



PROVINCIA DI PARMA

*Servizio Pianificazione Territoriale Ufficio Sistemi Informativi Territoriali,
Sicurezza Territoriale e Pianificazione d'Emergenza - Assistenza Tecnica EE.LL. - Statistica*

Servizio Viabilità e Infrastrutture - Ufficio Manutenzione Strade Provinciali

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

*ai sensi dell'art.41 del D.Lgs 36/2023
«Codice dei contratti pubblici»*

Comune di Bardi Intervento di messa in sicurezza della SP 28 di Varsi al km 33+800 (loc. Saliceto)

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Il Dirigente

Geol. Andrea RUFFINI

Il Progettista

Arch. Sara SANDEI

IL RUP

Ing. Andrea CORRADI

Il Tecnico

Geol. Martino PIAZZA

CUP D28H26000340005

Aprile 2026

Sommario

1. PREMESSA	2
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	2
3. INQUADRAMENTO DEL DISSESTO.....	5
4. ANALISI SISMICA.....	7
STAZIONE N. 1.....	11
STAZIONE N. 2.....	16
STAZIONE N. 3.....	18
STAZIONE N. 4.....	21
STAZIONE N. 5.....	23

1. PREMESSA

L'area di interesse è ubicata in località Saliceto, nel Comune di Bardi (PR), a monte della Strada Provinciale n. 28. L'area in esame è interessata da un esteso fenomeno franoso che si sviluppa per una lunghezza di circa 450 m e una larghezza media di 60 m. Si tratta di un deposito di frana attiva avente uno stile composito, costituito dalla combinazione di due o più tipologie di movimento, riconducibile a scivolamenti accompagnati da colamenti di fango o detriti. Il deposito ha manifestato evidenze di movimenti in atto nell'ultimo ciclo stagionale, con la formazione di lesioni, fratture e sollevamenti del terreno, oltre a evidenti segni sulla vegetazione circostante. Nel 2013 sono stati segnalati movimenti evolutivi del versante che hanno interessato la SP 28 con documentati danni alla sede stradale. Attualmente l'area risulta priva di copertura arborea continua in quanto i ripetuti movimenti e le diverse riattivazioni hanno generato un progressivo disboscamento della lingua di frana, configurando una zona a vegetazione rada interclusa dai boschi limitrofi.

Nel corso del biennio 2023-2024, il versante è stato oggetto di una serie di interventi di sistemazione volti alla stabilizzazione del corpo di frana e alla protezione della viabilità. Tali opere hanno dimostrato un'efficacia funzionale significativa, assolvendo al compito di contenimento e permettendo il regolare transito dei veicoli sulla SP 28 per diversi mesi, nonostante la fragilità intrinseca del settore. L'equilibrio raggiunto è stato compromesso dagli eventi meteorici eccezionali verificatisi tra maggio e giugno 2024. L'intensità e la persistenza delle precipitazioni hanno saturato i complessi argillosi, esasperando le pressioni neutre all'interno del versante e innescando una significativa riattivazione del movimento franoso.

Sebbene le strutture di protezione abbiano inizialmente rallentato il fenomeno, il progressivo aggravarsi del dissesto ha infine superato la capacità di resistenza delle opere, portando, nell'inverno del 2024, a danni strutturali al piano viabile manifestatisi con sollevamenti localizzati e lesioni profonde del manto stradale e l'invasione del sedime di colate di fango e detriti argillosi.

A fronte di un fenomeno che continua ad evolvere, l'Ufficio Viabilità è dovuto intervenire con urgenza per garantire la sicurezza degli utenti. Constatata l'impossibilità di mantenere l'originario tracciato sotto la spinta diretta del fronte, si è proceduto all'arretramento della sede stradale. Questa configurazione, seppur efficace nell'immediato per mantenere aperta la viabilità, è attualmente minacciata dalla lenta ma costante progressione della frana, che continua a premere, rendendo indifferibile il nuovo piano di intervento.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area di intervento ricade in corrispondenza di un dissesto gravitativo segnalato dalla cartografia geologica alla scala 1:10.000 della regione Emilia-Romagna. Tale dissesto si sviluppa in corrispondenza di un esteso affioramento della Formazione delle Argille a Palombini (APA). La zona di accumulo della frana, individuabile in corrispondenza della interferenza con la strada provinciale, è situata a sua volta in corrispondenza del contatto con la formazione delle Arenarie di Scabiazza (SCB). Il contatto tra le due unità non è chiaramente distinguibile in affioramento.

Sulla base della cartografia geologica regionale (scala 1:10.000) e del Foglio 198 "Bardi" della Carta Geologica d'Italia, il sito vede l'interazione tra due unità principali:

- Formazione delle Argille a Palombini (APA) costituita da alternanze di argilliti grigio-scure/verdastre e calcari micritici in strati sottili e medi. La componente argillitica conferisce al terreno un'elevata suscettibilità al rigonfiamento e al colamento in presenza di saturazione idrica.

- Arenarie di Scabiazza (SCB) sovrapposte tettonicamente alle Argille a Palombini. Questa formazione presenta una marcata eteropia laterale, passando da successioni arenaceo-marnose a lenti pelitiche o facies grossolane (brecce e conglomerati).

Il contatto tettonico tra le due formazioni rappresenta un elemento di debolezza strutturale, dove la sovrapposizione delle Arenarie (più permeabili) sulle Argille (impermeabili) favorisce la circolazione idrica profonda, alimentando le superfici di scorrimento del dissesto.

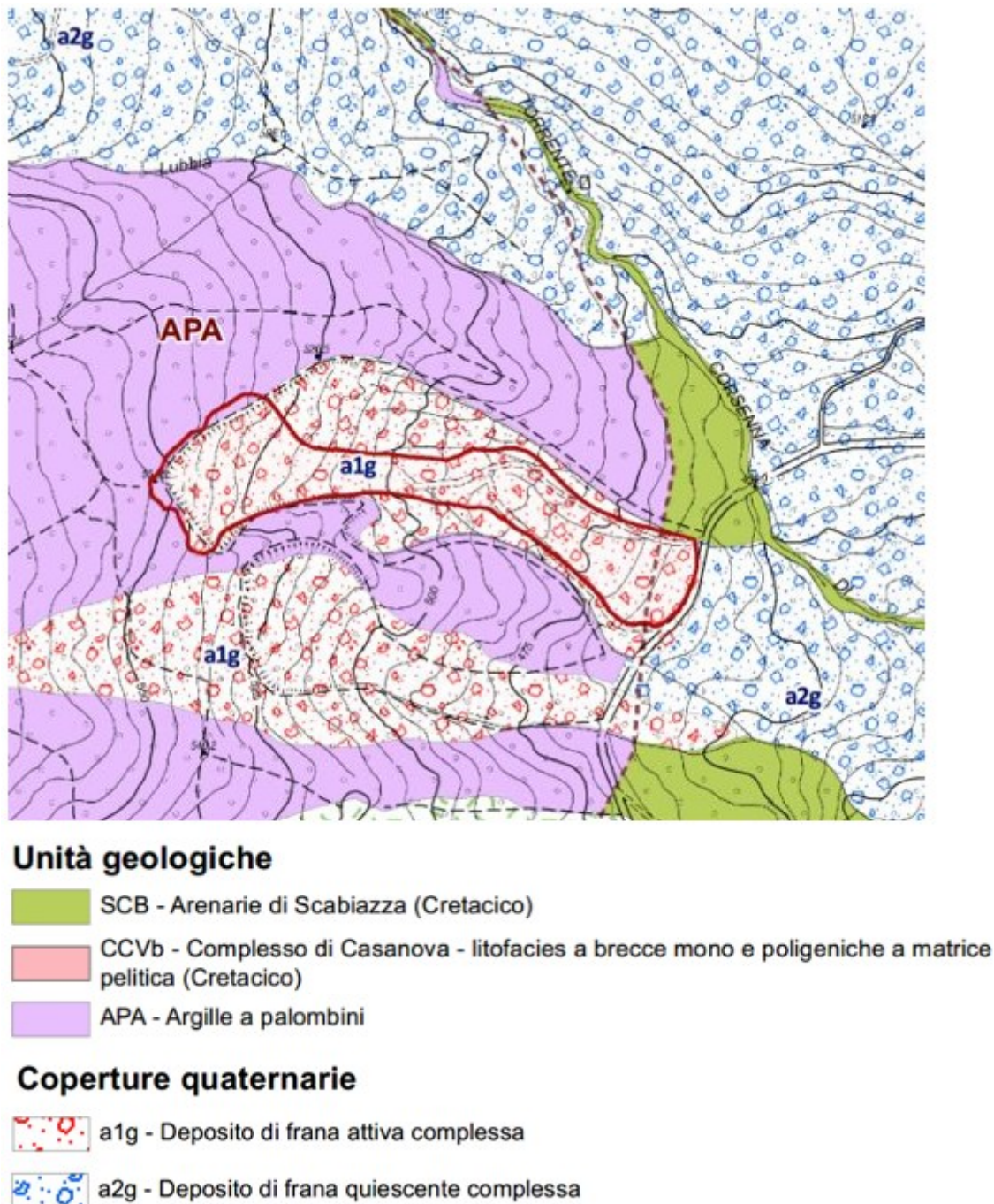
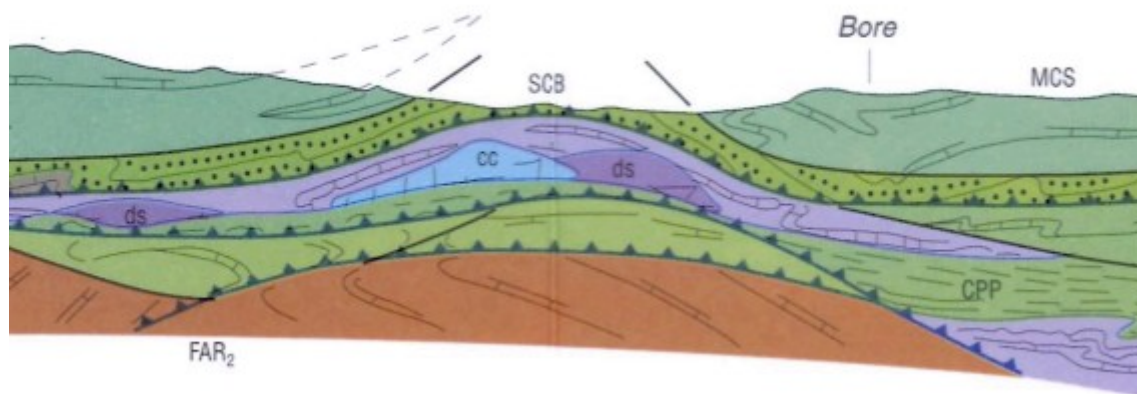


