetto attraversa scenari di pericolosità Z4c “Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi”, ai margini di uno scenario e lo scenario Z1b “Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti”. Quest’ultima classe comprende anche le aree della frana del 2025.



Stralcio Carta della PSL dell'abitato di Paisco (PGT comunale). Il cerchio nero indica la zona di progetto.

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 ha confermato, per il Comune di Pisogne, 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 seguente. 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, come ricavato dalle indagini HVSR riportati nelle pagine precedenti, un suolo di categoria B e una categoria topografica T2 (pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$).



Classe Edificio

II. Affollamento normale, assenza di funz. pubblic...

Vita Nominale

50

Interpolazione

Media ponderata

CU = 1

STATO LIMITE	TR	A _G [G]	F ₀	T _G * [S]
Operatività (SLO)	30	0.034	2.465	0.202
Danno (SLD)	50	0.043	2.474	0.222
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.111	2.456	0.279
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.143	2.475	0.289

Sopra: localizzazione dell'area e parametri sismici di base con suolo A e topografia T1.

Coefficienti sismici

Tipo

Stabilità dei pendii e fondazioni

☐

Muri di sostegno non in grado di subire spostamenti

↕

H (m)

1

📏

us (m)

0.1

🌐

Cat. Sottosuolo

B

📐

Cat. Topografica

T2

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti (360 < Vs30 ≤ 800 m/s)

Pendii con inclinazione media i > 15°

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,20	1,20	1,20	1,20
CC Coeff. funz. categoria	1,51	1,49	1,42	1,41
ST Amplificazione topografica	1,20	1,20	1,20	1,20

☐

⚡ Acc. massima attesa [m/s²]

0.6

COEFFICIENTI	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.010	0.012	0.038	0.050
kv	0.005	0.006	0.019	0.025
Amax [m/s²]	0.480	0.610	1.570	2.023
Beta	0.200	0.200	0.240	0.240

Coefficienti sismici

Tipo

Fronti di scavo e rilevati

☐

Muri di sostegno non in grado di subire spostamenti

↕

H (m)

1

📏

us (m)

0.1

🌐

Cat. Sottosuolo

B

📐

Cat. Topografica

T2

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti (360 < Vs30 ≤ 800 m/s)

Pendii con inclinazione media i > 15°

	SLO	SLD	SLV	SLC
SS Amplificazione stratigrafica	1,20	1,20	1,20	1,20
CC Coeff. funz. categoria	1,51	1,49	1,42	1,41
ST Amplificazione topografica	1,20	1,20	1,20	1,20

☐

⚡ Acc. massima attesa [m/s²]

0.6

COEFFICIENTI	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	--	0.029	0.061	--
kv	--	0.015	0.030	--
Amax [m/s²]	0.480	0.610	1.570	2.023
Beta	--	0.470	0.380	--

Parametri di calcolo per la stabilità dei pendii, con suolo B e categoria T2.

Considerazione in merito alla liquefazione dei terreni

Le Norme Tecniche per le costruzioni richiedono una verifica alla suscettibilità di liquefazione dei terreni su cui insiste il progetto: “Il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione” (art. 7.11.3.4.1 DM 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”).

Al capitolo 7.11.3.4.2 dello stesso decreto (Esclusione alla verifica di liquefazione) è riportato che:

“La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Fig. 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e in Fig. 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.”

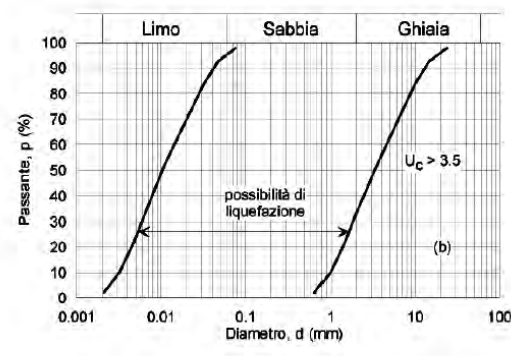
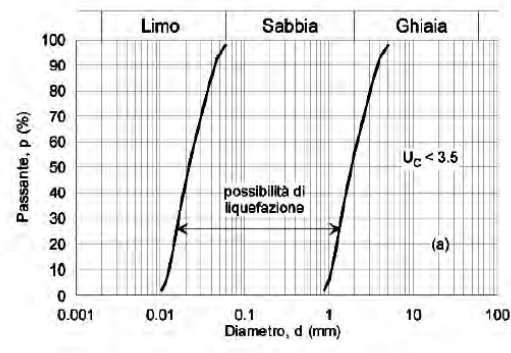


