

PROVINCIA DI VERONA
Comune di SAN ZENO DI MONTAGNA

**PIANO URBANISTICO RESIDENZIALE
Z.T.O. C2/11 SK 06 "LA CRETA" PER
CONTO DELLA SIG.RA PERETTI PAOLA
NEL COMUNE DI SAN ZENO DI
MONTAGNA (VR)**

Relazione Geologica, Idrogeologica e Sismica

TECNICO INCARICATO

Dott. Geol. Luca Bersani



COMMITTENTE

PERETTI PAOLA

Verona, febbraio 2020

DOTT. GEOL. LUCA BERSANI
Via Tiziano, 5 - 37138 Verona - Tel. 347 7993650
e-mail: luca.bersani@ltsht.com

INDICE

1. Premessa	3
2. Normativa di Riferimento.....	3
3. Inquadramento Geologico e Geomorfologico	4
3.1. Inquadramento Geologico e Geomorfologico	5
3.1. Inquadramento Idrografico e Idrogeologico	8
4. Pianificazione comunale	9
4.1. Matrice suolo e sottosuolo del PAT	9
4.2. Compatibilità sismica, Microzonazione sismica di Livello 1 e 2	12
5. Intervento in progetto	16
6. Indagini geognostiche	17
6.1. Trincee geognostiche	18
6.1.1. Prove di permeabilità in trincea	18
6.2. Indagine geofisica.....	20
6.2.1. Modello di resistività del sottosuolo	20
6.2.2. Risultati ottenuti dalla indagine di sismica a rifrazione	22
6.2.3. Re.Mi.	23
6.2.4. Indagine sismica passiva a stazione singola (H.V.S.R.)	23
7. Zonazione e pericolosità sismica dell'area	24
7.1. Analisi sismica locale.....	26
8. Modello Geologico Locale.....	27
9. Indicazioni di carattere geotecnico.....	28
10. Considerazioni sulle modalità di scavo	28
11. Conclusioni	29
12. Allegati.....	30

1. PREMESSA

La presente relazione viene redatta su incarico dell'ING. **ROBERTO PENAZZI**, progettista dell'intervento in oggetto, e per conto della **SIG.RA PERETTI PAOLA**, proprietaria dei lotti ubicati in località "La Creta" a S. Zeno di Montagna (VR), sui quali s'intende eseguire le opere finalizzate all'urbanizzazione dell'area.

Scopo dello studio geologico è la ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.

Inoltre, sarà definita la successione litostratigrafica locale dei litotipi e descritto lo schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea.

L'indagine si è articolata nelle seguenti attività:

- ❑ raccolta ed analisi della letteratura geologica esistente;
- ❑ realizzazione di n° 5 trincee geognostiche;
- ❑ esecuzione di n° 2 prove di permeabilità all'interno di 2 trincee geognostiche;
- ❑ esecuzione n° 3 stendimenti di geoelettrica;
- ❑ esecuzione n° 1 stendimento di sismica;
- ❑ esecuzione n° 1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor);
- ❑ esecuzione di n° 3 misure di sismica passiva HVSR, mediante Tromino;
- ❑ stesura della relazione geologica e idrogeologica, alla quale sono allegati:
 - stratigrafie e documentazione fotografica delle trincee geognostiche;
 - Relazione sull'Indagine Geofisica.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nella redazione della presente relazione ci si è attenuti alle prescrizioni della Normativa vigente, in particolare:

- ❑ O.P.C.M. n° 3274 del 20.03.2003: "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zone sismiche"
- ❑ O.P.C.M. n° 3519 del 28.04.2006: "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"
- ❑ D. M. Infrastrutture e trasporti del 14.01.2008: "Nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC)"
- ❑ Circ. Min. LL. PP. 02.02.2009 n° 617: "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni"
- ❑ D. M. Infrastrutture e trasporti del 17.01.2018: "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni"
- ❑ Min. Infrastrutture e trasporti - Circ. 21 gennaio 2019 n. 7 C.S.LL.PP: "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018";
- ❑ P.A.T. del Comune di S. Zeno di Montagna – adottato con D.C.C. n° 22 del 08.08.2012 e approvato dalla Regione Veneto in Conferenza di servizi del 28.02.2014.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area in oggetto è ubicata in Località Creta, in Comune di San Zeno di Montagna (VR) ad una quota topografica compresa tra circa 540-575 m s.l.m.

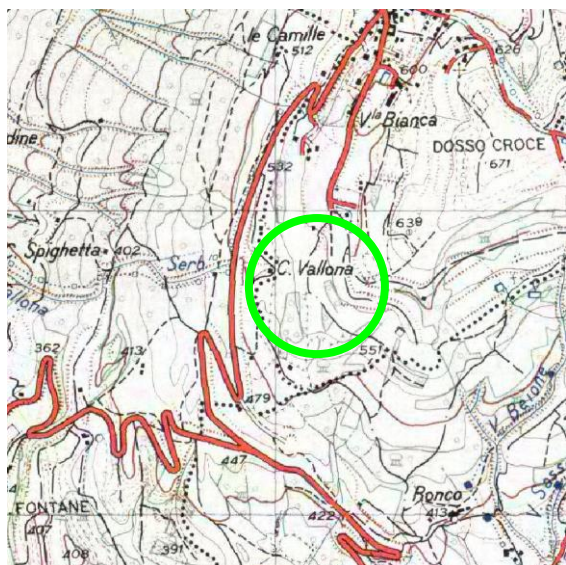


Figura 1: estratto della Carta Topografica d'Italia – scala 1:25000

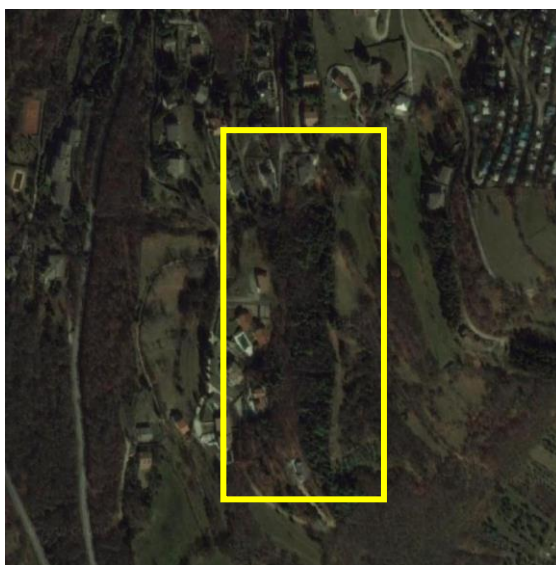


Figura 2: immagine estratta da Google Earth

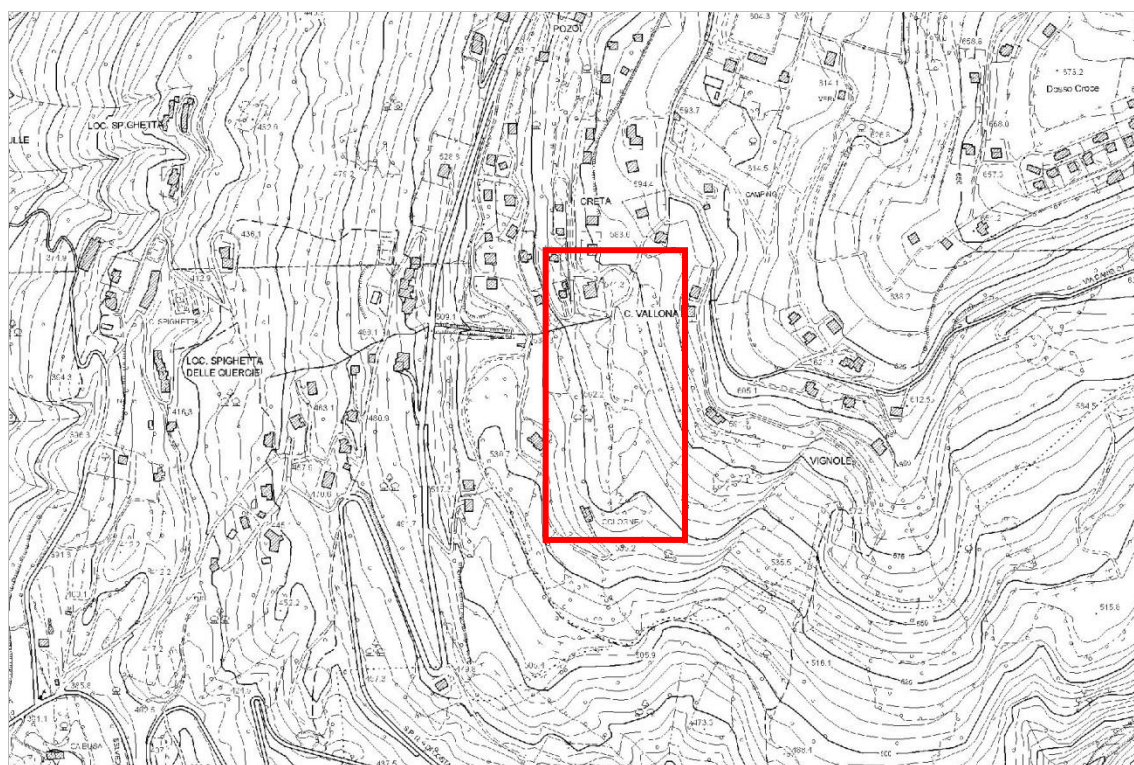


Figura 3: estratto della CTR – scala 1:10000 – sezione n° 101130 S. Zeno di Montagna

3.1. Inquadramento Geologico e Geomorfologico

L'area in oggetto è situata lungo il versante occidentale del Monte Baldo che, dalle creste sommitali, degrada verso la sponda orientale del Lago di Garda.

I litotipi affioranti lungo il pendio afferiscono generalmente alle formazioni calcaree mesozoiche, sovente ricoperte da depositi morenici e, localmente, alluvionali.

I depositi morenici sono testimoni delle alterne vicende climatiche che hanno caratterizzato il Quaternario. Importanti oscillazioni termiche, causate da concomitanti fattori astronomici, hanno prodotto un'alternanza di periodi di raffreddamento (glaciazioni) e di successivo riscaldamento della superficie terrestre (interglaciale).

Il bacino lacustre benacense fu sede di un imponente massa glaciale, che si espandeva, con le sue propaggini meridionali, sino all'attuale pianura padano-veneta.

Le fasi di massima espansione sono tuttora evidenziate dalle cerchie moreniche che cingono a sud il Lago di Garda.

Nel corso del Pleistocene, il basamento roccioso è stato eroso e modellato dall'azione glaciale sul fianco occidentale del Monte Baldo. Il ritiro del ghiacciaio ha lasciato coltri di depositi morenici, costituiti da ghiaia, ciottoli e blocchi inclusi in matrice limosa da compatta a mediocrementemente cementata. Sul versante a valle della spalla glaciale l'erosione post-glaciale ha smantellato buona parte dei depositi morenici riportando alla luce il basamento roccioso.

La Carta Geologica d'Italia 1:100.000 – Foglio n° 48 Peschiera del Garda (figura 4) – definisce i depositi affioranti nell'area in oggetto, come *“morene ghiaiose, talora debolmente cementate, con terreno di alterazione argilloso, di colore rossastro o rosso, con qualche ciottolo calcareo, e dello spessore massimo di 1-2 metri.”* (m^R).

I depositi appaiono come “lembi” di materiali sciolti poggiati sul substrato roccioso, rappresentato da Calcari Giurassici al limite tra la formazione del *“Rosso ammonitico veronese”* e dei *“Calcari oolitici di S. Vigilio”*, affioranti rispettivamente a monte e a valle del sito in oggetto.

Un maggior dettaglio viene fornito dalla *Carta Geologica dell'anfiteatro morenico del Garda – Tratto orientale e anfiteatro morenico di Rivoli Veronese* (Venzo, 1961), pubblicata alla scala 1:25.000, nella quale si evidenzia la presenza di un limitato lembo di morena rissiana compreso tra gli affioramenti rocciosi posti ad est del sito in oggetto e la morena würmiana ad ovest (figura 5). Come indicato nella descrizione posta in legenda, la discriminante principale tra le morene di età differente è data dall'alterazione superficiale in argille rosso- brune o giallastre, tipica della più antica morena rissiana.

Dal punto di vista strutturale, i principali elementi tettonici comprendono l'anticlinale e sinclinale del M. Baldo, con asse NNE-SSW e la linea M. Baldo - M. Stivo (NNE - SSW). La struttura anticlinale presenta il fianco sud-orientale verticalizzato e per lunghi tratti rovesciato, mentre la sinclinale appare meno pronunciata. Sul fianco occidentale dell'anticlinale del M. Baldo, dove è ubicata l'area in studio, le formazioni rocciose presentano, invece, una giacitura monoclinale orientata verso WNW.

Verso sud, la faglia San Vigilio-Sirmione sembra costituire la prosecuzione meridionale della struttura del M. Baldo.



LEGENDA



Area in studio

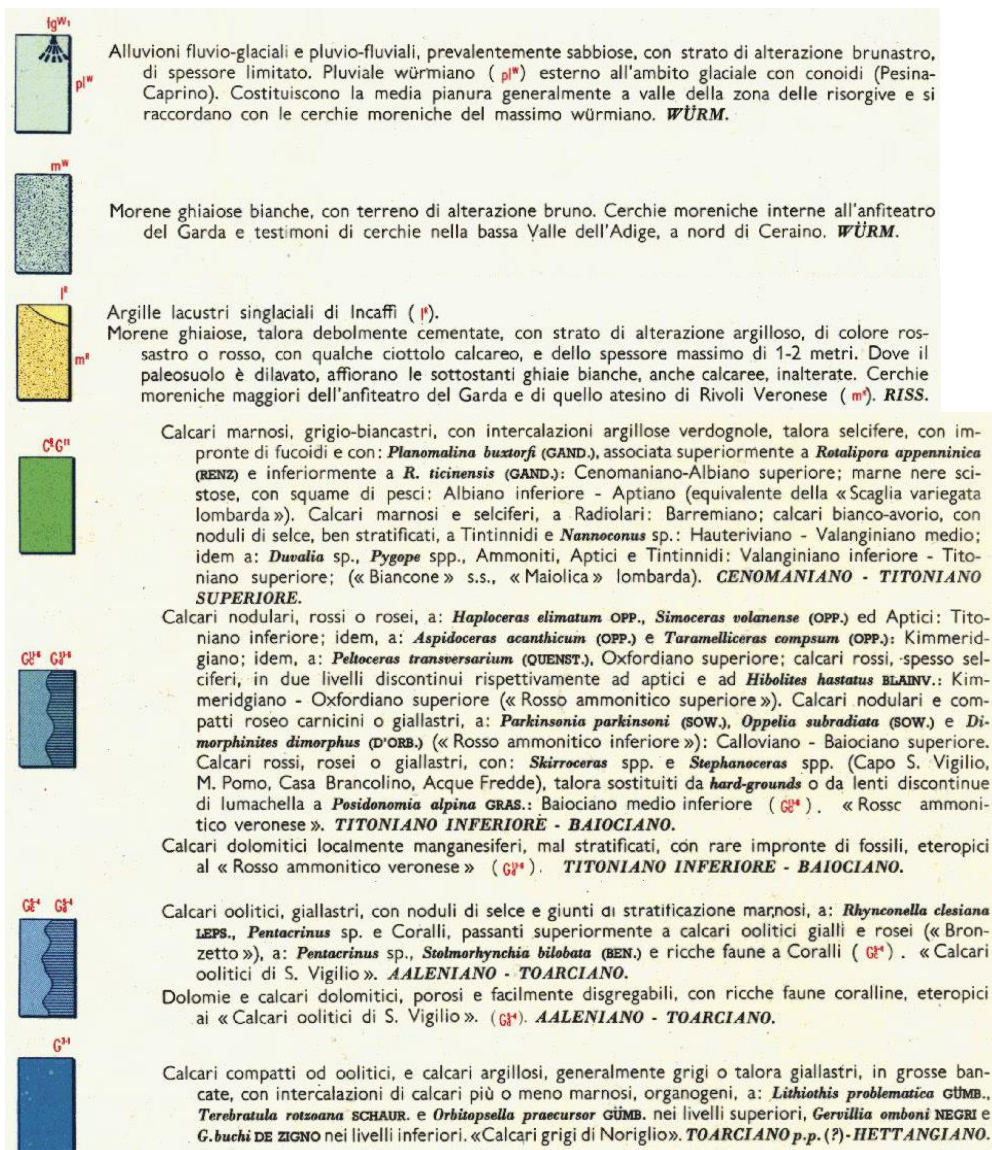


Figura 4: estratto della Carta Geologica d'Italia – Foglio n° 48 – Peschiera del Garda

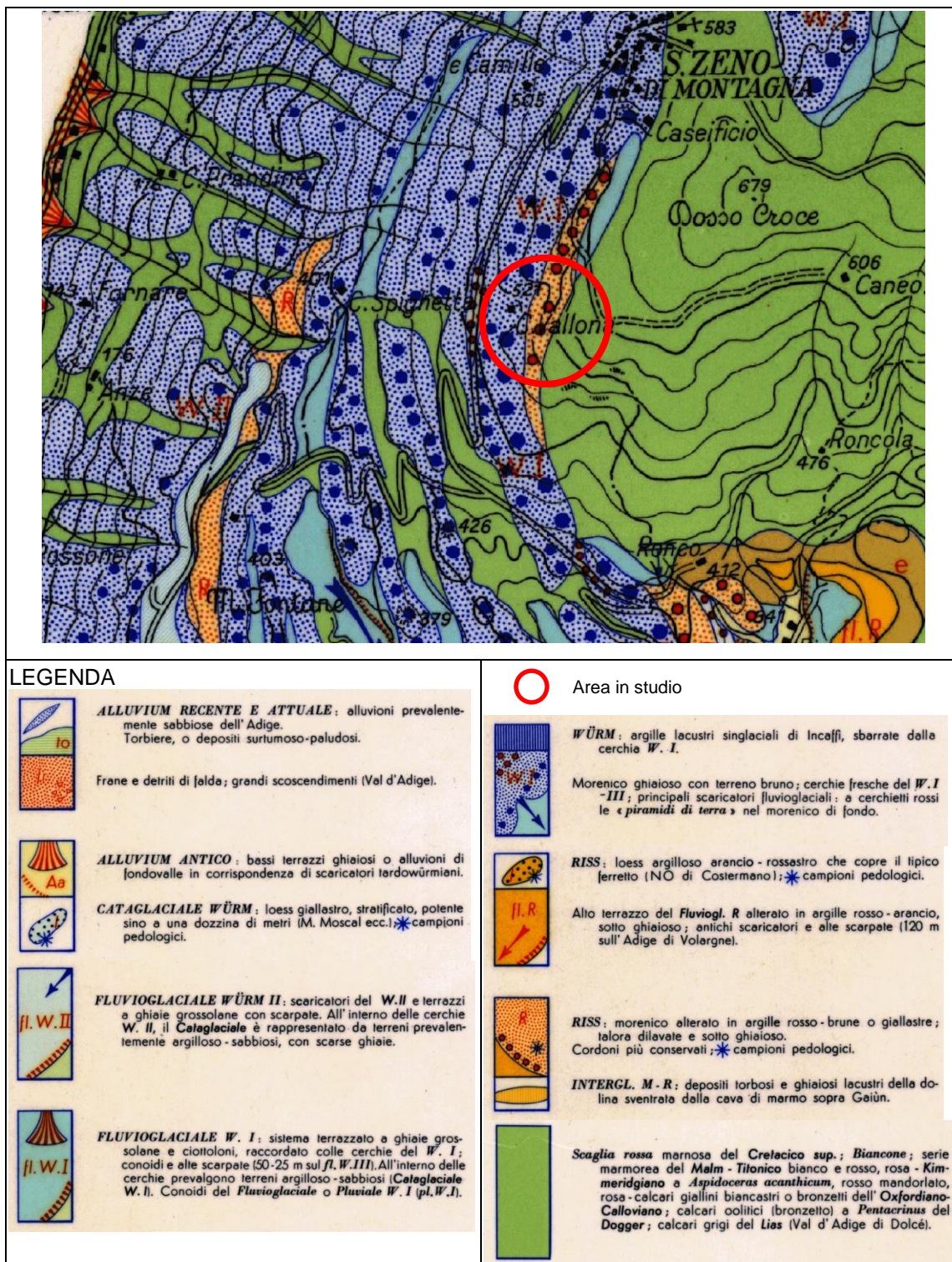


Figura 5: estratto della Carta Geologica dell'anfiteatro morenico del Garda – Tratto orientale e anfiteatro atesino di Rivoli (Venzo, 1961)

3.1. Inquadramento Idrografico e Idrogeologico

La rete idrica superficiale è rappresentata da corsi d'acqua aventi regime torrentizio impostati lungo incisioni vallive, presumibilmente di origine tettonica. Essi drenano parte del versante occidentale del Monte Baldo e si immettono nel Lago di Garda lungo la sua sponda orientale, al termine di tratte fluviali piuttosto brevi.

La tipologia idrogeologica di questi complessi calcarei è costituita da una circolazione idrica che si imposta essenzialmente sulle fratture e sulle discontinuità degli ammassi rocciosi, spesso accentuata dal carsismo. Tuttavia, non si esclude la presenza di falde acquifere sospese, generalmente poco produttive, che possono instaurarsi in corrispondenza di situazioni stratigrafico-tettoniche particolari e talora emergere. Si segnala la presenza di un "pozzo con falda saliente" circa 850 m ad est dell'area in oggetto.

La Carta Idrogeologica allegata al PAT (figura 6), della quale si propone uno stralcio nella figura seguente, non individua alcun elemento di interesse idrogeologico nell'area in studio.

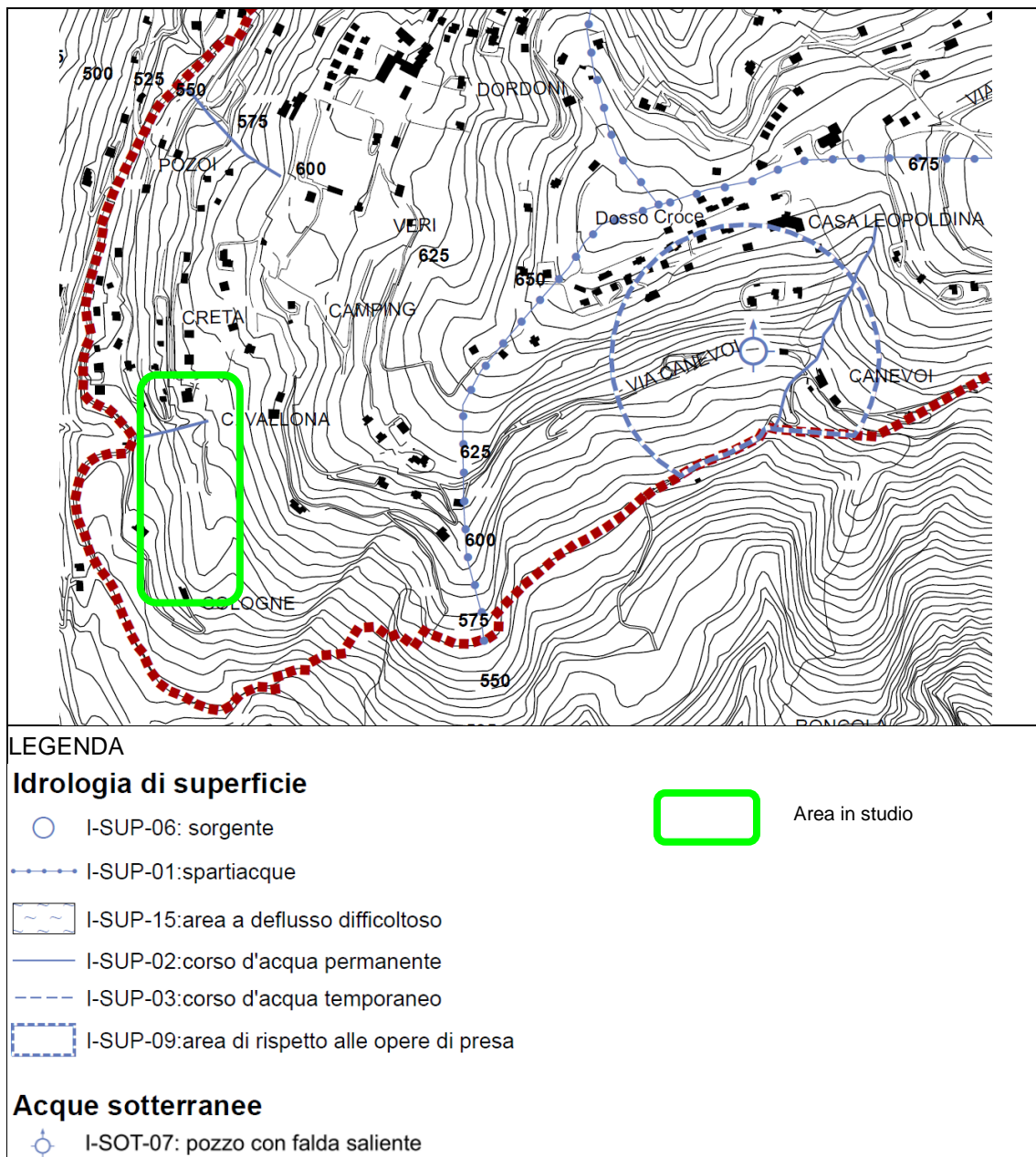


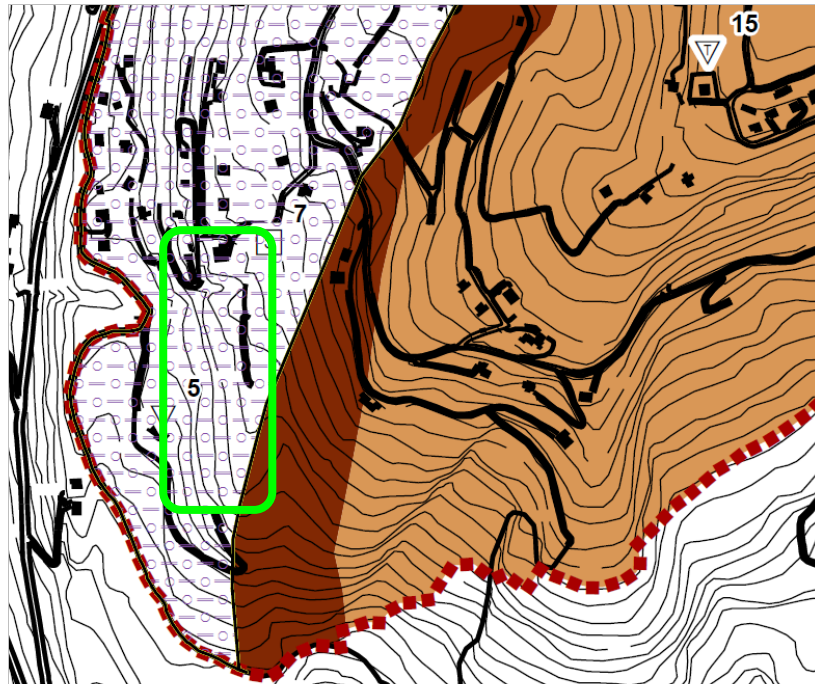
Figura 6: stralcio della Carta Idrogeologica allegata al PAT

4. PIANIFICAZIONE COMUNALE

4.1. Matrice suolo e sottosuolo del PAT

Il Piano di Assetto del Territorio (PAT) di S. Zeno di Montagna contiene, all'interno del Quadro Conoscitivo, le cartografie tematiche di carattere litologico, geomorfologico e idrogeologico del territorio comunale.

