

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J34G18000150001

U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO
NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA”

VARIANTE VAL DI RIGA

GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA

REPORT INDAGINI GEOFISICHE

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I B 0 H 0 0 D 6 9 I G G E 0 0 0 5 0 0 4 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Roverselli <i>D. Roverselli</i>		S. Rodani <i>S. Rodani</i>		C. Mazzocchi <i>C. Mazzocchi</i>		M. Comedini <i>M. Comedini</i>



File: IB0H00D69IGGE0005004A

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

INDICE

1	PREMESSA	4
1.1	ESEMPI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	7
2	RILIEVI TOMOGRAFICI ELETTRICI.....	9
2.1	TOMOGRAFIA ELETTRICA / METODOLOGIA	9
2.2	CENNI TEORICI	9
2.3	MODALITÀ DI MISURA.....	10
2.4	MODALITÀ D’INTERVENTO.....	11
2.5	ACQUISIZIONE DATI	12
2.6	ELABORAZIONE DATI	12
2.7	ANALISI DEI DATI.....	13
2.7.1	Zona Varna	13
2.7.2	Zona Naz-Sciaves.....	16
3	INDAGINI SISMICHE MASW / RE.MI.	17
3.1	MASW / RE.MI. – RIFERIMENTO NORMATIVO (NTC 2018, DM 17/01/2018)	17
3.2	STENDIMENTI SISMICI CON METODO “MASW” E “RE.MI.” CENNI METODOLOGICI	19
3.3	MODALITÀ ESECUTIVE DELL’INDAGINE	20
3.4	ELABORAZIONE DATI	21
3.5	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DELL’ATTIVITÀ DI REGISTRAZIONE	21
	ALLEGATO 1 SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE LOG VELOCITÀ ONDE VS (MASW / RE.MI.)	23
4	RILIEVI SISMICI HVSR	36
4.1	CENNI TEORICI	36
4.2	METODOLOGIA.....	37
4.3	SINTESI E COMMENTO DEI DATI REGISTRATI.....	39
	ALLEGATO 2 STAZIONI HVSR GRAFICO HVSR MEDIO GRAFICO DELLE TRE COMPONENTI N-S / E-W / UP-DOWN	40
5	PROVA DOWN-HOLE.....	45

5.1	DESCRIZIONE / ACQUISIZIONE PROVA D-H.....	46
5.2	ELABORAZIONE E RESTITUZIONE DEI DATI	46
ALLEGATO 3 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA E COMMENTO UBICAZIONE PLANIMETRICA SISMOGRAMMI VP – VS GRAFICO VELOCITÀ VP – VS TABELLA PARAMETRI.....		
		47
6	PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE (VP - VS)	53
6.1	CENNI TEORICI	54
6.2	ACQUISIZIONE DATI	54
6.3	ELABORAZIONE DATI	56
6.4	ANALISI DEI RISULTATI	57
6.4.1	<i>Profilo BR-P4</i>	58
6.4.2	<i>Profilo BR-P1</i>	59
6.4.3	<i>Profilo BR-P2</i>	60
6.4.4	<i>Profilo BR-P3</i>	61
6.4.5	<i>Profilo BR-P5</i>	62

1 PREMESSA

A seguito dell’Ordine n. 100037099 di attivazione n. 4 su A.Q. n. 200001269 del 21.02.2019, sono state eseguite specifiche prospezioni geofisiche di supporto al Progetto della Variante di Riga.

Le indagini geofisiche sono state eseguite in prossimità dell’asse del tracciato ferroviario in progetto. Le planimetrie di riferimento delle aree di studio e delle indagini eseguite in scala 1:2.000 sono allegate nel fascicolo degli elaborati grafici (PROGR. 001); in Fig. 1, Fig. 2 e Fig. 3 sono riportati gli elaborati planimetrici sopra menzionati in formato ridotto.

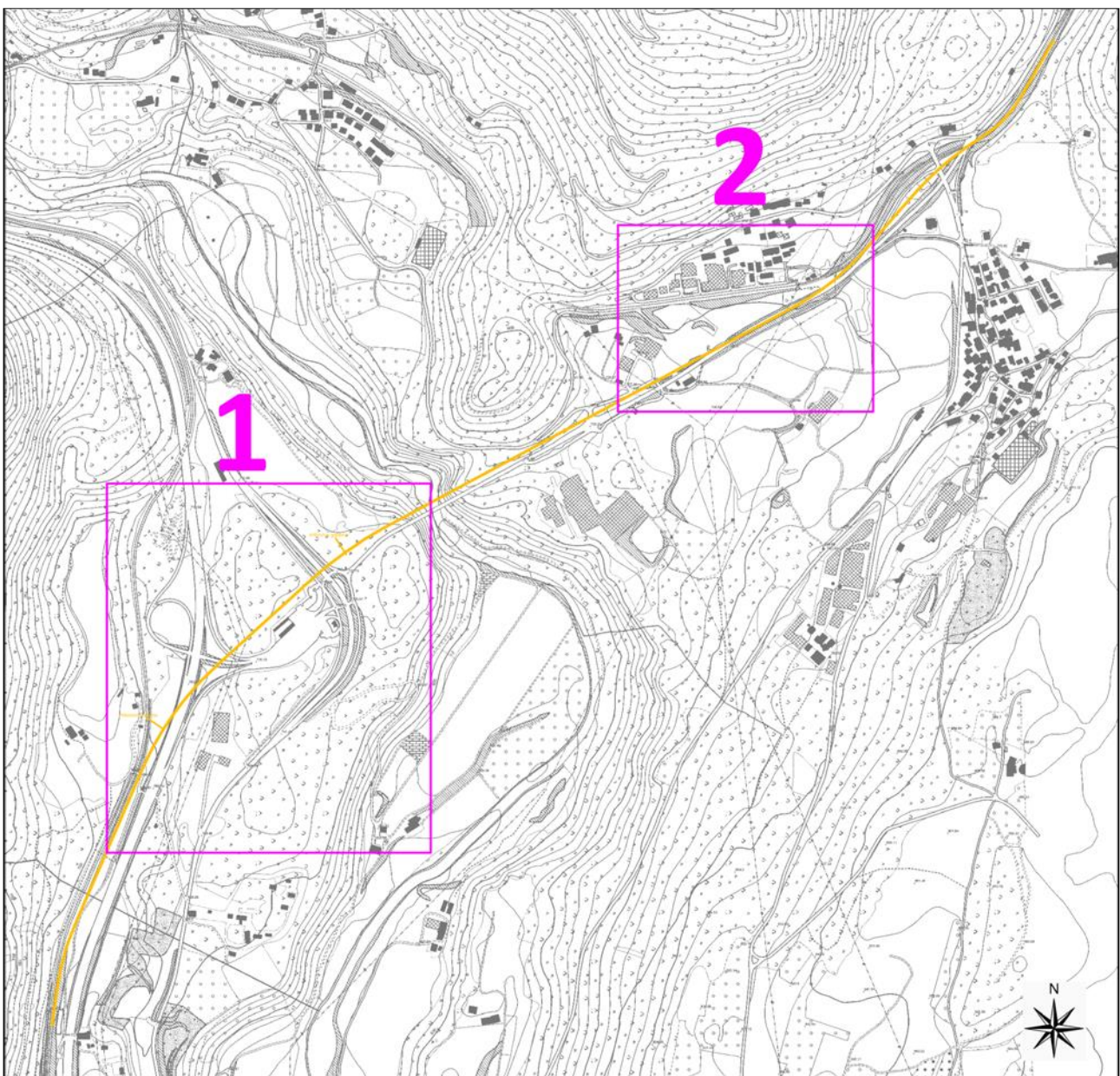


Fig. 1 - Estratto inquadramento territoriale delle aree oggetto di indagine, per zona 1 si intende il settore di Varna mentre per zona 2 quella di Naz-Sciaves. In giallo è tracciato l’andamento della Variante di Riga in progetto.