Fig. 7.11.1 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione

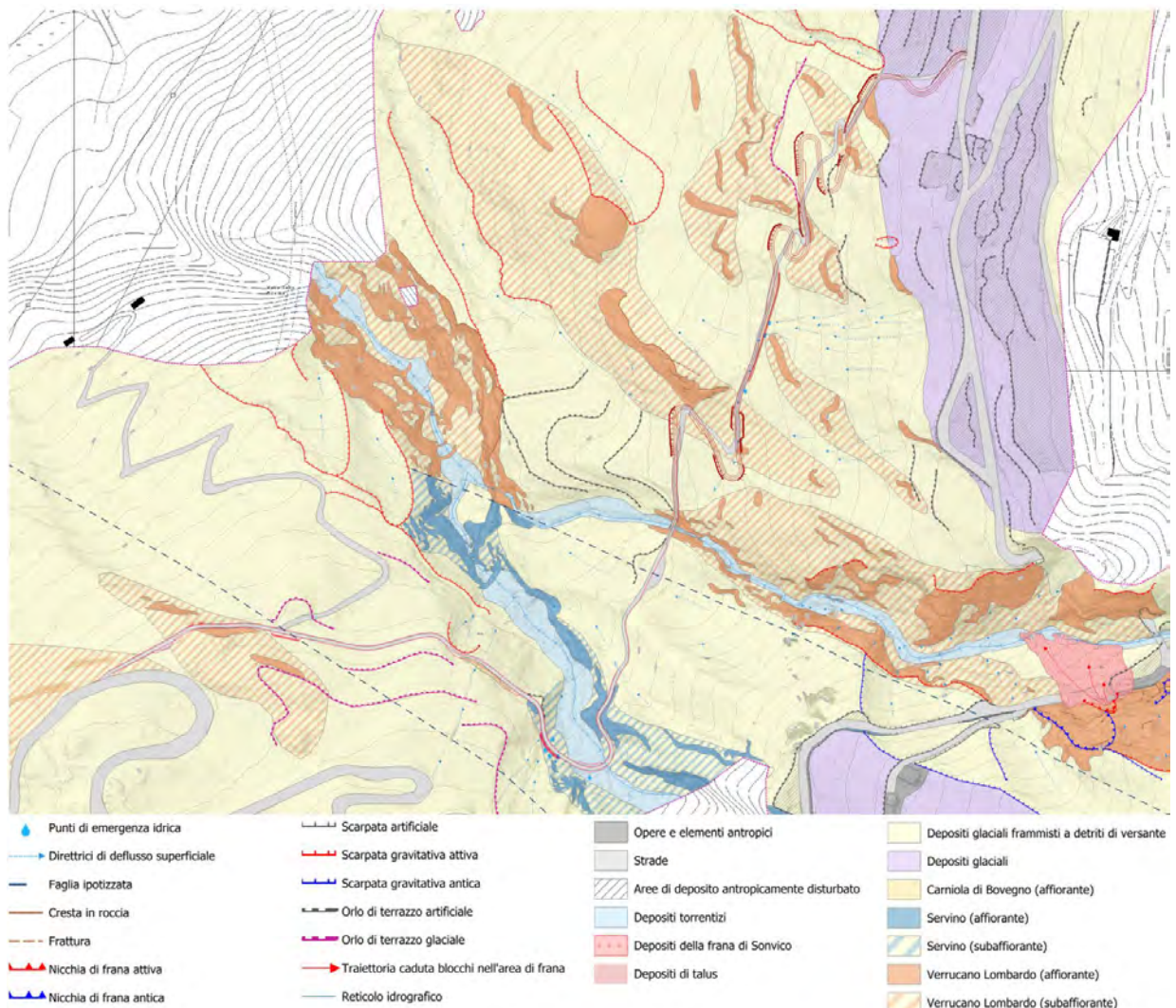
Nel caso in esame, i pochi depositi osservati non sono certo in grado di sostenere una falda permanente: eventuali episodi di saturazione sono limitati alle zone di concentrazione del flusso sotterraneo, non creando vere e proprie falde idriche. Questo fattore, unito al fatto che il deposito, per quanto possibile osservare, non è costituito da sabbie fini uniformi, porta a considerare il rischio di liquefazione basso o nullo.

FASE DI SINTESI

Modello Geologico Semplificato di Riferimento (MGR)

Tracciato della strada di bypass

L'insieme dei sopralluoghi e delle indagini eseguite ha consentito di ricavare un primo modello geologico semplificato di riferimento che, data la natura arealmente estesa dell'opera in progetto, è formalizzato nella planimetria geologica interpretativa (elab. E.403) e nella tavola di dettaglio per il tornante fra le sezioni 109 e 113 (elab. E.404). In questa fase di progettazione preliminare si è cercato di fornire un quadro geologico di riferimento lungo tutto il tracciato della strada di progetto, in modo da rendere fattibile la valutazione dell'interazione tra le opere previste e il contesto geo-morfologico. La variabilità dell'entità, della posizione e della tipologia delle opere previste può quindi essere inizialmente inquadrata nel contesto geologico; considerazioni e indagini più approfondite possono quindi essere valutate e programmate puntualmente nei tratti progettualmente più impegnativi.