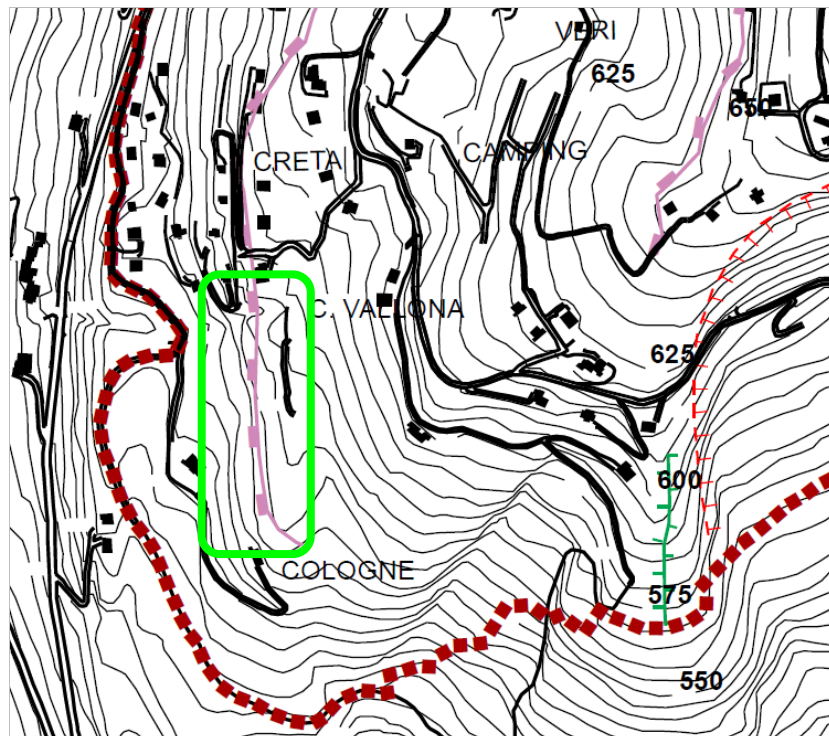
La *Carta Geolitologica* (figura 7) individua nell'area in oggetto “materiali di accumulo fluvio-glaciale o morenico grossolani in matrice fine sabbiosa (L-ALL-07)”.



LEGENDA	
MATERIALI DELLA COPERTURA DETRITICA ELUVIALE E COLLUVIALE	
	L-ALL-02 - materiali a tessitura eterogenea dei depositi di conoide di deiezione torrentizia
	L-ALL-07 - materiali di accumulo fluvio-glaciale o morenico grossolani in matrice fine sabbiosa
	L-DET-01 - materiali della copertura detritica eluviale e/o colluviale poco addensati e costituiti da elementi granulari sabbioso-ghiaiosi in limitata matrice limo-sabbiosa
	L-DET-04 - materiali della copertura detritica colluviale poco consolidati e costituiti da frazione limo-argillosa prevalente con subordinate inclusioni sabbioso-ghiaiose e/o di blocchi lapidei per spessori maggiori di 3 metri
	L-FRA-01 - materiali sciolti per accumulo di frana per colata o per scorrimento, a prevalente matrice fine argillosa talora inglobante inclusi lapidei
SUBSTRATO ROCCIOSO	
	L-SUB-03 - rocce compatte stratificate
	L-SUB-05 - rocce compatte prevalenti alternate a strati o interposizioni tenere
PUNTI DI INDAGINE GEOGNOSTICA E GEOFISICA	
	L-IND-01 - prova penetrometrica
	L-IND-02 - sondaggio
	L-IND-03 - trincea
	L-IND-05 - prospezione sismica
	L-IND-06 - altro
	Area in oggetto

Figura 7: estratto della Carta Geolitologica (PAT)

La *Carta Geomorfologica* (figura 8) segnala la presenza di un “orlo di scarpata di erosione glaciale”, posto alla base del versante che delimita ad ovest l'area in oggetto.



LEGENDA

Confini Comunali

Area in oggetto

FORME FLUVIALI

M-FLU-01- forra

M-FLU-14- vallecicole a V

M-FLU-15 - vallecicole a conca

M-FLU-17 - orlo di scarpata di erosione fluviale o di terrazzo: altezza inferiore a 5 metri

M-FLU-19 - orlo di scarpata di erosione fluviale o di terrazzo: altezza superiore a 10 metri

M-FLU-20- alveo con recente tendenza all'approfondimento

M-FLU-22- superficie con forme di dilavamento prevalentemente diffuso

M-FLU-27- cresta di dislivello

M-FLU-31-cono alluvionale con pendenza superiore al 10%

FORME GLACIALI

M-GLA-03- orlo di scarpata di erosione glaciale

FORME DOVUTE ALLA GRAVITA'

M-GRV-13-piccola frana o fruppo di frane non classificate

M-GRV-05-nicchia di frana di scorrimento non attiva

M-GRV-11-corpo di frana di scorrimento non attiva

FORME CARSIICHE

M-CAR-02-dolina

M-CAR-07-valle chiusa

M-CAR-13-ingresso di grotta a sviluppo prevalentemente

M-CAR-14 - aree di sprofondamento carsico

FORME STRUTTURALI

M-STR-01-frattura

M-STR-02a-faglia certa

M-STR-02b-faglia presunta

M-STR-06-orlo di scarpata di faglia

M-STR-12-orlo di scarpata ripida influenzata dalla struttura

FORME ARTIFICIALI

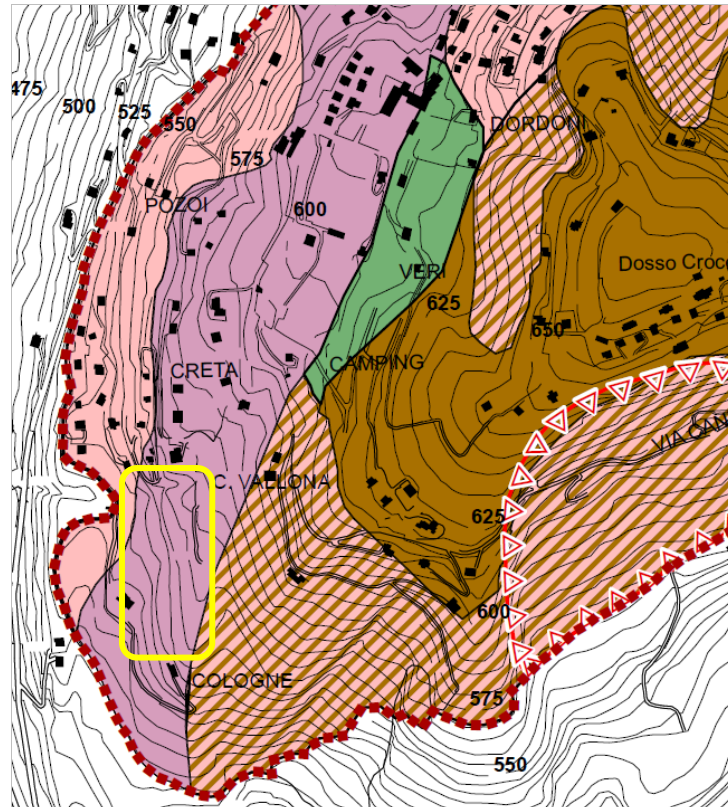
M-ART-03-terrazzamento agrario a muretti o a scarpata integro

M-ART-06-orlo di scarpata di cava abbandonata o dismessa

M-ART-08-cava di piccole dimensioni abbandonata o dismessa

Figura 8: estratto della Carta Geomorfologica (PAT)

La compatibilità geologica sintetizza le penalità ai fini edificatori in rapporto alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche dell'area, anche in considerazione dei dissesti in atto e potenziali. Questo tematismo è contenuto nella *Carta delle Fragilità* di cui si riporta uno stralcio in figura 9. La zona in studio è definita come “**area idonea a condizione**” tipo 02.04 caratterizzata da “*terreni con possibile scarso deflusso delle acque (L-ALL-07)*”.



LEGENDA

COMPATIBILITA' GEOLOGICA

IDONEO

IDONEO A CONDIZIONE

- 02.01 rocce intensamente fratturate (L-SUB-05)
- 02.02 aree a deflusso difficoltoso (I-SUP-15)
- 02.03 caratteristiche geotecniche scadenti e possibile sprofondamento carsico per spessori dei depositi < 1 metro
- 02.04 terreni con possibile scarso deflusso delle acque (L-ALL-07)
- 02.05 pendenza compresa tra 15° e 30°
- 02.06 rocce intensamente fratturate e pendenza compresa tra 15° e 30°
- 02.07 zone di possibile sprofondamento carsico con pendenza compresa tra 15° e 30°
- 02.08 sedimenti limo argillosi con spessore maggiore di 3 metri e circolazione d'acqua sotterranea

NON IDONEO

- 03 pendenza maggiore di 30°, aree in frana, dilavamento diffuso

Area in oggetto

DISSESTI

- CAR- aree soggette a sprofondamento carsico
- FRA- frane
- IDR-aree di ristagno idrico o deflusso difficoltoso e aree soggette a dilavamento diffuso

Figura 9: estratto della Carta delle Fragilità (PAT)

4.2. Compatibilità sismica, Microzonazione sismica di Livello 1 e 2

Il territorio comunale di San Zeno di Montagna rappresenta uno dei sette comuni della provincia di Verona classificati sismici già nelle normative precedenti all'OPCM n° 3274 del 20 marzo 2003, con la quale si attribuì un grado di pericolosità sismica a tutto il territorio nazionale secondo 4 diverse zone suddivise in base ad un intervallo di accelerazione orizzontale con probabilità di superamento del 10% in 50 anni.

Secondo tale ordinanza, il territorio comunale di San Zeno di Montagna è compreso in Zona 2, per la quale si assume un'accelerazione compresa tra $0,15 \div 0,25$ (a_g/g).

Con L'OPCM n° 3519 del 28 aprile 2006, l'area in esame è inserita nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s compreso tra $0,150g$ e $0,175g$ (valori relativi ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

In considerazione dell'appartenenza alla Zona 2, la Regione Veneto richiede l'elaborazione dello Studio di Compatibilità Sismica (DGRV n° 3308 del 04 novembre 2008) del territorio comunale (successivamente evoluto nella Microzonazione Sismica di livello 1, definita con la DGRV n° 1572 del 03 settembre 2013) da redigersi obbligatoriamente in fase di elaborazione di ogni nuovo strumento urbanistico comunale (P.A.T./P.A.T.I., P.I. e loro varianti di cui alla L.R.11/2004).

A seguito del terremoto de l'Aquila dell'aprile del 2009, sono stati introdotti dei supporti normativi a livello nazionale (articolo 11 della legge n° 77 del 24 giugno 2009 di conversione del DL n° 39 del 28 aprile 2009 per la ricostruzione in Abruzzo) finalizzati al finanziamento di interventi per la prevenzione del rischio sismico su tutto il territorio nazionale. Con l'OPCM n° 3843 del 19 gennaio 2010 è stata istituita una Commissione di esperti che ha individuato gli aspetti che riguardano, in particolare, la mitigazione del rischio sismico attraverso azioni e interventi tra i quali assumono valore fondamentale gli studi di microzonazione sismica.

In tale contesto normativo, è stato elaborato lo studio di Microzonazione Sismica del Comune di San Zeno di Montagna (Collareda et al., 2013), nell'ambito del quale è stata realizzata, tra le altre, la Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) di cui si riporta uno stralcio nella figura 10.

L'area in oggetto ricade all'interno della zona 3, rappresentata da *“depositi morenici ed eluvio/colluviali”* e sovrastano prevalentemente *“l'ammasso della Zona 1 (LPS – basamento roccioso costituito dalle formazioni del “Rosso Ammonitico” e di “San Vigilio”, rappresentate da rocce prevalentemente compatte stratificate e carsiche). Lo spessore, nella maggior parte dei casi, è di qualche metro e raramente maggiore di 8 m.”*

In ottemperanza alle normative regionali, è stato elaborato *“lo studio di Microzonazione Sismica di livello 2 del territorio comunale ai fini dell'attuazione del Piano degli Interventi”* (Lucchetta, 2017). Il Livello 2 analizza le incertezze del Livello 1 attraverso nuovi approfondimenti finalizzati ad attribuire quantificazioni numeriche, tramite abachi e leggi empiriche.

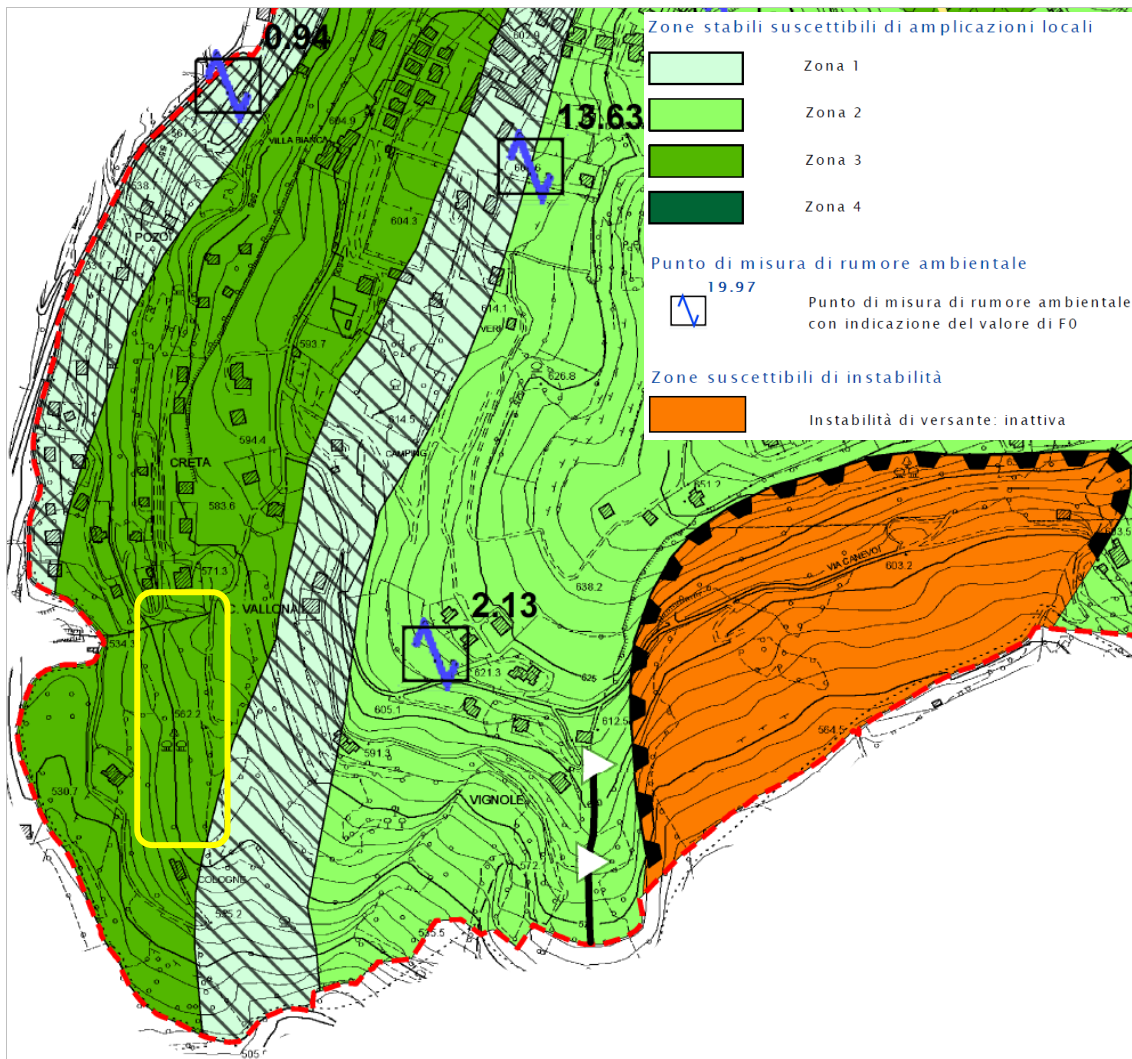


Figura 10: estratto della Carta delle MOPS (MS di livello 1)

Per l'area in oggetto, il livello 2 ha elaborato i fattori di amplificazione FA (fattore di amplificazione a basso periodo in termini di accelerazione) e FV (fattore di amplificazione a periodo proprio in termini di pseudo velocità) che risultano compresi tra i seguenti valori:

$$FV = 1,5 \div 1,6$$

$$FA = 2,3 \div 2,4$$

Pur avendo il livello 1 già mappato le "zone suscettibili di instabilità" per instabilità di versante, nello studio di livello 2 si è eseguita "la valutazione e la classificazione delle aree potenzialmente in frana..... tramite la stima di un parametro definito come "massimi spostamenti attesi" in caso di sisma, che può fornire una classificazione sulla pericolosità delle varie aree interessate. Va sottolineato che tale parametro non è uno spostamento reale ma piuttosto un indicatore di pericolo."

Come evidenzialo dalle figure seguenti, una parte del confine occidentale della lottizzazione è all'incirca compresa nella sottile fascia di "instabilità di versante", ovviamente posta in corrispondenza dell'accentuazione della pendenza del versante. Peraltro, l'autore dello studio non ha ritenuto opportuno modificare la Carta delle MOPS sottolineando "che lo scuotimento sismico può essere un fattore scatenante dell'instabilità ma che esso ha comunque una probabilità di accadimento molto inferiore rispetto ad altre cause scatenanti, prima fra tutte la saturazione del terreno a seguito di precipitazioni particolarmente intense."

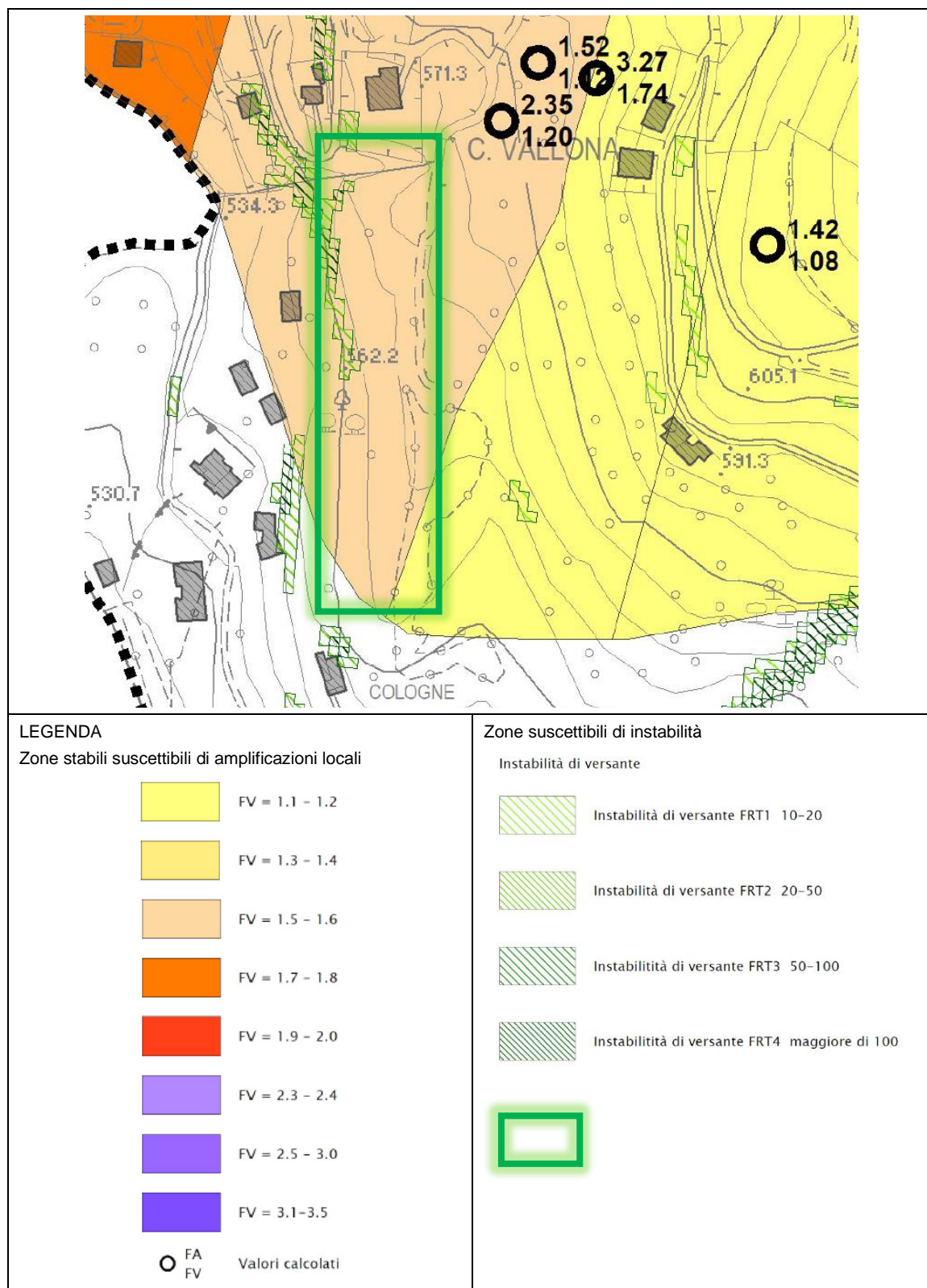


Figura 11: estratto della Carta della microzonazione sismica (FV) di livello 2 – Fattori di amplificazione delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

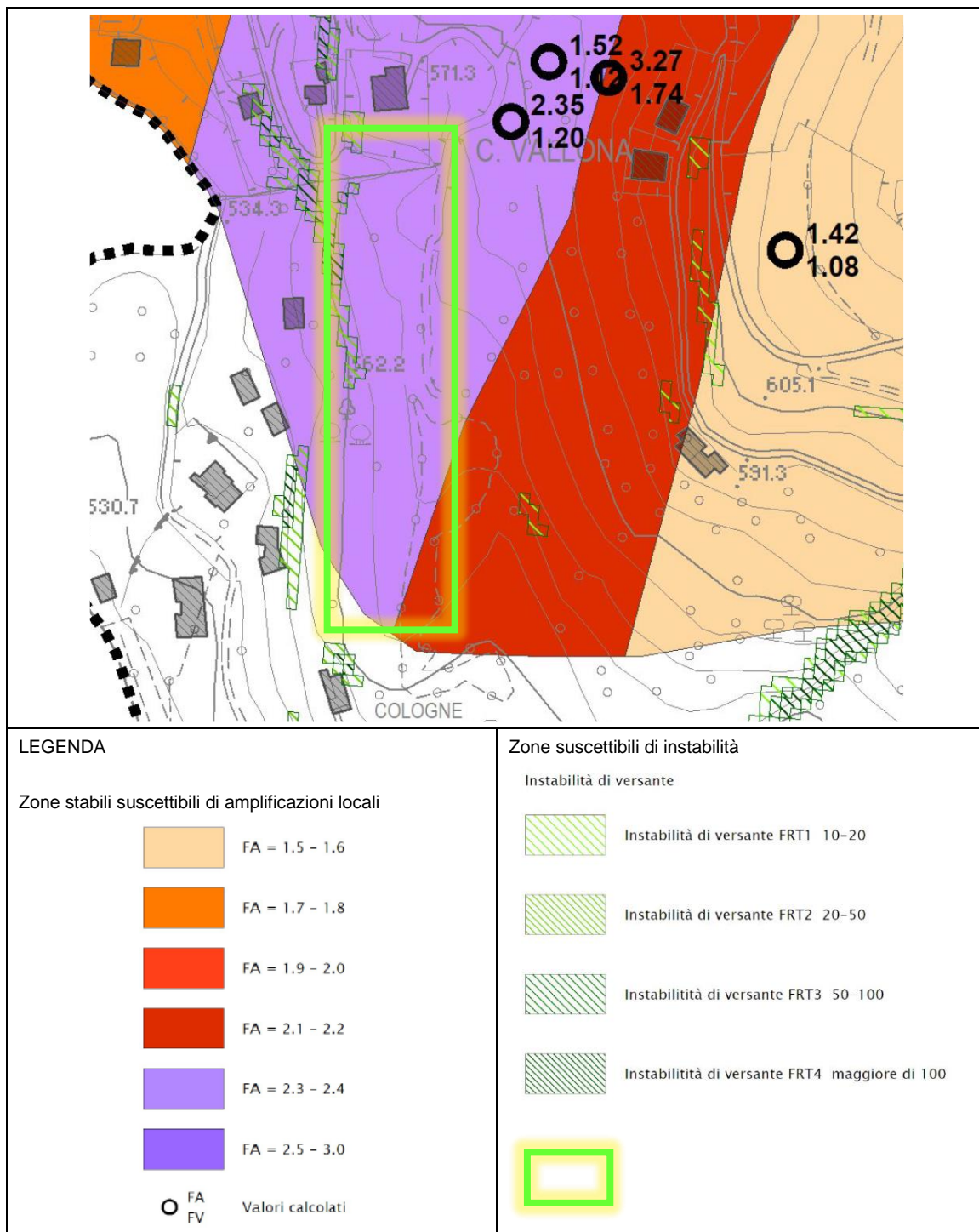


Figura 12: estratto della Carta della microzonazione sismica (FA) di livello 2 – Fattori di amplificazione delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

5. INTERVENTO IN PROGETTO

L'intervento in progetto prevede la realizzazione delle opere di urbanizzazione a servizio dei nuovi insediamenti abitativi della lottizzazione residenziale denominata "La Creta", costituita da n° 3 distinti lotti.