Figura 1 - Carta geologica con inquadramento dell'area di interesse

Le argille a Palombini (Argille a Palombini di Monte Rizzone - AMR della Carta Geologica d'Italia) sono caratterizzate da un'alternanza di argilliti grigio scure, verdastre e nocciola e calcari micritici grigi o grigio verdini, raramente biancastri e strati sottili e medi, talora spessi, rivestiti di patine

giallastre e in qualche caso da incrostazioni di ossidi neri. Gli strati calcarei mostrano frequentemente una base calcarenitica fine laminata ed un tetto marnoso. Localmente si intercalano arenarie fini grigio scure laminate in sottili alternanze e argilliti marnose grigie in strati spessi. La litofacies delle Arenarie di Scabiazza non è sempre uniforme, ma presenta delle variazioni irregolari riconducibili a fenomeni di eteropia. La facies più diffusa è rappresentata da una fitta successione di strati arenacei, marno-siltosi e argillosi con tinta grigio cinerea, passante a giallo tabacco per alterazione. Nei letti arenacei più sottili è caratteristica la presenza di lamelle micacee concentrate soprattutto in corrispondenza dei giunti di stratificazione. Le altre litofacies che caratterizzano la formazione derivano da quella sopra descritta per graduale variazione della granulometria. Dove la granulometria pelitica è prevalente si osservano argilliti generalmente variegata che costituiscono lenti irregolarmente distribuite nel corpo della formazione. Dove prevalgono le granulometrie grossolane le arenarie passano a brecce o a veri conglomerati. Anche queste facies grossolane hanno una giacitura lentiforme e risultano concentrate nella parte basale o alla sommità della formazione. I rapporti stratigrafici tra le due unità descritte sono di complessa interpretazione. La sezione B-B' della Carta Geologica d'Italia (Foglio 198 Bardi) tracciata nei pressi dell'area di intervento evidenzia come il contatto tra le due sia di carattere tettonico e come le Arenarie di Scabiazza siano stratigraficamente sovrapposte alle Argille a Palombini.



FLYSCH DI MONTE CASSIO

Torbiditi carbonatiche costituite da marne calcaree grigio-nocciola a base arenitica, in strati da spessi a molto spessi e rari banchi, e da areniti e peliti grigio-brune in strati da sottili a medi. Potenza parziale stimata 1300 m. Contatto tettonizzato con AVV localmente per alternanze.

CAMPANIANO terminale? - MAASTRICHTIANO



ARENARIE DI SCABIAZZA

Torbiditi arenaceo-pelitici costituite da litareniti fini grigio-nocciola e peliti siltoso-marnose grigio scure, in strati da molto sottili a medi, localmente spessi, con rapporto A/P tra 1 e 1/4. Sono intercalati locali strati molto spessi, fino a banchi, di marne calcaree grigie a base arenitica e conglomeratica e calcilutiti in strati spessi. Contatto tettonizzato su APG.

CENOMANIANO - SANTONIANO

OLISTOLITI presenti nei Complessi di Casanova, Pietra Parcellara e Case Boscaini	
	Σ Serpentiniti (Σ)
	β Basalti (β)
	γ Graniti (γ)
	ap Argille a Palombini (ap)
	cc Calcari a Calpionelle (cc)
	ds Diaspri (ds)
	av Argille varicolori (av)
	at Arenarie torbiditiche (at)

Figura 2 - Stralcio della sezione B-B' della Carta geologica d'Italia (Foglio 198 Bardi)

3. INQUADRAMENTO DEL DISSESTO

Il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale individua tale area nella Tav. C2 – Carta del Dissesto alla sezione CTR n. 198140 scala 1:5.000 classificandola come “Area a pericolosità geomorfologica molto elevata – Frana Attiva” normata dall’art. 21 delle NTA del piano stesso.

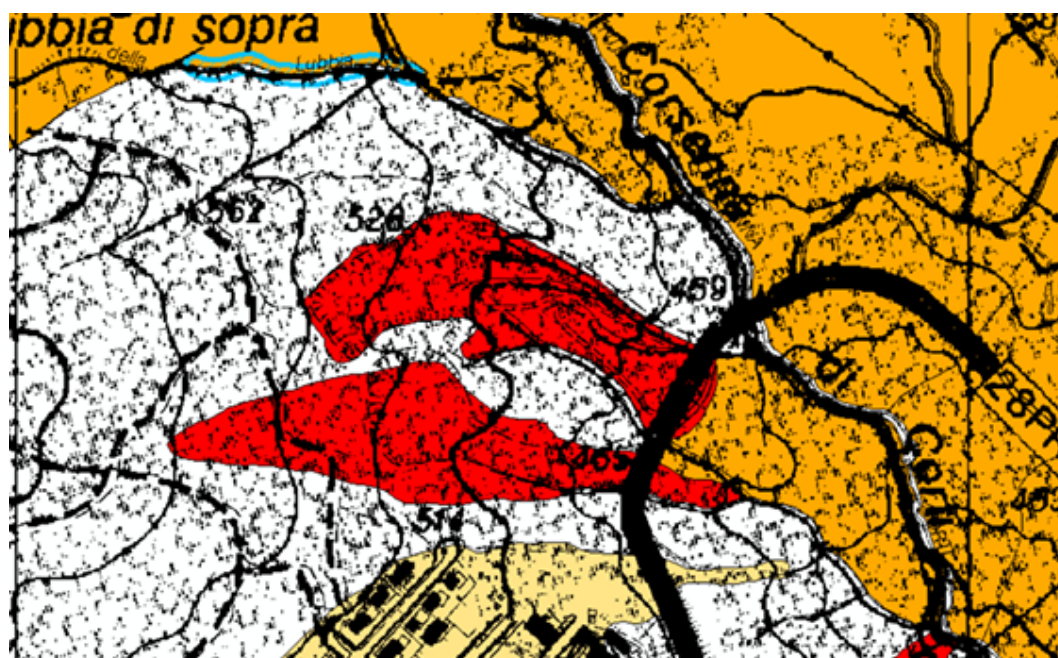


Figura 3 - Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale Tav. C2 - Carta del dissesto

Il Piano Strutturale Comunale, approvato con Del di C.C. n. 41 del 29.09.2014, classifica l'area come Area a pericolosità geomorfologica molto elevata in conformità al Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale della Provincia di Parma.

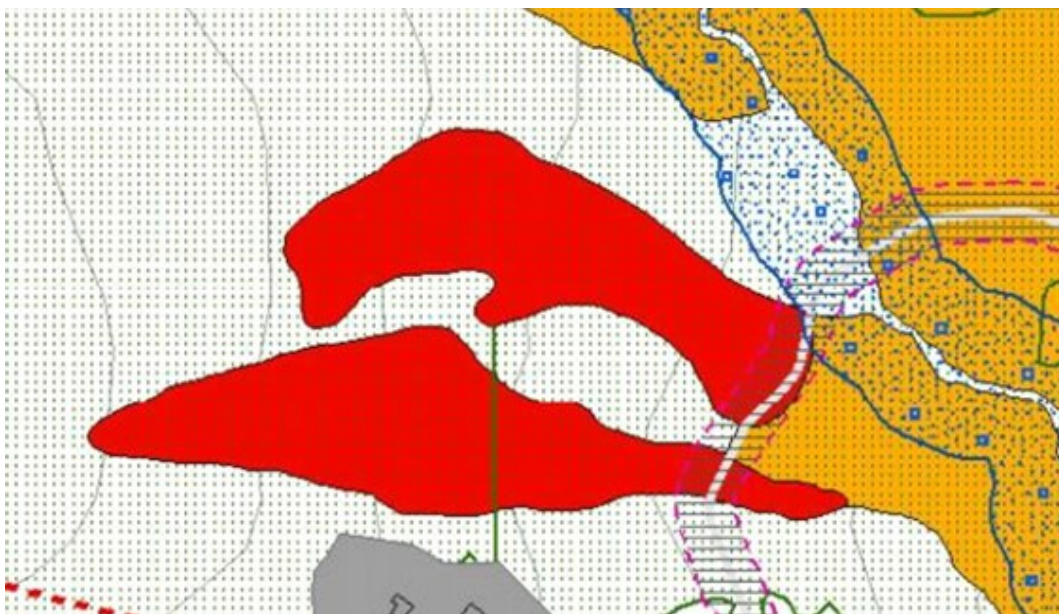


Figura 4 - Piano Strutturale Comunale - Carta del dissesto

La nicchia di distacco si origina a quota 550 m s.l.m ed interessa una fascia di larghezza massima pari a circa 90 m. La base della nicchia è posta a 525 m circa e la pendenza è pari mediamente al 30%. La zona di scorrimento si restringe ad una cinquantina di metri ed è fiancheggiata da versanti che manifestano segnali di instabilità latente legata al movimento avvenuto alla loro base.

La zona di accumulo, che insiste direttamente sulla SP 28, presenta una morfologia articolata in senso trasversale. Sui fianchi, infatti, sono presenti due fasce depresse alla base delle quali si sono sviluppati due rii per concentrazione dei deflussi, mentre al centro la quota risulta più elevata.



Figura 5 - ortofoto digitale Provincia di Parma - 20 febbraio 2026

4. ANALISI SISMICA

4.1 Inquadramento di sismotettonica regionale

Nella Carta Sismotettonica pubblicata dalla Regione Emilia-Romagna sono stati rappresentati gli elementi strutturali attivi di superficie e profondi sia in catena che in pianura, tenendo conto dei regimi di stress e, per quanto concerne i terremoti, anche la loro distribuzione ipocentrale secondo intervalli di profondità.

Dal confronto tra il quadro sismotettonico emerso e la distribuzione di alcune manifestazioni superficiali di idrocarburi, salse, sorgenti termali e idrotermali e di alcuni rischi geologici (emissioni di radon, subsidenza e franosità) risulta evidente, anche se a carattere solo indicativo, una connessione tra questi fenomeni e le principali strutture attive.