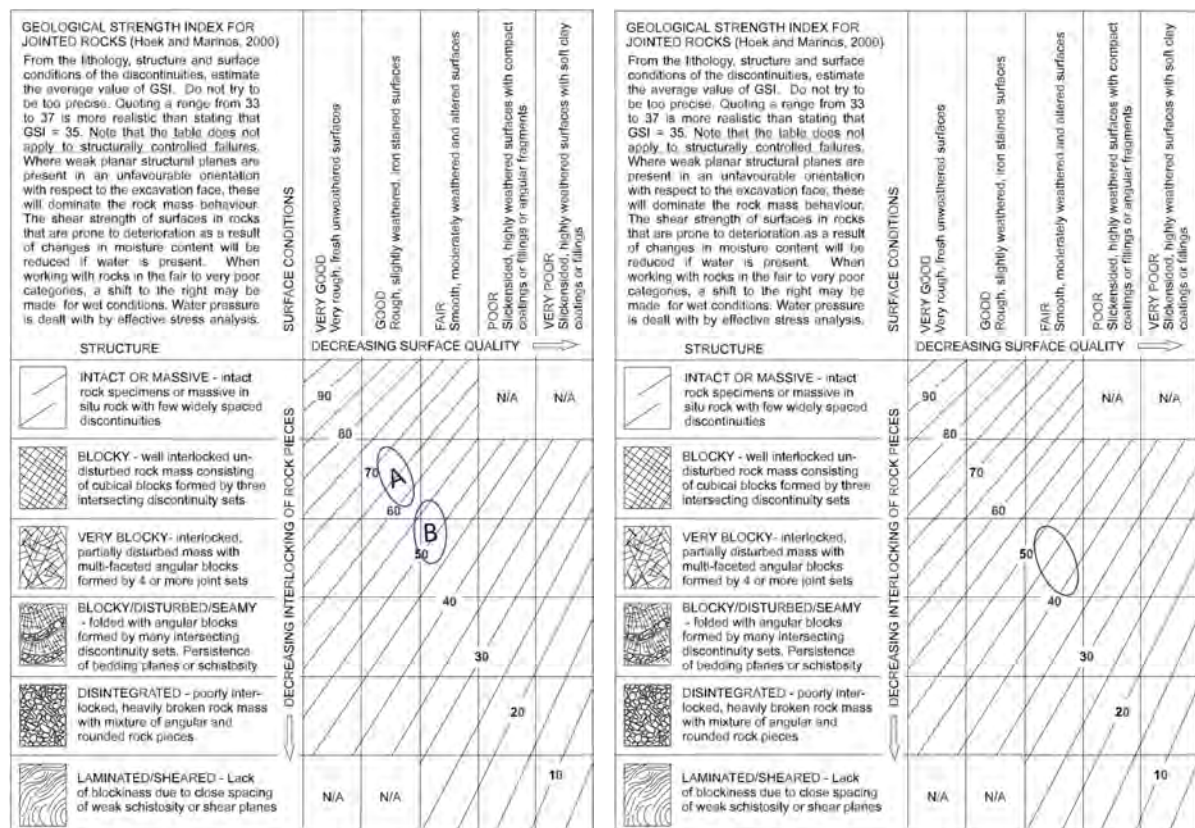


In planimetria sono rappresentate le aree di affioramento dell'ammasso roccioso, suddivise per litologia, ottenute dai sopralluoghi, dalle indagini e dalle analisi condotte e precedentemente descritte, che rappresentano il dato di base derivato direttamente dalle osservazioni o, comunque, con interpretazione minima. Si tratta quindi di porzioni

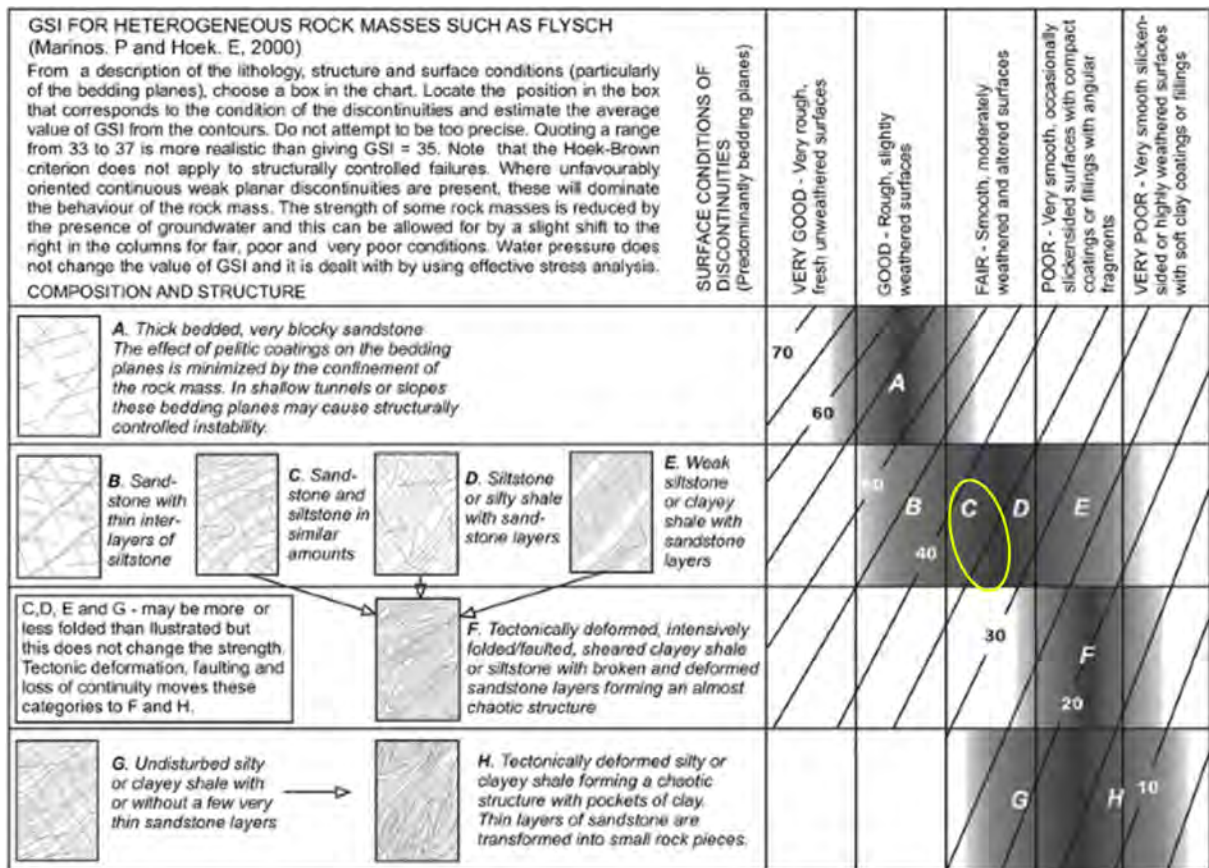
di territorio in cui la roccia è considerata direttamente affiorante, eventualmente coperta da un sottile livello eluvio-colluviale di spessore inferiore a 1m.