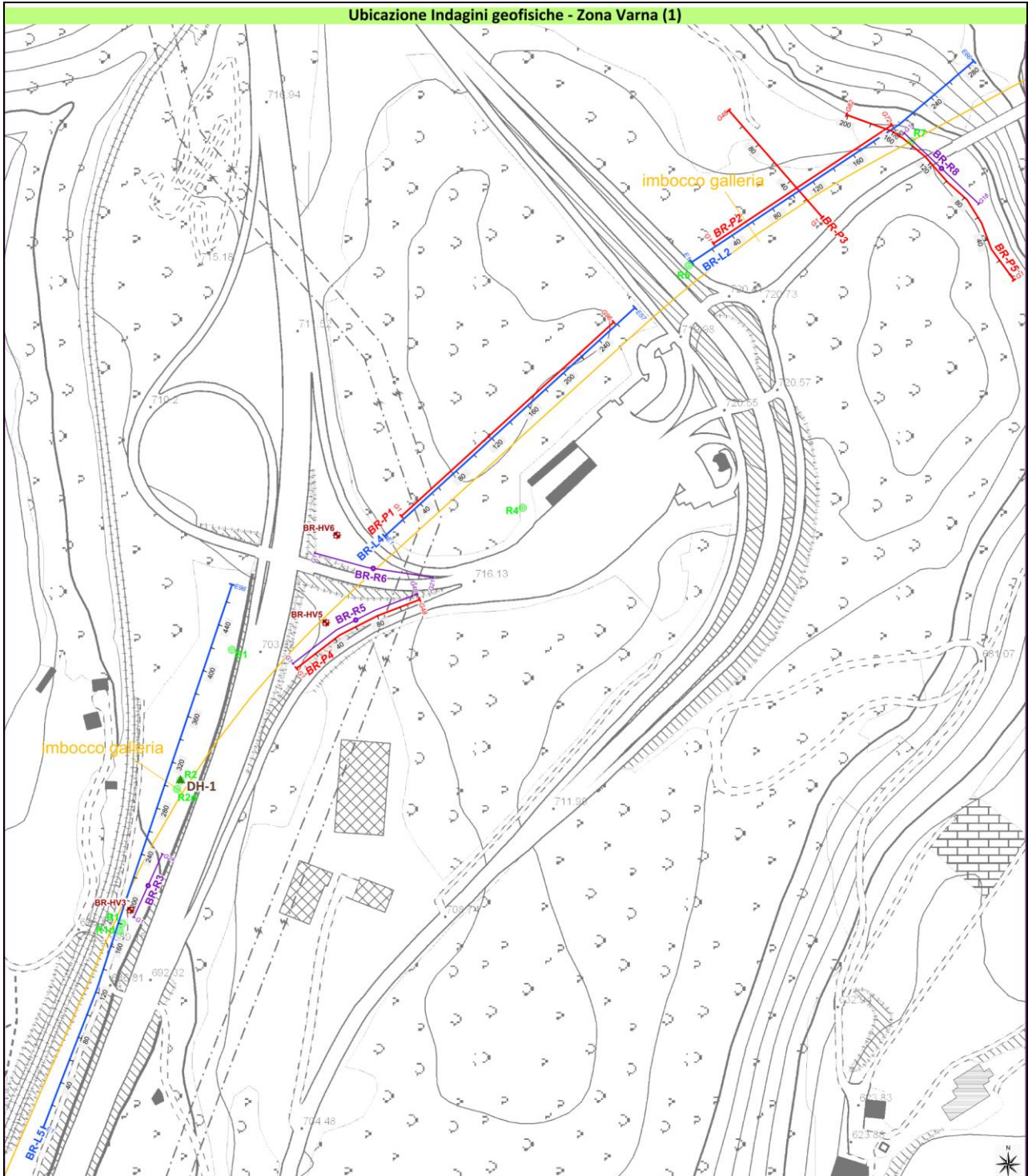


Fig. 2 Estratto planimetrico delle indagini effettuate – Zona Varna.

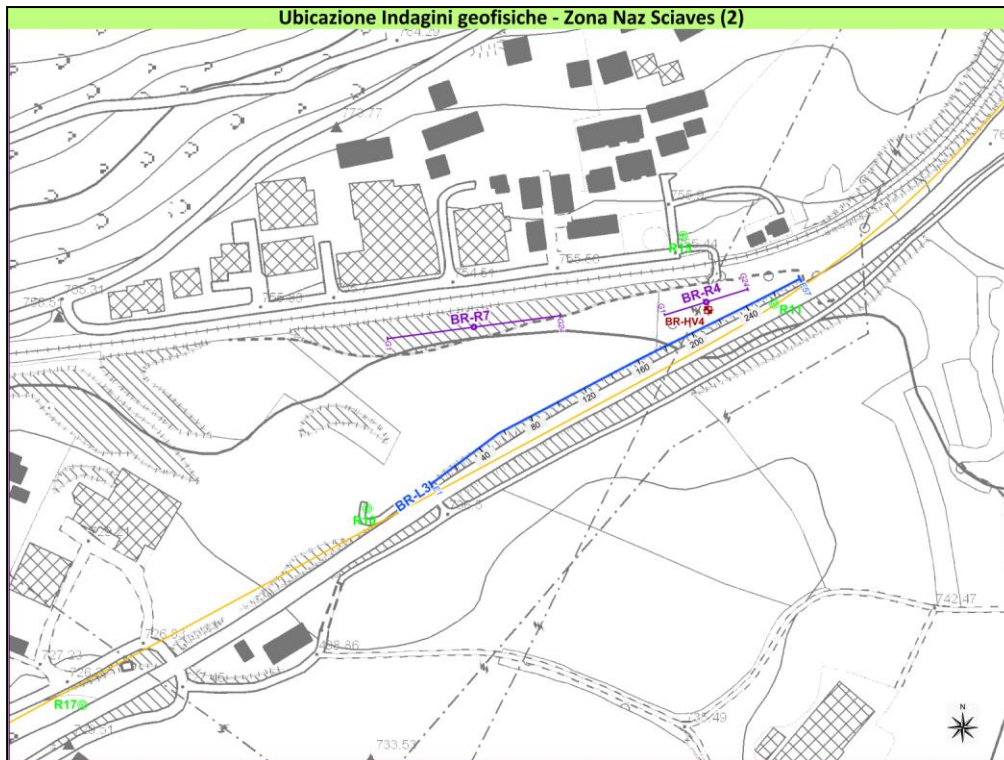


Fig. 3 - Estratto planimetrico delle indagini effettuate – Zona Naz Sciaves.

L'attività si è articolata in differenti metodologie geofisiche strutturate in:

- N. 4 Rilievi Tomografici Elettrici, denominato con sigla da **BR-L2** a **BR-L5**, per la ricostruzione bidimensionale delle geometrie e dei rapporti tra le unità elettrostratigrafiche; i profili sono costituiti da n. 57 elettrodi (BR-L3 e BR-L4), n. 66 elettrodi (BR-L2) e n. 96 elettrodi (BR-L5), posizionati ad intervalli regolari di 5.0m, pari ad uno sviluppo lineare rispettivamente di 280.0 m, 325.0 m, 475.0 m e complessivo di 1360 m;
- N. 6 stendimenti sismici con acquisizione prove di tipo Re.Mi. / MASW, denominate con sigla da **BR-R3** a **BR-R8** finalizzate alla determinazione del parametro V_{seq} ed alla definizione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle NTC 2018; gli stendimenti sono costituiti da n. 24 geofoni (BR-R3 e BR-R4) e n. 48 geofoni (BR-R5) posizionati ad intervalli regolari di 2.5m, i restanti invece sono costituiti da n.18 (BR-R8), n.21 (BR-R6) e n. 24 geofoni (BR-R7) ma equipazati ogni 5.0m; gli stendimenti con l'indicazione del punto centrale di riferimento rappresentativo del volume di terreno indagato sono posizionati su foto aerea nella relativa scheda monografica nello specifico capitolo dedicato;
- N. 4 prove sismiche passive di tipo HVSR, denominate da **BR-HV3** a **BR-HV6**, finalizzate alla definizione delle frequenze di risonanza di sito nonché alla verifica congiunta degli eventuali contrasti di impedenza sismica osservati nelle prove di tipo Re.Mi. / MASW nella ricostruzione del modello sismo-stratigrafico in termini di velocità V_s ; l'ubicazione dei punti di indagine, è riportata in dettaglio nella scheda monografica di ogni singola prova nello specifico capitolo dedicato su base aerea;
- N. 1 Prova Down-Hole, denominata **DH-1** e realizzata nel foro di sondaggio **R2** della lunghezza di 40.0 m, per la definizione dei profili di velocità V_p , V_s , V_{seq} , ai sensi delle NTC 2018, e dei moduli dinamici dei terreni carotati; l'ubicazione della prova su foto aerea è riportata nella relativa scheda monografica nello specifico capitolo dedicato;
- N. 5 prospezioni sismiche a rifrazione con registrazione in onde P e S per l'elaborazione di profili interpretativi in termini di velocità sismiche, denominati da **BR-P1** a **BR-P5**; gli stendimenti sono costituiti da n. 96 (BR-P1), n. 72 (BR-P2), n. 48 (BR-P3 e BR-P4) e n. 82 (BR-P5) geofoni posizionati ad intervalli regolari di 2.5m, pari ad uno sviluppo lineare rispettivamente di 237.5 m, 177.5 m, 117.5 m, 202.5 m e complessivo di 852.5 m.

Di seguito vengono descritte le singole attività svolte con le relative interpretazioni dei dati geofisici acquisiti unitamente agli allegati di riferimento e specifica documentazione fotografica.

1.1 Esempi delle attività svolte

INDAGINE SISMICA Prova Re.Mi. / MASW (*Energizzazione a sinistra e Strumentazione a destra*)



INDAGINE SISMICA Profilo Sismico a Rifrazione P e S (*Energizzazione Onde P a sinistra e Onde S a destra*)



INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA (*Stendimento a sinistra e Strumentazione a destra*)



INDAGINE SISMICA IN FORO - DOWN-HOLE - (*Energizzazione onde Vp a sinistra e onde Vs a destra*)



INDAGINE SISMICA – PROVA HVSR



	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

2 RILIEVI TOMOGRAFICI ELETTRICI

I profili tomografici elettrici sono stati acquisiti mediante il posizionamento di n. 57 (BR-L3 e BR-L4), n. 66 (BR-L2) e n.96 (BR-L5) elettrodi con spaziatura di 5.0m pari ad uno sviluppo lineare rispettivamente di 280.0, 325.0 e 475.0 m; le ubicazioni planimetriche sono riportate negli elaborati grafici **PROGR. 001** in scala 1:2.000 e **PROGR. 002** in scala 1:5.000.

La Fig. 4 visualizza le tracce dei profili tomografici elettrici su foto aerea.



Fig. 4 - Ubicazione profili tomografici elettrici su foto aerea.

2.1 Tomografia elettrica / Metodologia

La metodologia “geoelettrica” rappresenta uno dei metodi geofisici storicamente più utilizzati per la ricostruzione delle strutture presenti nel sottosuolo con particolare riferimento alle tematiche legate alla caratterizzazione delle diverse formazioni geolitologiche.

I recenti sviluppi dell’elettronica e delle procedure di acquisizione dati gestite via software, hanno consentito di applicare questa metodologia, un tempo lenta e laboriosa, ai più disparati settori dello studio del sottosuolo con tempistiche e dettaglio un tempo impensabili.

2.2 Cenni teorici

Il parametro di base è la “resistività elettrica”, proprietà fisica che esprime la “resistenza” che i materiali offrono al passaggio della corrente elettrica.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

Le misure geoelettriche consentono, valutando le deformazioni del flusso di corrente indotte dalle proprietà fisiche dei materiali, di caratterizzare i materiali stessi e ricostruirne la distribuzione spaziale.