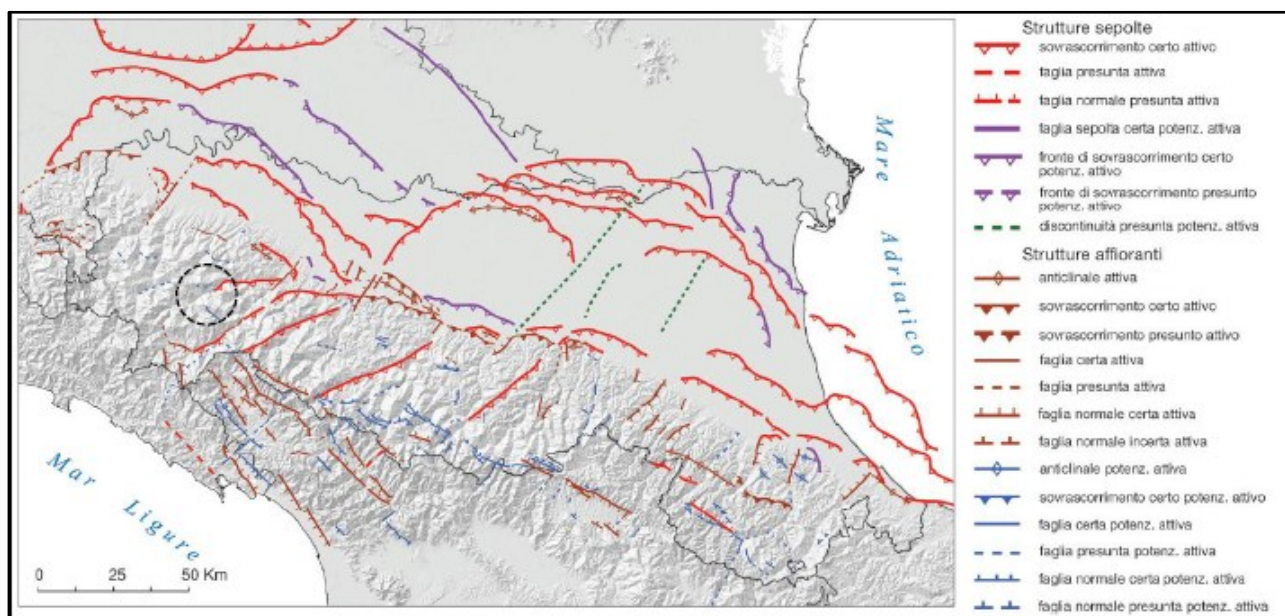


Figura 6 - Principali strutture tettoniche dell'area emiliano romagnola (tratta dalle Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna)

4.2 Pericolosità sismica e Zonazione Nazionale

L'area di Bardi si inserisce in un contesto territoriale caratterizzato da una pericolosità sismica media. Secondo la riclassificazione sismica del territorio nazionale (OPCM n. 3274/03 e successive deliberazioni della Regione Emilia-Romagna), il Comune di Bardi è inserito nella **Zona Sismica 3**.

Tale classificazione identifica zone in cui possono verificarsi terremoti di modesta entità, ma dove lo scuotimento sismico atteso non è trascurabile in termini di interazione con la dinamica dei versanti. In questo scenario, la sismicità viene interpretata non tanto come un parametro di calcolo per manufatti, quanto come una variabile ambientale in grado di influenzare l'evoluzione dei fenomeni gravitativi attivi e latenti.

4.3 Potenziale di Risposta Sismica Locale e Effetti di Sito

La morfologia e la litostratigrafia locale suggeriscono la possibilità di effetti di sito, ovvero fenomeni di amplificazione delle onde sismiche legati alle caratteristiche locali:

- **Effetti stratigrafici:** Il forte contrasto tra il deposito di frana (materiale detritico con prevalente componente argillosa frammista a blocchi eterometrici) a bassa velocità di propagazione delle onde e il substrato roccioso integro (Arenarie di Scabiazza) può generare fenomeni di risonanza.
- **Effetti topografici:** La posizione del dissesto, situato su un versante con pendenza significativa e creste limitrofe, può potenziare l'effetto dello scuotimento rispetto a zone pianeggianti.

4.4 Sismicità storica dell'area

La sismicità rappresenta uno strumento indispensabile per le analisi sismotettoniche e un utile supporto alla geologia strutturale, in quanto varie tipologie di dati sismici, ottenuti attraverso differenti metodologie, possono fornire indicazioni per l'identificazione e la caratterizzazione delle strutture geologicamente attive. Le informazioni riguardanti gli eventi sismici avvenuti nell'area in esame sono state ricavate dall'ultima versione del Database Macrosismico Italiano chiamata "DBMI15" v.4.0 rilasciata a gennaio 2022 (Locati et. al., 2022) e dal Bollettino Sismico Italiano elaborato da ISIDe Working Group.

4.5 Sorgenti sismogenetiche

L'Istituto Nazionale di Geofisica e di Vulcanologia ha diffuso, nell'ambito del Progetto DISS (Database of Individual Seismogenic Sources), le informazioni riguardanti la distribuzione spaziale e le caratteristiche sismico-tettoniche delle Sorgenti Sismogenetiche presenti sul territorio nazionale.

L'area oggetto di studio si trova in corrispondenza di due sorgenti sismogenetiche composita (CSS) classificate come:

– **ITCS026: Lunigiana** in cui la massima magnitudo momento attesa è pari a 7,0. La geometria è compresa tra i 1 e i 10 Km dalla superficie. Si estende da Sud-Est di Reggio Emilia, proseguendo in direzione Nord-ovest fino a Fiorenzuola d'Arda e appartiene al fronte esterno del thrust Nord Appenninico. È caratterizzato da un sistema a faglie inverse Nord-Est vergenti;

– **ITCS045: San Giorgio Piacentino – Fornovo di Taro:** si trova a cavallo tra la zona a nord ovest della valle del Taro e tra thrust pedeappenninico e il fronte di spinta esterno dell'Appennino settentrionale, e in cui la massima magnitudo attesa è 7,2 Mw. È caratterizzato da un sistema di faglie vergenti verso NE.

La sorgente sismogenetica composita è essenzialmente una struttura identificata sulla base dell'analisi di dati geologici di superficie e sotterranei, ed in particolare sulla base dell'identificazione delle tracce e delle caratteristiche delle faglie attive.

4.6 Zonazione Sismogenetica

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha realizzato una zonazione sismogenetica del territorio nazionale per recepire le conoscenze più recenti sulla tettonica attiva della penisola e sulla distribuzione delle sorgenti sismogenetiche, fornire per ogni zona una stima della profondità efficace dei terremoti (ovvero l'intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti) e per la descrizione del meccanismo di fagliazione prevalente attraverso l'analisi

cinematica di eventi geologici importanti che interessano la crosta superficiale e anche strutture profonde (INGV, Rapporto Conclusivo per il Dipartimento di Protezione Civile, 2004).

Il territorio italiano è suddiviso in 36 aree differenti numerate da 901 a 936 cui vanno aggiunte 6 zone non utilizzate in quanto non contribuiscono alla pericolosità del territorio italiano o hanno un numero di eventi interno molto basso.

L'area in esame si trova su limite sud-ovest della zona 913 nel settore dell'Appennino settentrionale. Insieme alle zone 914 e 918 rappresenta una fascia in cui si verificano terremoti prevalentemente compressivi nel settore in esame e distensivi nella porzione più sud-orientale. Le profondità ipocentrali sono mediamente superiori rispetto alla fascia più esterna e le magnitudo raggiunte presentano di rado valori elevati.

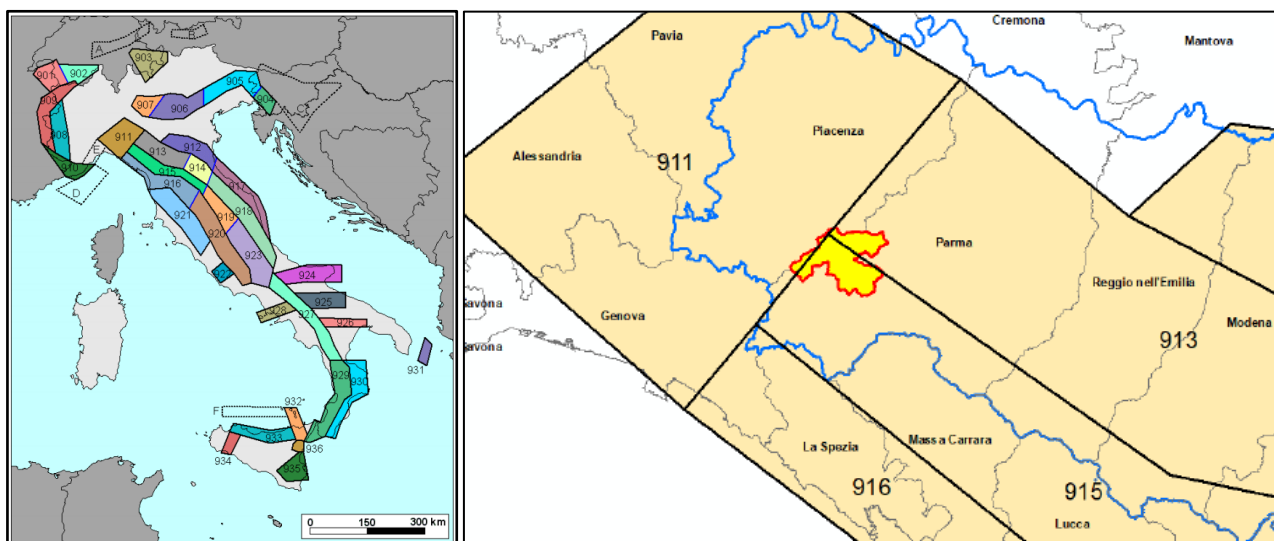


Figura 7 - Zonazione sismogenetica ZS9. I limiti blu separano zone con analogo significato cinematico ma diverse caratteristiche sismiche (fonte: INGV, Rapporto Conclusivo per il Dipartimento di Protezione Civile, 2004); particolare di Fig. 14 in cui viene evidenziato il comune di Bardi

4.7 Indagini geofisiche

Al fine di integrare il quadro conoscitivo derivante dall'analisi geologica di superficie e dalla sismotettonica regionale, è stata condotta una campagna di indagini geofisiche basata sulla tecnica del rapporto spettrale H/V (Horizontal to Vertical Spectral Ratio).

Tale metodologia si basa sulla registrazione del microtremore sismico ambientale, generato sia da sorgenti naturali (vento, variazioni di pressione atmosferica) che antropiche (traffico veicolare, attività industriali). L'obiettivo primario dell'applicazione di tale metodo sul corpo di frana di Bardi è l'individuazione della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) del sito, strettamente correlata al contrasto di impedenza acustica tra il deposito di frana e il substrato roccioso che identifica il bedrock sismico locale.

Nel contesto specifico di Saliceto, caratterizzato dalla sovrapposizione tettonica tra le Arenarie di Scabiazza (SCB) e le Argille a Palombini (APA), l'analisi HVSR permette di:

- Identificare la profondità della superficie di scorrimento principale.
- Valutare l'eterogeneità spaziale del deposito di frana.

- Fornire parametri cinematici preliminari per la modellazione di stabilità.

4.8 Strumentazione impiegata e misure effettuate

Tromino

Per l'acquisizione dei dati in sito è stato utilizzato un dispositivo Tromino, un sismometro triassiale digitale ad alta risoluzione, specificamente progettato per il rilievo del rumore ambientale e per indagini di tipo HVSR. Lo strumento integra tre sensori elettrodinamici ortogonali che permettono la registrazione simultanea delle componenti del moto del terreno nelle direzioni Verticale (V), Nord-Sud (NS) ed Est-Ovest (EW).

L'impiego del Tromino risulta particolarmente vantaggioso in contesti di dissesto attivo come quello in esame, in quanto consente di operare con estrema rapidità anche su versanti acclivi o difficilmente accessibili.