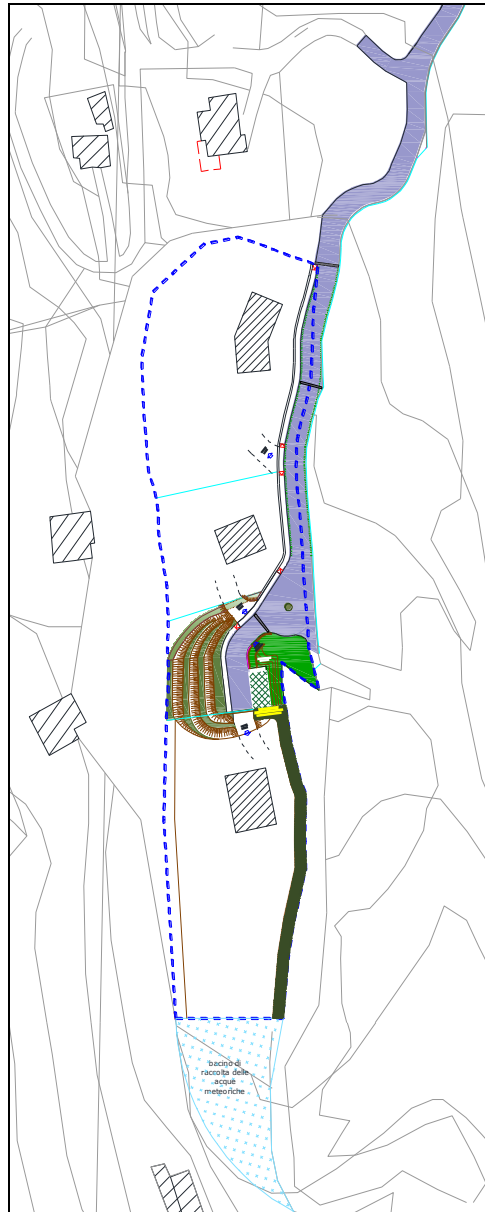


Figura 13: planimetria lottizzazione

Le opere accessorie all'urbanizzazione consistono principalmente in:

- strada di collegamento e penetrazione al lotto da Via Creta;
- realizzazione di un parcheggio, il cui sostegno verso valle dovrà essere garantito da un'adeguata riprofilatura del pendio oppure mediante utilizzo di terre armate o rinforzate;
- rotonda di collegamento tra la strada di lottizzazione e il parcheggio;
- posa rete fognaria, acquedottistica e di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche;
- posa sottoservizi reti tecnologiche.

6. INDAGINI GEOGNOSTICHE

L'area in oggetto è posta lungo un pendio boscoso la cui morfologia condiziona fortemente l'accessibilità al sito. Pertanto, la caratterizzazione diretta dei terreni è stata eseguita con trincee esplorative realizzate mediante escavatore mentre una mappatura indiretta dell'area è stata realizzata mediante indagine geofisica.

Nel complesso, sono quindi state eseguite le seguenti indagini:

- ❑ n° 5 trincee geognostiche, spinte fino alla profondità massima di 1,2 m da p.c.;
- ❑ n° 2 prove di permeabilità, eseguite nelle trincee T2 e T4;
- ❑ n° 3 stendimenti geo-elettrici 2D per misurare la resistività dei terreni;
- ❑ n° 1 prospezione sismica a rifrazione per individuare le principali unità geo-sismiche tramite la stima delle velocità di propagazione delle onde longitudinali P (V_p);
- ❑ n° 1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. per la ricostruzione sismo - stratigrafica del sottosuolo e per l'assegnazione della Categoria del sottosuolo di fondazione ($V_{s,eq}$);
- ❑ n° 3 registrazioni di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. per individuare le frequenze di risonanza del terreno.

L'esatta ubicazione delle indagini eseguite è stata ottenuta tramite l'utilizzo dell'antenna smart Leica Zeno GG04, e riportata nella figura seguente.

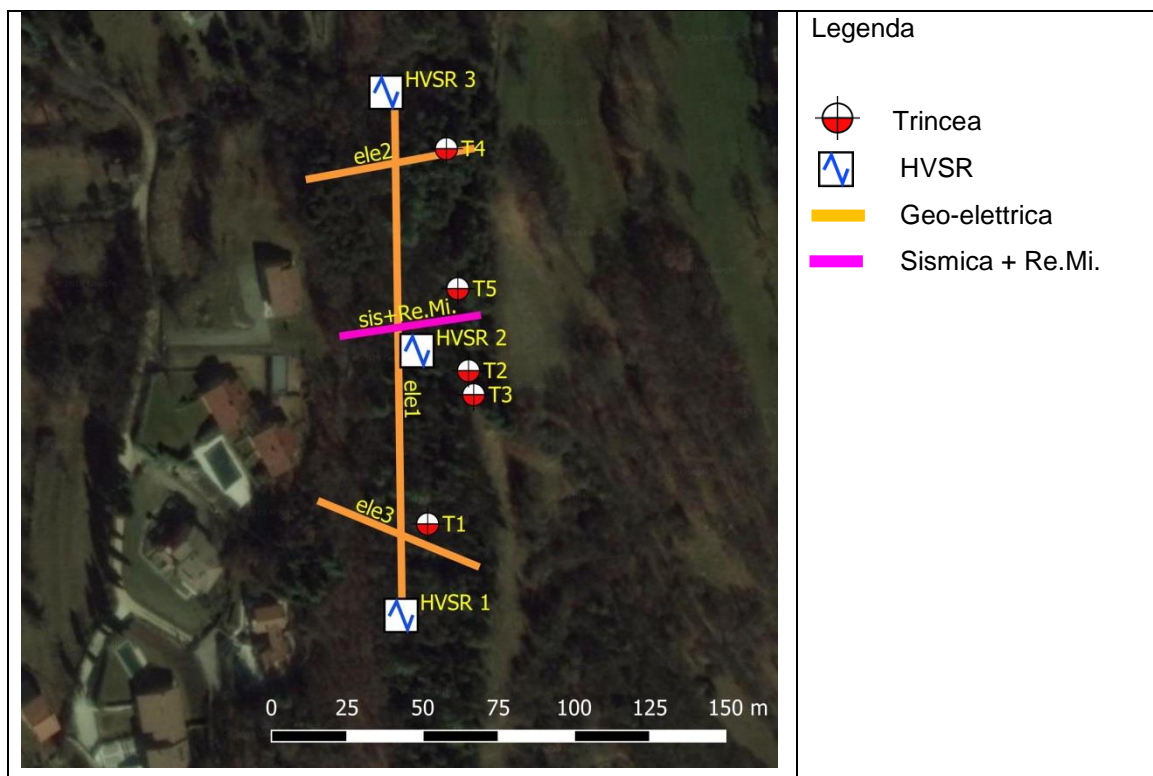


Figura 14: ubicazione indagini

6.1. Trincee geognostiche

In data 4 ottobre 2019 sono state eseguite n° 5 trincee esplorative, posizionate in modo tale da caratterizzare, nel modo più omogeneo possibile, i terreni affioranti nell'area in studio. L'ubicazione è stata fortemente condizionata dalla pendenza del versante e dall'irregolarità del profilo topografico.

Le trincee T1, T4 e T5 sono state eseguite, all'incirca, in posizione limitrofa alla prevista ubicazione degli edifici. Le trincee T2 e T3 sono invece state posizionate in prossimità della rotonda.

All'interno delle trincee T2 e T4 sono inoltre state eseguite 2 prove di permeabilità, una per ciascuna trincea.

L'esame dei terreni estratti dallo scavo e la visione delle pareti delle trincee hanno confermato, al di sotto di uno strato vegetale, la natura morenica dei terreni, caratterizzati da ghiaie, con pezzatura massima variabile tra 20-60 cm, immerse in matrice sabbioso-limoso-argillosa, estremamente addensata e/o compatta.

Solo la trincea T5 ha mostrato una composizione leggermente difforme dalle altre: in essa, si osserva la presenza di limo-argilloso o argilla limosa marrone-rossastro con clasti di disaggregazione rocciosa, al di sotto del quale si riscontra la presenza di ghiaia molto addensata o cementata.

Gli scavi sono stati interrotti a profondità comprese tra 0,7÷1,2 m da p.c., per l'elevato grado di addensamento e/o cementazione dei depositi morenici.

Non sono state evidenziate venute d'acqua all'interno delle trincee, anche se non è da escludere la presenza di falde effimere e di circolazioni idriche in corrispondenza dei livelli più permeabili.

6.1.1. Prove di permeabilità in trincea

All'interno delle trincee T2 e T4 sono state eseguite **n° 2 prove di permeabilità a carico variabile** (una per ciascuna trincea), al fine di determinare il coefficiente di permeabilità dei terreni in oggetto.

La prova consiste nel riempire parzialmente le trincee con acqua e quindi misurare gli abbassamenti dei livelli idrici in funzione del tempo.

Entrambe le trincee sono state realizzate a base rettangolare, con lunghezza (L) circa 1,4 m, larghezza (B) pari a circa 0,7 m e profondità di circa 0,7 m. Nella formulazione per il calcolo del coefficiente di permeabilità (k) si è utilizzato come valore "b" (=1m) il lato della sezione quadrata avente area equivalente a quella della base rettangolare dello scavo (B=0,7m e L=1,4m).

Il coefficiente di permeabilità è stato calcolato, secondo la formulazione proposta dalle Raccomandazioni A.G.I. 1977, mediante la seguente espressione:

$$k = \frac{h_1 - h_2}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1 + \frac{2 \cdot h_m}{b}}{\frac{27 \cdot h_m}{b} + 3}$$

Dove:

h_m = altezza media dell'acqua nel pozzetto

$t_2 - t_1$ = intervallo di tempo

$h_1 - h_2$ = variazione del livello dell'acqua nell'intervallo ($t_2 - t_1$)

b = lato della base del pozzetto a base quadrata

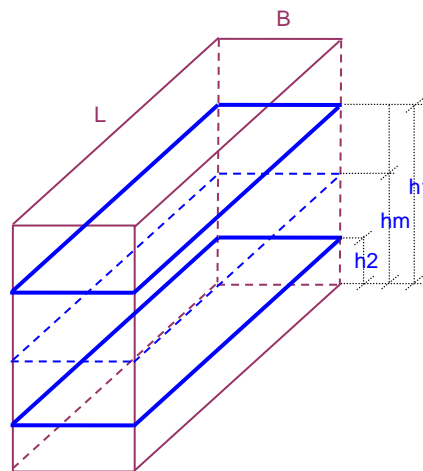




Figura 15: fasi esecutive prova di permeabilità nella trincea T2



Figura 16: fasi esecutive prova di permeabilità nella trincea T4

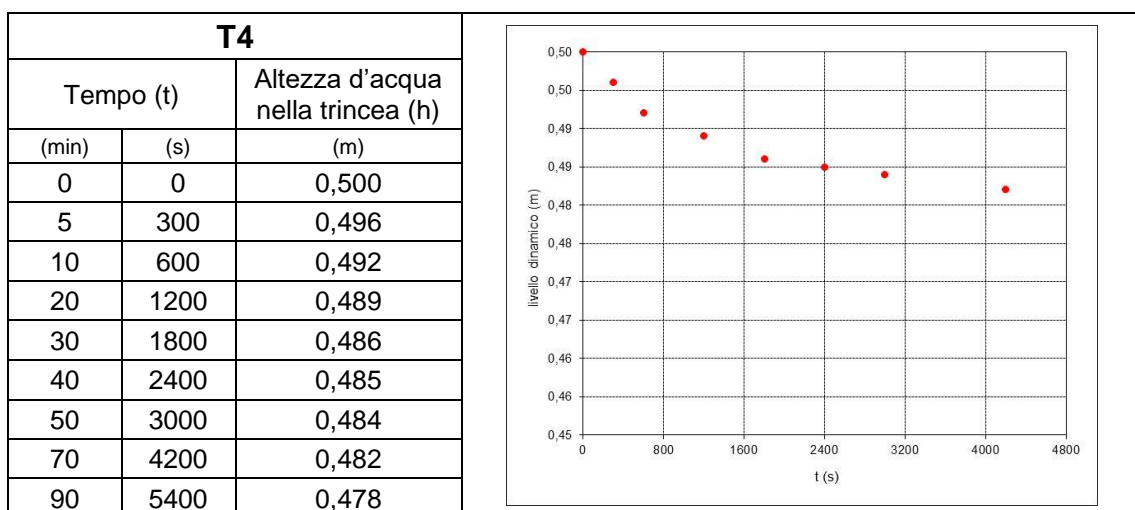
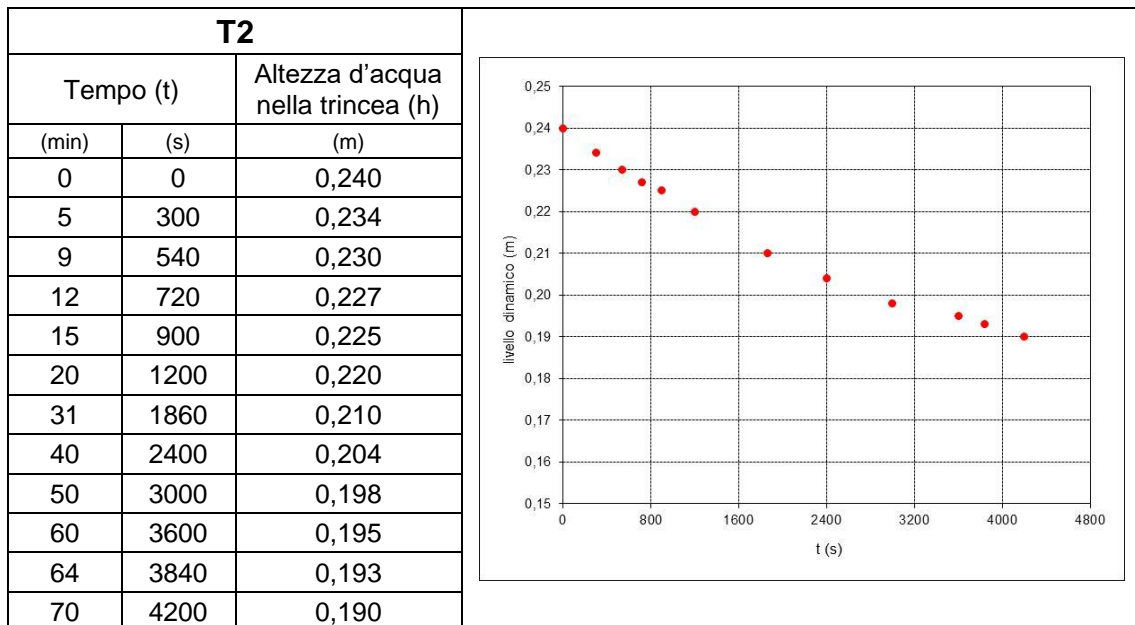


Figura 17: dati e grafici prove di permeabilità

La tabella seguente sintetizza il valore del coefficiente di permeabilità ottenuto.

Trincea	Coefficiente di permeabilità (k)
T2	$2 \cdot 10^{-6}$ (m/s)
T4	$6 \cdot 10^{-7}$ (m/s)

Tabella 1

L'approvvigionamento idrico è stato garantito da un bulk avente capienza di circa 1 m³, caricato su rimorchio trainato da trattorino. Pertanto, si è potuto operare agevolmente solo nelle trincee poste in adiacenza al sentiero carreggiabile. Non è pertanto da escludere che, in considerazione sia del grado di addensamento del materiale sia della variabilità composizionale della matrice, la permeabilità dei terreni possa variare anche all'interno della lottizzazione.

6.2. Indagine geofisica

Il giorno 25 ottobre 2019 è stata condotta una campagna d'indagine geofisica al fine di ricostruire, in modo indiretto l'assetto stratigrafico del sottosuolo. A tale scopo sono state eseguite le seguenti indagini:

- ❑ n° 3 stendimenti geo-elettrici 2D con numero massimo di 45 elettrodi, per misurare la resistività dei terreni tramite l'inversione tomografica in configurazione Wenner;
- ❑ n° 1 prospezione sismica a rifrazione con inversione tomografica sviluppata in un array lineare con n°16 geofoni ad asse verticale per individuare le principali unità geosismiche tramite la stima delle velocità di propagazione delle onde longitudinali P (V_p);
- ❑ n° 1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor) sviluppata in un array lineare con n°16 geofoni a 4,5 Hz ad asse verticale per la ricostruzione sismo - stratigrafica del sottosuolo e per l'assegnazione della Categoria del sottosuolo di fondazione ($V_{s,eq}$) come espressamente richiesto dalla normativa vigente (Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17.01.2018);
- ❑ n° 3 registrazioni di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) per individuare le frequenze di risonanza del terreno al fine di eseguire una corretta progettazione sismica delle strutture.

La completa descrizione delle suddette metodologie geofisiche, delle procedure esecutive e dei risultati conseguiti sono consultabili in allegato a fondo testo. Nei paragrafi seguenti vengono analizzati sinteticamente i risultati ottenuti.

6.2.1. Modello di resistività del sottosuolo

Le indagini di seguito illustrate sono state eseguite con lo scopo di caratterizzare dal punto di vista elettrico il sottosuolo, al fine di individuare l'assetto stratigrafico locale.

La sezione **ELE 1** presenta una grande variabilità dei valori di resistività elettrica del sottosuolo, in particolare si sono distinte tre diverse unità geo-elettriche:

1. "basso-resistiva" che coinvolge i primi 4-5 m del sottosuolo ($0 < \rho < 500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$);
2. "mediamente resistiva" ($500 < \rho < 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$);
3. "altamente resistiva" ($\rho > 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$).

Se la prima parte della linea è caratterizzata da valori piuttosto omogenei ($\rho < 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) anche alle massime profondità investigate, a partire dalla seconda metà della linea elettrica i valori di resistività mostrano un gradiente decisamente più elevato, con l'unità "altamente resistiva" riconosciuta già a circa 10 m di profondità.

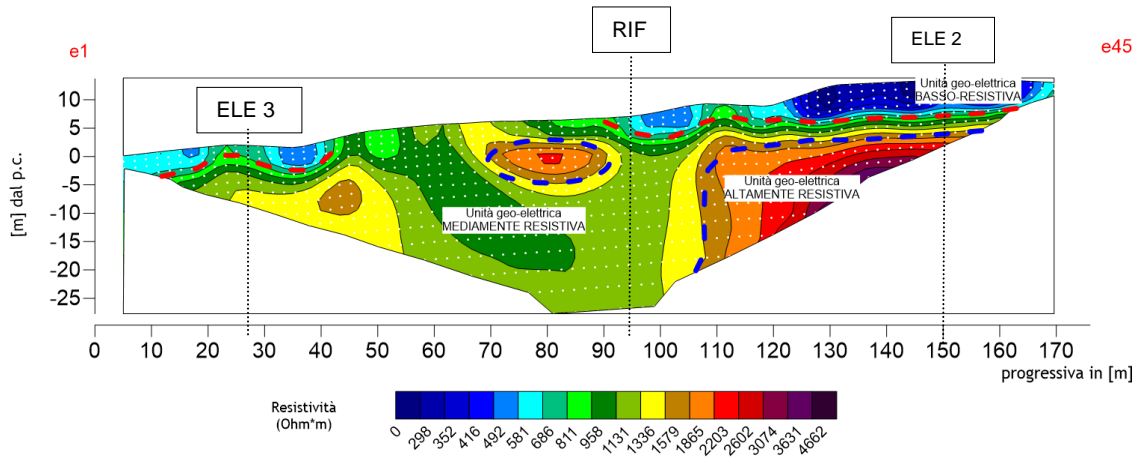


Figura 18: sezione ELE 1

Considerando il contesto geologico dell'area, è ipotizzabile che l'unità "basso-resistiva" possa essere ricondotta ai depositi glaciali, tipicamente molto consolidati, caratterizzanti l'area. Il passaggio alle unità più resistenti può essere associato alla presenza dei depositi glaciali grossolani addensati / substrato roccioso, mentre più complesso è interpretare i rapporti tra le due unità più resistenti. Si può ipotizzare che le due unità appartengano al medesimo substrato, caratterizzato tuttavia da un diverso grado di fratturazione e/o da una diversa circolazione delle acque al suo interno. Un'ulteriore ipotesi sull'unità alto-resistiva è di natura puramente morfologica: tale zona potrebbe coincidere con uno spartiacque superficiale che di fatto facilita l'infiltrazione delle acque superficiali nelle porzioni di sottosuolo adiacenti (zone medianamente resistenti) alla zona stessa.

La sezione **ELE 2** è stata realizzata in direzione trasversale rispetto alla ELE 1 con la quale si interseca al metro 150 della prima linea. Si sono distinte le medesime unità geo-elettriche riconosciute nella ELE 1 ed è stato osservato lo stesso gradiente presente nella seconda parte della ELE 1, consolidando così la validità di entrambe le prove. In particolare, la prova ELE 2 presenta una porzione superficiale di materiale conduttivo fino ad una profondità di circa 4-6 m dal p.c. locale; per valori di profondità superiori i valori di resistività superano i 1500 Ohm*m.

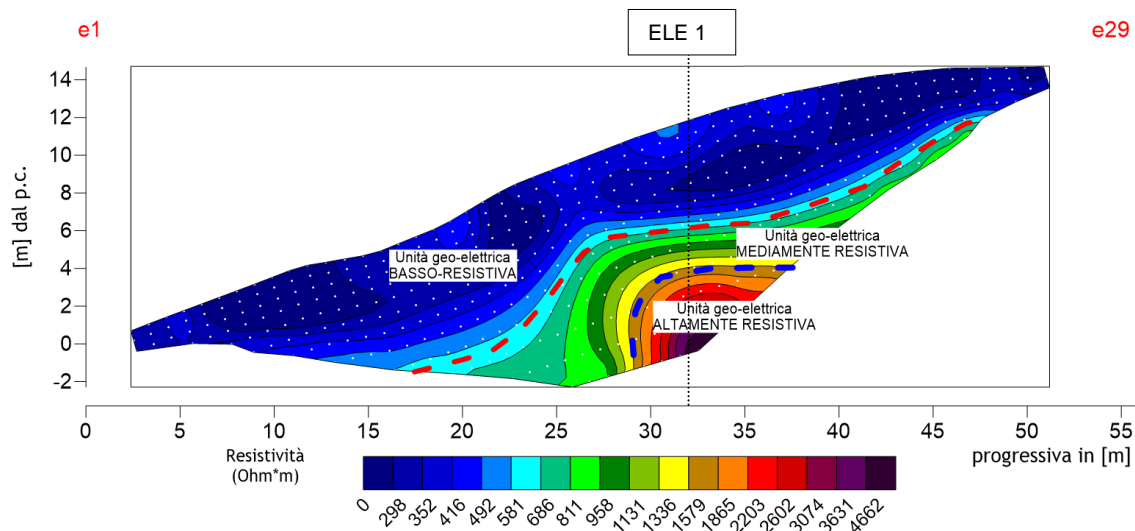


Figura 19: sezione ELE 2

La sezione **ELE 3** è stata realizzata anch'essa in direzione trasversale rispetto alla ELE 1 con la quale si interseca al metro 27 della prima linea. Sono state individuate le medesime unità geo-

elettriche riconosciute nella ELE 1 e, come nella linea ELE 2, è stato osservato lo stesso gradiente presente nella prima parte della ELE 1.

Risulta interessante notare la differenza di resistività tra la porzione a monte rispetto a quella più a valle, per valori di profondità maggiori di 2 m dal p.c. locale. Tale differenza potrebbe essere causata da un diverso grado di infiltrazione delle acque nel sottosuolo.