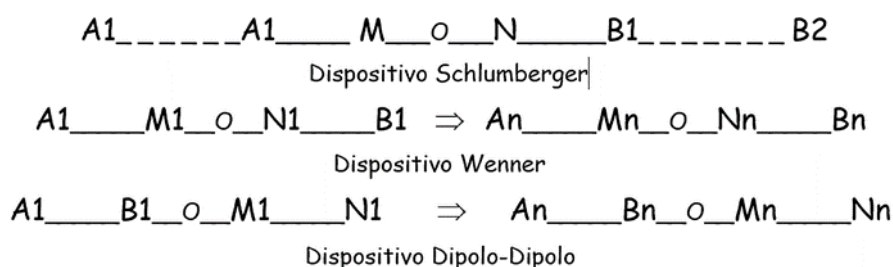
La resistività che caratterizza i materiali costituenti il sottosuolo, è determinata essenzialmente dai seguenti fattori:

- natura litologica (conducibilità intrinseca dei componenti di base);
- porosità e/o fratturazione e quindi forma, dimensione e continuità dei pori;
- percentuale di presenza di fluidi interstiziali (essenzialmente presenza di acqua);
- grado di salinità dell’acqua di saturazione;
- presenza di matrice fine.

2.3 Modalità di misura

La misura del valore di resistività elettrica dei materiali si realizza creando un campo elettrico artificiale nel mezzo oggetto dell’indagine e studiandone la distribuzione nel sottosuolo.

Il dispositivo di misura è costituito quindi da due coppie di elettrodi metallici (quadripolo) infissi sul terreno con geometrie che si differenziano in funzione del tipo di rilievo da realizzare.



Il dispositivo di misura classico è costituito quindi da due coppie di elettrodi, disposti a distanze opportune (dispositivo quadripolare), in posizioni generalmente simmetriche rispetto ad un punto centrale O, al quale si riferisce il valore di resistività misurato, ad una profondità che è funzione della interdistanza tra le due coppie di elettrodi.

La coppia (A-B) costituisce il circuito con il quale s’immette corrente nel terreno, la coppia (M-N) è il circuito di misura della differenza di potenziale generata nel terreno stesso dal passaggio della corrente.

Si misurano così le variazioni del campo elettrico, indotte dalle eterogeneità litologiche presenti nel sottosuolo; queste variazioni sono più o meno marcate in funzione del contrasto di resistività elettrica esistente fra mezzi con caratteristiche differenti.

La profondità dell’esplorazione è direttamente proporzionale alla distanza tra i due elettrodi A e B e alle caratteristiche intrinseche del mezzo esplorato.

La scelta del dispositivo più opportuno è legata alle condizioni dell’area da indagare, sia in termini strutturali sia di rapporto segnale-rumore (S/N); in questo lavoro è stata utilizzata una combinazione Wenner-Schlumberger.

L’innovazione fondamentale introdotta nell’acquisizione tomografica è rappresentata dall’utilizzo di strumentazioni digitali “multicanale” in grado di gestire automaticamente un gran numero di elettrodi che riducono largamente i tempi di acquisizione e forniscono la misura della resistività in corrispondenza di un elevato numero di punti costituenti la sezione indagata.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

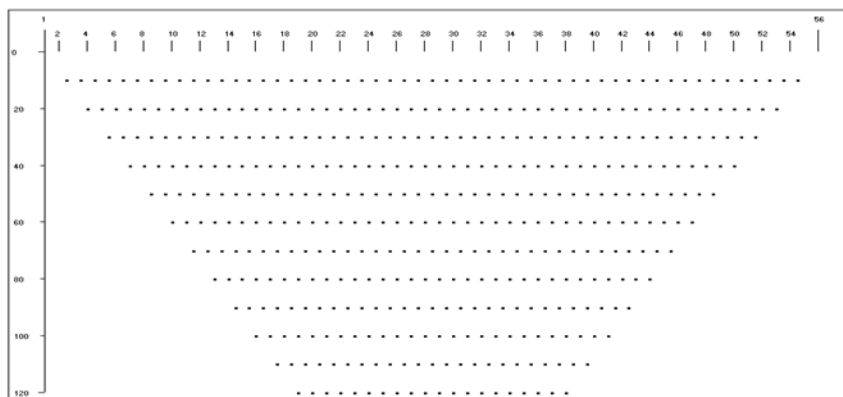


Fig. 5 - Tomografia elettrica – Esempio di distribuzione delle misure.

Grazie all’elevata densità dei punti si rende possibile, nella fase di elaborazione, l’applicazione di potenti algoritmi di “inversione” bidimensionale (2D) ricostruendo con estremo dettaglio, la sezione di resistività “vera”, definendo in particolare gli effetti delle “variazioni laterali” e quindi restituendo una rappresentazione finale largamente corrispondente alla situazione reale.

2.4 Modalità d’intervento

La capacità della tomografia elettrica di discriminare con grande dettaglio le unità di copertura, le variazioni laterali, nonché le eventuali “inversioni di resistività” (che costituiscono un grande limite per altre metodologie) rappresenta una fondamentale caratteristica del metodo. Gli elettrodi vengono disposti lungo stendimenti sulla superficie topografica, secondo lo schema rappresentato in Fig. 5. In tal caso, la profondità di esplorazione è direttamente proporzionale alla lunghezza dello stendimento, mentre il dettaglio è funzione della distanza elettrodica. Entrambe queste dimensioni rappresentano quindi un aspetto fondamentale per la progettazione dell’intervento. In genere le indagini sono volte all’esplorazione secondo sezioni bidimensionali (2D) ma è possibile intervenire con modalità tridimensionale (3D) sia in acquisizione sia in elaborazione. È inoltre possibile l’elaborazione 3D sulla base di una geometria di acquisizione 2D.

I dati sono stati acquisiti tramite un georesistivimetro digitale del tipo AMBROGEO MANGUSTA SYSTEM MC 96/E (Fig. 6), in grado di gestire fino a 96 elettrodi singolarmente indirizzabili secondo le diverse configurazioni elettrodiche. Lo strumento è costituito da una Centralina hardware di controllo, da un Laptop che gestisce il processo di misura, da unità periferiche (elettrodi passivi, cavi impermeabili e picchetti metallici) e da moduli esterni di energizzazione.



Fig. 6 - Georesistivimetro digitale.

La principale innovazione introdotta dalla strumentazione utilizzata è rappresentata dalla gestione totalmente automatizzata delle misure che si realizza attraverso l’invio alternato della corrente agli elettrodi e misurata la differenza di potenziale, secondo una sequenza pre-programmata. È quindi possibile l’acquisizione in tempi brevi di un elevato numero di punti.

	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A



Fig. 7 – Elettrodo passivo.

2.5 Acquisizione dati

L’acquisizione automatica dei dati garantisce, come accennato, un’elevata velocità di esecuzione. In tale situazione per la miglior qualità dei dati è di fondamentale importanza un “layout” ottimale della linea degli elettrodi.

Una volta verificato il layout e iniziata la serie di misure, che procede automaticamente, è possibile proseguire con il successivo layout di elettrodi lungo il profilo che consente di realizzare l’acquisizione in continuo secondo la procedura definita del “roll-along”.

Ogni misura di resistività viene effettuata con una ripetizione del ciclo “+--+” di cui viene calcolato il valore della **deviazione standard**.



2.6 Elaborazione dati

L’elaborazione dei dati segue il seguente schema:

- editing per l’individuazione e rimozione dei valori caratterizzati da un errore elevato (deviazione standard > 2%);
- ricostruzione della sezione di pseudoresistività apparente misurata;
- definizione delle dimensioni della griglia da utilizzare per l’inversione 2D;
- inversione 2D e la ricostruzione della sezione di resistività tramite iterazioni successive condotte sulla base del confronto delle pseudosezioni di resistività misurata e calcolata.

I passi indicati sono sviluppati tramite l’utilizzo dei seguenti pacchetti software:

- RES2DINV 4.9
 Programma che, dai dati di resistività apparente calcolata e utilizzando la tecnica di inversione “*smoothness-constrained least-squares*”, produce un modello bidimensionale di resistenza reale vs profondità. Il programma è stato ottimizzato per essere utilizzato con “data set” di grandi dimensioni acquisiti secondo le configurazioni Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, polo-polo, polo-dipolo, ecc.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

Tramite questo programma è inoltre possibile effettuare le adeguate correzioni topografiche. Unitamente al programma RES2DMOD costituisce un avanzato pacchetto di “inversione” e “modeling” bidimensionale. Il programma permette all’utente di selezionare i migliori parametri d’inversione per ogni particolare set di dati.

Sono forniti tre differenti variazioni del metodo “*least-squares*”: uno molto veloce “quasi Newton”, uno più lento ma più accurato “Gauss-Newton” e una tecnica ibrida mediamente veloce che include i vantaggi di entrambe i metodi precedenti.

- **GOLDEN SOFTWARE – SURFER**

Software utilizzato per la rappresentazione dei dati acquisiti tramite curve ad isovalore (contouring) di resistività.

Le sezioni di resistività ottenute, vengono inoltre visualizzate in modalità 3D attraverso il pacchetto software EVS (Earth Volumetric Studio) della C Tech. Il risultato di tale elaborazione viene riportato nell’elaborato grafico **PROGR. 002** e come estratto nelle Fig. 12 e Fig. 13.

2.7 Analisi dei dati

Le procedure di lavoro descritte hanno consentito di acquisire dati di un elevato livello qualitativo e pertanto il successivo processo di inversione per l’elaborazione delle sezioni finali, ha raggiunto livelli minimi di scostamento tra dati acquisiti e modello teorico.

Le sezioni allegate (**PROGR. 002** - scala 1:1000), nelle quali, tramite le diverse gradazioni di colore, sono state rappresentate le distribuzioni dei valori di resistività elettrica, mostrano il migliore modello bidimensionale possibile e consentono di evidenziare la presenza di differenti unità geofisiche ed i loro rapporti stratigrafici.

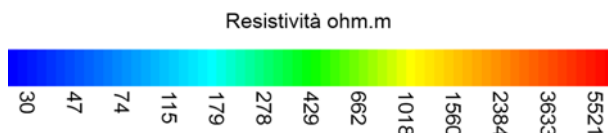


Fig. 8 – Scala colorimetrica dei valori di resistività elettrica.

2.7.1 Zona Varna

Le sezioni tomografiche geoelettriche acquisite in prossimità del tracciato di progetto, sono illustrate con sequenza da Sud-Ovest a Nord Est.