Attorno a queste aree sono state definite delle zone di subaffioramento, in cui il substrato non è direttamente visibile né deducibile su base morfologica, ma in cui l'abbondanza di affioramenti e le elevate pendenze portano a presupporre la presenza di substrato a profondità comunque ridotte, nell'ordine, indicativamente, di 1-3m, tendenzialmente minore man mano che ci si avvicina alle zone di affioramento.

È possibile fornire una classificazione geomeccanica di massima dei materiali rocciosi in base alla litologia e alla struttura osservata. Stante l'assenza di dedicati rilievi geomeccanici di dettaglio lungo il tracciato della strada, si propone l'utilizzo della classificazione GSI, che si basa essenzialmente su criteri derivabili dalla semplice osservazione dell'ammasso e delle discontinuità. Il valore è poi correlabile alla classificazione RMR considerando che $RMR = GSI - 5$. Si tratta quindi di un sistema di classificazione abbastanza speditivo, inteso per fornire un primo inquadramento delle caratteristiche globali degli ammassi rocciosi, da approfondire eventualmente in fasi successive, se richiesto dalla tipologia e dall'entità delle opere e della loro interazione con i mezzi geologici.



A sinistra: classificazione GSI per la litologia Verrucano Lombardo (A: ammasso tipico – B: ammasso in zona di faglia). A destra: classificazione GSI per la litologia del Servino.



Classificazione GSI per la litologia del Servino

Esternamente alle aree precedentemente descritte sono rappresentati i depositi superficiali, generalmente di origine glaciale o glaciale frammisto a detrito di versante, sostituiti da sedimenti torrentizi in coincidenza, soprattutto, della Valle di San Pietro. In queste aree lo spessore dei depositi non è direttamente noto, ma può essere considerato in genere maggiore di 3m, come osservato anche dalle indagini sismiche condotte, che nelle zone di terrazzo morfologico e nei punti più lontani dagli affioramenti riportano livelli anche di 6-7 m a basse velocità sismiche, interpretabili appunto come depositi superficiali. Si tratta di depositi ghiaioso-sabbiosi con blocchi e trovanti di dimensioni talora metriche, localmente a supporto di matrice limo-sabbiosa, che può presentare un certo grado di cementazione o consolidamento.

A livello tecnico, in assenza di dedicate indagini geognostiche, è possibile fornire i seguenti parametri descrittivi delle caratteristiche del terreno:

- Angolo di attrito interno: 35°-38°;
- Peso unità di volume: 18-19 kN/mc;
- Coesione efficace: 0 kPa.

La planimetria prodotta fornisce anche l'ubicazione dei principali punti di emergenza idrica osservati lungo il tracciato della strada, assieme agli ipotetici percorsi di alimentazione superficiali e sub-superficiali. In particolare, si osservano due importanti venute idriche che interferiscono con il tracciato della strada. La prima zona è collocata in prossimità dell'attraversamento sulla Valle di San Pietro, sulla sinistra idrografica di quest'ultima. In questo tratto

il versante è sostenuto da muri a secco e l'acqua, abbondantemente emergente e ruscellante, viene in parte collettata e indirizzata a un attraversamento, che a valle della strada, sostenuta da altri muri a secco, scarica direttamente su versante, producendo localizzati fenomeni di erosione. Parte della circolazione idrica ruscella invece liberamente sul versante, venendo poi in parte recuperata da una canaletta a lato strada e in parte correndo lungo la strada stessa. In questa zona il deposito si può quindi presentare più alterato e degradato, mostrando caratteristiche peggiori e una maggiore tendenza al franamento. Il progetto prevede quindi la realizzazione di gabbioni a sostegno del versante e una cunetta alla francese per collettare le acque, di cui si dovrà evitare lo scarico diretto a valle su sedimento non protetto.