Software Grilla

L'elaborazione dei segnali registrati è stata effettuata tramite il software Grilla, applicando i criteri di affidabilità e stabilità definiti dalle linee guida europee SESAME (*Site Effects Assessment using Ambient Excitations*). Le principali fasi di processing hanno riguardato:

- La selezione di finestre temporali stabili (cleansing), escludendo transitori antropici non stazionari.
- La rimozione del trend e il tapering del segnale.
- Il calcolo degli spettri di ampiezza per le tre componenti e la successiva media geometrica delle componenti orizzontali.
- La determinazione del rapporto H/V con analisi della significatività statistica dei picchi di ampiezza.

La campagna di indagine ha previsto l'esecuzione di n. 5 misure di microtremore sismico. La strategia di posizionamento è stata finalizzata a intercettare le variazioni di spessore del materiale sciolto e a definire l'andamento della superficie di scorrimento sotterranea.

Ogni registrazione ha avuto una durata minima di 20 minuti, con una frequenza di campionamento pari a 128 Hz, garantendo una risoluzione spettrale adeguata per l'intervallo di frequenze di interesse geotecnico (0.5 - 20 Hz).

4.9 Analisi dei risultati

L'elaborazione dei dati segue le linee guida internazionali del progetto SESAME (2004). Per ciascuna delle 5 stazioni di misura effettuate con sismografo digitale integrato (Tromino), il segnale acquisito viene suddiviso in finestre temporali stazionarie tramite algoritmi di *anti-triggering* (STA/LTA), al fine di escludere disturbi transitori antropici. Per ogni finestra viene calcolata la Trasformata Rapida di Fourier (FFT), e lo spettro finale è ottenuto mediando le componenti orizzontali e rapportandole a quella verticale secondo la formula:

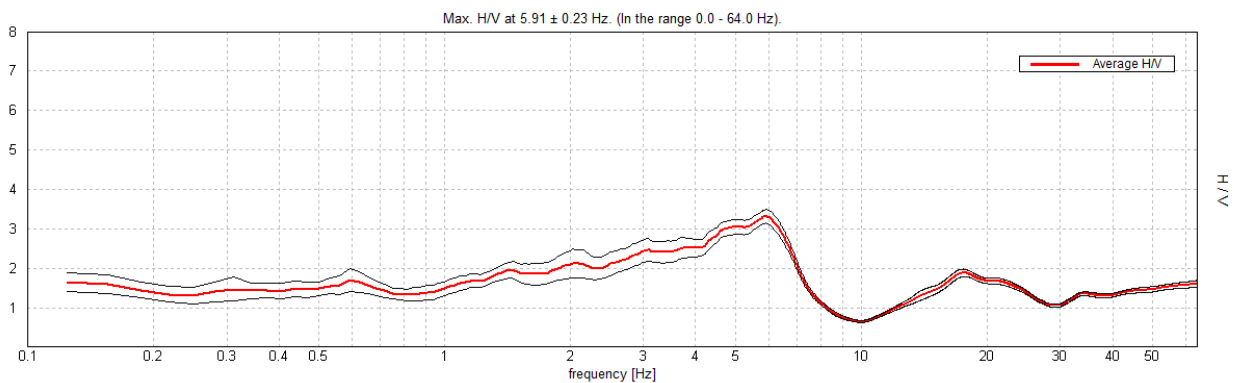
$$HVS R(f) = \sqrt{\frac{P_{NS}(f) + P_{EW}(f)}{2 \cdot P_V(f)}}$$

dove P_{NS} , P_{EW} e P_V rappresentano le densità spettrali di potenza rispettivamente per le componenti Nord-Sud, Est-Ovest e Verticale. Al fine di rendere i grafici leggibili e statisticamente significativi, le tracce vengono sottoposte a un processo di *smoothing* e verificate attraverso i criteri di affidabilità e stabilità del picco imposti dallo standard SESAME, garantendo così la robustezza dell'interpretazione stratigrafica 1D proposta.

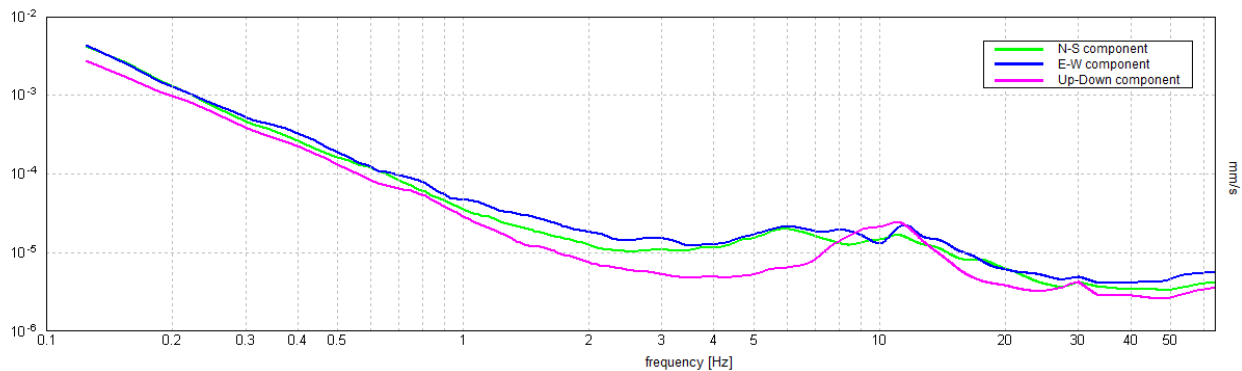
STAZIONE N. 1

Rapporto Spettrale H/V Sperimentale (HVS R)

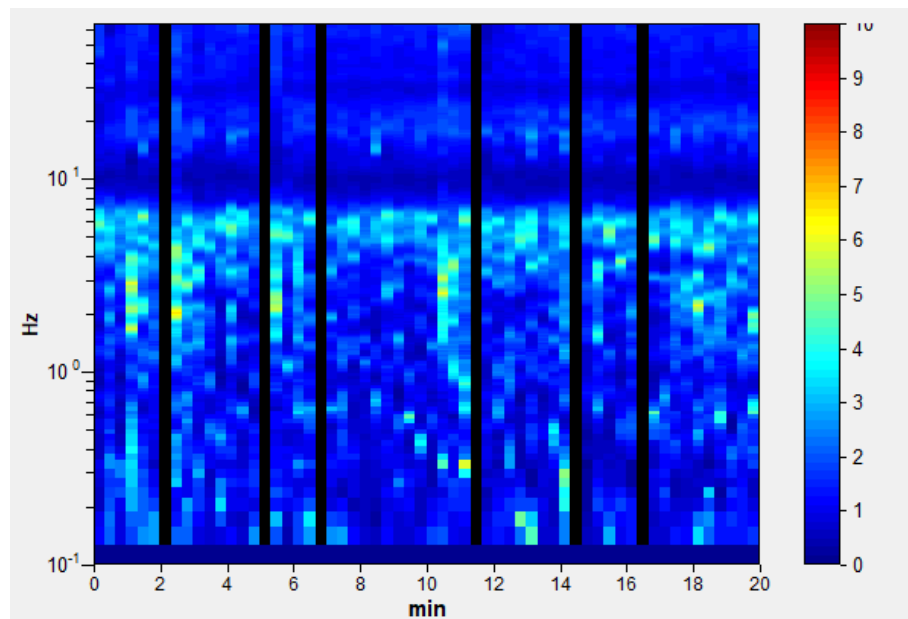
La figura seguente illustra i risultati dell'acquisizione sismica passiva effettuata in sito. La curva rossa rappresenta il rapporto spettrale medio H/V, con le relative fasce di confidenza evidenziate dalle linee nere sottili. Si osserva un picco di risonanza principale alla frequenza di 5.91 ± 0.23 Hz con ampiezza superiore a 3. Tale evidenza sperimentale indica la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo, riconducibile alla transizione tra i materiali rimaneggiati del corpo di frana e il substrato sismico più rigido.



L'immagine seguente mostra gli spettri di ampiezza medi per le tre componenti del moto sismico: Nord-Sud (verde), Est-Ovest (blu) e Verticale Up-Down (magenta). Il grafico evidenzia la distribuzione dell'energia cinetica del microtremore ambientale alle diverse frequenze. Si osserva una chiara separazione tra le componenti orizzontali e quella verticale nell'intervallo tra 4 e 8 Hz, dove la componente verticale presenta un minimo relativo; tale scostamento energetico è il fattore fisico che genera il picco nel rapporto H/V a 5.91 Hz. La sostanziale sovrapposizione delle due tracce orizzontali indica l'assenza di forti anisotropie nel sottosuolo, confermando l'applicabilità del modello stratigrafico 1D.

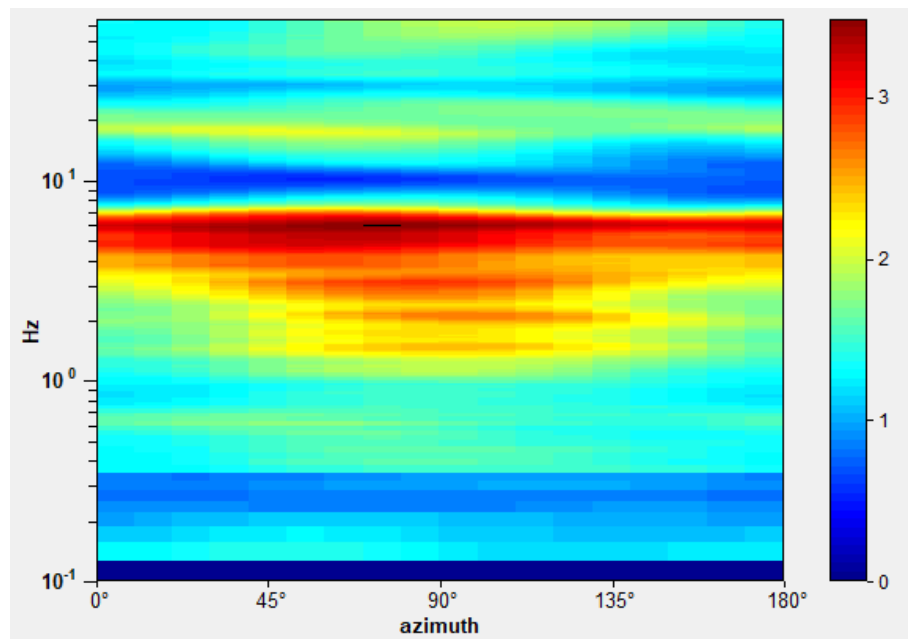


L'immagine seguente rappresenta uno spettrogramma (o mappa tempo-frequenza) del rapporto H/V durante l'intervallo di acquisizione di 20 minuti. È un grafico fondamentale per attestare la stabilità temporale della misura e considerare valido il picco di risonanza. Lo spettrogramma mostra l'andamento del rapporto spettrale H/V in funzione del tempo di acquisizione (asse delle ascisse, 0-20 minuti) e della frequenza (asse delle ordinate). La scala cromatica indica l'ampiezza del rapporto H/V. Si osserva una persistenza stazionaria della banda energetica (colore azzurro/giallo) in corrispondenza della frequenza di circa 6 Hz per l'intera durata della registrazione. Le bande nere verticali indicano i segmenti temporali (finestre) scartati durante l'analisi per la presenza di disturbi antropici transitori. La continuità del segnale nel tempo conferma che il picco identificato a 5.91 Hz è un fenomeno fisico legato alle caratteristiche stratigrafiche del sito e non a sorgenti di rumore occasionale.