2.7.1.1 Profilo BR-L5

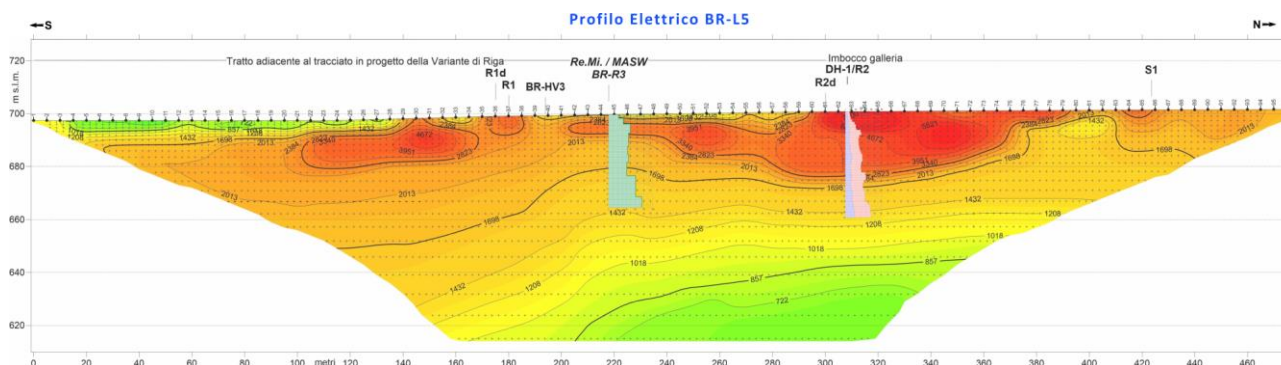


Fig. 9 – Sezione tomografica elettrica BR-L5.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

Nel tratto indagato l’elaborazione dei dati di resistività acquisiti permette di evidenziare una successione elettrostratigrafica nel complesso piuttosto omogenea e regolare. Nel dettaglio si osserva la sovrapposizione di due unità principali suborizzontali.

Si definisce un’unità superiore caratterizzata da valori di resistività elettrica superiori a 1000 ohm.m (colore giallo - arancione - rosso), riferibile a materiali di origine fluvio - glaciale di natura prevalentemente grossolana. Tale unità nel settore centro-meridionale si sviluppa per tutta la profondità d’indagine, mentre si riduce mediamente fino a profondità di almeno - 50.0 m dal p.c. dopo la progr. 210 m.

Nel settore centro-settentrionale si registra un decremento dei valori di resistività elettrica compresi tra 1000 e 700 ohm.m (colore verde), riferibile ad una possibile transizione a depositi fluvioglaciali caratterizzati nella porzione basale da una maggiore presenza di litologie fini.

2.7.1.2 Profilo BR-L4

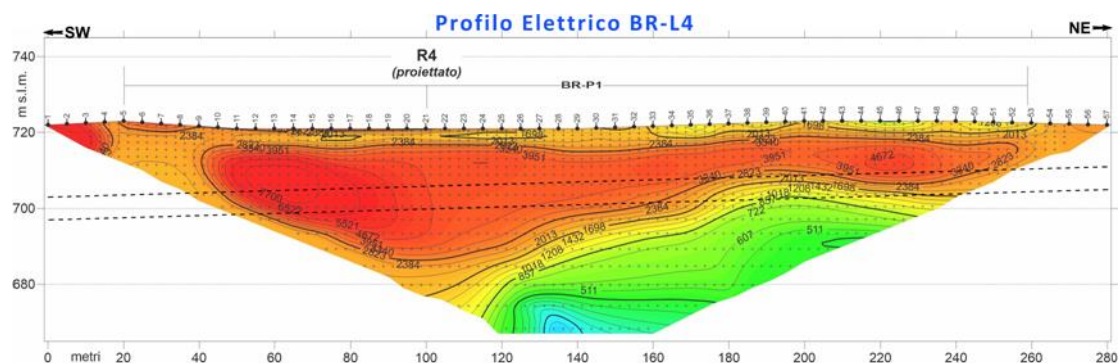


Fig. 10 – Sezione tomografica elettrica BR-L4.

L’elaborazione dei dati di resistività acquisiti evidenziano una serie elettrostratigrafica caratterizzata da n.2 unità differenti:

- Unità superficiale resistiva (colore giallo-arancione) caratterizzata da valori di resistività superiori a 1000 ohm, riferibili ai materiali di origine fluvio-glaciale di natura prevalentemente grossolana; si estende con continuità lungo tutto il tratto indagato con spessori variabili da un massimo > 40.0m nel settore meridionale ad un minimo dell’ordine di 20.0-25.0m nel settore settentrionale;
- Unità mediamente resistiva (colore verde) caratterizzata da valori di resistività compresi tra 200 e 800 ohm.m. In particolare i valori inferiori a 500 ohm.m sono verosimilmente rappresentativi del passaggio a materiali ricchi nella frazione fine; i valori tra 500 e 800 ohm.m sono riferibili a caratteristiche intermedie tra le due unità.

2.7.1.3 Profilo BR-L2

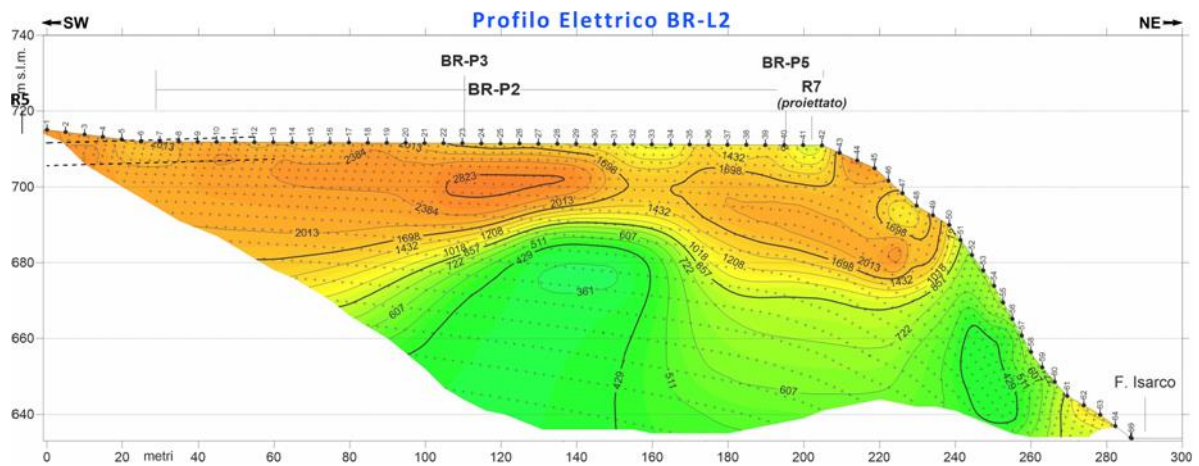


Fig. 11 – Sezione tomografica elettrica BR-L2.

L’elaborazione dei dati di resistività acquisiti evidenziano una serie elettrostratigrafica caratterizzata da n.2 unità differenti:

- Unità superficiale resistiva (colore giallo-arancione) caratterizzata da valori di resistività superiori a 1000 ohm estesa mediamente per 25.0/30.0m di spessore, riferibile ai materiali di origine fluvio-glaciale di natura prevalentemente grossolana;
- Unità mediamente resistiva (colore verde) caratterizzata da valori di resistività compresi tra 400 e 800 ohm.m. In particolare in corrispondenza della scarpata di versante (dx orografica del F. Isarco) si registra la presenza del substrato con valori di resistività inferiori a 700 ohm.m.

Per una visione d’insieme dei modelli descritti è stata elaborata una rappresentazione 3D, visibile in Fig. 12 e Fig. 13.

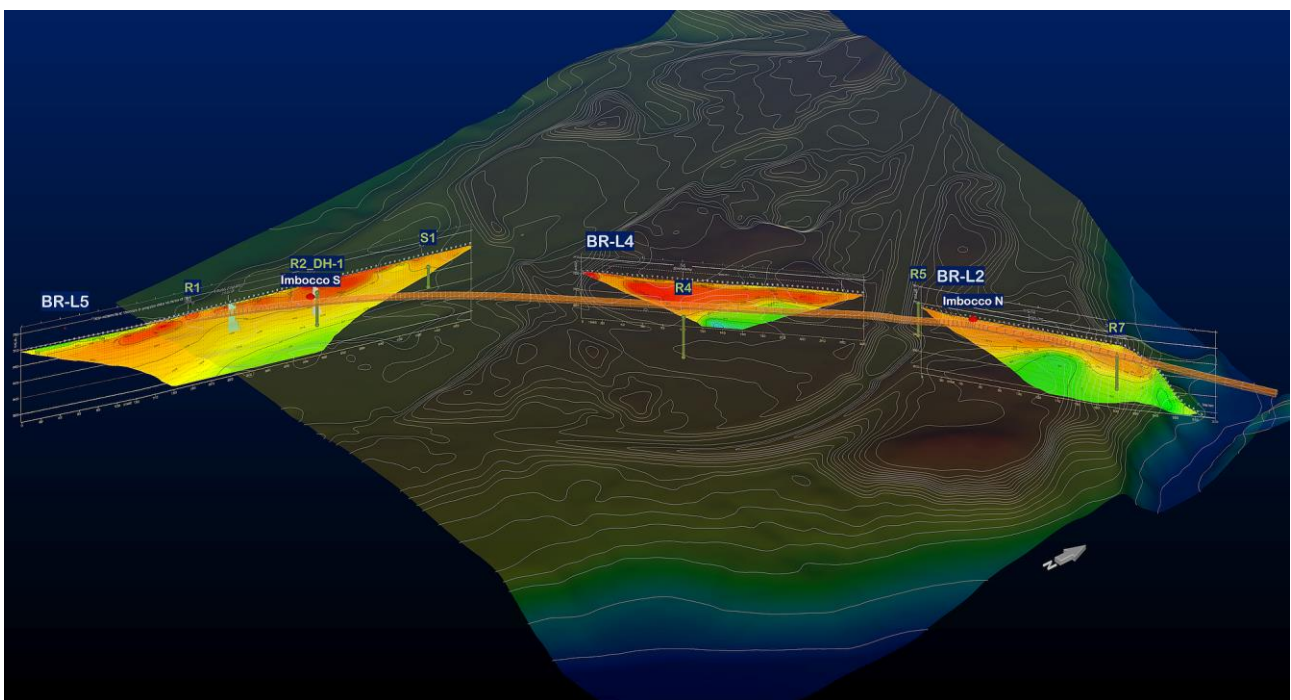


Fig. 12 – Vista 3D da Sud-Est delle sezioni elettriche BR-L2, BR-L4 e BR-L5, con ubicazione dei sondaggi geognostici eseguiti, andamento del tracciato (in arancione) e imbocchi della galleria della Variante di Riga in progetto.