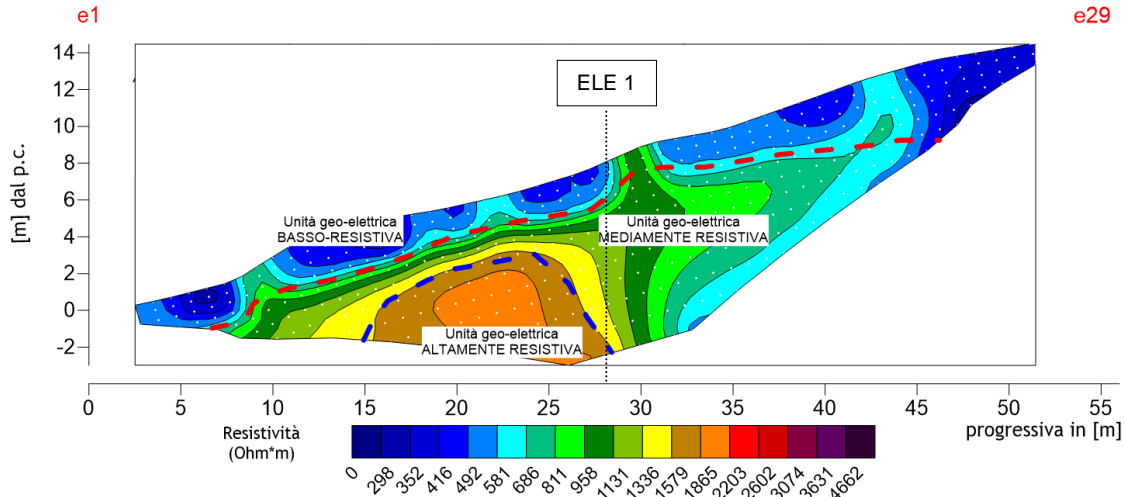


Figura 20: sezione ELE 3

6.2.2. Risultati ottenuti dalla indagine di sismica a rifrazione

L'obiettivo primario delle indagini sismiche è la ricostruzione sismo – stratigrafica di sito mediante la stima del gradiente geo-sismico.

La linea è stata realizzata in direzione trasversale rispetto alla ELE 1 con la quale si interseca al metro 95 della prima linea. La tavola mostra un graduale aumento della velocità delle onde P nel sottosuolo con un gradiente piuttosto costante. Tale andamento, privo di grandi contrasti di rigidità, è in accordo con la porzione centrale della linea ELE 1 dove si nota una certa omogeneità dei valori di resistività, a testimonianza di un sottosuolo caratterizzato dall'assenza di cambi repentini delle proprie caratteristiche fisiche (conducibilità elettrica e rigidità).

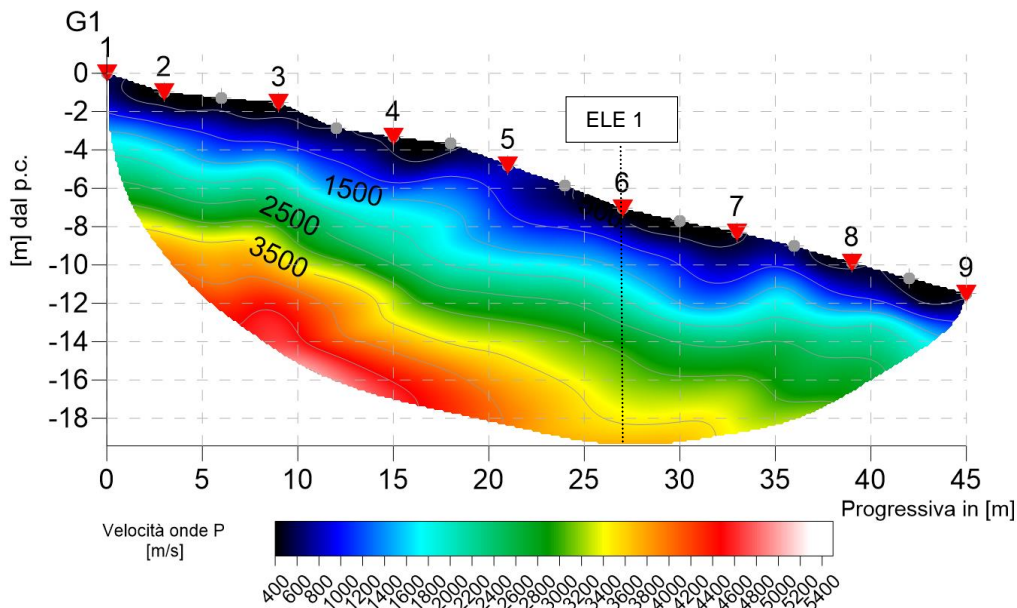


Figura 21: sezione RIF

6.2.3. Re.Mi.

La ricostruzione sismo-stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale mediamente addensato fino a circa 1,0 m dal p.c. locale caratterizzato da una V_s di circa 250 m/s mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità diventa più elevato con V_s che aumentano a valori di circa 370 m/s e 550 m/s.

L'ammasso roccioso compatto o quel materiale che, dal punto di vista sismico, si comporta come un bedrock geofisico ($V_s \approx 820$ m/s) è stato localizzato a circa 26 m dal p.c. locale.

Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (modello sismo - stratigrafico interpretativo):

Indagine sismica Re.Mi. con inversione congiunta H.V.S.R.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	250	1	0,0 – 1,0
II SISMOSTRATO	370	7	1,0 - ≈ 8
III SISMOSTRATO	550	18	≈ 8 – ≈ 26
IV SISMOSTRATO	820	35	≈ 26 – ≈ 61
V SISMOSTRATO	1000	Semisp.	≈ 61 -Semisp.

Tabella 2

6.2.4. Indagine sismica passiva a stazione singola (H.V.S.R.)

Sono state realizzate tre indagini sismiche passive a stazione singola ubicate all'inizio, a metà ed alla fine della stesa elettrica ELE 1, al fine di verificare l'eventuale bidimensionalità del sottosuolo lungo tale direzione. Nel caso specifico del sito in esame si è cercato di correlare i valori di picco, dello spettro di risposta HVSR, con le frequenze fondamentali di risonanza di sito.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si sono potute ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

Le curve H/V restituite sono del tutto simili tra loro (assetto sismo-stratigrafico omogeneo), per cui definiremo un'unica frequenza di risonanza per il sito indagato. La frequenza fondamentale di risonanza di sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ($H/V \approx 3,7$) nell'intervallo di interesse ingegneristico-strutturale (0,0 – 20,0 Hz), è di circa 3,5 Hz. Va comunque sottolineato come l'ampiezza del picco H/V sia in parte accentuato dalla presenza di disturbi antropici caratterizzati dalla medesima frequenza di risonanza.

Frequenza fondamentale di risonanza
3,38 \pm 0,51 Hz

È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio.

Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi lo stesso periodo di vibrazione naturale del terreno poiché il rapporto H/V calcolato è tale da ipotizzare un elevato fattore di amplificazione del moto sismico in superficie.

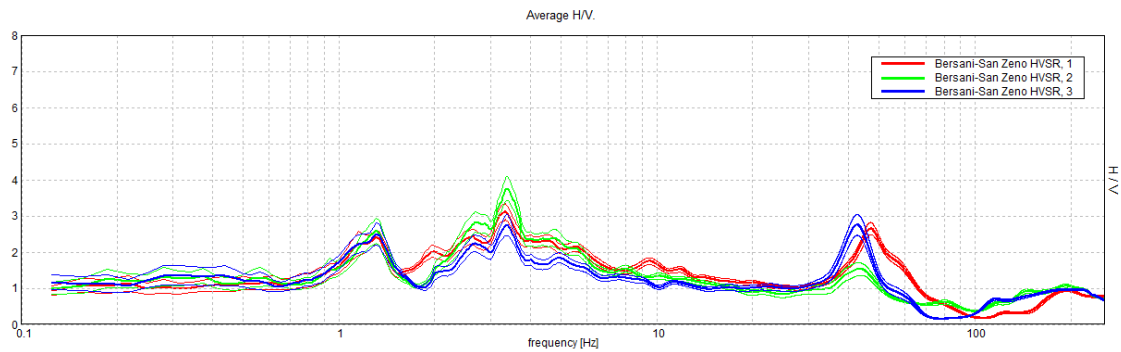


Figura 22: Confronto tra i rapporti spettrali H/V delle indagini HVSR1, HVSR 2, HVSR 3

7. ZONAZIONE E PERICOLOSITÀ SISMICA DELL'AREA

Come già menzionato in un precedente paragrafo, l'OPCM n° 3274 del 20 marzo 2003 definì una nuova classificazione sismica del territorio italiano, su basi comunali, attribuendo un grado di pericolosità sismica all'intera penisola, a differenza della precedente normativa che classificava come sismica solo una parte del territorio nazionale.

Secondo tale ordinanza, il territorio comunale di S. Zeno di Montagna è compreso in Zona 2, per la quale si assume un'accelerazione orizzontale con probabilità di superamento del 10% in 50 anni pari $0,15 \div 0,25$ (a_g/g).

Secondo l'OPCM n° 3519 del 28 aprile 2006, la cui applicazione è stata recepita dalla Regione Veneto con DGRV n° 71 del 22 gennaio 2008 e considerata nell'emanazione del D.M. 17 gennaio 2018, l'area in esame è inseribile nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s compreso tra $0,150g$ e $0,175g$ (valori relativi ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni – figura 23).

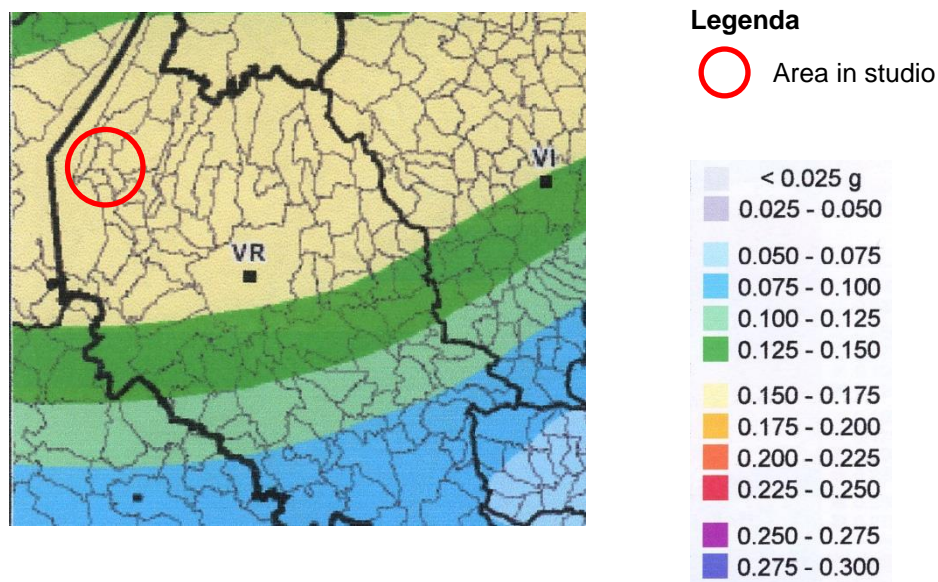


Figura 23: mappa della pericolosità sismica (espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi)

Per quanto riguarda la pericolosità di base del sito di intervento, sempre in riferimento ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ($T_R = 475$ anni), il calcolo eseguito con il programma “Spettri di risposta – ver. 1.0.3” del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici mediante interpolazione per superficie rigata (figura 24) individua la pericolosità sismica del sito di intervento con un valore di a_g riferito a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s pari a **0,163g**.

La latitudine e la longitudine dell'area sono state acquisite mediante posizionamento con l'antenna GPS smart Leica Zeno GG04 in coordinate WGS84, successivamente convertite nel Datum ED 50 e inserite nel programma “Spettri di risposta – ver. 1.0.3” per l'individuazione della pericolosità del sito.

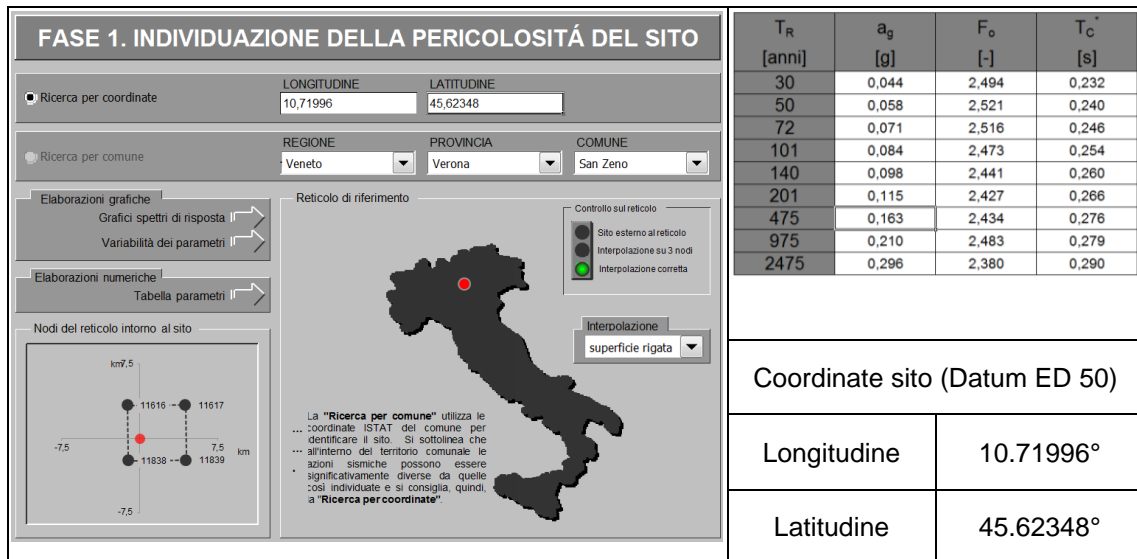


Figura 24 – Valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* per i periodi di ritorno T_R di riferimento (interpolazione per superficie rigata)

I valori base di accelerazione a_g ed i parametri sismici da utilizzare nei calcoli dovranno essere successivamente stabiliti sulla base della “Strategia di Progettazione” che sarà adottata dal Progettista, una volta assegnate all'opera in esame la Vita nominale, la Classe d'uso ed il Periodo di riferimento.

7.1. Analisi sismica locale

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi o in rapporto ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento. Per definire tali Categorie, il D.M. 17.01.2018 prevede il calcolo del parametro $V_{s,eq}$, ovvero della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio V_s entro una profondità H , dove per H s'intende la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

La Categoria di sottosuolo è stata ottenuta mediante una prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi., i cui risultati sono di seguito sintetizzati.

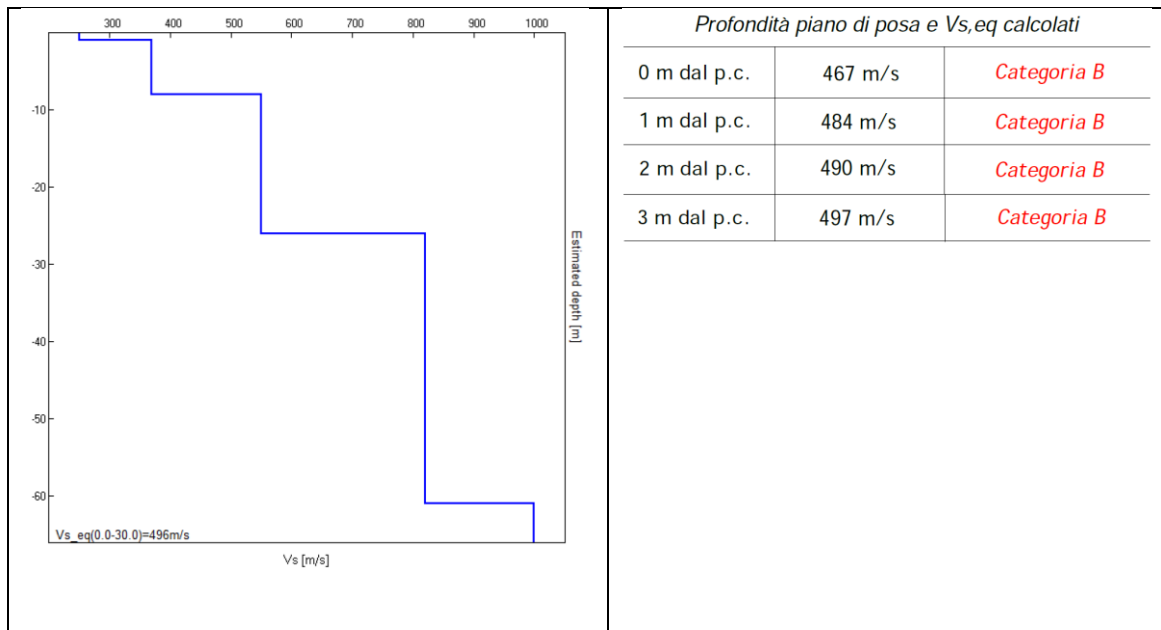


Figura 25: sismo-stratigrafia e categoria di sottosuolo

La velocità media di propagazione delle onde di taglio fino al bedrock geofisico m **dal piano attuale** della campagna è di circa $V_{s,eq} = 467$ m/s.

Pertanto, si attribuisce il sito in studio alla **Categoria di Sottosuolo B**: *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti*, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Il sito in oggetto è posto lungo un versante che degrada verso il Lago di Garda con pendenze che, pur variando localmente, mostrano un andamento piuttosto regolare. Si consiglia di adottare, per l'area in studio, una **Categoria Topografica T2** (pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$).

8. MODELLO GEOLOGICO LOCALE

La costituzione litologica del sottosuolo dell'area in oggetto è stata verificata in modo diretto visionando il materiale estratto da n° 5 trincee esplorative e interpretando i dati conseguiti mediante l'indagine geofisica.

L'esame dei terreni estratti dagli scavi e la visione delle pareti delle trincee hanno confermato, al di sotto di uno strato vegetale, la natura morenica dei terreni, caratterizzati da ghiaie, con pezzatura massima variabile tra 20÷60 cm, immerse in matrice sabbioso-limoso-argillosa, estremamente addensata.

Solo la trincea T5 ha mostrato una composizione leggermente difforme dalle altre: in essa, si osserva la presenza di limo-argilloso o argilla limosa marrone con clasti di disaggregazione rocciosa, al di sotto del quale si osserva la presenza di ghiaia molto addensata o cementata.

Gli scavi sono stati interrotti a profondità comprese tra 0,7÷1,2 m da p.c., per l'elevato grado di addensamento e/o cementazione dei depositi morenici.

Non sono state evidenziate venute d'acqua all'interno delle trincee, anche se non è da escludere la presenza di falde effimere e di circolazioni idriche in corrispondenza dei livelli più permeabili.

La ricostruzione del sottosuolo eseguita mediante le indagini geofisiche permette di ipotizzare, al di sotto del livello più superficiale descritto con le trincee geognostiche, la presenza di un passaggio tra depositi glaciali grossolani addensati / substrato roccioso a profondità variabili ma che potrebbe essere indicativamente stimata in circa 5÷10 m (circa 8 m in corrispondenza dello stendimento sismico).

Non è tuttavia da escludere che le due unità appartengano al medesimo substrato, caratterizzato da un diverso grado di fratturazione e/o da una diversa circolazione delle acque al suo interno. Un'ulteriore ipotesi sull'unità alto-resistiva è di natura puramente morfologica: tale zona potrebbe coincidere con uno spartiacque superficiale che di fatto facilita l'infiltrazione delle acque superficiali nelle porzioni di sottosuolo adiacenti (zone mediamente resistive) alla zona stessa.

La ricostruzione sismo-stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale mediamente addensato fino a circa 1,0 m dal p.c. locale caratterizzato da una V_s di circa 250 m/s mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità diventa più elevato con V_s che aumentano a valori di circa 370 m/s fino a ≈ 8 m da p.c. e 550 m/s per profondità maggiori. L'ammasso roccioso compatto o quel materiale che, dal punto di vista sismico, si comporta come un bedrock geofisico ($V_s \approx 820$ m/s) è stato localizzato a circa 26 m dal p.c. locale.

Pertanto, sulla base delle informazioni desunte dalla cartografia geologica e delle indagini eseguite, è possibile schematizzare il seguente modello geologico.

Profondità (m da p.c.)	Litologia
0 – 1	Ghiaie ($\varnothing_{\max} = 20\div 60$ cm) immerse in matrice sabbioso-limoso-argillosa, addensata. In T5 la frazione limo-argillosa risulta prevalente.
1 – $\approx 5\div 10$	Depositi morenici (<i>profondità che potranno variare all'interno dei lotti</i>)
$\approx 5\div 10$ – $\approx 25\div 30$	Substrato roccioso e/o depositi morenici grossolani molto addensati

Tabella 3

9. INDICAZIONI DI CARATTERE GEOTECNICO

Le indagini eseguite non permettono di caratterizzare i parametri geotecnici dei terreni che costituiscono il sottosuolo. Si ritiene comunque opportuno formulare alcune considerazioni in merito alle probabili caratteristiche dei terreni.

Le trincee geognostiche hanno evidenziato superficialmente terreni prevalentemente ghiaiosi, immersi in una matrice sabbioso-limoso-argillosa, addensata e/o compatta oppure un limo-argilloso o argilla limosa marrone con clasti di disgregazione rocciosa (T5). Questo livello costituisce il suolo e non dovrà essere utilizzato come sedime di fondazione, come previsto dalle NTC al capitolo 6.4.2, ove è prescritto che *“... Il piano di fondazione deve essere situato sotto la coltre di terreno vegetale nonché sotto lo strato interessato dal gelo e da significative variazioni stagionali del contenuto d'acqua.”*

Il sottostante morenico ghiaioso non è stato indagato direttamente poiché la pezzatura dei clasti e l'elevato grado di addensamento ha impedito l'approfondimento dello scavo. Si ritiene, tuttavia, verosimile attribuire a questo terreno morenico parametri geotecnici, nell'ambito di terreni prevalentemente granulari, piuttosto affidabili ($\phi \approx 32^\circ \div 38^\circ$).

La componente coesiva nei terreni morenici non è, generalmente, trascurabile; durante l'esecuzione degli scavi, se ne dovrà valutare l'eventuale prevalenza rispetto alla frazione granulare. Nelle trincee eseguite, solo nel caso di T5 appare prevalente la componente coesiva, ma solo nella porzione più superficiale, fino a circa 0,9 m di profondità. Misure speditive con vane test effettuate su scavi in aree limitrofe hanno evidenziato coesioni non drenate generalmente comprese tra 50-100 KPa.

Le verifiche geotecniche di stabilità globale potranno ritenersi attendibili solo in presenza di una caratterizzazione geotecnica affidabile. Pertanto, si ritiene opportuno eseguire, una volta resa accessibile l'area ai mezzi d'opera, adeguate indagini e prove in sito (sondaggi a carotaggio continuo) con eventuale prelievo di campioni in foro finalizzati a prove di laboratorio.

10. CONSIDERAZIONI SULLE MODALITÀ DI SCAVO

La necessità di dover effettuare scavi per la posa dei sottoservizi (profondi presumibilmente circa 1÷2 m da p.c.) impone l'adozione di tutte quelle cautele atte ad assicurare la stabilità dei fronti di scavo e l'incolumità delle maestranze che andranno ad operare nel cantiere.

Pertanto, per eventuali altezze di scavo superiori a 1,5 m, dovranno essere adottate tecniche di blindaggio scavi al fine di garantire l'operatività in completa sicurezza.

Le pareti di scavo, in via provvisoria, dovranno essere, comunque, protette con teli in materiale plastico al fine di evitare il disseccamento dei terreni ed un conseguente decadimento delle caratteristiche geotecniche degli stessi.

In corrispondenza del ciglio di scavo, non dovranno essere sistemate mezzi o materiali, in modo tale da non sovraccaricare i contorni.

Le eventuali acque di deflusso sub-superficiale dovranno essere intercettate, raccolte e coltate al di fuori dell'area di scavo, già durante le fasi di cantierizzazione.

11. CONCLUSIONI

Con riferimento alle opere in progetto e alla luce di quanto emerso dal presente studio, si ritiene di poter esprimere le seguenti considerazioni:

- l'area in oggetto è situata lungo il versante occidentale del Monte Baldo che, dalle creste sommitali, degrada verso la sponda orientale del Lago di Garda;
- l'esame dei terreni estratti dagli scavi e la visione delle pareti delle trincee hanno confermato, al di sotto di uno strato vegetale, la natura morenica dei terreni, caratterizzati da ghiaie immerse in matrice sabbioso-limoso-argillosa, estremamente addensata e/o compatta;
- solo la trincea T5 ha mostrato una composizione leggermente difforme dalle altre: in essa, si osserva la presenza di limo-argilloso o argilla limosa marrone-rossastra con clasti di disaggregazione rocciosa, al di sotto del quale si osserva la presenza di ghiaia molto addensata o cementata.
- gli scavi hanno mantenuto la verticalità delle pareti a breve termine dimostrando una buona pseudocoazione dei materiali escavati;
- non sono state evidenziate venute d'acqua all'interno delle trincee, anche se non è da escludere la presenza di falde effimere e di circolazioni idriche in corrispondenza dei livelli più permeabili;
- le prove di infiltrazione eseguite nelle trincee T2 e T4 hanno evidenziato bassi coefficienti di permeabilità (circa 10^{-6} ÷ 10^{-7} m/s);
- le prove geofisiche ipotizzano un sottosuolo morenico sovrastante un livello ad alta resistività/alta velocità interpretabile come substrato roccioso fratturato o depositi glaciali grossolani addensati;
- la porzione centrale della lottizzazione mostra un approfondimento dello strato mediamente resistivo, che potrebbe essere dovuto ad una diversa circolazione delle acque al suo interno oppure ad un diverso grado di fratturazione;
- l'indagine geofisica mediante tecnica di sismica passiva Re.Mi. ha stimato una **categoria di sottosuolo di tipo B**.

All'apertura degli scavi dovrà essere controllata la situazione locale, in modo da verificare la corrispondenza con le notizie raccolte in questa fase e quindi mantenere valide o meno le considerazioni espresse circa le condizioni del sottosuolo.