L'immagine seguente rappresenta la mappa azimutale del rapporto H/V (detta anche analisi della direttività). È un grafico finalizzato a indagare se la risonanza del terreno ha una direzione preferenziale, parametro critico soprattutto nello studio di corpi di frana. La figura illustra la variazione dell'ampiezza del rapporto H/V in funzione della frequenza (asse y) e dell'angolo azimutale di rotazione delle componenti orizzontali (asse x, da 0° a 180°). La scala cromatica indica l'entità del rapporto H/V. Si osserva una banda ad alta ampiezza (colore rosso) costante e continua intorno ai 5.91 Hz per tutte le direzioni indagate. La mancanza di marcate variazioni di ampiezza al variare dell'angolo azimutale indica una sostanziale isotropia della risposta sismica del sito. Tale evidenza

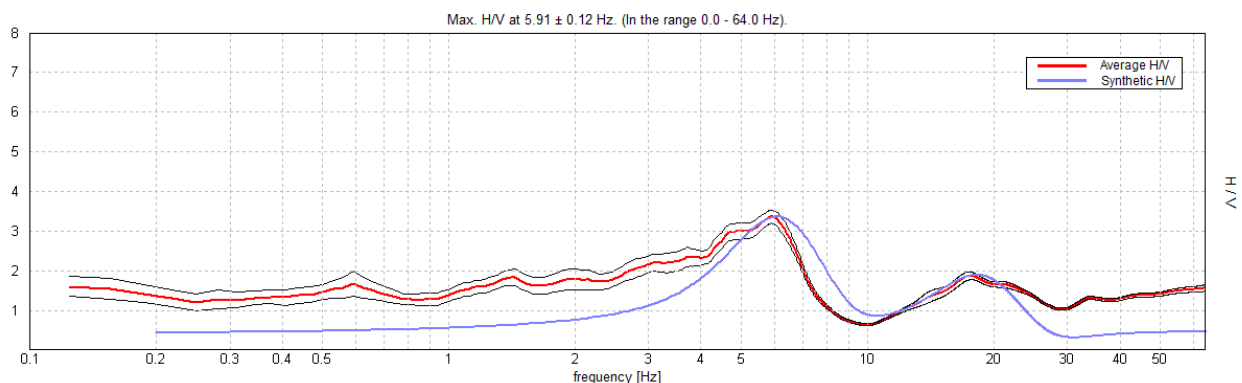
suggerisce che, alla scala dell'indagine, il contrasto di impedenza agisce come un'interfaccia sub-orizzontale, validando ulteriormente l'utilizzo di una modellazione sismo-stratigrafica monodimensionale (1D).



Risultato dell'elaborazione dei microtremori ambientali (metodo HVSR) acquisiti sul corpo di frana. Nell'immagine seguente la curva rossa rappresenta il rapporto spettrale medio H/V, con le relative fasce di confidenza (linee nere sottili).

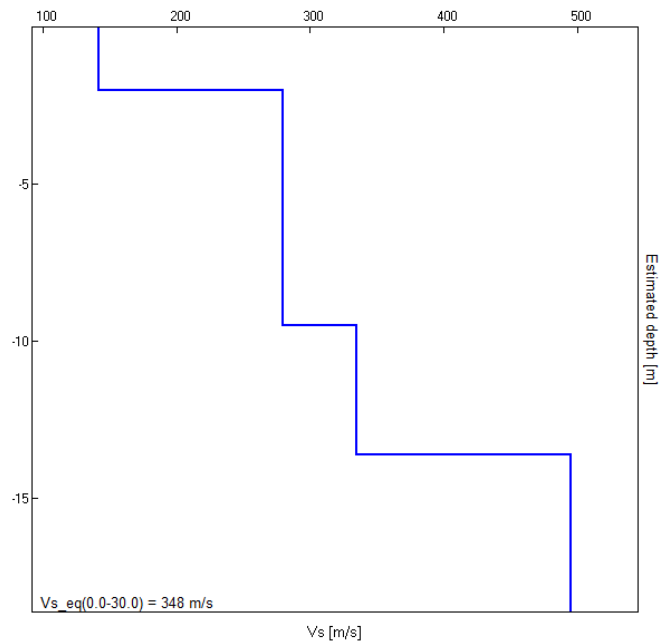
Si osserva un picco di risonanza fondamentale chiaramente definito alla frequenza 5.91 Hz, con un'ampiezza significativa (~ 3.3), indicativa di un marcato contrasto di impedenza acustica presumibilmente riconducibile alla differenza di proprietà acustiche tra i materiali rimaneggiati della frana e il substrato più rigido.

L'immagine seguente mostra la sovrapposizione tra la curva sperimentale (in rosso) e la curva sintetica (in blu) generata attraverso il processo di modellazione numerica. L'ottima corrispondenza tra le due curve, in particolare in corrispondenza del picco fondamentale a 5.91 Hz, valida la robustezza del modello stratigrafico adottato. Il fit soddisfacente permette di confermare con elevato grado di confidenza i parametri elastici e le profondità delle interfacce sismiche ipotizzate.



Profilo finale delle velocità (V_s) e stratigrafia sismica

Profilo finale delle velocità delle onde di taglio che definisce l'assetto sismo-stratigrafico del settore indagato. Il modello finale indica una velocità equivalente $V_{s,eq}$ (0.0-30.0) pari a 354 m/s. Il contrasto di velocità più marcato si posiziona a una profondità stimabile di circa -13 m, dove la V_s passa da valori tipici di un materiale alterato/rimaneggiato a valori superiori ai 500 m/s, identificando il bedrock sismico locale e definendo geometricamente la profondità della superficie di scollamento principale della frana.



Il cuore dell'elaborazione è consistito nella ricerca di un profilo di velocità delle onde di taglio (V_s) capace di replicare la risposta sperimentale. Il modello finale è stato ottenuto attraverso un processo iterativo di "fit" (matching), che ha permesso di sovrapporre con elevata precisione la curva sintetica (blu) a quella media reale (rossa). La congruenza riscontrata sia sulla frequenza fondamentale ($f_0 = 5.91$ Hz) che sui picchi secondari (~ 18 Hz) garantisce la robustezza della stratigrafia sismica ricostruita.

Il profilo V_s finale identifica chiaramente la struttura profonda del versante:

- **Coltre superficiale:** caratterizzata da bassi valori di velocità.
- **Superficie di Scollamento:** Il modello individua il limite inferiore del corpo instabile in corrispondenza del gradino di velocità più marcato, posto a una profondità di circa -13 m, a segnare l'interfaccia con il substrato, agendo come superficie di contrasto responsabile della risonanza principale.

Conclusione tecnica

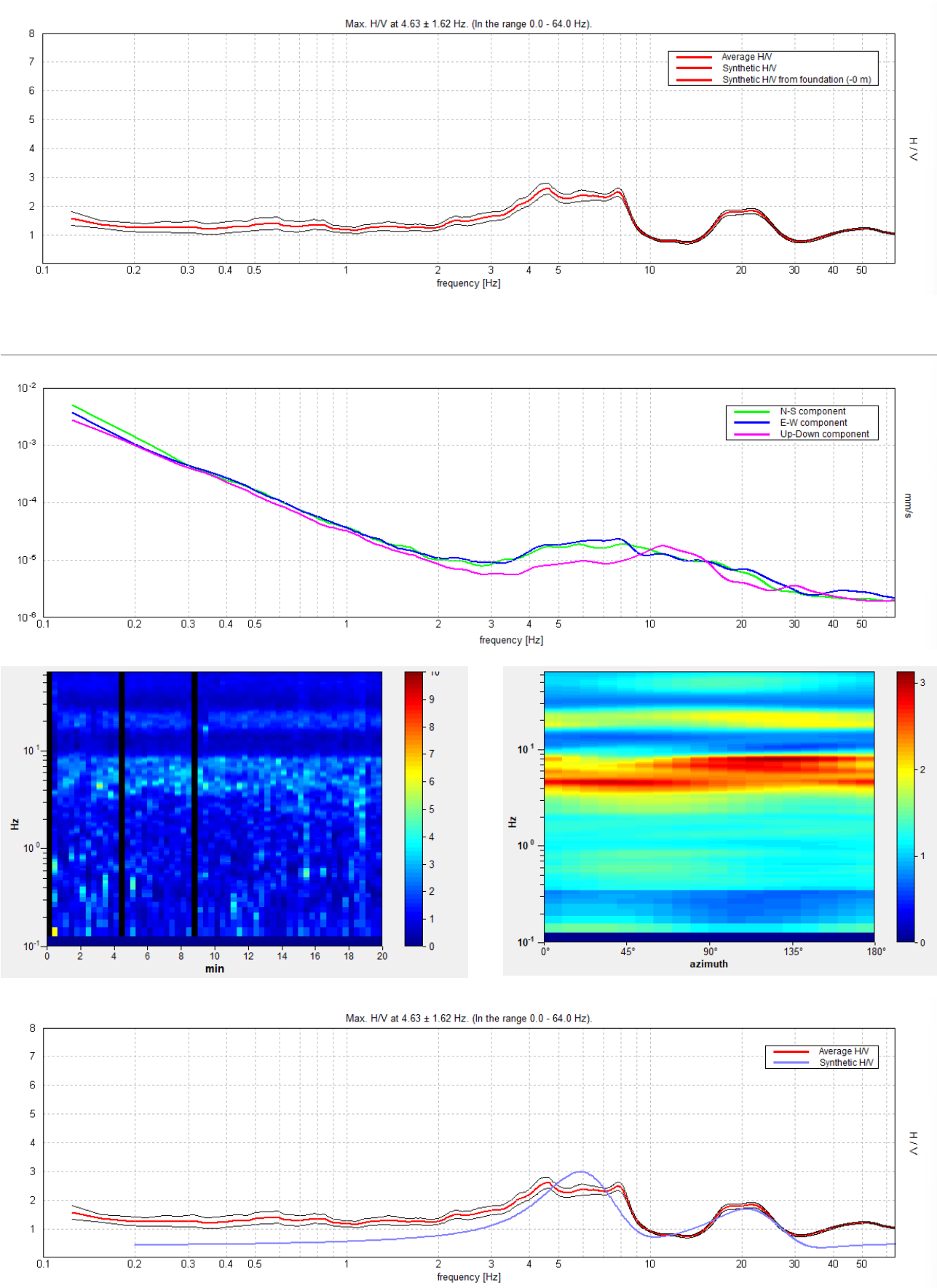
L'elaborazione permette di definire con elevata confidenza lo spessore della frana, fissando a -13.8 m la profondità della superficie di scollamento nel punto di indagine.