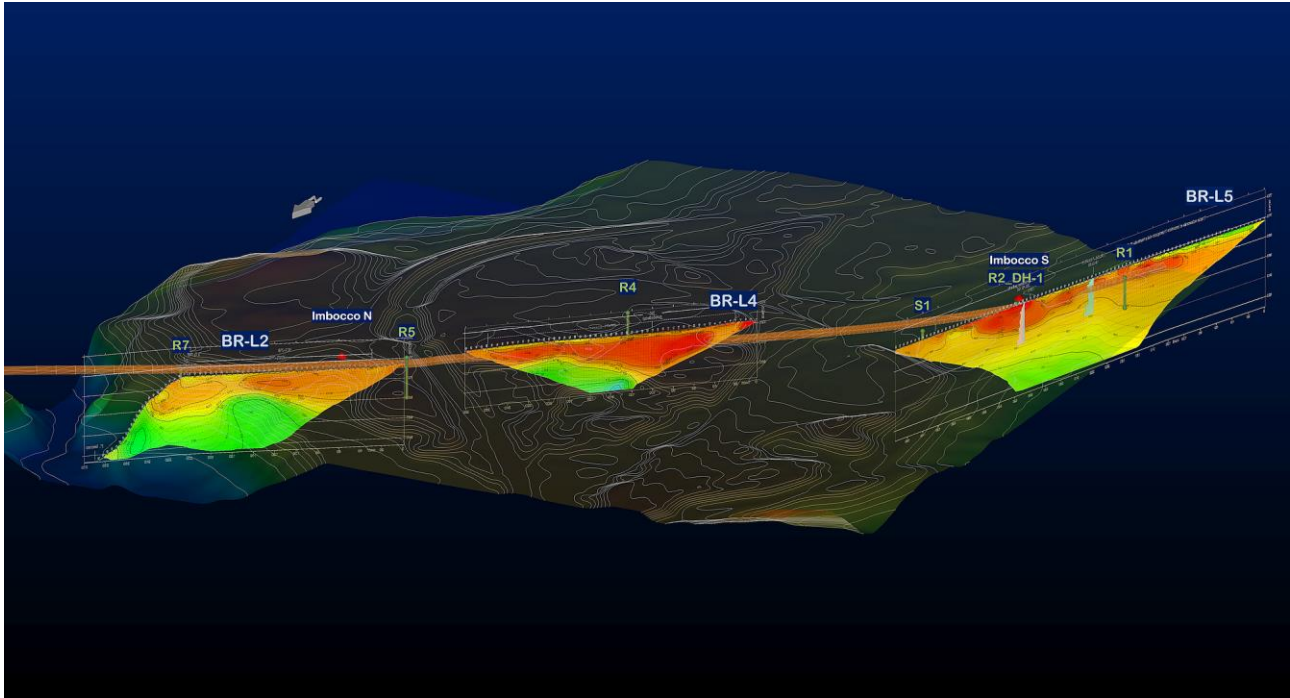


Fig. 13 – Vista 3D da Nord-Ovest delle sezioni elettriche.

2.7.2 Zona Naz-Sciaves

2.7.2.1 Profilo BR-L3

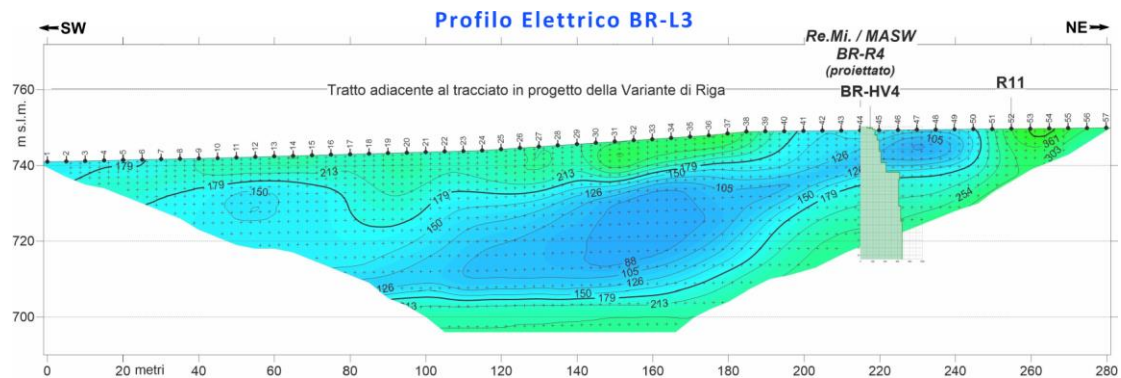


Fig. 14 – Sezione tomografica elettrica BR-L3.

L'elaborazione dei dati di resistività acquisiti evidenziano una serie elettrostratigrafica nel complesso piuttosto omogenea con valori di resistività medio-bassi compresi tra 90 e 250 ohm.m, verosimilmente rappresentativi di litologie medie prevalenti (sabbie ghiaiose) lungo tutto il tratto indagato. Incrementi dei valori di resistività imputabili ad una maggiore presenza della frazione grossolana e/o di blocchi litoidi si registrano nel settore centrale a profondità superiori a 30.0m e più superficialmente nel settore settentrionale mentre i valori minimi si registrano mediamente a - 10.0/15.0m di profondità dal p.c., e direttamente a partire dal p.c. tra le progr 200 - 240 m.

3 INDAGINI SISMICHE MASW / RE.MI.

Per la determinazione del parametro $V_{s_{eq}}$ e la classificazione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle NTC 2018 sono state eseguite n.6 prove sismiche di tipo MASW/Re.Mi., denominate con sigla da **BR-R3** a **BR-R8**; le ubicazioni planimetriche sono riportate nell’elaborato grafico PROGR. **001** in scala 1:2.000.

La Fig. 15 visualizza su foto aerea, le tracce delle prove MASW/Re.Mi con il punto centrale rappresentativo del volume di terreno investigato.



Fig. 15 - Inquadramento territoriale delle prove MASW/Re.Mi..

L’ubicazione di dettaglio su foto aerea delle prove sismiche è riportata in **allegato 1** “SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE e LOG VELOCITÀ ONDE V_s Masw / Re.Mi.

3.1 MASW / Re.Mi. – Riferimento normativo (NTC 2018, DM 17/01/2018)

La normativa D.M. 14.01.08 “Norme tecniche per le costruzioni”, aggiornata con D.M. del 17 gennaio 2018, indica che ai fini della definizione dell’azione sismica di progetto (punto 3.2.2), deve essere valutata l’influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto del suolo in superficie, mediante studi specifici di risposta sismica locale.

In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s), ottenuti mediante specifiche prove geofisiche.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad [3.2.1]$$

con:

- h_i spessore dell'*i*-esimo strato;
- $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano d'imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano d'imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

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

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>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.</i>
D	<i>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.</i>
E	<i>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.</i>

	LINEA VERONA – BRENNERO E LINEA FORTEZZA – SAN CANDIDO NUOVO COLLEGAMENTO FERROVIARIO “VARIANTE VAL DI RIGA” VARIANTE DI RIGA					
	REPORT INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA IB0H	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 00 05 004	REV. A

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

3.2 Stendimenti sismici con metodo “MASW” e “Re.Mi.” cenni metodologici

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica d’indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi e ciò limita i costi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d’onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d’onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi danno informazioni sulla parte più profonda del suolo. Il metodo d’indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J.1999) o in una combinazione di entrambi.

Nel metodo attivo, utilizzato nell’indagine, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori.

Nel metodo passivo lo stendimento dei sensori può essere sia lineare che circolare e si misura il rumore ambientale di fondo esistente. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo. Il metodo passivo in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa tra 0 Hz e 10Hz, quindi dà informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50m, in funzione della rigidità del suolo.

L’elaborazione dei dati con il metodo MASW prevede tre fasi di lavoro:

1. la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale;
2. la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica,
3. la terza ed ultima fase consiste nell’individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità delle onde di taglio V_s e di compressione V_p (o in maniera alternativa alle velocità V_p è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio verticali possono essere individuati con procedura manuale o con procedura automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello, il coefficiente di Poisson, la densità di massa ρ e si variano lo spessore h e la velocità V_s degli strati.

Nella procedura manuale l'utente assegna per tentativi diversi valori delle velocità V_s e degli spessori h , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale. Nella procedura automatica la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l'errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l'errore relativo, tra curva sperimentale e curva numerica è compresa tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio V_s e quindi il tipo di suolo sismico conseguente rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

La tecnica di prospezione “Refraction Microtremor“ (Re.Mi.), utilizzata nell'ambito di questo progetto, capovolge il concetto comune del parametro “segnale-disturbo”, per il quale tradizionalmente il primo (segnale) ha necessità di essere rilevato in condizioni favorevoli quindi in assenza o scarsità di rumore. Viceversa, in presenza di forte rumore di fondo (es. ambiente urbano), le tradizionali rilevazioni sismiche hanno sempre trovato una condizione di difficile applicazione a causa della difficoltà di discriminare il segnale dal rumore.

Con questa nuova tecnica, il disturbo, il “noise” ambientale diventa il segnale utilizzato per la caratterizzazione sismica. Sono i microtremori (rumore di fondo generato dal traffico stradale, ferroviario e comunque il rumore presente costantemente in ambito urbanizzato) a costituire la sorgente di energia utile allo scopo.