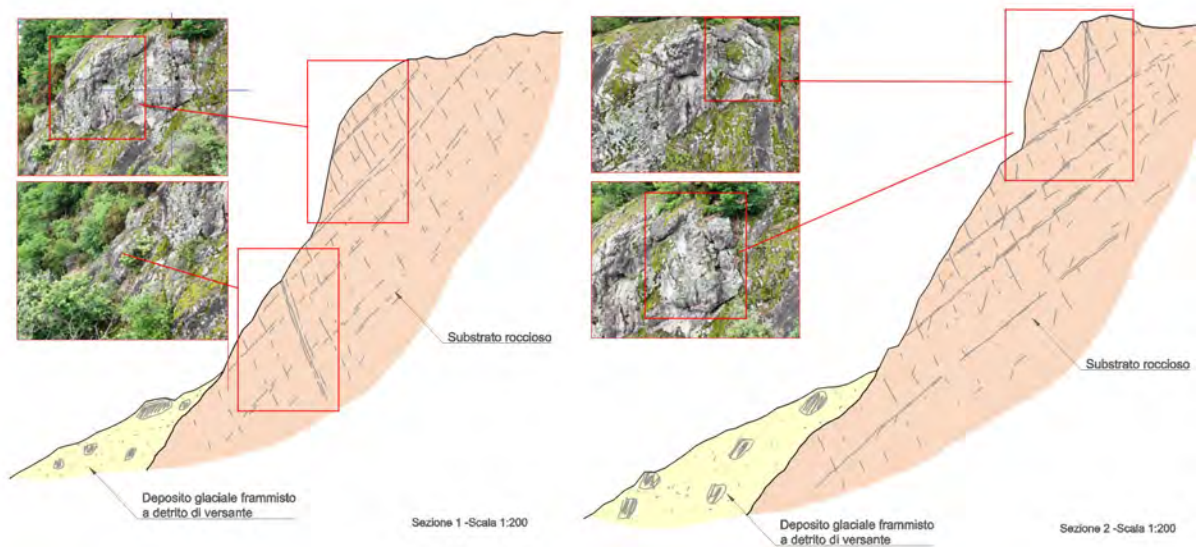
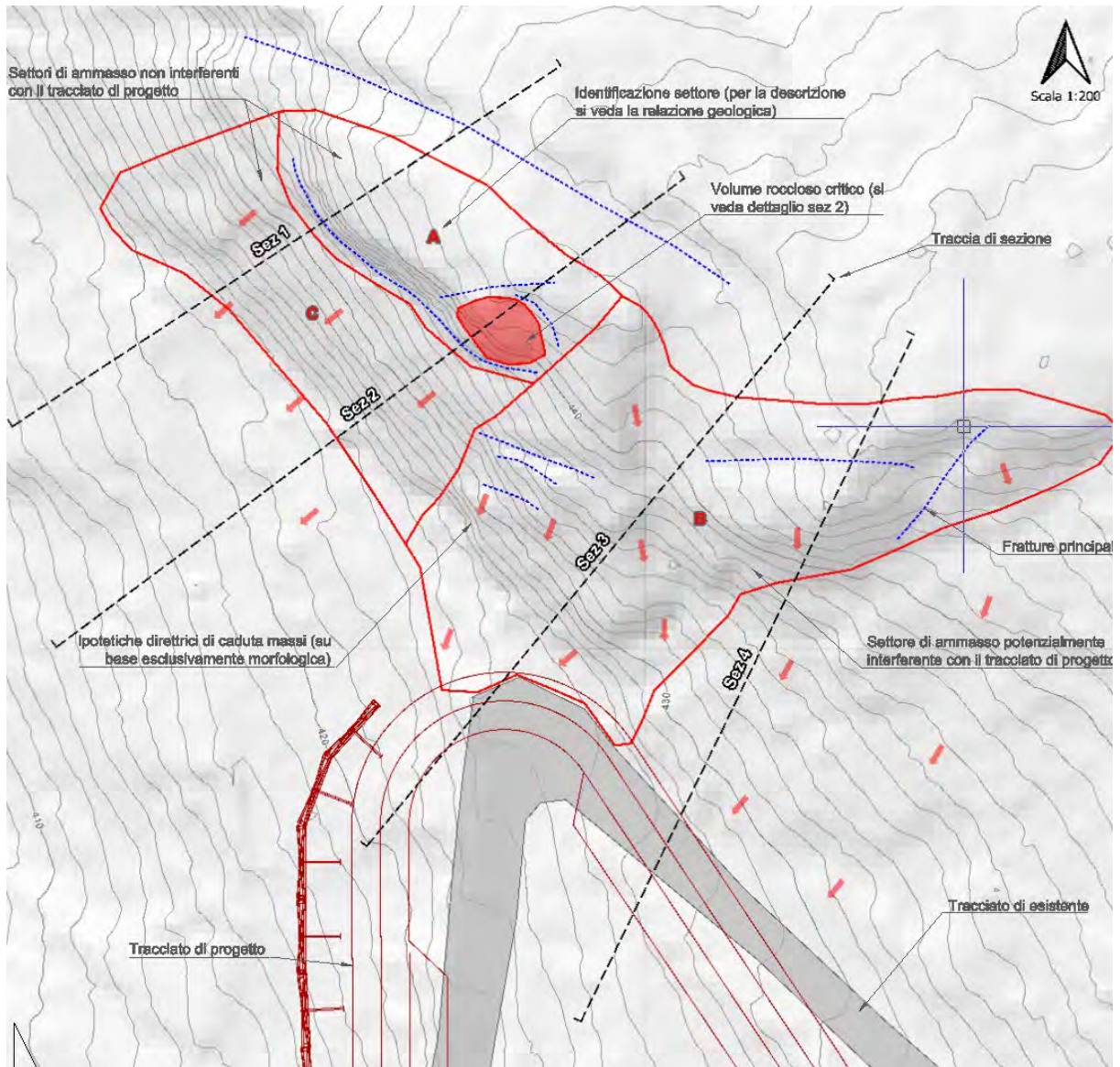
Il secondo punto di emergenza diffusa è presente a monte dei primi due tornanti, dove la strada attualmente collette le acque provenienti dal versante a monte. In questo caso sono evidenti dei solchi di ruscellamento concentrato, cui si sommano zone di emergenza indotte dal progressivo affiorare del substrato muovendosi da monte a valle. Allo stato attuale le acque ruscellano liberamente lungo la strada, scendendo poi nel bosco o venendo scaricate all'esterno del tornante 2. Il progetto prevede in questo caso di migliorare la gestione delle acque tramite l'introduzione di canaline per l'attraversamento della strada e canalette laterali per la sua intercettazione. Anche in questo caso si dovrà prevedere di non realizzare scarichi idrici concentrati su deposito senza difese.