Verona, 26 febbraio 2020

Dott. Geol. LUCA BERSANI

12. ALLEGATI

- Stratigrafie e documentazione fotografica delle trincee geognostiche

- Relazione sull' **Indagine di tomografia elettrica e sismica con analisi congiunta ReMi-HVSR per la ricostruzione eletto-stratigrafica e sismo-stratigrafica del sottosuolo**

Committente: Sig.ra Peretti Paola	Data:	Trincea geognostica	T1
Cantiere: Lottizzazione "La Creta" – S. Zeno di Montagna (VR)	04.10.2019		

Profondità (m da p.c.)	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,0 – 0,2	Strato vegetale
0,2 – 0,7	Ghiaia poligenica ($\varnothing_{\max} = 30\div 60$ cm) in matrice limoso-sabbiosa nocciola chiaro, molto addensata

NOTE:

- ☐ Non è stata verificata alcuna venuta d'acqua.



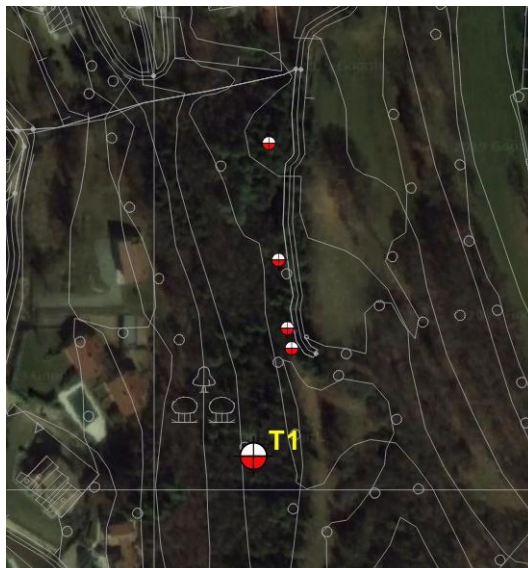
Fasi esecutive trincea T1



Scavo trincea T1



Cumulo trincea T1



Ubicazione trincea T1

Committente: Sig.ra Peretti Paola	Data:	Trincea geognostica	T2
Cantiere: Lottizzazione "La Creta" – S. Zeno di Montagna (VR)	04.10.2019		

Profondità (m da p.c.)	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,0 – 0,4	Suolo: limo argilloso con clasti, marrone
0,4 – 0,7	Ghiaia poligenica ($\varnothing_{\max} = 30\div 60$ cm) in matrice limoso-sabbiosa nocciola chiaro, molto addensata

NOTE:

- ☐ Non è stata verificata alcuna venuta d'acqua.



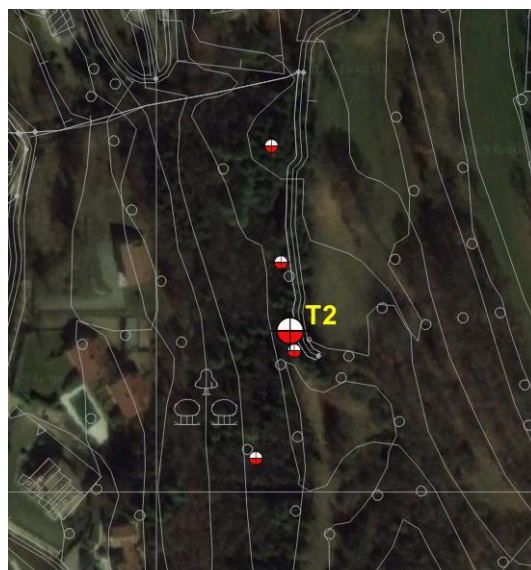
Fasi esecutive trincea T2



Scavo trincea T2



Cumulo trincea T2



Ubicazione trincea T2

Committente: Sig.ra Peretti Paola	Data:	Trincea geognostica	T3
Cantiere: Lottizzazione "La Creta" – S. Zeno di Montagna (VR)	04.10.2019		

Profondità (m da p.c.)	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,0 – 0,2	Suolo: limo argilloso con clasti, marrone
0,2 – 1,2	Ghiaia poligenica ($\varnothing_{\max} = 30\div 60$ cm) in matrice limoso-sabbiosa nocciola chiaro, molto addensata

NOTE:

- ☐ Non è stata verificata alcuna venuta d'acqua.



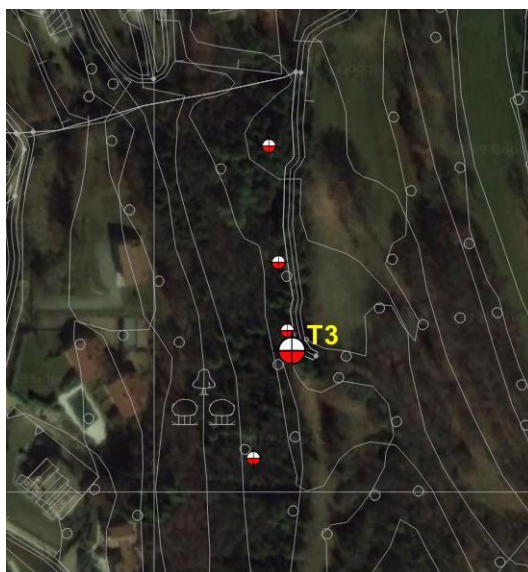
Fasi esecutive trincea T3



Scavo trincea T3



Cumulo trincea T3



Ubicazione trincea T3

Committente: Sig.ra Peretti Paola	Data:	Trincea geognostica	T4
Cantiere: Lottizzazione "La Creta" – S. Zeno di Montagna (VR)	04.10.2019		

Profondità (m da p.c.)	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,0 – 0,2	Suolo: limo argilloso con clasti, marrone
0,2 – 0,7	Ghiaia poligenica ($\varnothing_{\max} = 30\div 60$ cm) in matrice limoso-sabbiosa nocciola chiaro, molto addensata

NOTE:

- ☐ Non è stata verificata alcuna venuta d'acqua.



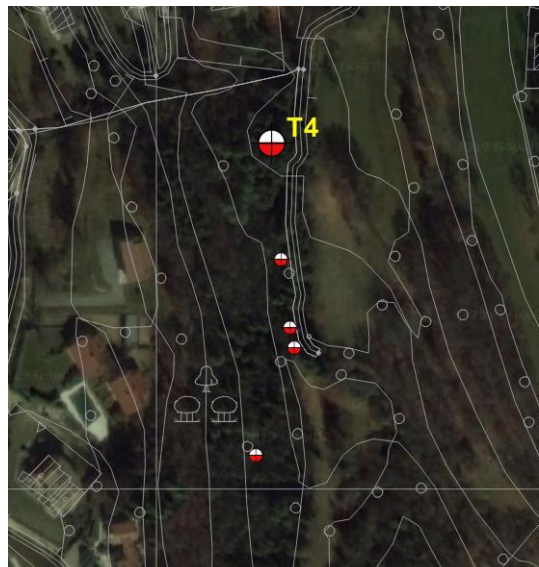
Fasi esecutive trincea T4



Scavo trincea T4



Cumulo trincea T4



Ubicazione trincea T4

Committente: Sig.ra Peretti Paola	Data:	Trincea geognostica	T5
Cantiere: Lottizzazione "La Creta" – S. Zeno di Montagna (VR)	04.10.2019		

Profondità (m da p.c.)	DESCRIZIONE LITOLOGICA
0,0 – 0,9	Limo argilloso o argilla limosa con clasti, marrone-rossastro
0,9 – 1,1	Ghiaia molto addensata o cementata, biancastra

NOTE:

- ☐ Non è stata verificata alcuna venuta d'acqua.



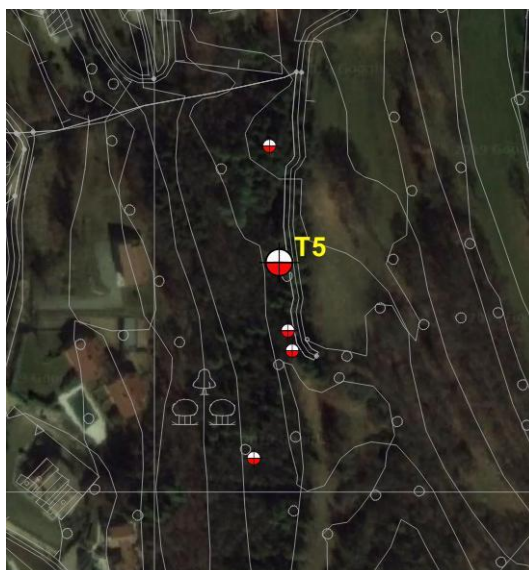
Fasi esecutive trincea T5



Scavo trincea T5



Cumulo trincea T5

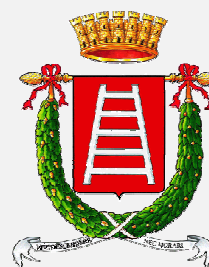


Ubicazione trincea T5



REGIONE DEL VENETO

Provincia di Verona



**Indagine di tomografia elettrica e sismica con analisi
congiunta ReMi-HVSR per la ricostruzione eletto-stratigrafica
e sismo-stratigrafica del sottosuolo**

Via Creta
Comune di San Zeno di Montagna (VR)

Committente:
Dott. Geol. Luca Bersani

Data: novembre 2019








STUDIOSISMA srl
Via Birori, 102/5 - 36050 Monteviale (VI)
Tel/Fax. 0444/962532 Cell. +39 349/0567455
Mail: info@studiosisma.com
C.F. e P.IVA 03797510249

INDICE

1.	PREMESSE	3
2.	CENNI TEORICI E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	6
2.1	Rilievo topografico	6
2.2	Indagine geo-elettrica con inversione tomografica	7
2.3	Prospezione simica a rifrazione	9
2.4	Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)	10
2.5	Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)	12
3.	EVOLUZIONE NORMATIVA E CENNI DI INGEGNERIA SISMICA	13
4.	ANALISI TOMOGRAFICA: RESISTIVITÀ E RIGIDITÀ DEL SOTTOSUOLO	15
4.1	Modello di resistività del sottosuolo	15
4.2	Risultati ottenuti dalla indagine di sismica a rifrazione	17
5.	ANALISI SISMICA DI SITO E DEFINIZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	17
5.1	Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate	17
5.1	Indagine sismica passiva in array (Re.Mi.) con inversione congiunta	18
5.2	Indagine sismica passiva a stazione singola (H.V.S.R.)	19
5.3	Categoria di sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17 gennaio 2018	20

ALLEGATI

-  Tav.01 Sezione geo-elettrica 2D - Linea ELE 1
-  Tav.02 Sezione geo-elettrica 2D - Linea ELE 2
-  Tav.03 Sezione geo-elettrica 2D - Linea ELE 3
-  Tav.04 Sezione tomografica 2D - Linea RIF
-  Tav.05 Indagine sismica Re.Mi. e H.V.S.R.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Responsabile di Progetto	Autori	Collaboratori
M. Collareda	E. Mammoliti - A. Fortugno	-

1. PREMESSE

Il giorno 25 ottobre 2019 è stata condotta la presente campagna d'indagine geofisica in Via Creta nel comune di San Zeno di Montagna (VR), su incarico del **Dott. Geol. LUCA BERSANI**. Al fine di ricostruire l'assetto stratigrafico del sottosuolo, sono state effettuate:

- **n°3 stendimenti geo-elettrici 2D** con numero massimo di 45 elettrodi, per misurare la resistività dei terreni oggetto di indagine tramite l'inversione tomografica in configurazione Wenner;
- **n°1 prospezione sismica a rifrazione con inversione tomografica** sviluppata in un *array* lineare con n°16 geofoni ad asse verticale per individuare le principali unità geo-sismiche tramite la stima delle velocità di propagazione delle onde longitudinali P (V_p);
- **n°1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor)** sviluppata in un *array* lineare con n°16 geofoni a 4,5 Hz ad asse verticale per la ricostruzione sismo - stratigrafica del sottosuolo e per l'assegnazione della Categoria del sottosuolo di fondazione ($V_{s,eq}$) come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17/01/2018*);
- **n°3 registrazioni di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)** per individuare le frequenze di risonanza del terreno al fine di eseguire una corretta progettazione sismica delle strutture.

Nella figura a seguire viene evidenziata l'area in oggetto di studio (*Fig. n°1 - Estratto da Ortofoto*).



Fig. n°1: Estratto da Ortofoto

L'ubicazione dell'area è stata ottenuta, secondo il Datum WGS 84, utilizzando l'*antenna smart Leica Zeno GG04*, le coordinate ottenute sono specificate nella tabella sottostante. Nella figura seguente (*Fig. n°2 - Ubicazione prove in sito*) sono invece riportate, in dettaglio, le posizioni di ogni misura effettuata.

Latitudine	Longitudine
45.622569° N (WGS 84)	10.718970° E (WGS 84)



Linea ELE 1



Linea ELE 2



Linea ELE 3



Misura RIF + Re.Mi.



Misura HVSR 1



Misura HVSR 2



Misura HVSR 3

Fig. n°2 - Ubicazione prove in sito

2. CENNI TEORICI E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

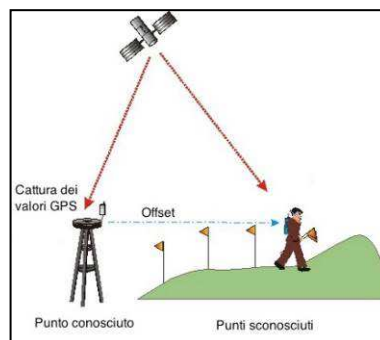
2.1 Rilievo topografico


L'esatta ubicazione dell'area e delle indagini geofisiche eseguite è stata ottenuta tramite l'utilizzo dell'*antenna smart Leica Zeno GG04*.

L'*antenna smart Leica Zeno GG04* gestisce 555 canali che garantiscono la ricezione delle costellazioni GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS, SBAS e L-band. L'antenna è in grado di connettersi tramite Bluetooth 2.0 a dispositivi esterni (smartphone, tablet) che consentono la gestione del dato topografico per mezzo del software Zeno Connect.

La precisione dei dati acquisiti è elevata, arrivando ad errori di ubicazione nell'ordine di 1-2 cm in tempo reale, senza la necessità di ricorrere a lavori di post-processing. Tale precisione è data dalla possibilità dell'antenna di avvalersi della tecnologia RTK.

Il sistema di posizionamento GPS RTK (Real Time Kinematic - Cinematica in tempo reale) è una tecnica utilizzata per migliorare la precisione dei dati di posizione derivanti da sistemi di posizionamento satellitari quali GPS, GLONASS e Galileo. La distanza tra un ricevitore di navigazione satellitare e il corrispondente satellite può essere calcolata in accordo al tempo necessario per un segnale a percorrere la distanza satellite-ricevitore. L'accuratezza della misura è essenzialmente una funzione della capacità hardware/software del ricevitore per elaborare accuratamente i segnali provenienti dal satellite, e nello stesso tempo analizzare ulteriori fonti di errore a causa di ritardi ionosferici e troposferici, multipath, orologio satellitare ecc. RTK utilizza una stazione base fissa e un rover per ridurre l'errore di posizione del rover stesso. La stazione base trasmette i dati di correzione al rover. I sistemi RTK utilizzano un singolo ricevitore di base e un numero di unità mobili. La stazione base determinerà la fase del vettore e le unità mobili confrontano le proprie misurazioni di fase con quelle ricevute dalla stazione base.



ACQUISIZIONE	
Numero di canali: 555 canali	
GNSS: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS, SBAS e L-band	
PRECISIONE	
Precisione orizzontale in tempo reale	SBAS, L1 only < 0.9 m Spot Lite, PPP < 60 cm DGNSS, L1 only < 40 cm Spot Prime, PPP < 10 cm RTK < 1 cm + 2 ppm4
Precisione verticale in tempo reale	RTK: 2 cm + 1 ppm
Misura statica in post-elaborazione	H: 3 mm + 0.5 ppm (rms) V: 6 mm + 0.5 ppm (rms)
	

2.2 Indagine geo-elettrica con inversione tomografica

Basi teoriche di tomografia elettrica

La tecnica dell'*imaging* elettrico (o tomografia elettrica) adotta una procedura automatizzata sia per l'acquisizione che per l'elaborazione e consente di raccogliere dati elettrici del sottosuolo con una densità elevata impiegando cavi *multicore* con spaziatura interelettrodica variabile (generalmente da 1-2 m a 10).

L'unità di misura è costituita da un geo-resistivimetro assistito da un *computer* che mediante un *software* dedicato gestisce la configurazione geometrica e la sequenza del grande numero di letture che vengono effettuate. Gli elettrodi da controllare sono molte decine, spesso qualche centinaio, ed i vari cavi impiegati vengono tra loro connessi e collegati all'unità di misura.

In pratica, il rilievo consiste dapprima nel posizionare gli elettrodi nel terreno secondo *arrays* 2D o 3D, quindi nell'effettuare il collegamento ai *take-out* dei cavi che portano il segnale (di input ed output) all'unità di misura. Dal *software* viene poi impostata la configurazione prescelta (Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo o polo-polo) ed i relativi parametri geometrici (passo di misura, numero di misure, ecc.).

Le misure sono ciclicamente ripetute fino ad un massimo di 4-6 volte qualora non si raggiunga prima una stabilizzazione della lettura (indicata da un basso scarto percentuale tra il 2-6%) e in corrente alternata con periodo di misura che può essere compreso tra 0,8s e 0,12s con cicli di alcuni secondi; i voltaggi variano da un minimo di 0,2mV a massimi di 400V mentre l'intensità di corrente varia da minimi di 0,001mA a massimi di 50mA. Le misure non soddisfacenti, comunque salvate nel *data set*, potranno essere eliminate in sede di analisi. Per ottenere una densità di valori idonea alla costruzione di una pseudosezione di resistività è necessario che il passo di misura non superi la distanza interelettrodica. Il primo risultato dell'analisi è costituito da una pseudosezione che è solo rappresentativa della sezione reale. Ritrae, infatti, l'andamento della resistività apparente, una specie di valore mediato, con la pseudopropfondità, calcolata con semplici considerazioni geometriche. Ogni misura viene posta convenzionalmente al centro del quadripolo attivo ed alla pseudopropfondità che gli compete.

I dati acquisiti in campagna sono rappresentati secondo pseudosezioni (2D) o pseudopiani (3D) e vengono successivamente elaborati per risalire alla elettro-stratigrafia reale (resistività vera) del volume indagato che si ottiene utilizzando la tecnica di inversione.

Nelle indagini geo-elettriche è possibile scegliere diversi tipi di configurazioni in base a criteri che considerano, ad esempio, il tipo di *target* da individuare, la profondità massima da raggiungere o la sensibilità delle misurazioni condotte. Le configurazioni si distinguono in base alla distribuzione geometrica della programmazione di attivazione delle coppie di elettrodi attivati per l'acquisizione.

Strumentazione, acquisizione ed elaborazioni

Nel caso in questione è stato utilizzato il nuovo geo-resistivimetro della MoHo Srl modello **ELECTRA** in configurazione Wenner e con un *array* geometrico come riportato nella tabella seguente.

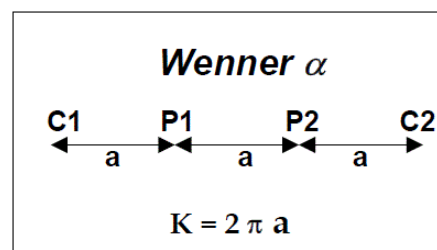
Nome Linea	N° elettrodi	Interdistanza degli elettrodi [m]	Lunghezza [m]
ELE 1	45	4 m	176 m
ELE 2	29	2 m	56 m
ELE 3	29	2 m	56 m



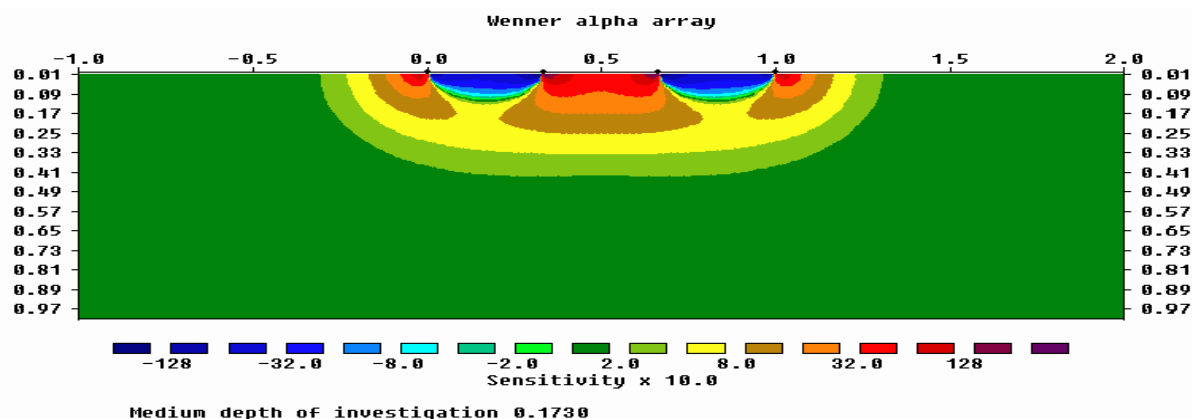
Array Wenner

Questo tipo di arrangiamento è caratterizzato dal fatto che gli elettrodi di potenziale sono posti al centro degli elettrodi di corrente e la distanza tra i vari elettrodi (distanza interelettrodo) è sempre la stessa ed è pari ad a .

Il valore del fattore geometrico relativo a tale dispositivo è pari a $2\pi a$ e quindi il fattore geometrico del Wenner, risulta essere, il più basso tra i dispositivi più comunemente utilizzati. Pertanto è il tipo di *array* che consente di ottenere la massima intensità del segnale e i dati che si misurano con questo dispositivo risultano essere poco rumorosi.



La funzione *sensitivity* per un dispositivo Wenner presenta un andamento quasi orizzontale al disotto del centro del dispositivo (figura seguente); ne consegue che questa tipologia di *array* è relativamente sensibile ai cambiamenti verticali di resistività al di sotto del centro dello stendimento, ma è meno sensibile alle variazioni orizzontali della resistività.



La pseudo-sezione di resistività (o tomografia di prima specie) fornisce un'immagine approssimativa ed immediata della distribuzione di resistività lungo la sezione verticale di sottosuolo sottesa al profilo di misura; può essere quindi considerata come un'immagine sfocata della configurazione elettrica del sottosuolo. La tomografia geoelettrica vera e propria si ottiene mettendo a fuoco l'immagine di resistività apparente in modo da definire meglio le geometrie dei corpi sepolti. È possibile risolvere questo problema (cioè passare da una pseudo-sezione a una tomografia) applicando la tecnica d'inversione di *Loke & Barker* implementata nel [software Res2Dinv v4.01](#) prodotto dalla Geotomo (Malesia) e impiegato nel presente lavoro. Di seguito viene esposto il procedimento utilizzato comunemente per l'analisi.

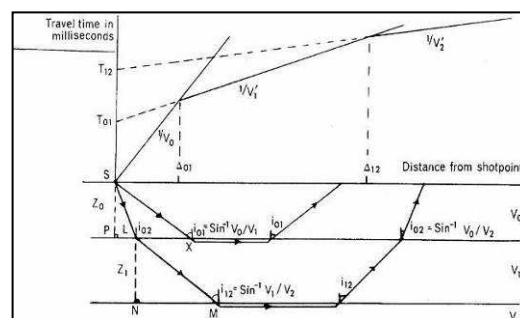
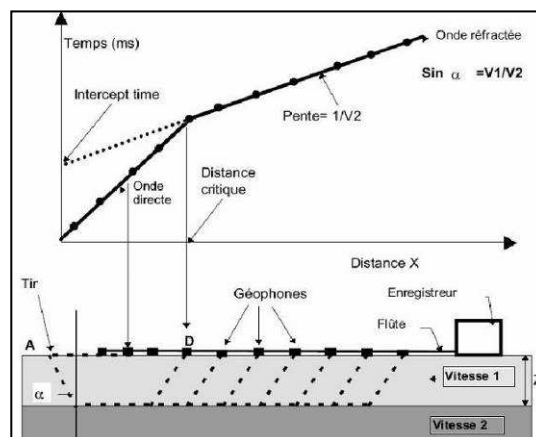
- Il procedimento di calcolo prevede la suddivisione iniziale del volume in una griglia di regolarizzazione (analoga a quella impiegata nelle computazioni ad elementi finiti). Ad ogni cella della griglia viene attribuito un valore di resistività sulla base dei dati misurati ed a quelle di confine viene impostata una resistività pari alla media delle letture eseguite.
- Il modello iniziale viene quindi sottoposto ad un processo di inversione che utilizza una *routine* conosciuta con il nome di *smoothness-constrained least-square method* (De Groot-Hedlin e Constable 1990, Sasaki 1992) implementata con una tecnica di ottimizzazione quasi-Newtoniana (Loke e Barker 1996) che la velocizza notevolmente. Le elaborazioni considerano in blocco tutti i dati acquisiti ed ottimizzano un modello a celle di resistività. Questo modello è meno viziato dalla assunzione di una elettrostratigrafia piana valida per il monodimensionale e risulta, quindi, più adattabile alle complesse geometrie che si incontrano nella realtà.
- L'inversione ha termine al momento in cui si ottiene una buona coincidenza, in senso statistico (scarto quadratico medio), tra i dati sperimentali e quelli teorici (confronto tra pseudosezioni misurate e calcolate).
- Disponendo di una taratura (sondaggio meccanico o dati desunti da scavi) il modello geoelettrico del sottosuolo proposto al termine dell'analisi può essere ricondotto a quello geolitologico.