Numerose sperimentazioni hanno consentito di appurare che le registrazioni del rumore di fondo ambientale, effettuate con uno stendimento sismico normalmente utilizzato per la sismica a rifrazione, possono essere utilizzate, con opportune procedure di acquisizione ed elaborazione, per stimare la velocità delle onde di taglio (V_s) fino a profondità che possono essere superiori a 100m. La metodologia d'indagine più applicata per la determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio V_s , è stata proposta e sperimentata da J.N.Louie del Seismological Laboratory and Dept. of Geological Sciences dell'Università del Nevada, ed è basata su due aspetti fondamentali:

- uno pratico, rappresentato dal fatto che alcuni sistemi di acquisizione di sismica a rifrazione (con dinamica a 24bit) sono in grado di registrare onde di superficie con frequenze fino a 2 Hz per intervalli di tempo sufficientemente lunghi (almeno 10 sec);
- uno teorico, sulla base del quale una semplice trasformata bidimensionale (p-f) slowness-frequency della registrazione di un rumore di fondo (microtremor) è in grado di separare le onde di Rayleigh (onde di superficie) da altri tipi di onde che compongono il sismogramma, rendendo possibile il riconoscimento delle vere velocità di fase dalle velocità apparenti.

3.3 Modalità esecutive dell'indagine

In considerazione delle particolari condizioni logistiche locali, per poter definire con una discreta certezza il dato medio di V_{seq} , si è proceduto ad acquisire sia profili sismici di tipo “MASW” che “Re.Mi.” impiegando geofoni da 4.5Hz e acquisitori digitali a 24 canali della Geometrics tipo “Geode” con dinamica a 24bit.

Per quanto riguarda le prove sismiche attive MASW sono state effettuate molteplici registrazioni energizzando agli estremi dello stendimento sismico (minimo n.3 per estremo) a distanze diverse dal geofono iniziale o finale; i film e gli spettri delle registrazioni, effettivamente utilizzate per il “processing”, sono riportati in **All.1**.

Per le prove sismiche passive (Re.Mi.) in ogni punto d'indagine sono state effettuate molteplici acquisizioni con l'intento di ottenere statisticamente un migliore dato da processare, in **All.1** nella pagina “Prova Masw/Re.Mi. - ...” è graficizzato lo “spettro medio” ottenuto dall'elaborazione congiunta delle singole registrazioni. In questa stessa pagina è riportato anche lo “spettro medio” delle prove MASW acquisite secondo lo schema descritto precedentemente.

3.4 Elaborazione dati

I dati della prova “MASW” sono stati elaborati con il software “WinMasw – Eliosoft”.



Per la metodologia “Re.Mi.” per l’elaborazione dei dati si è utilizzato il pacchetto software SeisOpt Re.Mi. 5.0 prodotto dalla Optim Software LLC.



Come prima fase è stata eseguita un’analisi spettrale di più sismogrammi che ha consentito di elaborare un’immagine della distribuzione media del segnale di velocità sismica in funzione delle diverse frequenze che lo compongono. Da tale elaborazione è stata estrapolata la curva di attenuazione del segnale caratteristico e in funzione del suo andamento (curva di dispersione) si è risaliti alla stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio (V_s). Il risultato finale dell’elaborazione è consistito, quindi, nella rappresentazione grafica del profilo di velocità.

La velocità delle onde di taglio, essendo legata alle caratteristiche dello scheletro del materiale, costituisce un parametro di grande rilevanza per la definizione delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali. Risulta evidente che a velocità elevate corrispondono materiali con buone caratteristiche geomeccaniche, viceversa a bassi valori corrispondono materiali con scadenti caratteristiche geotecniche.

La tabella seguente sintetizza i valori di V_{s30} calcolati e conseguente categoria di suolo sismico:

Sigla Prova	V_{s30} (m/sec)	Categoria suolo
BR-R3	443	B
BR-R4	455	B
BR-R5	467	B
BR-R6	487	B
BR-R7	401	B
BR-R8	509	B

3.5 Documentazione fotografica dell’attività di registrazione



Fig. 16 - Stendimento sismico ed energizzazione per registrazione MASW / Re.Mi..



Fig. 17 – Particolare energizzazione Prova MASW.

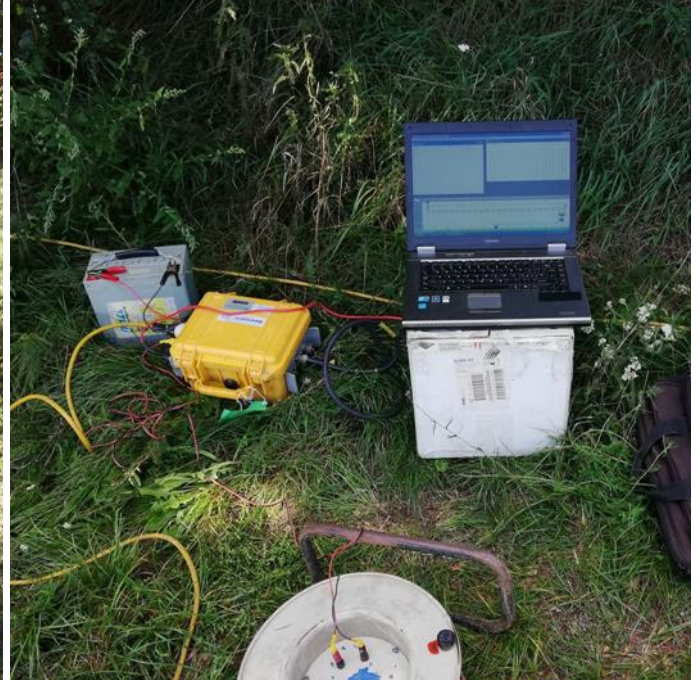


Fig. 18 - Attrezzatura di registrazione.

ALLEGATO 1
SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE
LOG VELOCITÀ ONDE V_s (MASW / Re.Mi.)