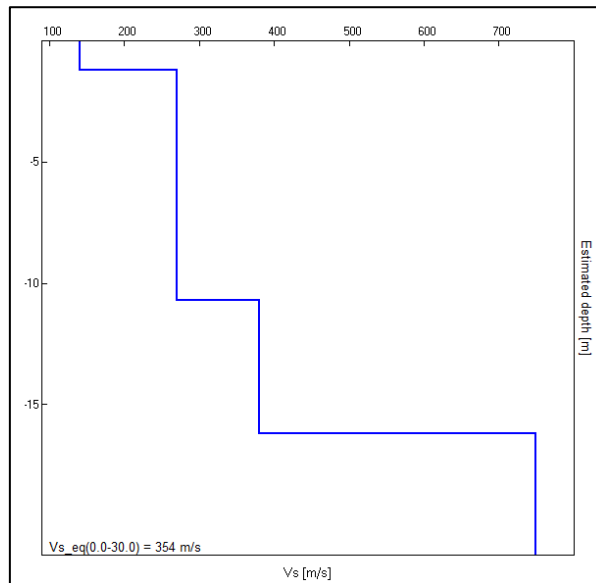


Figura 8 - individuazione dei punti di misura

Di seguito sono riportati i risultati dell'elaborazione effettuata sugli altri punti di misura:

STAZIONE N. 2





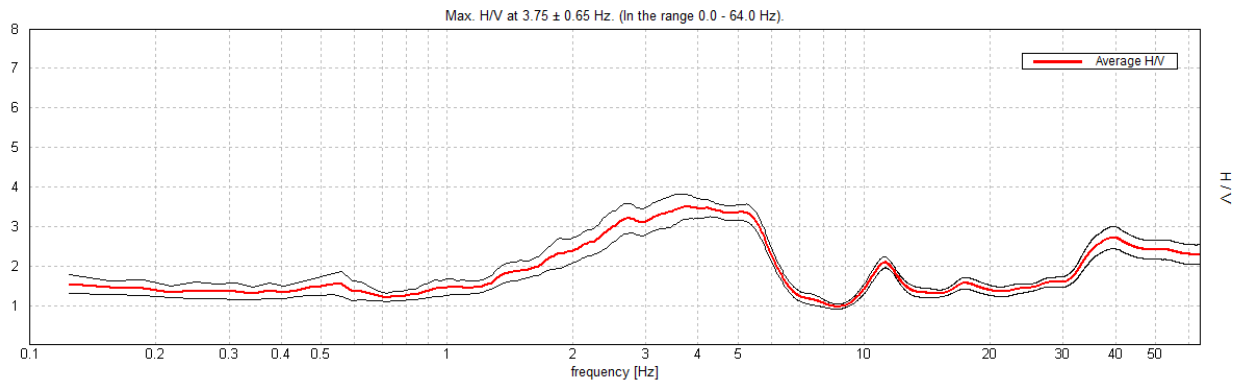
Il profilo estrapolato dalle analisi della stazione di misura n. 2 evidenzia una struttura a strati con rigidità crescente, permettendo di distinguere nuovamente il corpo di frana dal substrato stabile:

- **Corpo di frana (0.0 - 16.2 m circa):** I primi tre livelli presentano valori di Vs relativamente bassi (compresi tra 140 m/s e 380 m/s). Queste velocità sono fisicamente coerenti con materiali sciolti, coltri detritiche o ammassi rocciosi intensamente fratturati e rimaneggiati dal movimento gravitativo.
- **Superficie di scorrimento:** L'interfaccia critica viene identificata alla profondità di circa -16.2 m. In corrispondenza di questa quota si osserva il gradino di velocità più significativo del modello.
- **Substrato:** Al di sotto dei -16 m, l'elevato valore di Vs indica il passaggio a una formazione geologica competente e non coinvolta dal fenomeno di instabilità superficiale.

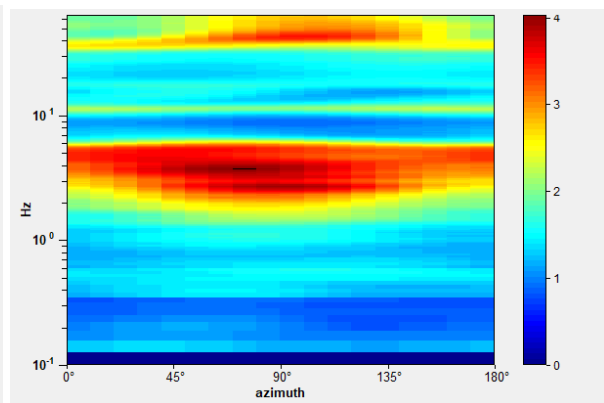
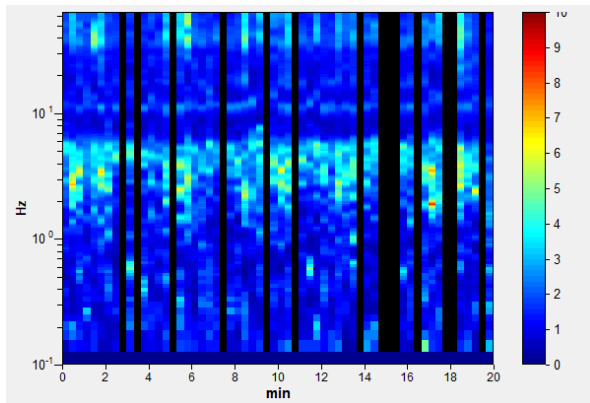
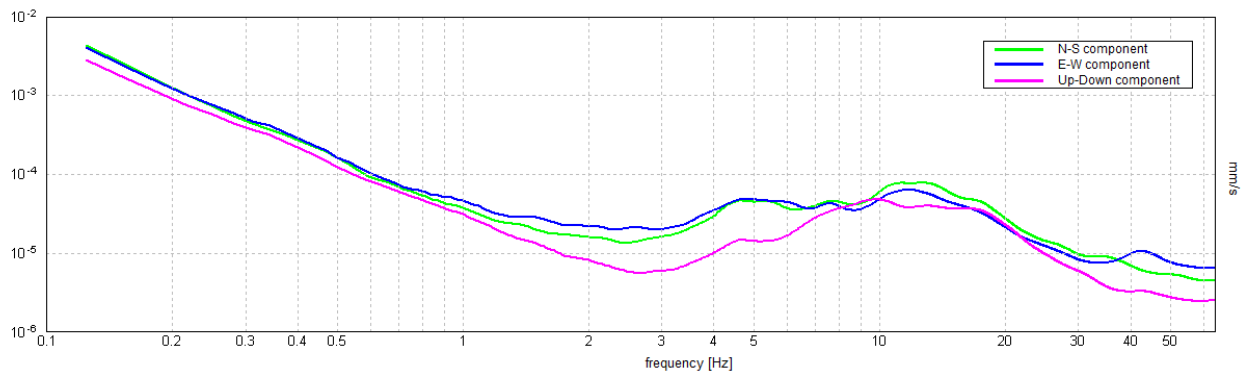
Conclusione tecnica

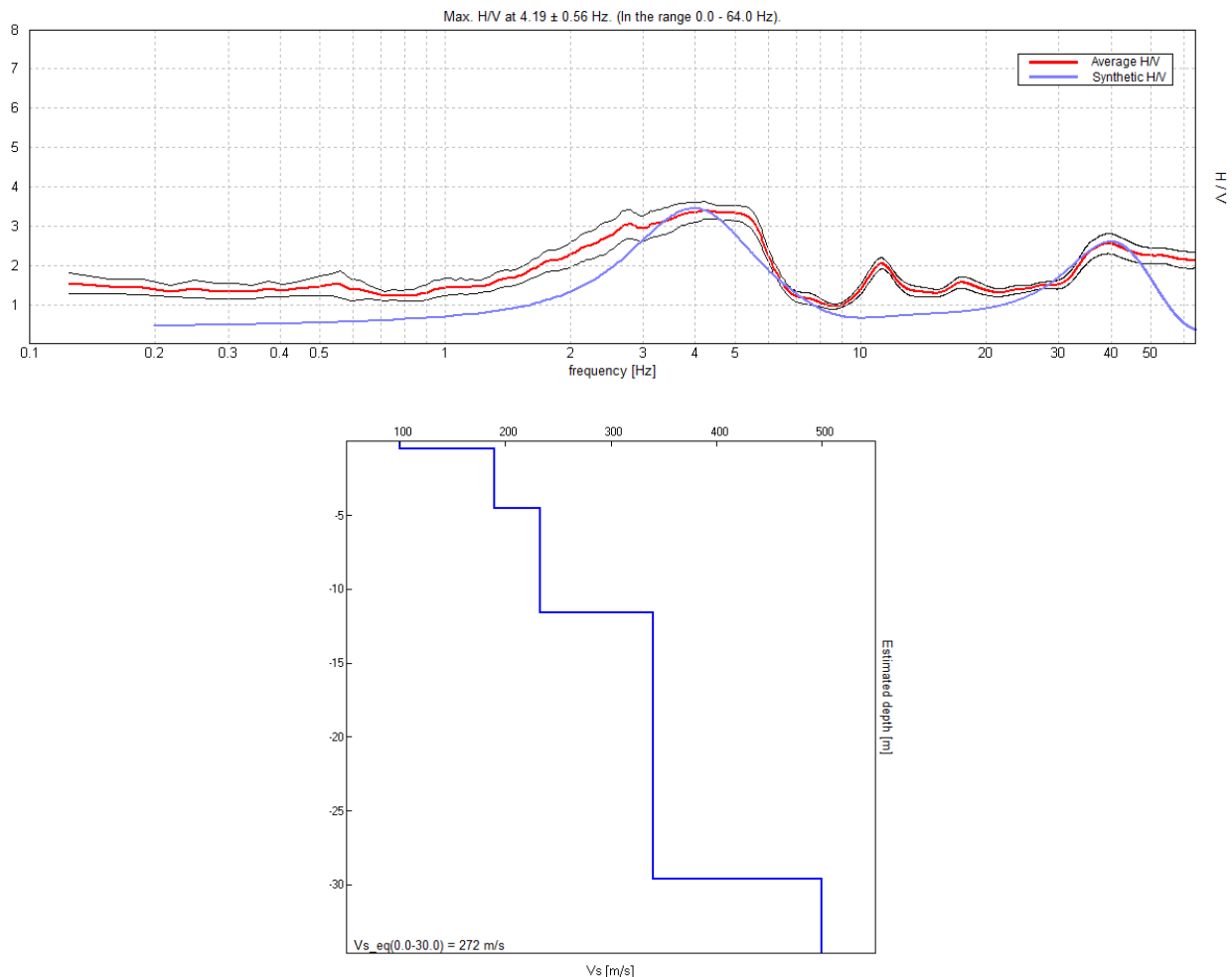
Il forte contrasto di impedenza acustica rilevato a circa 16 m di profondità rappresenta il vincolo fisico che genera il picco di risonanza a 4.59 Hz osservato sperimentalmente. Pertanto, tale orizzonte è da interpretarsi come la superficie di scollamento principale della frana nel punto indagato.