2.3 Prospezione sismica a rifrazione

2.3.1 Basi teoriche di sismica a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura del tempo richiesto perché una perturbazione di origine elastica si trasmetta dalla sorgente ai geofoni percorrendo gli strati superficiali, a bassa velocità, e la superficie di separazione di due mezzi elastici differenti, a velocità più levata.

La prospezione sismica a rifrazione è particolarmente indicata per ottenere rapide informazioni strutturali nel caso di strutture a grandi dimensioni, che siano costituite almeno da uno strato rifrangente ad alta velocità, giacente sotto una serie stratigrafica avente velocità più bassa. Se in un sistema di assi cartesiani si riportano i tempi di arrivo delle onde sismiche in funzione della loro distanza dal punto di scoppio, si ottiene una famiglia di curve “tempi - distanze” che dipendono dalle caratteristiche geologiche locali. Tali curve sono dette “dromocrone”. Nella figura riportata a fianco, sono rappresentate le dromocrone riguardanti le onde dirette, riflesse e rifratte, più la dromocrona degli impulsi diretti nell’areato. Nel punto angolare D corrispondente al geofono G0, arriveranno contemporaneamente le onde dirette e le onde rifratte. Per i geofoni posti ad una distanza minore di G0, il primo arrivo sarà rappresentato da un’onda diretta. Da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una distanza corrispondente a G0. Oltre il punto angolare D i primi arrivi sono sempre rappresentati dalle onde rifratte. Si possono costruire dromocrone anche nel caso di “n” strati, purché le velocità aumentino sempre con la profondità; ogni punto angolare indicherà il passaggio da uno strato al successivo, e le velocità saranno indicate dalla pendenza dei rispettivi rami di dromocrone. Se gli strati sono poco potenti (come di solito avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l’alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva (figura seguente).



I principali limiti della sismica a rifrazione risiedono nell’impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l’energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta, tale situazione è nota come “orizzonte muto”. Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l’orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile.

2.3.2 Strumentazione, acquisizione ed elaborazioni

Le stese sismiche sono state eseguite utilizzando le onde di compressione P (V_p); le caratteristiche degli stendimenti sono riassunte sinteticamente nella seguente tabella.

Misura	Lunghezza [m]	N° geofoni	Interdistanza dei geofoni [m]	N° shot
RIF	45 m	16	3 m	9

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo a 16 + n canali modello “SoilSpy Rosina” con registrazione degli eventi in forma digitale. I sensori sono costituiti da una catena di 16 geofoni a componente verticale con frequenza propria di vibrazione di 4,5 Hz. L’energizzazione delle onde di compressione P è avvenuta utilizzando una mazza da 5 Kg. Sono stati previsti n°9 *shot* per linea sismica in modo da ottenere una quantità di dati sufficienti per ottenere un modello sismico del sottosuolo attendibile. Per l’interpretazione dei dati si è utilizzato un programma di elaborazione della sismica di superficie con la tecnica tomografica.

La tomografia sismica è una tecnica dettagliata di esplorazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo (in questo caso si tratta di terreno); questo si basa sul primo arrivo delle perturbazioni sismiche, cioè del tempo necessario per compiere distanze prestabilite fra sorgente e ricevitore. La prospezione sismica con elaborazione tomografica, con il suo estremo dettaglio, permette di mettere in risalto fenomeni di anisotropia anche in presenza di un orizzonte apparentemente omogeneo.

Per l’elaborazione si è utilizzato il Software Rayfracy, prodotto dalla Intelligent Resource inc., che effettua l’inversione di dati sismici attraverso due fasi distinte.

Nella prima fase l’inversione avviene con il metodo Delta T-V (Gebrande and Miller 1985), che si basa sulla ricostruzione di velocità per ogni CMP (common midpoint). Questo metodo permette di ottenere un modello del campo di velocità indagato immettendo solo dati geometrici, topografici e primi arrivi.

Il software permette quindi di effettuare un controllo sul modello proveniente dall’inversione tramite l’algoritmo di “forward modelling”, che permette di ricostruire le dromocrone relative al nuovo modello consentendo, ad esempio, di evidenziare zone con scadente modellizzazione, errori di picking, ecc. La fase successiva consiste nel perfezionamento del modello ottenuto tramite il Wavepath Eikonal Travelttime tomography processing (Schuster 1993 - Geophysics - September 1993 - Volume 58, Issue 9, pp. 1341 - 1323; Watanabe - SEG meeting 1999), che rappresenta una vera e propria inversione tomografica tramite il tracciato di raggi e la ricostruzione del fronte d’onda generato tenendo conto della frequenza del segnale utilizzato, con una soluzione alle differenze finite dell’equazione Eikonal. Tale inversione non presenta le limitazioni evidenziate nel metodo Delta T-V, e permette di ottenere un modello di velocità altamente affidabile.

2.4 Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un’unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d’onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità. Questo comportamento viene definito **dispersione in frequenza** ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente le lunghezze d’onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d’onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico - matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l’Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come metodo passivo in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi promossi da questo metodo sono molteplici: è molto veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d’indagine ma soprattutto permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati.

La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da prendere in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale - rumore.



Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, nel caso Re.Mi. rappresenta la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh da quelli superiori e dall'aliasing spaziale. C'è, in questo caso, la necessità di soddisfare la condizione di "omnidirezionalità" delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni.

I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione sarà analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi.

Sono da considerare la lunghezza dello stendimento L e la distanza intergeofonica Δx . Quest'ultima agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza. Supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa. Se la frequenza è più bassa aumenta la profondità d'indagine.

La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_r) che sono correlabili con le velocità V_s di propagazione delle onde S ($V_s \approx 1,1 V_r$).

Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio $x - t$ (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo, attraverso lo spettro, di localizzare la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale. La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz in modo da ottenere un elevato dettaglio del segnale. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è [Grilla v.6.4 beta release 2015](#).

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n° 16 geofoni verticali a 4,5 Hz uniti in un *array* lineare totalmente digitale (*SoilSpy Rosina*). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB. Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza. La spaziatura utilizzata tra i geofoni è stata di 3 m quindi la lunghezza complessiva del profilo è risultata essere di 4 m. Non sono presenti sostanziali variazioni di quota e quindi il sito può essere considerato orizzontale.



Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde V_s è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\hat{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad [2.1]$$

V_s = valore di velocità delle onde di taglio [m/s];

H = profondità alla quale si desidera stimare V_s [m] (30 m in caso di V_{s30});

h_i = spessore dello strato i - esimo [m];

v_i = velocità delle onde V_s all'interno dello strato i - esimo [m/s].

In via puramente indicativa, al fine di correlare le velocità delle onde di taglio ad un tipo di suolo, si riportano i valori tabulati da Borchardt (1992; 1994) assieme a quelli ottenuti sperimentalmente in diversi ambienti sedimentari da altri autori (Budny, 1984; Ibs von Seht e Wohlenberg, 1999; Delgado et al., 2000 a, b; Parolai et al., 2002; Scherbaum et al., 2003; D'Amico et al., 2004, 2006; Hinzen et al., 2004).

TIPO DI SUOLO	Vs min [m/s]	Vs media [m/s]	Vs max [m/s]
ROCCE MOLTO DURE (es. rocce metamorfiche molto - poco fratturate)	1400	1620	-
ROCCE DURE (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturate)	700	1050	1400
SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE (es. rocce sedimentarie ignee tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia)	375	540	700
ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI - GHIAIOSI (es. ghiaie e suoli con < 20% di ghiaia, sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose)	200	290	375
TERRENI TENERI (es. terreni di riempimento sotto falda, argille da tenere a molto tenere)	100	150	200

2.5 Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio Vs** calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la Vs,30 e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni del 17 gennaio 2018*;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

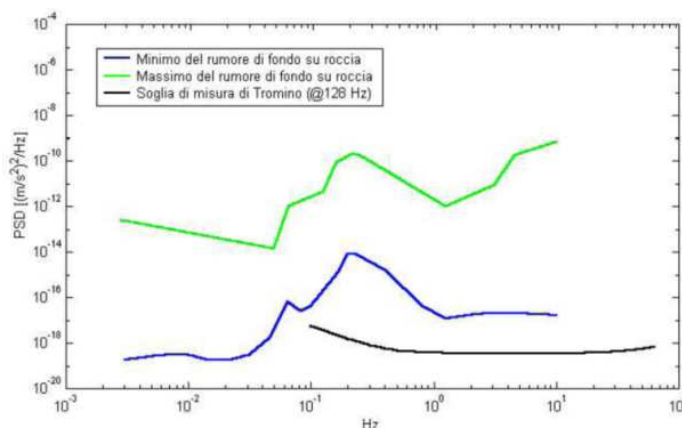
- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

$$\text{segnale registrazione al sito } x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi poiché il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta MoHo S.r.l. modello "Tromino ENG-Y-PLUS" che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra - leggeri e ultra - compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno una terna velocimetrica con i sensori ortogonali tra loro e con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di "Tromino" a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



3. EVOLUZIONE NORMATIVA E CENNI DI INGEGNERIA SISMICA

La storia della classificazione sismica Italiana comincia dopo il terribile terremoto di Reggio Calabria e Messina del 1908 (XI grado MCS) che provocò la morte di circa 80.000 persone. In seguito a questo evento ci fu un deciso impegno dello Stato a tradurre in legge le conoscenze scientifiche e tecniche sulle costruzioni sino ad allora maturate. Fu così emanato il Regio decreto n° 193 [1909] nel quale è contenuta la prima classificazione sismica del territorio Italiano. Negli anni a seguire si continuò ad aggiornare la normativa tecnica ampliando la classificazione in base alle zone colpite da eventi sismici. Nel 1962 fu pubblicata la Legge n° 1684, in seguito ai terremoti di Carnia (1956), Valle del Velino (1961) e Irpinia (1962) dove, per la prima volta, si prescrisse l'applicazione delle norme sismiche ai comuni "soggetti a intensi movimenti sismici" e non solo a quelli colpiti dal terremoto. In seguito ai terremoti dei Monti Nebroli (1967), della Valle del Belice (1968) e di Tuscania (1971), fu emanata la Legge n° 64 [1974], che costituisce una pietra miliare nel panorama della normativa sismica poiché stabilì che la classificazione sismica dovesse procedere sulla base di comprovate motivazioni tecniche scientifiche.

La promulgazione dell'Ordinanza P.C.M. n° 3274 del 20/3/2003 e successive modifiche ed integrazioni ha determinato sul panorama nazionale un grande rinnovamento sul fronte della normativa tecnica in zona sismica, rappresentata fino ad allora dai contenuti del D.M. 16 gennaio 1996. La principale novità introdotta dall'O.P.C.M. n° 3274 è l'abbandono del carattere puramente prescrittivo e convenzionale che caratterizzava le norme tecniche di vecchia concezione, come il D.M. 16/01/1996, per abbracciare un'impostazione puramente prestazionale, in cui gli obiettivi della progettazione e quindi il livello di sicurezza sono esplicitamente dichiarati, a seconda della risposta sismica attesa per la struttura e il sito di costruzione, per un prefissato livello di severità dell'azione sismica.

Le attuali norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. D.M. - 17 gennaio 2018) ereditano gran parte dei contenuti dell'O.P.C.M. n° 3274 in merito alla progettazione in zone sismiche; tuttavia rispetto a quest'ultimo documento sono anche stati apportati importanti cambiamenti, di cui forse il più rilevante riguarda la definizione dell'azione sismica.

Per comprendere pienamente il significato della nuova normativa è necessario rifarsi al concetto di **risposta sismica locale**. Dal punto di vista strettamente fisico, per effetto di sito (risposta sismica locale) s'intende l'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (R), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (S). Nel presente lavoro si sfrutterà la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto spettrale $H / V = 1$) con quello effettivamente misurato in superficie.

Il moto sismico è amplificato in corrispondenza di determinate frequenze che corrispondono alle frequenze naturali f_n di vibrazione del deposito:

$$f_n = 1 / T_n = (V_s * (2n - 1)) / (4 * H) \quad \text{con } n = 1, 2, \dots, \quad [3.1]$$

mentre risulta ridotto di amplificazione alle frequenze elevate a causa dello smorzamento del terreno. Di particolare importanza è la prima frequenza naturale di vibrazione del deposito denominata frequenza fondamentale di risonanza:

$$f_1 = 1 / T_1 = V_s / 4H \quad [3.2]$$

E' quindi necessario porre estrema attenzione a fenomeni di "**doppia risonanza**", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei manufatti ivi edificati in quanto le azioni sismiche su di essi sarebbero gravose.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani.} \quad [3.3]$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{freq. naturale edificio} \approx \text{freq. fondamentale di risonanza del sito} \quad [3.4]$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

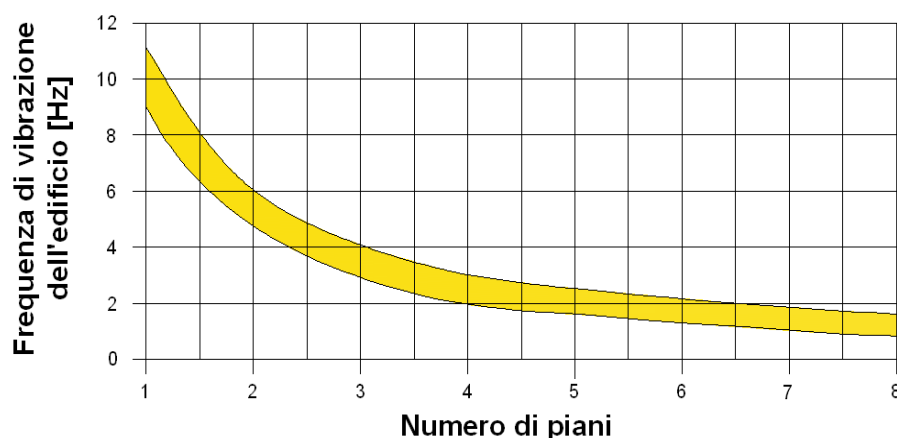


Figura - Frequenza di vibrazione degli edifici rapportata al numero di piani.

4. ANALISI TOMOGRAFICA: RESISTIVITÀ E RIGIDITÀ DEL SOTTOSUOLO

Nelle Tavole riportate in allegato (Tav. 1, 2, 3) e in estratto a seguire, viene mostrato l'andamento della resistività nel sottosuolo attraverso una scala cromatica che parte dal blu ed incrementa verso il viola.

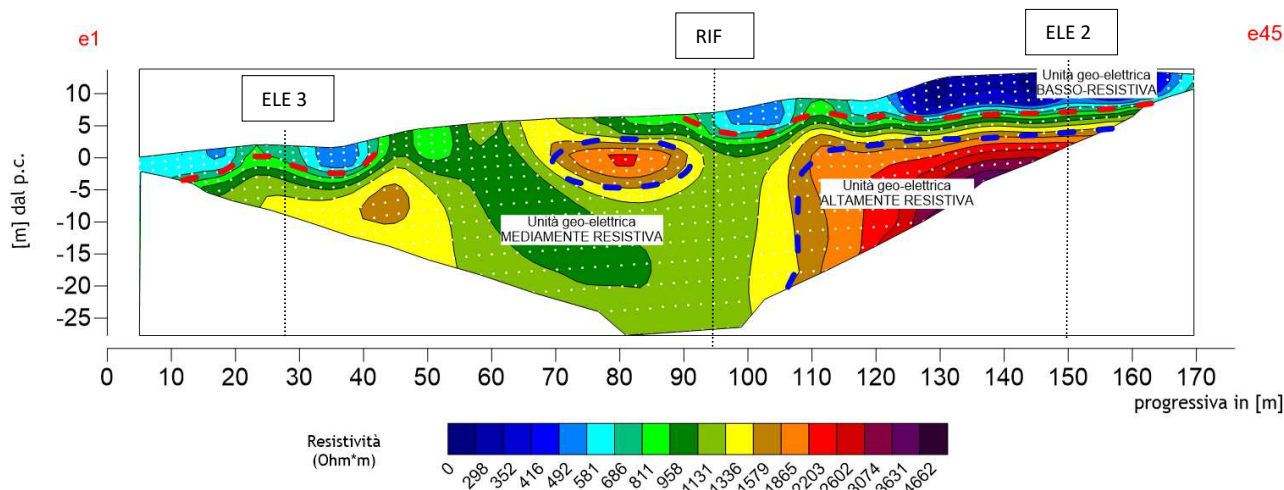
I modelli elettrici ottimizzati, che restituiscono la resistività reale del terreno, presentano *range* di valori compresi tra pochi ohm*m ad oltre 4500 ohm*m.

Lo spessore delle unità geoelettriche può essere stimato attraverso la scala metrica posta sulle ordinate del grafico. Le sezioni sono state acquisite in prossimità dei punti critici in funzione della morfologia del terreno e degli spazi disponibili.

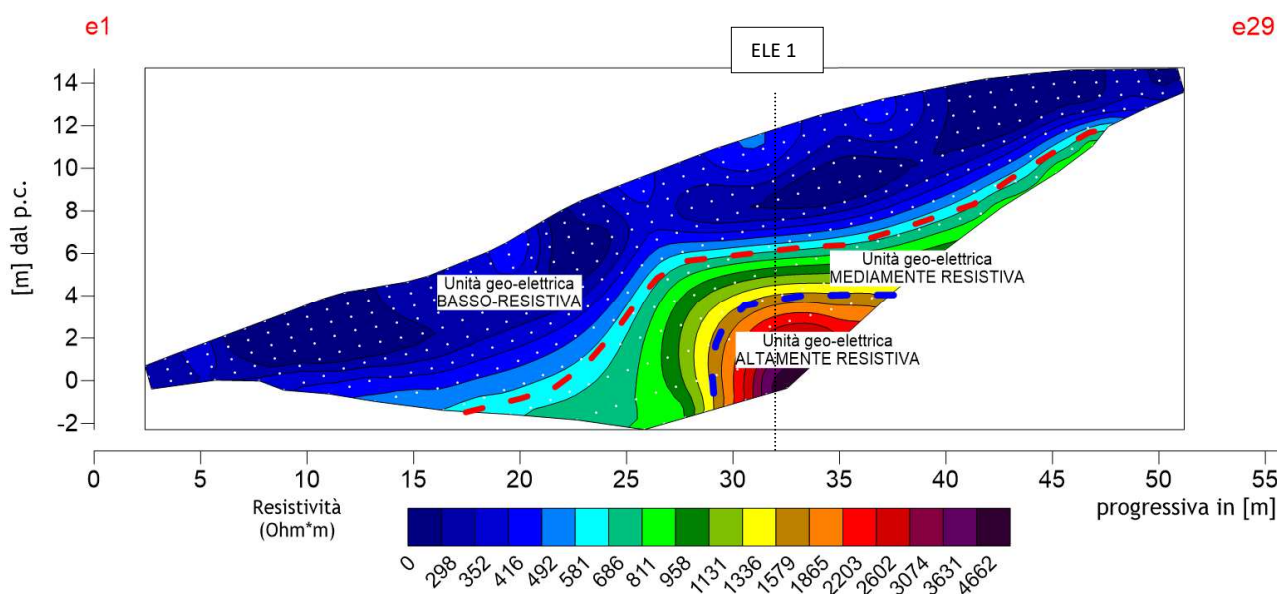
4.1 Modello di resistività del sottosuolo

Le indagini elettriche di seguito illustrate sono state eseguite con lo scopo di caratterizzare dal punto di vista elettrico il sottosuolo, al fine di individuare, l'assetto stratigrafico locale.

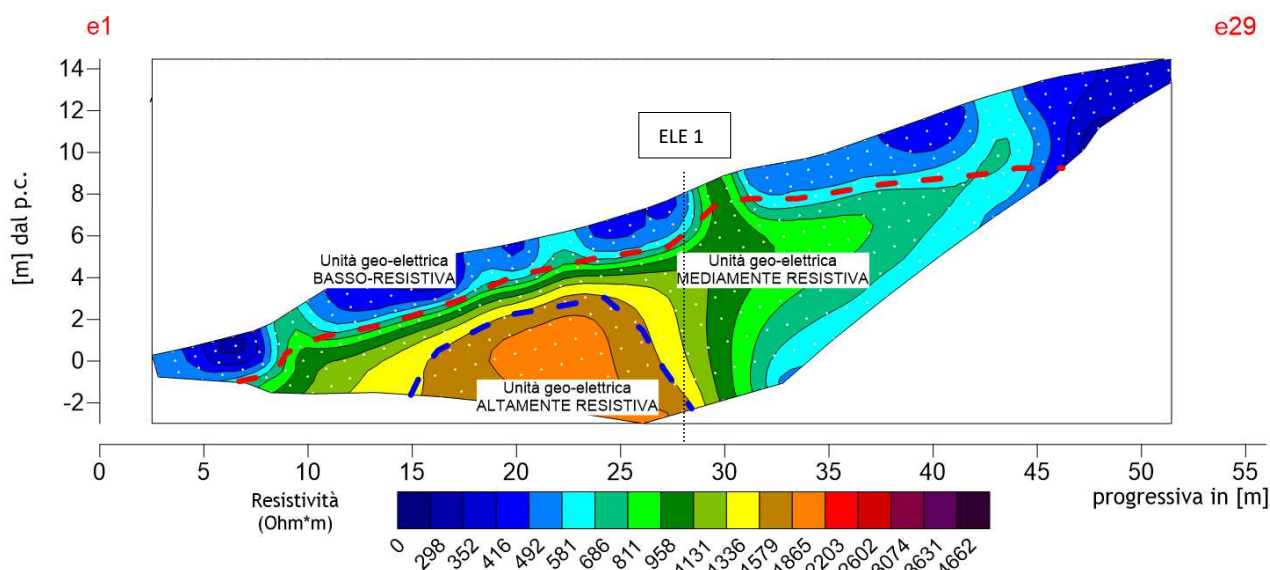
Linea ELE 1



Linea ELE 2



Linea ELE 3



La sezione *ELE 1* presenta un errore di inversione <5% ed ha raggiunto, al centro, la profondità massima di indagine di circa 30 m dal p.c. locale. La tavola mostra una grande variabilità dei valori di resistività elettrica del sottosuolo, in particolare si sono distinte tre diverse unità geo-elettriche. Si riconosce una prima unità “basso-resistiva” che coinvolge i primi 4-5 m del sottosuolo, caratterizzata dai valori di resistività più bassi ($0 < \rho < 500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). I valori di resistività aumentano progressivamente nell’unità “mediamente resistiva” ($500 < \rho < 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), per poi raggiungere i valori più alti, in assoluto, nell’unità “altamente resistiva” ($\rho > 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). L’andamento di tali unità è piuttosto peculiare: vi è una sostanziale differenza tra la prima e la seconda parte della linea elettrica. Se la prima parte della linea è caratterizzata da valori piuttosto omogenei ($\rho < 1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) anche alle massime profondità investigate, a partire dalla seconda metà della linea elettrica i valori di resistività mostrano un gradiente decisamente più elevato, con l’unità “altamente resistiva” riconosciuta già a circa 10 m di profondità. Dalle conoscenze pregresse sul contesto geologico dell’area è ipotizzabile che l’unità “basso-resistiva” possa essere ricondotta ai depositi glaciali, tipicamente molto consolidati, caratterizzanti l’area. Il passaggio alle unità più resistenti può essere associato alla presenza dei depositi glaciali grossolani addensati / substrato roccioso, mentre più complesso è interpretare i rapporti tra le due unità più resistenti. Si può ipotizzare che le due unità appartengano al medesimo substrato, caratterizzato tuttavia da un diverso grado di fratturazione e/o da una diversa circolazione delle acque al suo interno. Un’ulteriore ipotesi sull’unità alto-resistiva è di natura puramente morfologica, si può pensare che tale zona coincida con uno spartiacque superficiale che di fatto facilita l’infiltrazione delle acque superficiali nelle porzioni di sottosuolo adiacenti (zone mediamente resistenti) alla zona stessa.

La sezione *ELE 2* presenta un errore di inversione <6% ed ha raggiunto, al centro, la profondità massima di indagine di circa 11 m dal p.c. locale. La linea è stata realizzata in direzione trasversale rispetto alla *ELE 1* con la quale si interseca al metro 150 della prima linea. Si sono riconosciute le medesime unità geo-elettriche riconosciute nella *ELE 1* ed è stato osservato inoltre lo stesso gradiente presente nella seconda parte della *ELE 1*, consolidando così la validità di entrambe le prove. In particolare, la prova *ELE 2* presenta una porzione superficiale di materiale conduttivo fino ad una profondità di circa 4-6 m dal p.c. locale; per valori di profondità superiori i valori di resistività superano i $1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.

La sezione *ELE 3* presenta un errore di inversione <6% ed ha raggiunto, al centro, la profondità massima di indagine di circa 10 m dal p.c. locale. La linea è stata realizzata in direzione trasversale rispetto alla *ELE 1* con la quale si interseca al metro 27 della prima linea. Si sono riconosciute le medesime unità geo-elettriche riconosciute nella *ELE 1* ed è lo stesso osservato inoltre lo stesso gradiente presente nella prima parte della *ELE 1*, consolidando così la validità di entrambe le prove. Risulta interessante notare la differenza di resistività tra la porzione a monte rispetto a quella più a valle, per valori di profondità maggiori di 2 m dal p.c. locale. Tale differenza potrebbe essere causata da un diverso grado di infiltrazione delle acque nel sottosuolo.