e

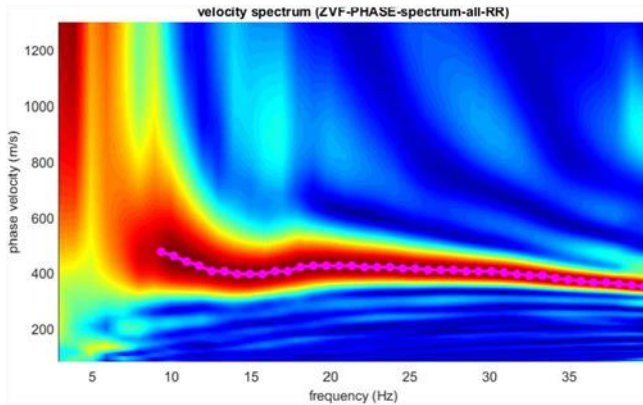
REGISTRAZIONI / SPETTRI
PROVE MASW

BR-R3 / BR-R4 / BR-R5 /

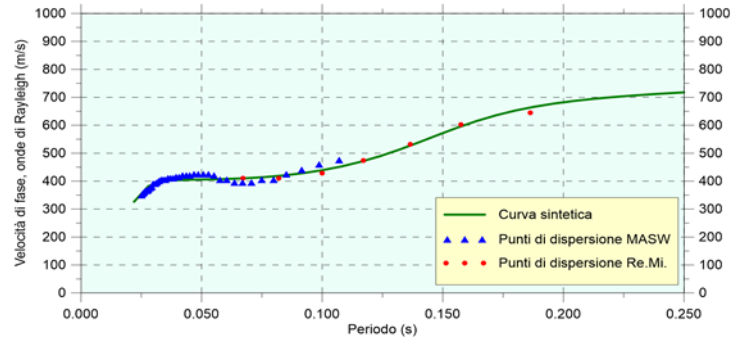
BR-R6 / BR-R7 / BR-R8

Prova Masw/Re.Mi. – BR-R3

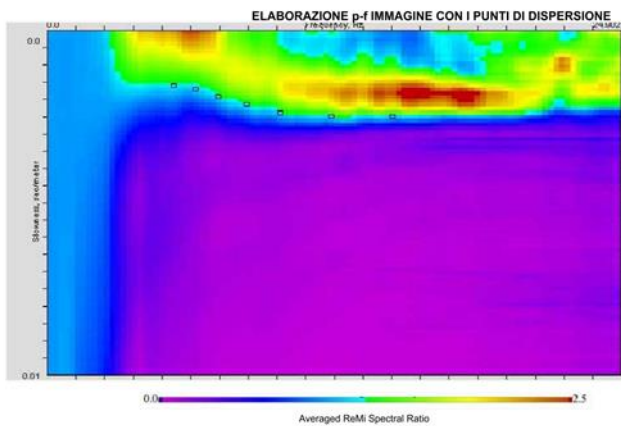
PROVA MASW - Spettro medio



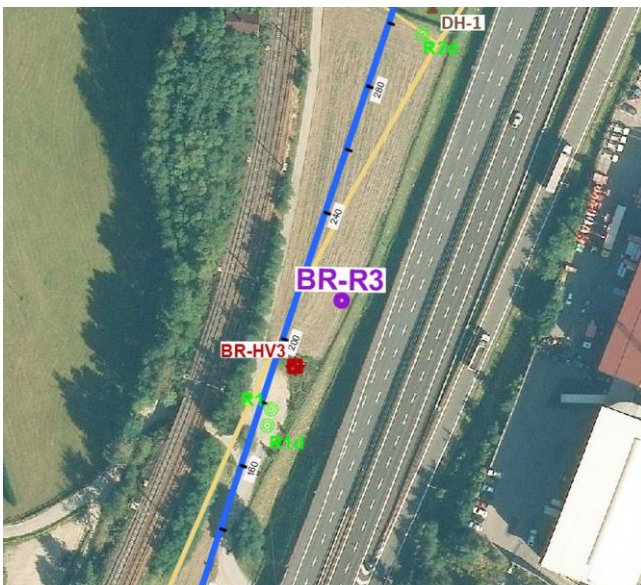
CURVA DI DISPERSIONE



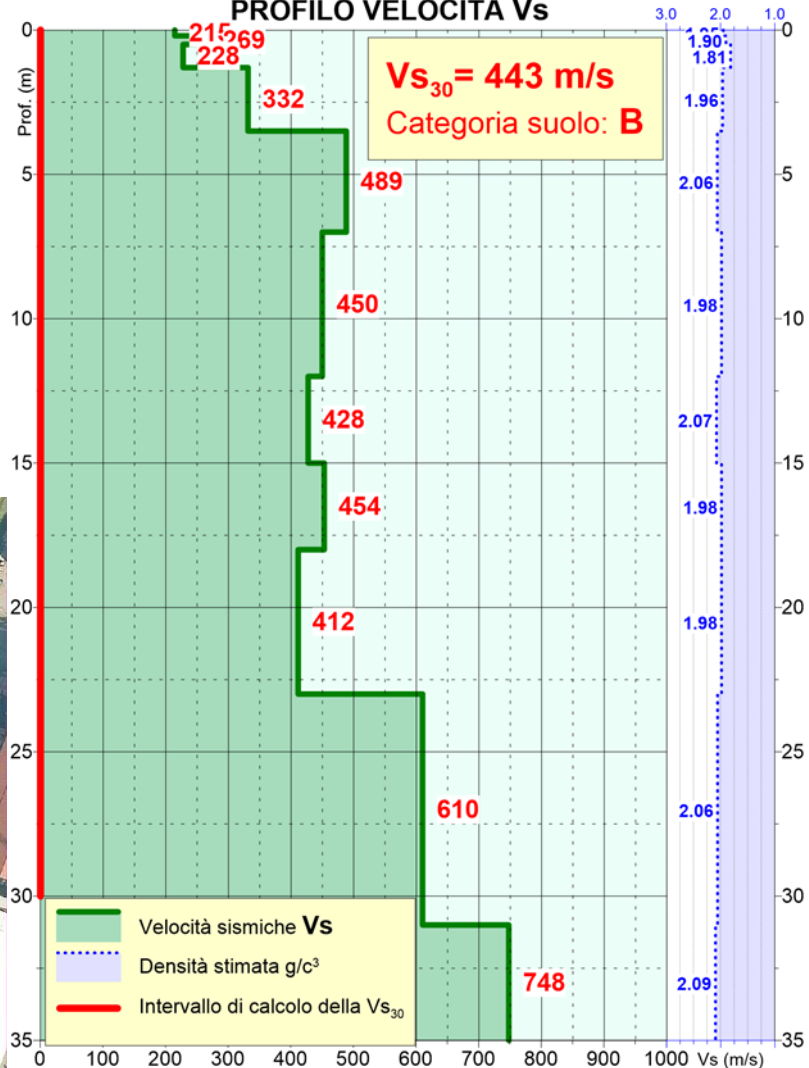
PROVA REMI - Spettro medio



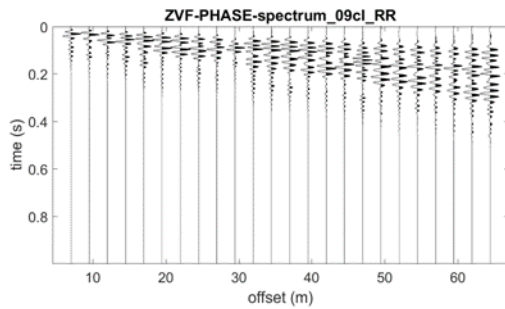
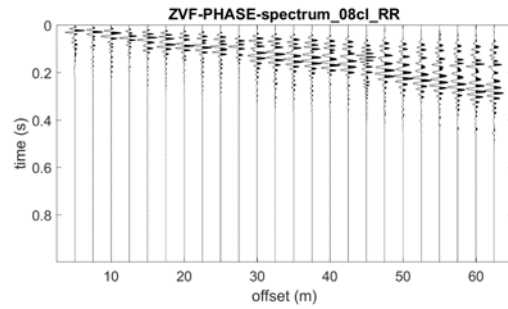
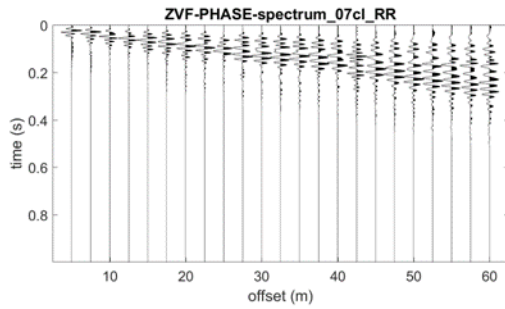
Ubicazione prova



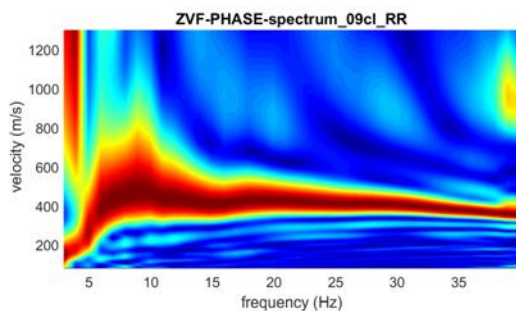
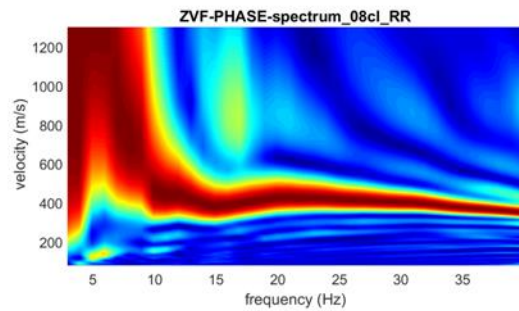
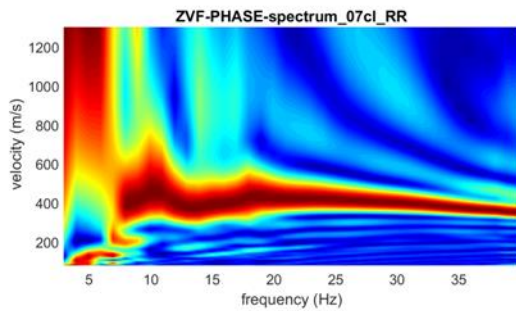
PROFILO VELOCITÀ Vs



Prova Masw – Acquisizioni elaborate per BR-R3



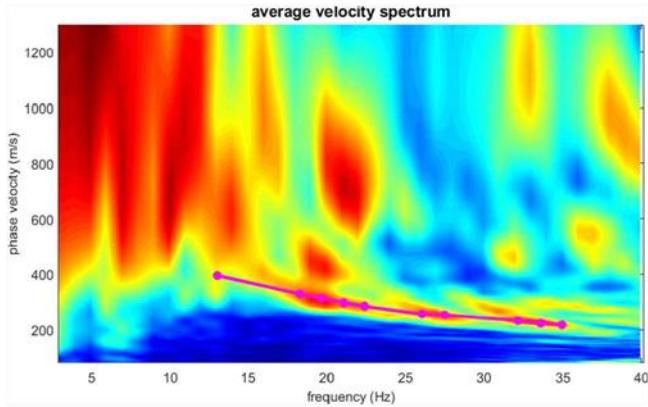
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



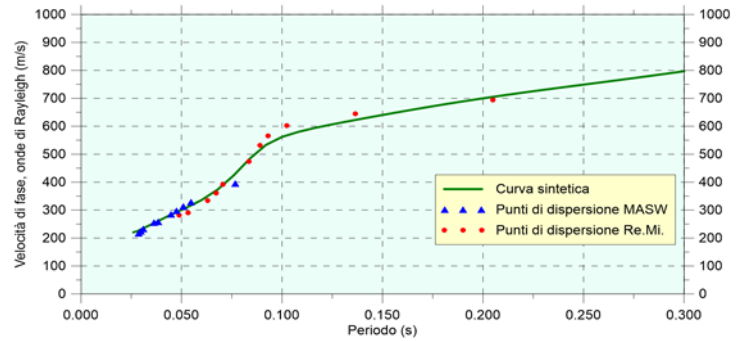
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio.