STAZIONE N. 3



la curva H/V mostra un picco principale più energetico e traslato verso frequenze leggermente più alte (circa 4.19 Hz), questo riflette la risonanza del volume di terreno maggiormente coinvolto da rielaborazione gravitativa.





Il profilo della velocità delle onde di taglio (V_s) in funzione della profondità, ottenuto attraverso l'inversione della curva di rapporto spettrale H/V, delinea un modello stratigrafico caratterizzato da una complessa articolazione del corpo di frana e da un substrato sismico profondo.

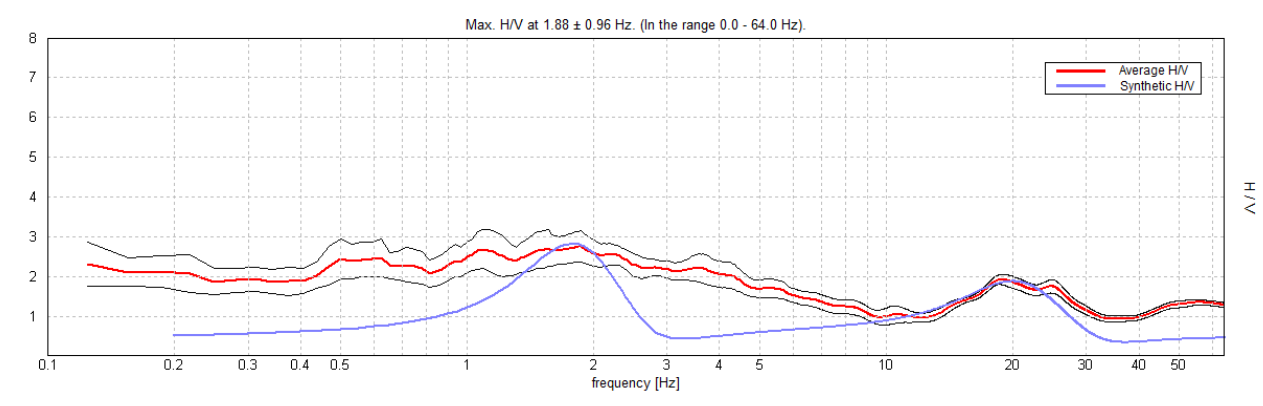
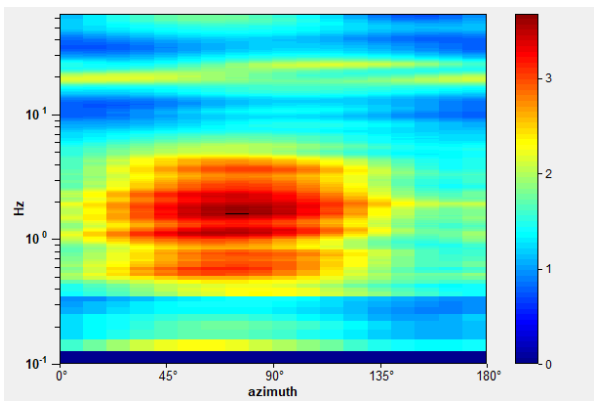
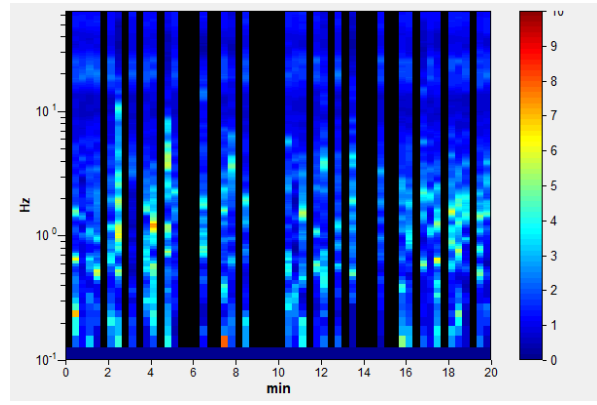
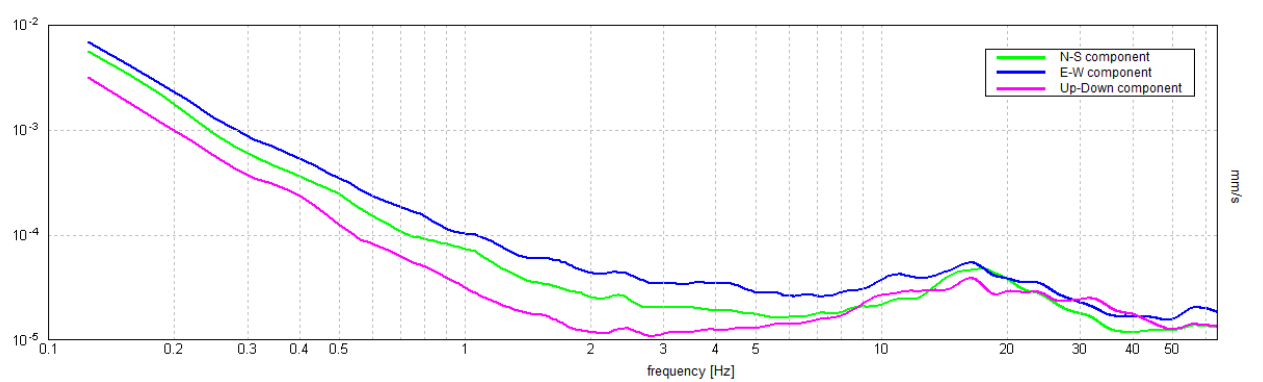
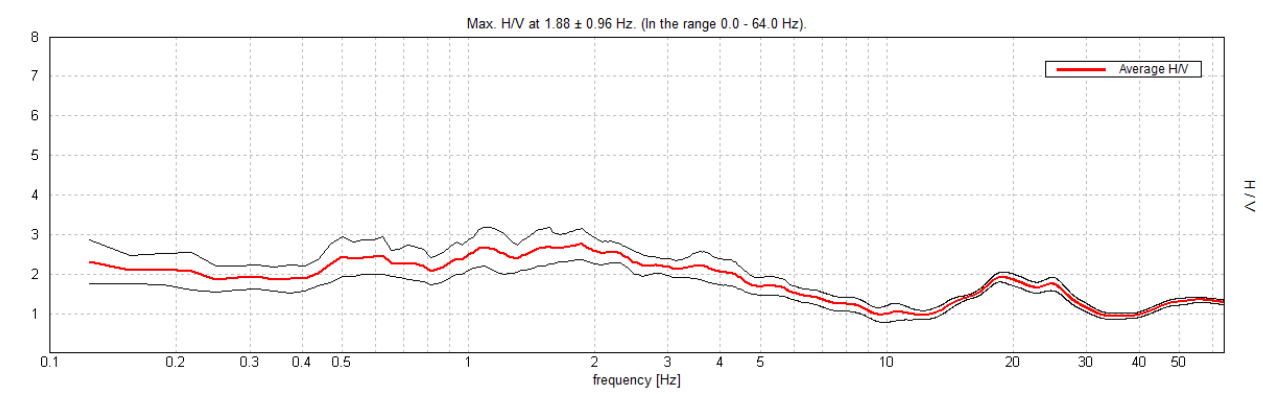
- **Coltri superficiali e terreno riportato (0.0 - 4.5 m):** La parte sommitale del modello evidenzia un primo strato molto sottile (0.5 m) a bassa velocità, seguito da un livello più consistente caratterizzato da una V_s di circa 190 m/s. Tali valori sono riconducibili a terreni di copertura rimescolati e a una porzione superficiale del corpo di frana che presumibilmente risente dell'azione di rimodellamento eseguita durante i lavori conclusi nel 2024.
- **Corpo di frana (4.6 - 11.7 m):** Un pacchetto consistente rielaborato dal movimento gravitativo.
- **Zona di transizione:** individuato da un orizzonte critico che presumibilmente definisce la zona di scorrimento profonda mobilitata nelle fasi più recenti.
- **Substrato rigido (oltre i -30 m):** In corrispondenza della profondità di circa 29.5 - 30.0 m, il modello evidenzia il contrasto di impedenza principale. Il passaggio al bedrock sismico è segnato da un incremento della velocità fino a 500 m/s che riflette lo stato di fratturazione della compagine rocciosa di base.

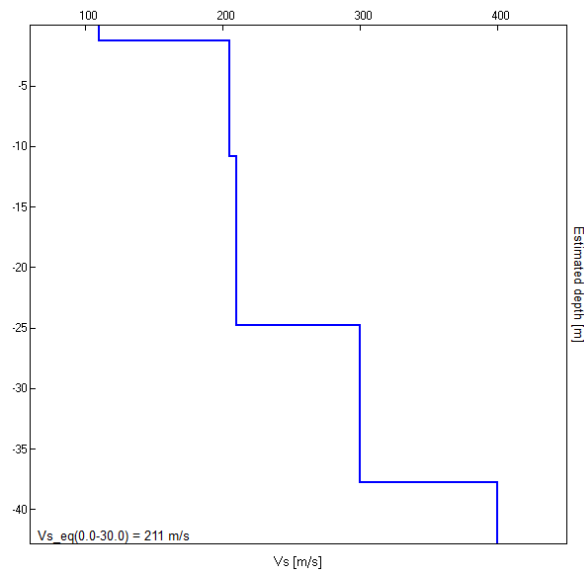
Conclusione Tecnica

A differenza della zona stabile esterna, la risposta spettrale sul corpo di frana mostra una maggiore complessità nelle alte frequenze, segno di una disomogeneità strutturale interna

causata dal rimescolamento dei materiali. Il modello di inversione evidenzia che il contrasto di impedenza più significativo si stabilizza intorno ai 29.7 m, profondità che identifica il piano di scollamento principale della frana. L'analisi suggerisce che il movimento non sia limitato a un singolo piano basale, ma coinvolga diverse superfici di scorrimento secondarie individuabili fra -4.5 m e -11.5 m di profondità. Il corpo di frana ha uno spessore complessivo di circa 30 m e poggia su un bedrock sismico che, pur essendo fratturato delimita rigorosamente la profondità massima del fenomeno.

STAZIONE N. 4





Analizzando la curva sperimentale HVSr fornita, si osserva una risposta sismica complessa e multimodale, caratterizzata da ampiezze moderate ($H/V < 3$). Tale morfologia "piatta" e spalmata è tipica di contesti geologici dove i contrasti di impedenza non sono netti, ma mediati da importanti coltri di alterazione e depositi rielaborati. Il picco principale si attesta a 1.9 Hz, suggerendo una superficie di contrasto significativamente più profonda rispetto ai casi precedenti.