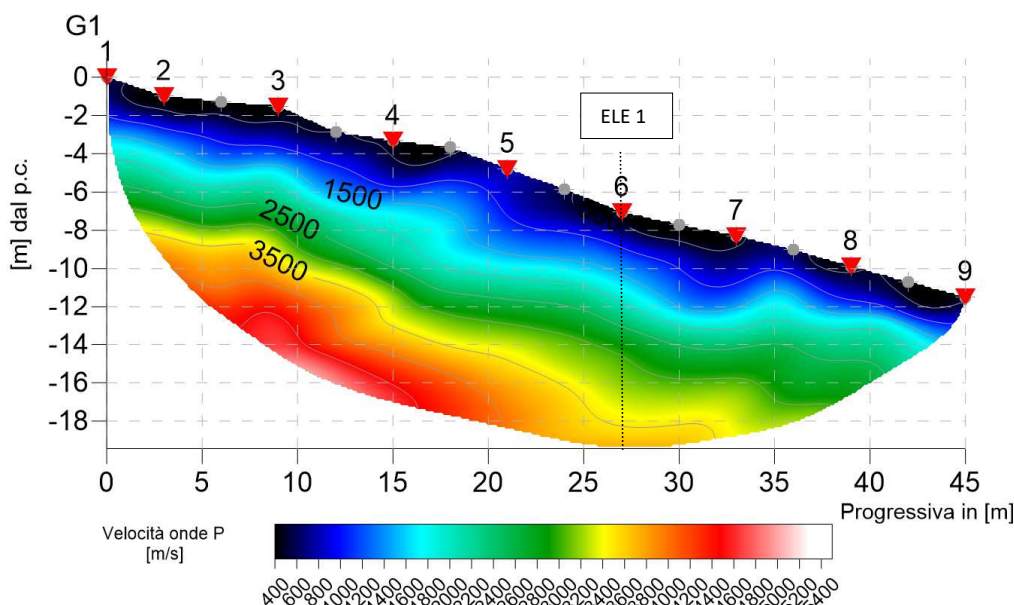
4.2 Risultati ottenuti dalla indagine di sismica a rifrazione

L'obiettivo primario delle indagini sismiche è la ricostruzione sismo - stratigrafica di sito mediante la stima del gradiente geo-sismico.

La tavola riportata in allegato (Tav. 04) e in estratto a seguire mostra l'andamento del sottosuolo attraverso una scala cromatica di colori che parte dal blu ed incrementa verso il bianco.

Lo spessore delle unità geosismiche può essere stimato attraverso la scala metrica posta sulle ordinate del grafico.

I dati sismici sono stati acquisiti nelle aree in prossimità dei punti critici di progetto in funzione della morfologia del terreno e degli spazi disponibili.



La linea è stata realizzata in direzione trasversale rispetto alla *ELE 1* con la quale si interseca al metro 95 della prima linea. La tavola mostra un graduale aumento della velocità delle onde P nel sottosuolo con un gradiente piuttosto costante. Tale andamento, privo di grandi contrasti di rigidità, è in accordo con la porzione centrale della linea *ELE 1* dove si nota una certa omogeneità dei valori di resistività, a testimonianza di un sottosuolo caratterizzato dall'assenza di cambi repentini delle proprie caratteristiche fisiche (conducibilità elettrica e rigidità).

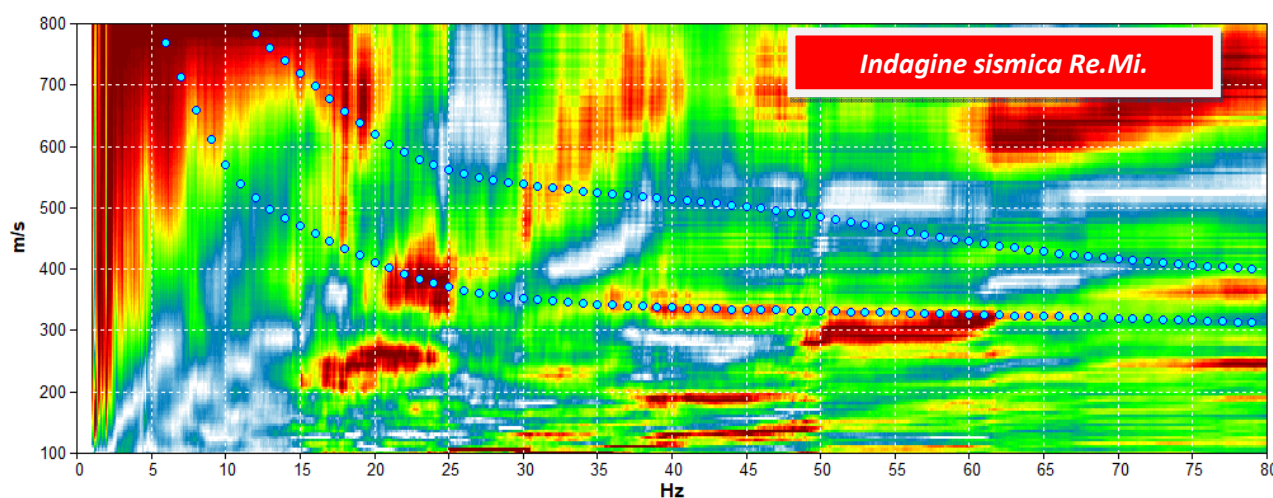
5. ANALISI SISMICA DI SITO E DEFINIZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

5.1 Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate

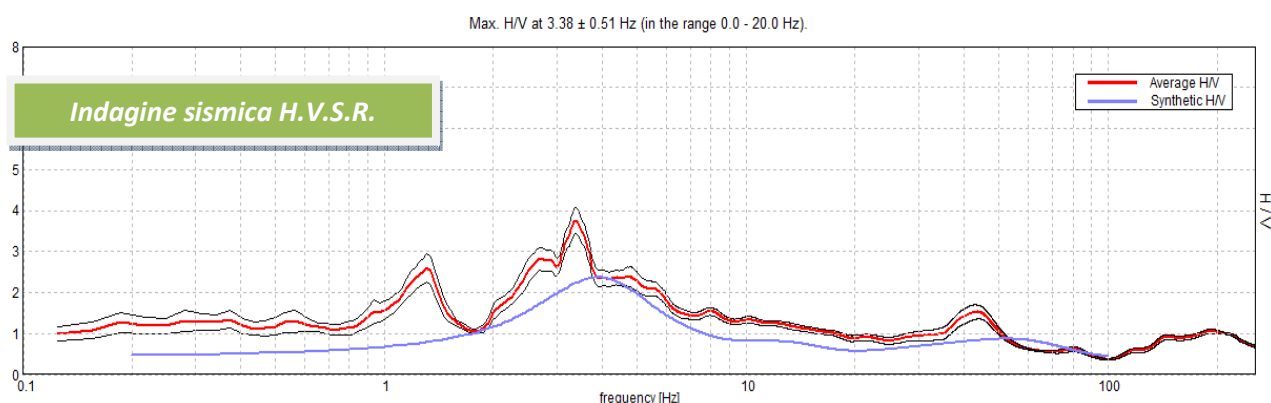
L'utilizzo incrociato delle due tecniche sismiche ha permesso di ottenere un modello sismo - stratigrafico del sottosuolo robusto e affidabile in corrispondenza della zona d'interesse. L'indagine Re.Mi. ha individuato le discontinuità sismiche superficiali e stimato le velocità di propagazione delle onde S mentre la prospezione passiva a stazione singola (HVSr 2) tramite inversione congiunta, ha stimato il grado di rigidità della copertura superficiale e del *bedrock* geofisico. Inoltre, la misura H.V.S.R. ha determinato le frequenze di risonanza di sito cioè i valori di frequenza attesi in superficie in occasione di evento sismico.

L'attendibilità del modello sismo-stratigrafico desunto è da considerarsi elevata poiché la coerenza del segnale è buona e lo spettro di velocità è ben definito nel modo fondamentale per quasi tutte le frequenze campionate. Il programma di elaborazione utilizzato permette di considerare non solo il modo fondamentale ma, una volta individuati, anche i modi superiori per vincolare con maggior attendibilità la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo.

5.1 Indagine sismica passiva in array (Re.Mi.) con inversione congiunta



Spettro di velocità: il modo fondamentale è presente in parte nelle frequenze campionate. Compaiono i modi superiori alle medio-alte frequenze. Il segnale si presenta con una buona coerenza. In blu le curve sintetiche create da una modellizzazione diretta delle onde S.



La curva spettrale rossa rappresenta l'andamento sismico registrato in campagna mentre quella blu è la curva sintetica generata dal codice di calcolo

La ricostruzione sismo-stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale mediamente addensato fino a circa 1,0 m dal p.c. locale caratterizzato da una V_s di circa 250 m/s mentre per valori di profondità maggiori il grado di rigidità diventa più elevato con V_s che aumentano a valori di circa 370 m/s e 550 m/s.

L'ammasso roccioso compatto o quel materiale che, dal punto di vista sismico, si comporta come un *bedrock* geofisico ($V_s \approx 820$ m/s) è stato localizzato a circa 26 m dal p.c. locale.

Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (*modello sismo - stratigrafico interpretativo*):

Indagine sismica Re.Mi. con inversione congiunta H.V.S.R.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	250	1	0,0 - 1,0
II SISMOSTRATO	370	7	1,0 - ≈ 8
III SISMOSTRATO	550	18	≈ 8 - ≈ 26
IV SISMOSTRATO	820	35	≈ 26 - ≈ 61
V SISMOSTRATO	1000	Semisp.	≈ 61 - Semisp.

5.2 Indagine sismica passiva a stazione singola (H.V.S.R.)

Sono state realizzate tre indagini sismiche passive a stazione singola ubicate all'inizio, a metà ed alla fine della stesa elettrica ELE 1, al fine di verificare l'eventuale bidimensionalità del sottosuolo lungo tale direzione. Nel caso specifico del sito in esame si è cercato di correlare i valori di picco, dello spettro di risposta HVSR, con le frequenze fondamentali di risonanza di sito.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si sono potute ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

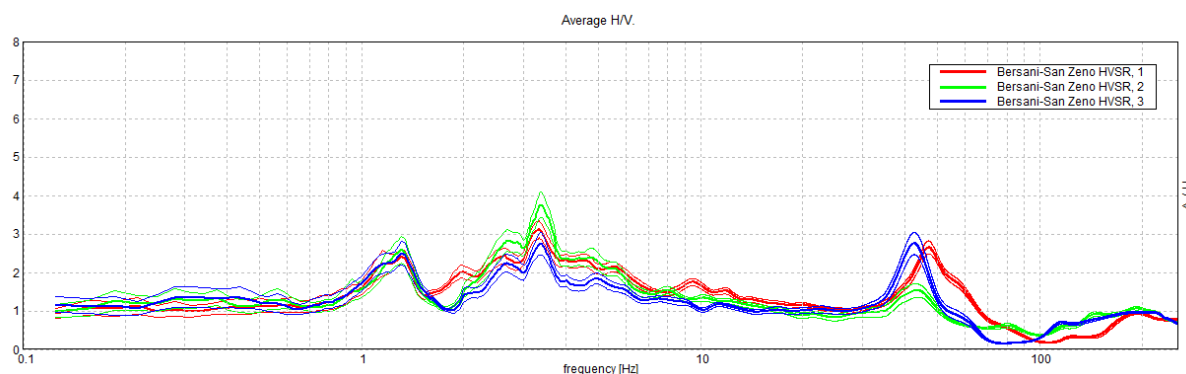
Le curve H/V restituite sono del tutto simili tra loro (assetto sismo-stratigrafico omogeneo), per cui definiremo un'unica frequenza di risonanza per il sito indagato. La frequenza fondamentale di risonanza di sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ($H/V \approx 3,7$) nell'intervallo di interesse ingegneristico-strutturale (0,0 - 20,0 Hz), è di circa 3,5 Hz. Va comunque sottolineato come l'ampiezza del picco H/V sia in parte accentuato dalla presenza di disturbi antropici caratterizzati dalla medesima frequenza di risonanza.

Frequenza fondamentale di risonanza

$3,38 \pm 0,51$ Hz

È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio.

Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi lo stesso periodo di vibrazione naturale del terreno poiché il rapporto H/V calcolato è tale da ipotizzare un elevato fattore di amplificazione del moto sismico in superficie.



Confronto tra i rapporti spettrali H/V delle indagini HVSR1, HVSR 2, HVSR 3

Nella tabella seguente, s'illustra la qualità del segnale acquisito in base al progetto [SESAME](#) (Linee guida 2005). Per l'affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri mentre per avere un chiaro e pulito segnale del picco massimo devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi. Si osserva quindi che il picco a 3,38 Hz soddisfa tutti i criteri e può pertanto essere assunto come frequenza fondamentale di risonanza del sito.

Max. H/V at 3.38 ± 0.15 Hz (in the range 0.0 - 20.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$3.38 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$2362.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 163 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	2.219 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.969 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.75 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.15031 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.15079 < 0.16875$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3244 < 1.58$	OK	

5.3 Categoria di sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17 gennaio 2018

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi o in rapporto ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento.

Per definire le Categorie, il D.M. 17 gennaio 2018 prevede il calcolo del parametro $V_{s,eq}$, ovvero della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio V_s dei terreni posti al di sopra del substrato di riferimento ($V_{s,30}$ per depositi con profondità del substrato superiore a 30 m). La profondità del substrato è riferita al piano di posa delle fondazioni superficiali, alla testa dei pali per fondazioni indirette, al piano di imposta delle fondazioni per muri di sostegno di terrapieni o alla testa delle opere di sostegno di terreni naturali.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Dall'assetto sismo-stratigrafico desunto dalle indagini sismiche effettuate, è possibile constatare la presenza del *bedrock* geofisico (substrato di riferimento) a profondità inferiori a 30 m.

Pertanto, come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17/01/2018*), si è calcolata la velocità media di propagazione delle onde di taglio fino a 26 m dal piano di posa delle fondazioni ($V_{s,eq}$), a partire da varie profondità dal piano campagna:

Profondità piano di posa delle fondazioni	Vs,eq
0 m dal p.c.	Vs (0 - 26) \approx 467 m/s
1 m dal p.c.	Vs (1 - 26) \approx 484 m/s
2 m dal p.c.	Vs (2 - 26) \approx 490 m/s
3 m dal p.c.	Vs (3 - 26) \approx 497 m/s

Dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso dal presente studio e dalle indicazioni normative si prevede l'inserimento del sito d'indagine nella **Categoria di Sottosuolo denominata B**, così definita:






Categoria B - Depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione utilizzata e di problematiche incontrate durante la fase di acquisizione. Infine, i profili di Vs e di conducibilità elettrica ricavati con questa metodologia, come tutti i metodi indiretti, non presentano una soluzione univoca e quindi più modelli possono fornire curve sintetiche simili tra loro.

Monteviale, novembre 2019

STUDIOSISMA srl
Via Bironi, 102/5 - 36050 Monteviale (VI)
Tel/Fax. 0444/962532 Cell. +39 349/0567455
Mail: info@studiosisma.com
C.F. e P.IVA 03797510249

ALLEGATO

-  Tav.01 Sezione geo-elettrica 2D - Linea ELE 1
-  Tav.02 Sezione geo-elettrica 2D - Linea ELE 2
-  Tav.03 Sezione geo-elettrica 2D - Linea ELE 3
-  Tav.04 Sezione tomografica 2D - Linea RIF
-  Tav.05 Indagine sismica Re.Mi. e H.V.S.R.

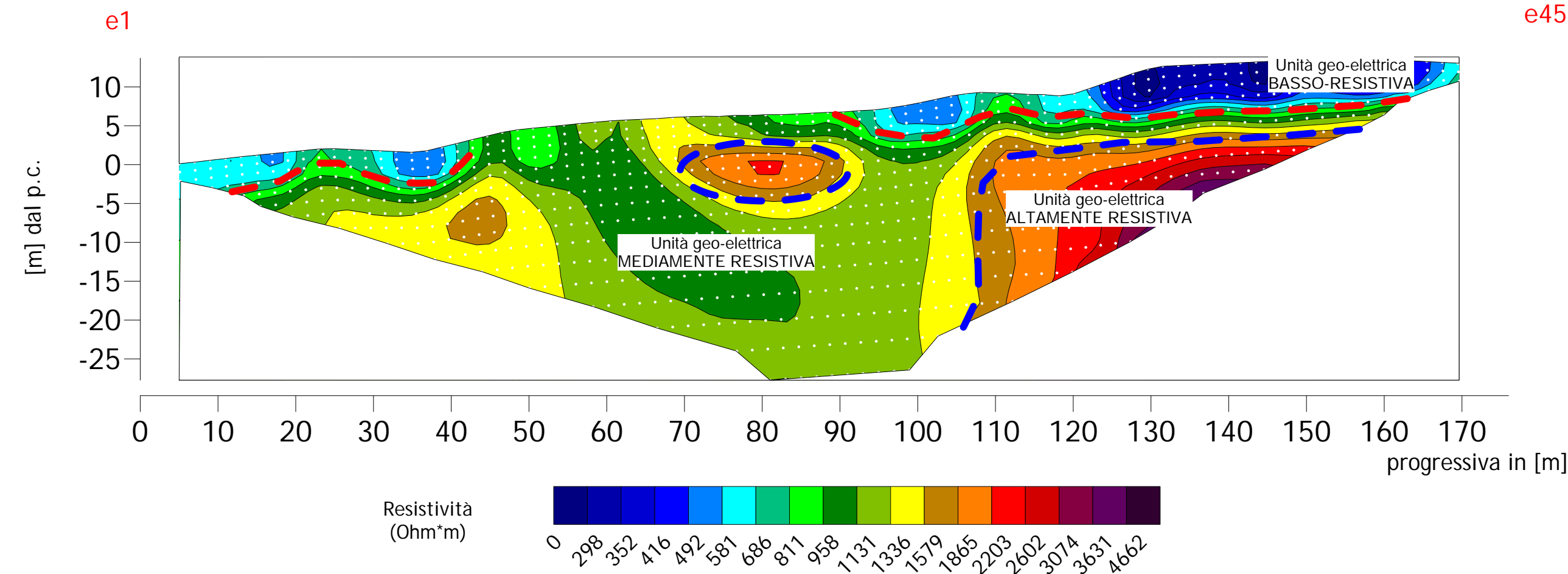


BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

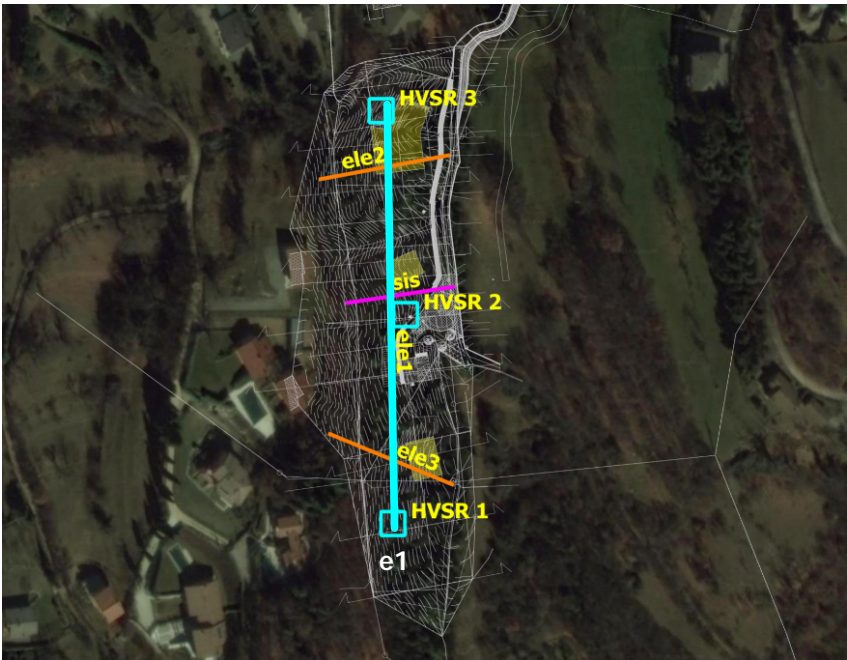
- ✓ Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 29, p. 665 - 666.
- ✓ Arai H. e Tokimatsu K., 2004. S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, p. 53 - 63.
- ✓ Castellaro S., Mulargia F. Bianconi L., 2005. Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica, *Geologia Tecnica Regionale*, vol. 3.
- ✓ D'Amico V., Picozzi M., Albarello D., Naso G. e Tropenscovino S., 2004. Quick estimates of soft sediments thicknesses from ambient noise horizontal to vertical spectral ratios: a case study in southern Italy, *J. Eartq. Eng.*, 8, p. 895 - 908.
- ✓ Dal Moro G., 2008b, Rapporto sulla campagna Vs30 in Friuli Venezia Giulia, Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, Università di Trieste.
- ✓ Dal Moro G & Pipan M., 2007, Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curve and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms, *J. Appl. Geophysics*, 61, 56-81.
- ✓ Gallipoli R., La Penna V., Lorenzo P. et al., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy, *European J. Environm. and Eng. Geophys.*, 4, p. 117 - 128.
- ✓ Ibs-von Seht M. e Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. America*, 89, p. 250 - 290.
- ✓ Ivanov, J., Miller, R.D., Xia, J., Steeples, D., and Parck, C.B., 2006, Joint Analysis of Refractions with Surface Waves. An Inverse Refraction-Traveltime Solution: *Geophysics*, 71, R131-R138.
- ✓ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2001. A critical review of 10 Years of microtremor HVSr technique, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, P. 255 - 266.
- ✓ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2006. Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Conf. Eartq. Eng. And Seismol.*, Ginevra, 3-8 Sept. no 270.
- ✓ Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., 2007. Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica", *Il geologo - Ordine dei Geologi Regione Emilia Romagna*.
- ✓ Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTRI*, 30, p. 25 - 30.
- ✓ Roth M. & Holliger K- 1999. Inversion of Sourcegenerated noise in high-resolution seismic data. *The Leading Edge*, 18, 1402-1406.
- ✓ [SESAME Project](#): "Site Effects Assessment Using Ambient Excitations", 2005.



Modello di resistività del sottosuolo - Linea ELE 1



Ubicazione indagine



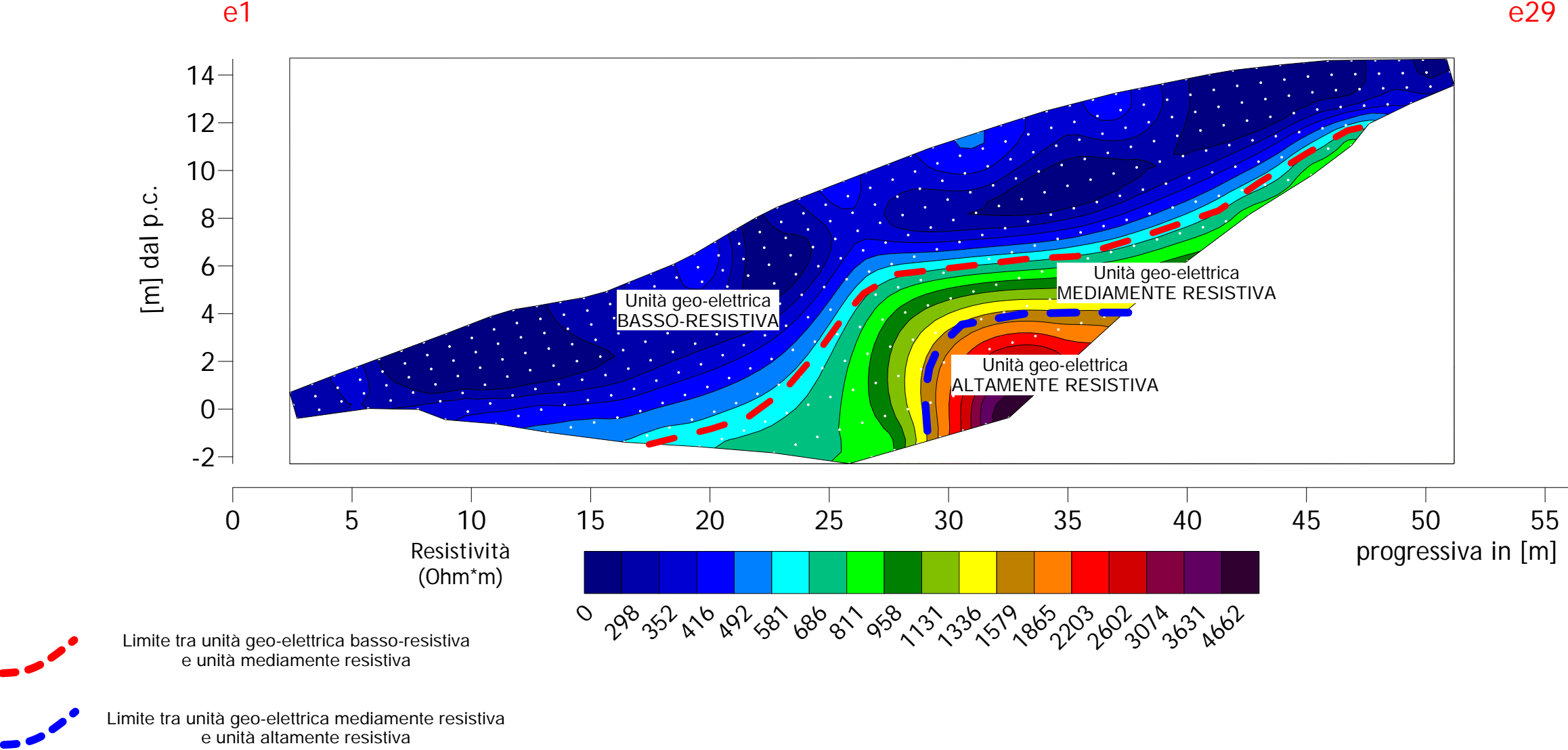
Documentazione fotografica



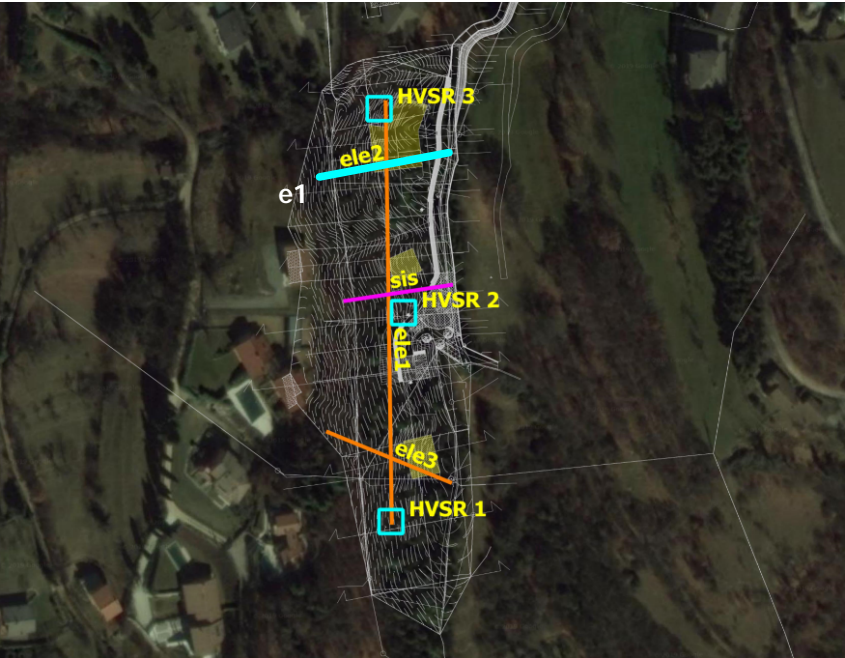
Strumento:	ELECTRA
Elettrodi:	45
Energizzazione:	400Volt - max
Elaborazione 2D:	Res2Dinv
Valori di resistività validi:	302
Errore di inversione:	<5%