Infine, dal punto di vista della stabilità del versante, non sono state osservate frequenti punti di criticità. Un punto dove porre attenzione è collocato in prossimità dell'affioramento di Carniola di Bovegno (sezione di progetto n° 15), dove si osserva un piccolo dissesto sul lato di valle della strada, per cui il nuovo tracciato verrà allontanato dalla scarpata esistente. Gli altri punti di attenzione coincidono con i citati punti di emergenza idrica. In generale, comunque, le buone caratteristiche del deposito presente e il diffuso subaffiorare del substrato mitigano molto queste problematiche, che restano relegate alle zone di maggiore acclività e a quelle con elevato contenuto idrico. Per quanto riguarda i fenomeni di caduta massi, potenziali distacchi sono possibili a partire dalle zone di affioramento roccioso. In tal senso, il punto più notevole è il settore di ammasso roccioso presente in prossimità del tornante 1, di cui si riporta nel capitolo seguente una descrizione dedicata.

Tornante tra le sezioni di progetto 109 e 113

La parete in oggetto può essere schematicamente divisa in 3 aree, identificate come A B e C.

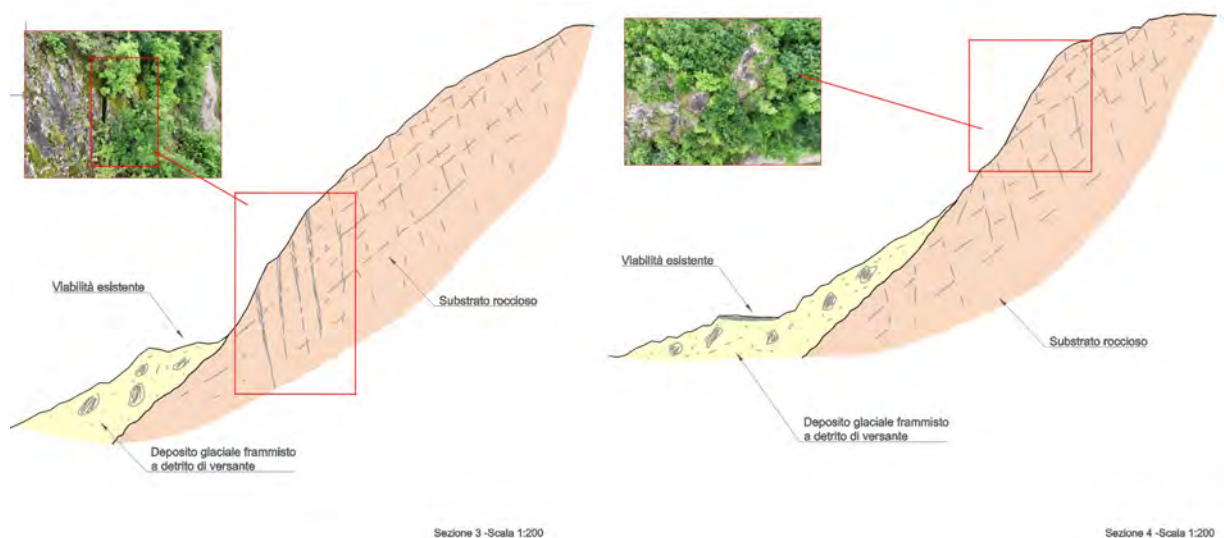
L'area A è quella che mostra le caratteristiche più critiche in termini di possibilità di caduta massi, in quanto è delimitata da una frattura basale evidentemente persistente e uscente dal versante, che predispone allo scivolamento di volumi rocciosi. La struttura massiccia dell'ammasso a monte di questa frattura in parte mitiga la criticità, individuando singoli blocchi con forme a lastra appoggiate sulla frattura basale, soggette prevalentemente a scivolamento; resta tuttavia un settore di ammasso molto disarticolato al margine sinistro (orografico) dell'area. Si tratta di un volume a elevata fratturazione, con discontinuità sia a tergo sia laterali, che di fatto lo isolano dal versante, e appoggiato alla frattura basale. Si tratta in sostanza di un elemento roccioso, dal volume stimabile nell'ordine di circa 20 mc, che può potenzialmente destabilizzarsi per scivolamento o ribaltamento.