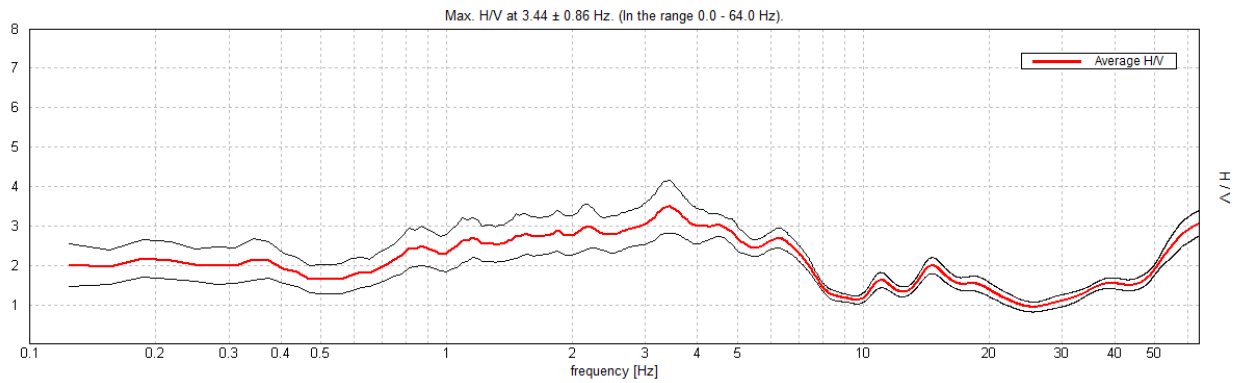
Dall'analisi del modello sismostratigrafico si distinguono tre domini principali:

- **Orizzonte superficiale (0.0 – 4.5 m):** una coltre sommitale a bassa velocità riconducibile al terreno di riporto di copertura.
- **Successione intermedia (4.5 - 25 m):** un pacchetto di terreni con rigidità crescente riconducibile a materiali rielaborati da dinamiche gravitative ed elementi geologici oggetto di intensa fratturazione e rielaborazione.
- **Substrato rigido (oltre i 30 m):** definito da un netto incremento della velocità (V_s), indicativo di un substrato roccioso verosimilmente intensamente fratturato.

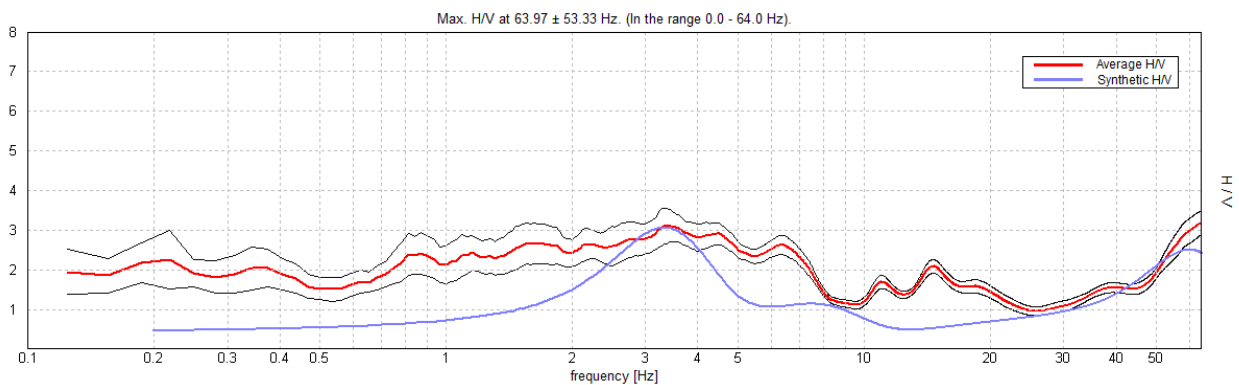
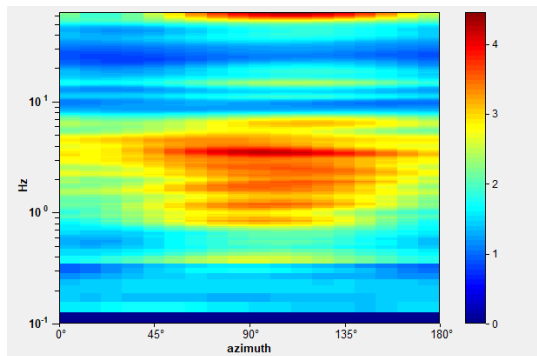
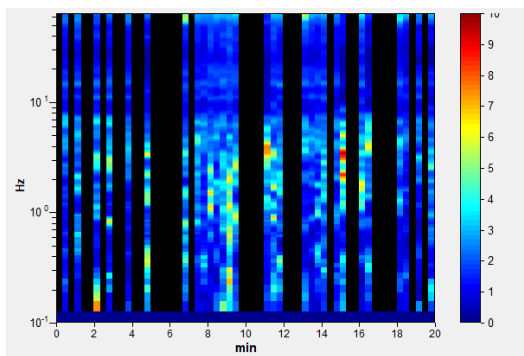
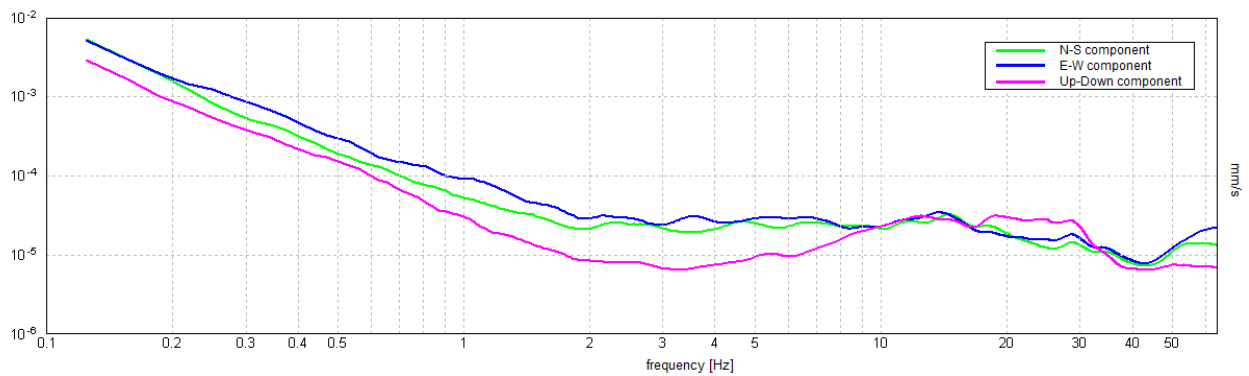
Conclusione tecnica

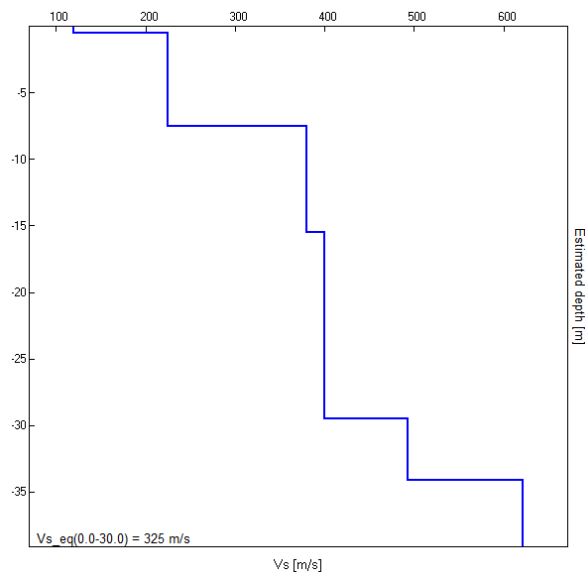
L'analisi definisce un modello sismostratigrafico a tre stadi in cui la superficie di separazione a -25 m rappresenta l'interfaccia meccanica principale. Sebbene il punto di misura si trovi in zona attualmente stabile, l'individuazione di una successione così potente di materiali rielaborati suggerisce che la superficie di scorrimento della frana attuale tende probabilmente a modellarsi sulla geometria di questa interfaccia profonda (-25/-30 m), o a raccordarsi ad essa nelle fasi di massima evoluzione. Il tratto stradale insiste su un settore di versante che possiede un potenziale di mobilitazione profondo.

STAZIONE N. 5



La curva H/V media (rossa) evidenzia una risposta sismica complessa, caratterizzata da un picco principale a 3.44 Hz e una serie di massimi secondari tra 1 Hz e 3 Hz. L'allargamento della banda di risonanza è indicativo di un sottosuolo eterogeneo, tipico delle zone di contatto tettonico o stratigrafico.





Il picco molto nitido osservato a circa 64 Hz indica un contrasto d'impedenza estremamente superficiale (primi 50-80 cm), riconducibile al terreno di riporto. Il grafico mostra un rigonfiamento ampio e a bassa ampiezza tra 3.4 e 4.0 Hz. In termini geofisici, la mancanza di un picco di risonanza singolo e d'elevata ampiezza ($H/V < 3$) suggerisce la presenza di un contrasto d'impedenza moderato potenzialmente rivelatore di una transizione graduale. Il bedrock sismico, individuato nel modello a circa 28-32 m di profondità, non si presenta come un corpo rigido ideale, ma verosimilmente come una formazione rocciosa tettonizzata o profondamente alterata nella sua parte sommitale.

Il profilo della velocità delle onde di taglio (V_s) in funzione della profondità, derivato dall'inversione della curva di rapporto spettrale H/V , delinea un modello stratigrafico coerente con la dinamica di un corpo di frana complesso sovrapposto a un substrato sismico profondo.

- **Coltri superficiali e terreno riportato (0.0 - 4.5 m):** la parte sommitale del modello evidenzia un primo strato estremamente sottile (~ 0.5 m) a bassissima velocità. Segue un livello con V_s di circa 190 m/s, riconducibile a terreni di copertura rimescolati.
- **Depositi consolidati (4.5 - 30.0 m):** rappresenta il volume principale del deposito franoso, con rigidezza crescente (incremento progressivo della V_s).
- **Substrato Rigido (oltre i 30 m):** il passaggio al bedrock sismico è segnato da un incremento della velocità fino a 500 m/s, valore compatibile con una compagine rocciosa di base seppur parzialmente fratturata.

L'assetto proposto non identifica necessariamente il livello di scollamento primario come un'interfaccia netta e immediata; al contrario, la morfologia della curva H/V suggerisce che la superficie di interfaccia fra i depositi franosi e il substrato possa configurare un orizzonte di transizione profondo, situato alla base della coltre degradata, che delimita un volume cinematizzato di grandi dimensioni sovrapposto a un substrato che acquisisce rigidezza in modo progressivo ma definitivo.