INDAGINE GEOFISICA	
Via Creta Comune di San Zeno di Montagna (VR)	
Indagine elettro - stratigrafica	
SEZIONE GEO-ELETTRICA 2D Linea ELE 1	
Tav. 01	

Modello di resistività del sottosuolo - Linea ELE 2



Ubicazione indagine



Documentazione fotografica



Strumento:	ELECTRA
Elettrodi:	29
Energizzazione:	400Volt - max
Elaborazione 2D:	Res2Dinv
Valori di resistività validi:	124
Errore di inversione:	<6%

INDAGINE GEOFISICA

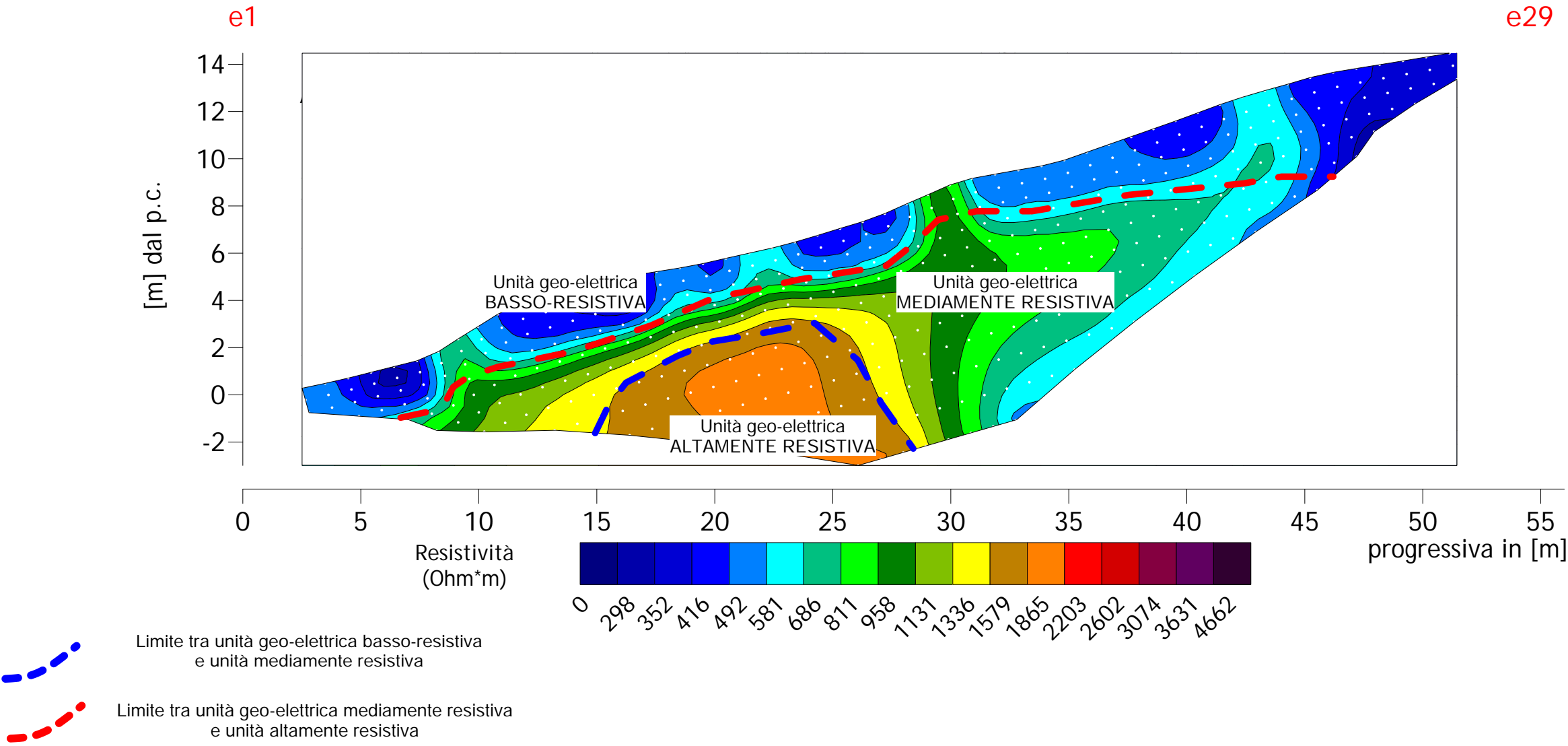
Via Creta
Comune di San Zeno di Montagna (VR)

Indagine elettro - stratigrafica

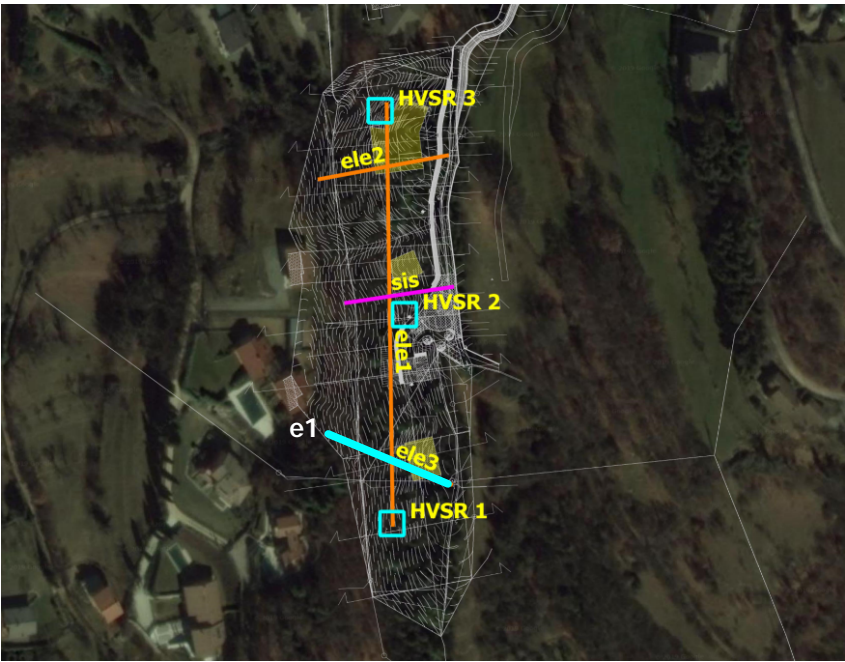
SEZIONE GEO-ELETTRICA 2D
Linea ELE 2

Tav. 02

Modello di resistività del sottosuolo - Linea ELE 3



Ubicazione indagine



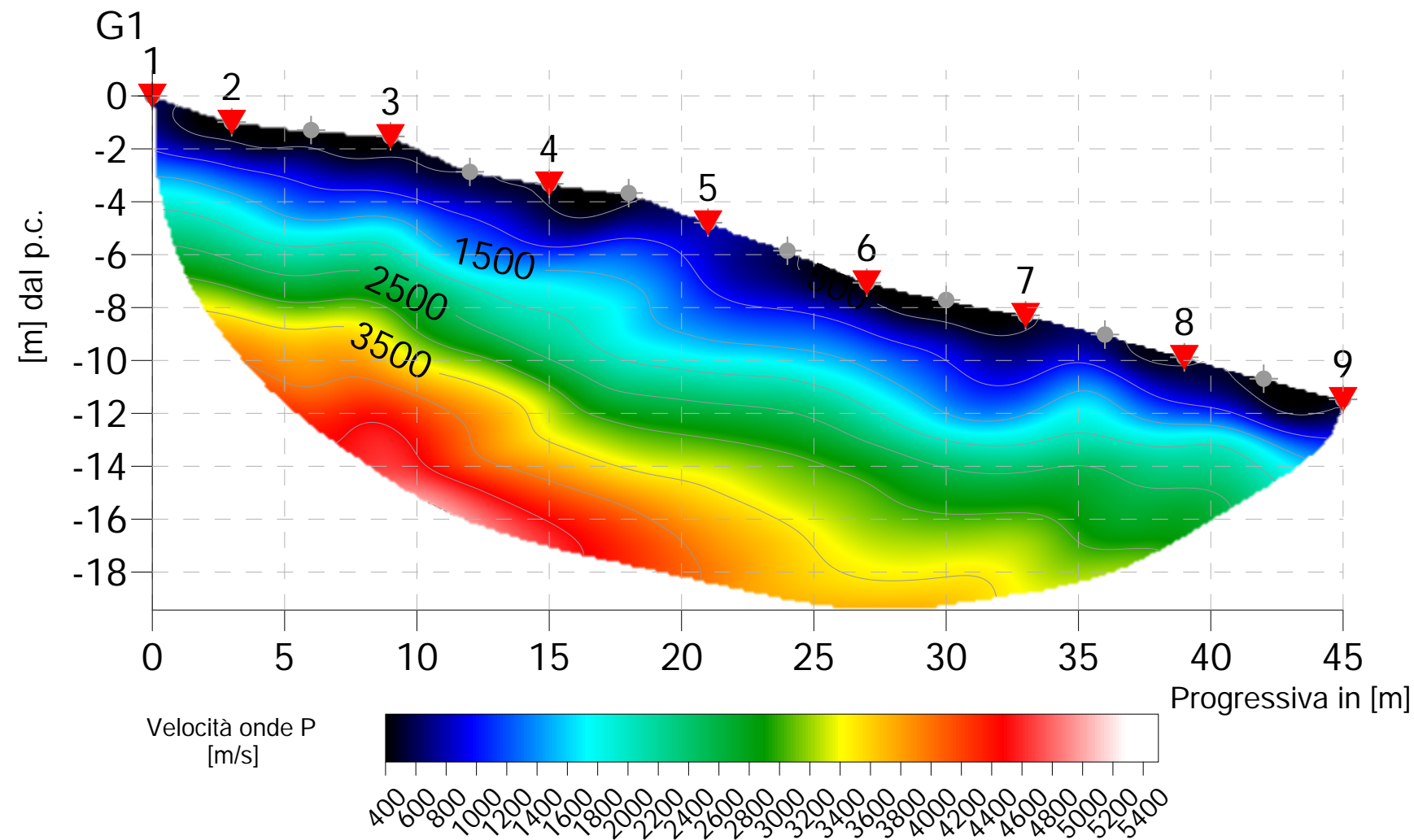
Documentazione fotografica



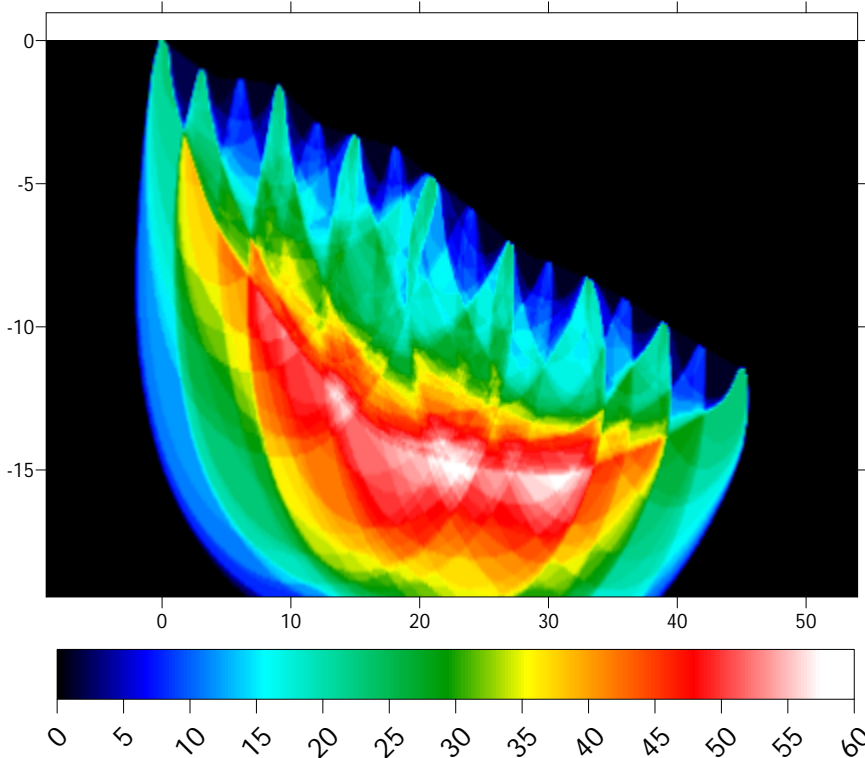
Strumento:	ELECTRA
Elettrodi:	29
Energizzazione:	400Volt - max
Elaborazione 2D:	Res2Dinv
Valori di resistività validi:	123
Errore di inversione:	<6%

INDAGINE GEOFISICA	
Via Creta Comune di San Zeno di Montagna (VR)	
Indagine elettro - stratigrafica	
SEZIONE GEO-ELETTRICA 2D Linea ELE 3	
Tav. 03	

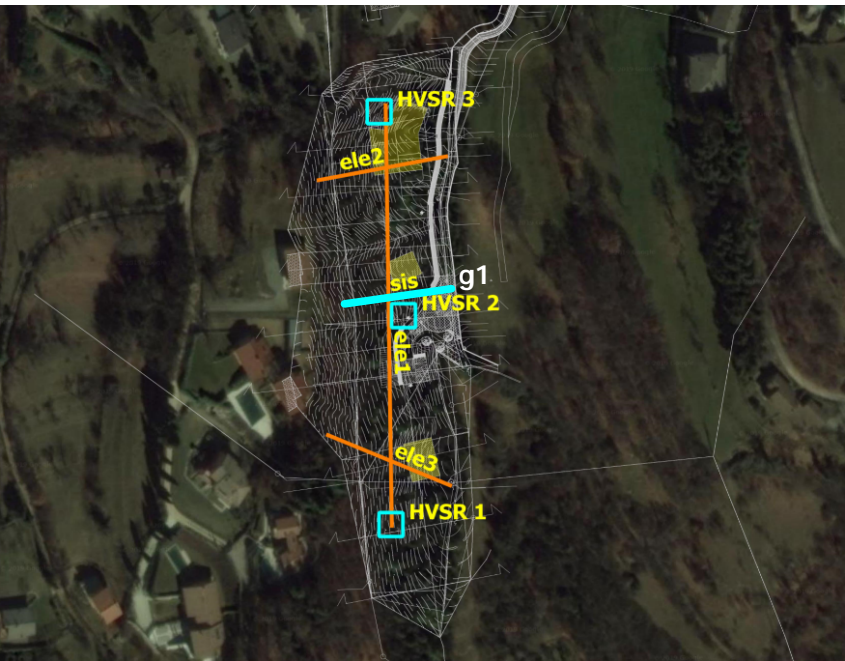
RIF: SEZIONE TOMOGRAFICA 2D IN ONDE P



Convergenza
[n raggi sismici]



Ubicazione indagine



Documentazione fotografica



Strumento:	Soil-spy Rosina
Geofoni:	16
Energizzazione:	Mazza 5Kg
Elaborazione 2D:	Reyfract
Valori di velocità validi:	tutti
Errore di inversione:	<10%

INDAGINE GEOFISICA

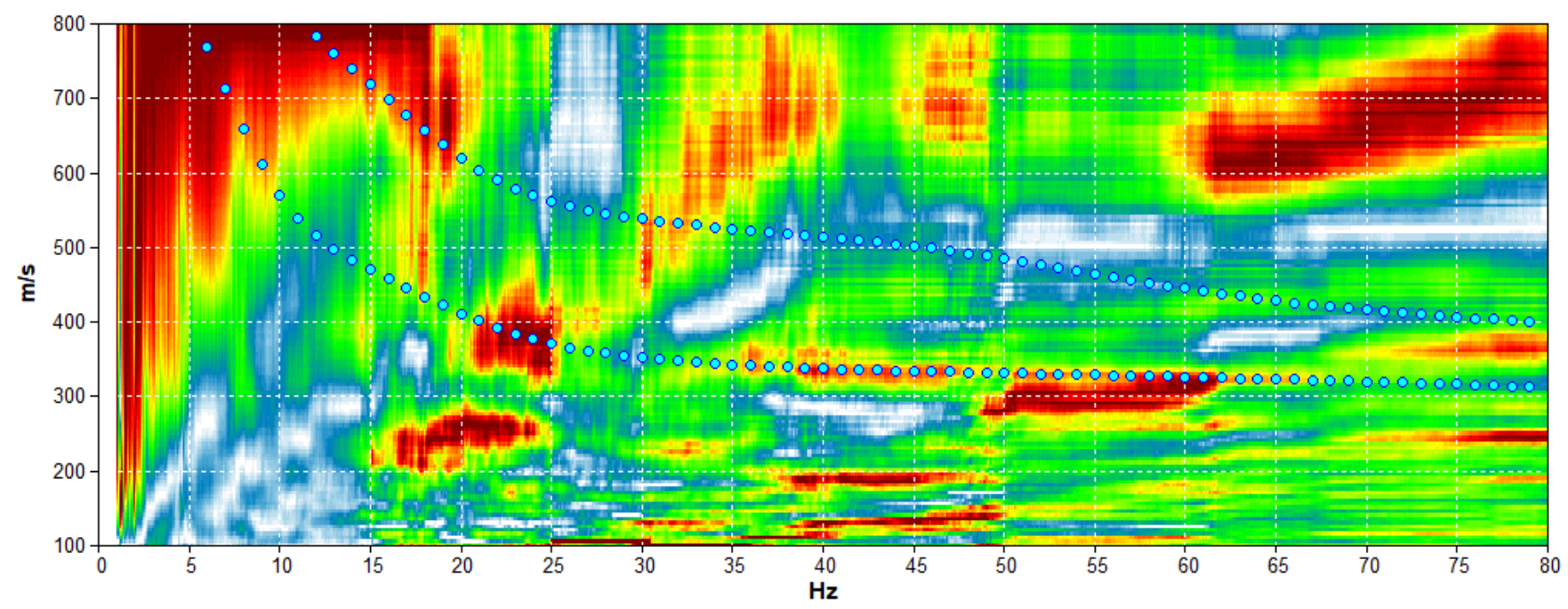
Ubi: Via Creta - San Zeno di Montagna (VR)

Indagine sismo - stratigrafica

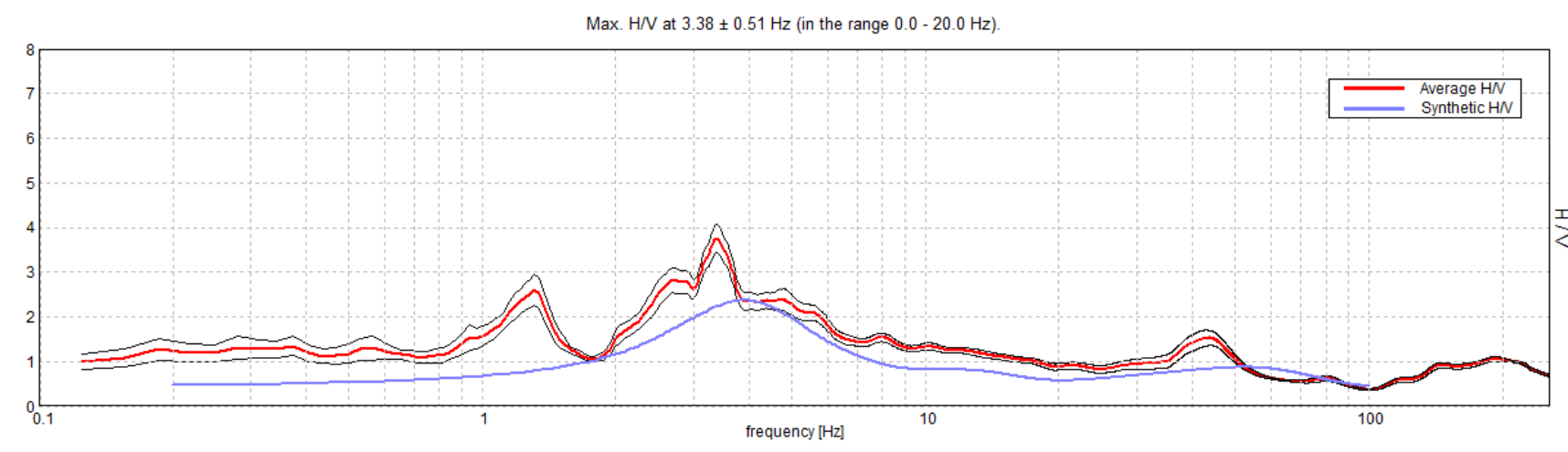
SEZIONE GEO-SISMICA 2D
Linea RIF

Tav. 04

StudioSisma srl



Spettro di velocità e curve sintetiche da indagine sismica in array (Re.Mi.)



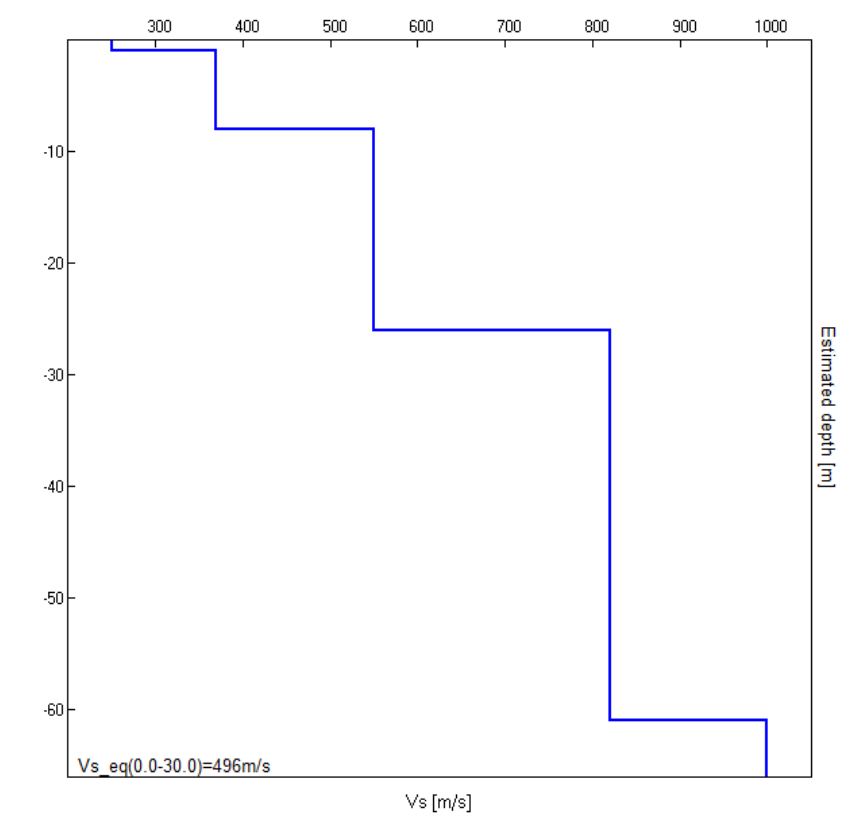
Spettro sismico a curva sintetica da misura a stazione singola (H.V.S.R.)

Indagine sismica Re.Mi. con inversione congiunta H.V.S.R.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	250	1,0	0,0 - 1,0
II SISMOSTRATO	370	7	1,0 - ≈8
III SISMOSTRATO	550	18	≈8 - ≈26
IV SISMOSTRATO	820	35	≈26 - ≈61
V SISMOSTRATO	1000	Semisp.	≈61 -Semisp.



Profondità piano di posa e Vs,eq calcolati

0 m dal p.c.	467 m/s	<i>Categoria B</i>
1 m dal p.c.	484 m/s	<i>Categoria B</i>
2 m dal p.c.	490 m/s	<i>Categoria B</i>
3 m dal p.c.	497 m/s	<i>Categoria B</i>



Profilo verticale onde S (Vs)

INDAGINE GEOFISICA

Ubi: Via Creta - San Zeno di Montagna (VR)

Lat. 45.622569°N - Lon. 10.718970°E (WGS-84)

**Indagine sismica
Re.Mi. e H.V.S.R.**

Tav. 5 - Novembre 2019