Il limitrofo settore B è in gran parte soffocato dalla vegetazione e non visibile, per cui è difficile individuarne in modo compiuto le caratteristiche di fratturazione e possibili stili di instabilità. È stato possibile raggiungere a piedi l'estremità sinistra (orografica) dell'affioramento, dove si è osservato un volume roccioso singolo disarticolato dal versante, di dimensioni indicative di 1.5x0.8x0.5 m. la geometria lisciata e bombata dell'affioramento globale, tipica dei dossi montonati, non mette in evidenza aree particolarmente disturbate o complesse dell'ammasso, che appare, per quanto visibile, caratterizzato da una struttura a blocchi, senza elementi evidentemente critici come quello descritto per l'area A.



Alla base del versante sono percepibili, tra la fitta vegetazione, delle lastre rocciose di spessore metrico, chiaramente separate dal versante, di cui però non è stato possibile osservare il piede e di cui non è possibile definire compiutamente la geometria e l'assetto statico.



Il settore C si presenta molto omogeneo, con fratture parallele alla superficie topografica, probabilmente originate da tipici meccanismi di rilascio tensionale conseguenti il ritiro glaciale; tali fratture hanno la caratteristica di non emergere dal versante e, quindi, difficilmente si prestano a giocare il ruolo di superfici di base per scivolamenti.

Il settore B insiste direttamente sulla strada di progetto e dovranno quindi essere necessariamente considerate delle opere di mitigazione e protezione della strada. Date le caratteristiche generali dell'ammasso roccioso, si propone la posa di pannelli in rete di fune sul settore di affioramento che insiste sulla viabilità di progetto. Al momento, data l'impossibilità di osservare in modo compiuto l'affioramento, non è possibile formulare indicazioni di maggior dettaglio, per esempio escludere determinati settori dal rivestimento con pannelli sostituendoli con semplice disgaggio e chiodatura puntuale. Tali valutazioni potranno quindi essere condotte in un secondo momento, una volta che la parete rocciosa sia pulita e resa visibile. Per le lastre presenti alla base del versante, si suggerisce di prevedere la loro chiodatura con ancoraggi profondi, anche in questo caso da verificare compiutamente una volta che sono rese visibili.

Le zone A e C non insistono direttamente sul tracciato di progetto e possono quindi essere considerate non prioritarie. Intervenire nella zona A dovrebbe prevedere, oltre alle pannellature in rete di fune, anche la realizzazione di un piccolo contrafforte al piede del settore di ammasso più fratturato. Per il settore C sarebbe sufficiente il solo rivestimento.

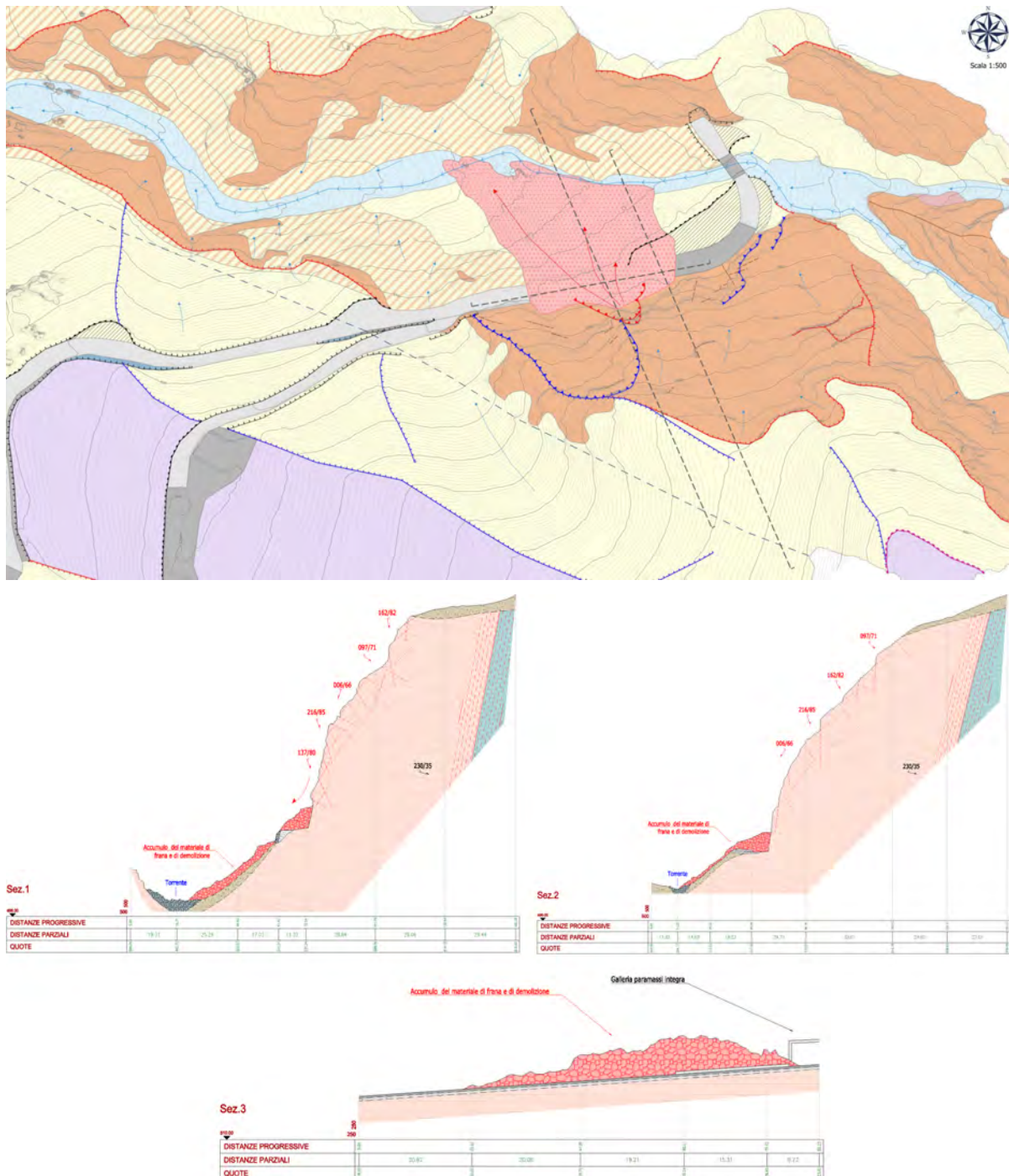
Settore della frana di Sonvico

Il presente progetto non comprende un'analisi di dettaglio delle condizioni di stabilità dell'ammasso roccioso nella zona di frana, aspetto che è al momento in fase di definizione nell'ambito di altri incarichi specialistici affidati dal Comune di Pisogne.

Nell'ambito del presente progetto ci si è quindi limitati a recepire i risultati delle prime valutazioni e dei rilievi condotti dai tecnici incaricati dal Comune di Pisogne, formalizzandoli in planimetrie e sezioni geologiche semplificate, che mostrano l'assetto dell'area e le condizioni di elevata fratturazione degli ammassi rocciosi, in cui gli elementi rocciosi più instabili sono stati eliminati tramite le operazioni di disgaggio con esplosivo, ma che non possono certo dirsi completamente in sicurezza. L'esecuzione dei lavori di smarino e il successivo transito dei mezzi di soccorso dovranno quindi essere gestiti tramite dedicato sistema di monitoraggio in grado di allertare il personale e interdire il transito in caso di movimenti dell'ammasso o distacchi di blocchi rocciosi.

In fase di disgaggio erano già stati montati n°4 fessurimetri elettrici per il monitoraggio di eventuali movimenti dell'ammasso durante le operazioni: si propone quindi di ripristinare questi sensori, aumentandone il numero per estendere l'area monitorata. I fessurimetri sono strumenti in grado di misurare gli spostamenti dell'ammasso, in termini di apertura o chiusura delle fratture monitorate: in linea di principio potrebbero quindi essere utilizzati in associazione a delle soglie di allerta progressive, associate a determinati livelli di spostamenti assoluti o velocità di spostamento. Tali soglie potranno essere definite soltanto a valle di dedicate e approfondite modellazioni del comportamento dell'ammasso che, come detto, sono attualmente affidate a tecnici individuati dal Comune di Pisogne con incarico separato. Nel frattempo, i fessurimetri dovranno essere utilizzati di fatto come un sistema

binario “fermo-non fermo”, dove anche la più piccola deformazione misurata, compatibilmente con la sensibilità dello strumento, deve essere considerata alla stregua di un’allerta.



Stralci delle planimetrie e delle sezioni geologiche prodotte per l'area di frana

Alla posa dei fessurimetri si propone di associare l'installazione di sistemi a strappo, che funzionano utilizzando un sensore centrale da cui si dipartono una serie di cavi in acciaio, ancorabili all'ammasso in molteplici punti. In questo caso non si tratta di strumenti di misura, ma di allerta: il sensore non misura direttamente l'entità dello spostamento, si limita a emettere l'allerta quando un cavo viene messo in trazione oltre un certo valore, definito dalla taratura dei

sensori. In pratica, se vi è uno spostamento relativo tra uno qualsiasi dei blocchi cui il cavo è ancorato e il sensore centrale, questo emette il segnale di allerta diretta. Questo sistema ha il vantaggio di poter coprire con un solo sensore numerosi punti, estendendo arealmente la rete di punti monitorati.

Tale sistema di allerta sarà poi collegato a dedicato impianto semaforico per l'interdizione della circolazione e il successivo sopralluogo di controllo e verifica.

Come detto, il sistema potrà essere ulteriormente tarato e affinato a seguito dei risultati di modellazione della stabilità dell'ammasso roccioso, affidato dal Comune di Pisogne a tecnici da lui individuati e incaricati.

Per quanto riguarda il materiale presente sulla sede stradale, le analisi presentate nei precedenti capitoli hanno permesso di individuare un volume di detrito nell'ordine di 800 – 1000 mc, costituito da blocchi eterometrici di Verrucano Lombardo, di cui i maggiori possono essere di alcuni metri cubi. Tale materiale potrà essere utilizzato come riempimento per i riporti previsti nella realizzazione della strada: in tal caso, tra questo materiale di base e il sovrastante riporto stradale dovrà essere prevista la posa di geosintetici ad elevata capacità portante in grado di mantenere separati i due materiali e di ripartire il carico degli strati sovrastanti sul materiale di base.

Il materiale in eccesso potrà essere ordinatamente distribuito nel sito di frana, in coincidenza dei pianori ancora esistenti e liberi a lato strada (presso la Valle San Martino) e sul versante a valle della stessa.

Lo scrivente resta a disposizione per eventuali approfondimenti o chiarimenti.

Malegno, giugno 2026

Geol. Iuri D. Tagliaferri

FASE DI SINTESI