Prova Masw/Re.Mi. – BR-R4

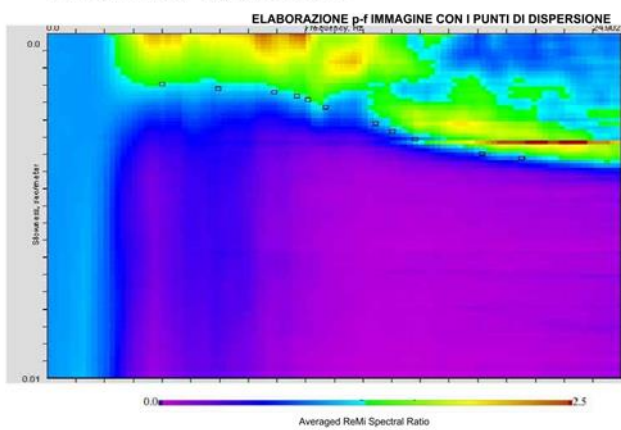
PROVA MASW - Spettro medio



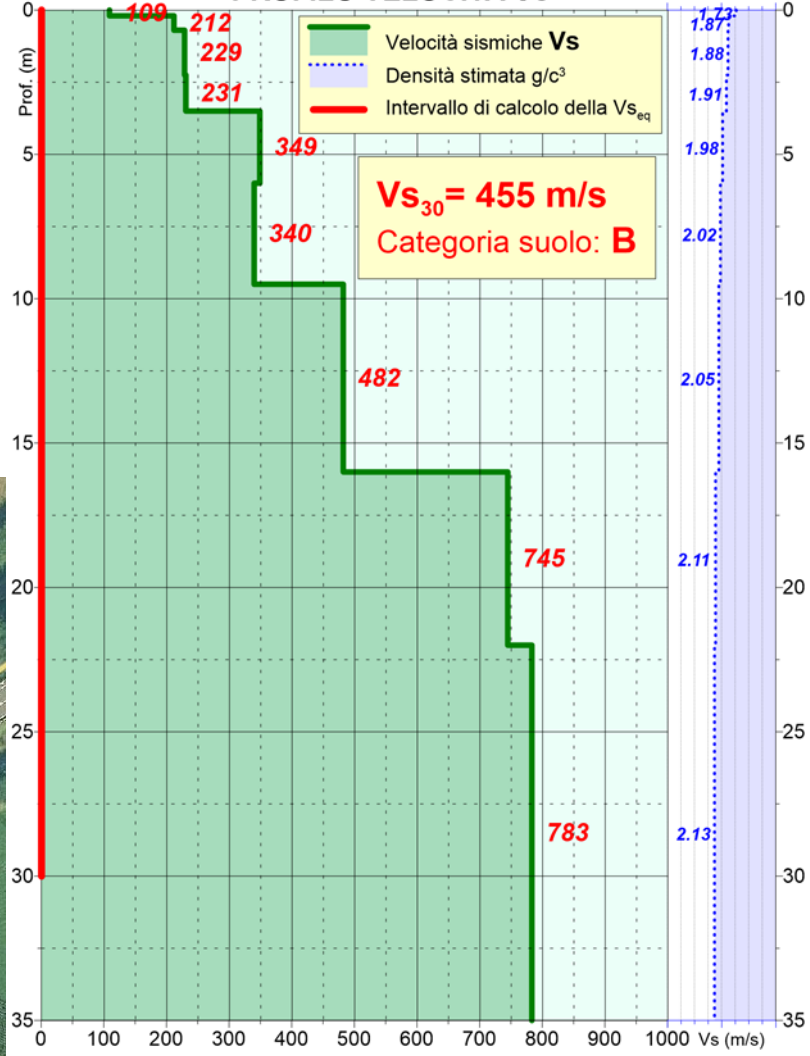
CURVA DI DISPERSIONE



PROVA REMI - Spettro medio



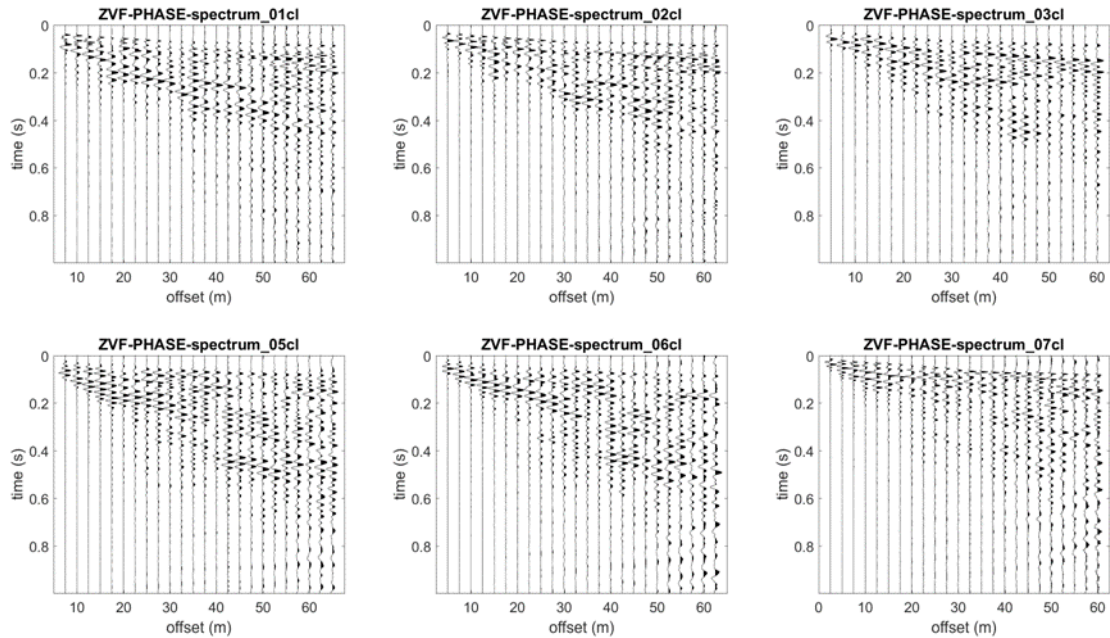
PROFILO VELOCITÀ Vs



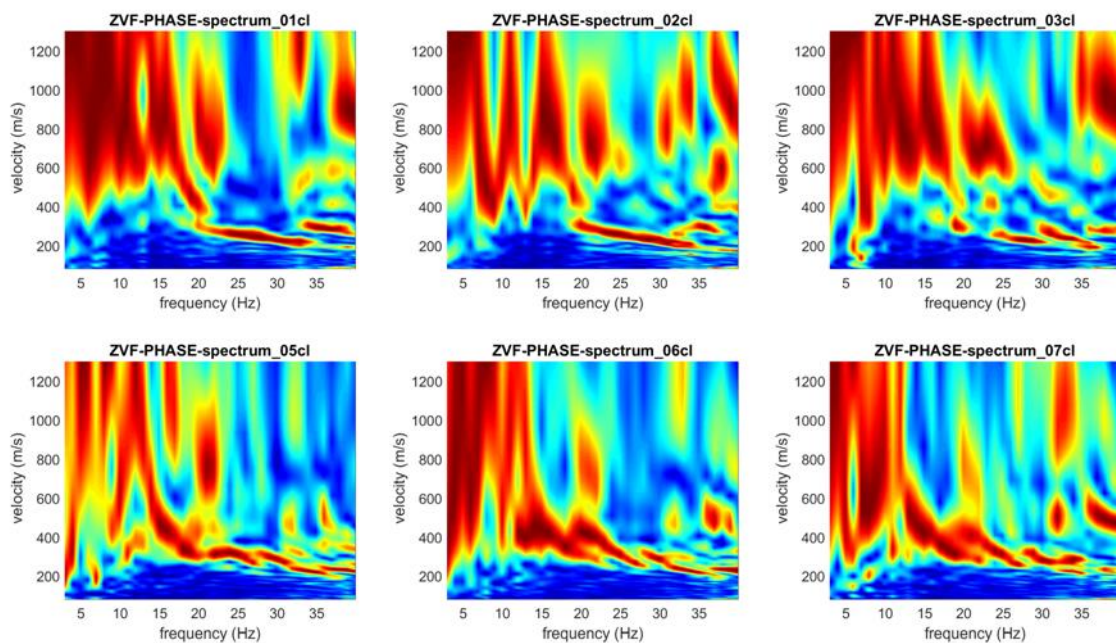
Ubicazione prova



Prova Masw – Acquisizioni elaborate per BR-R4



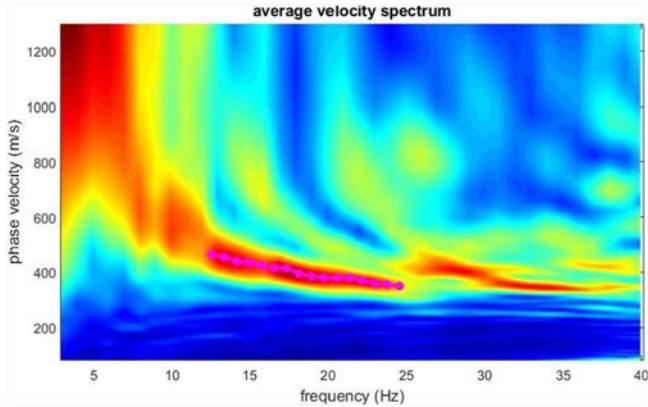
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



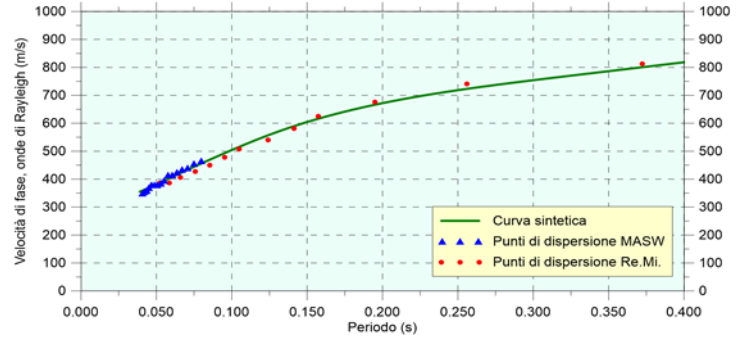
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio.

Prova Masw/Re.Mi. – BR-R5

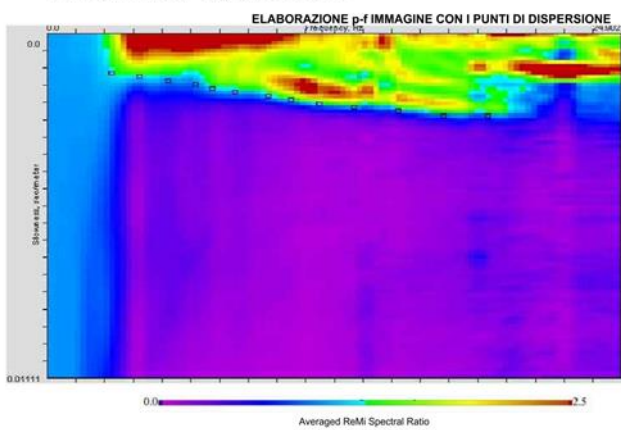
PROVA MASW - Spettro medio



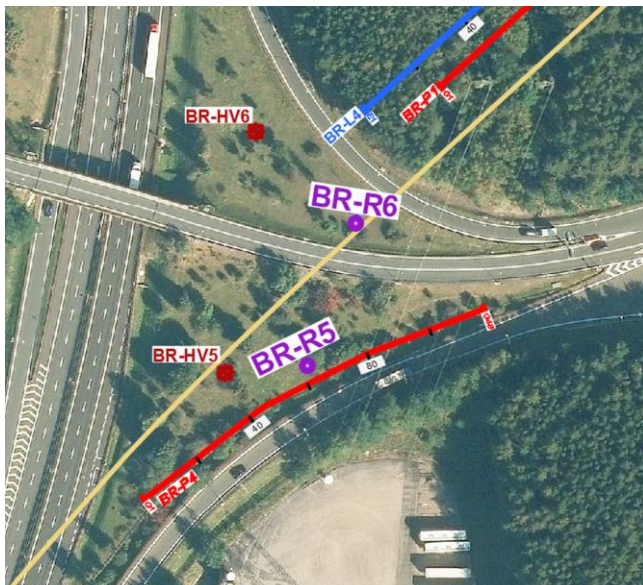
CURVA DI DISPERSIONE



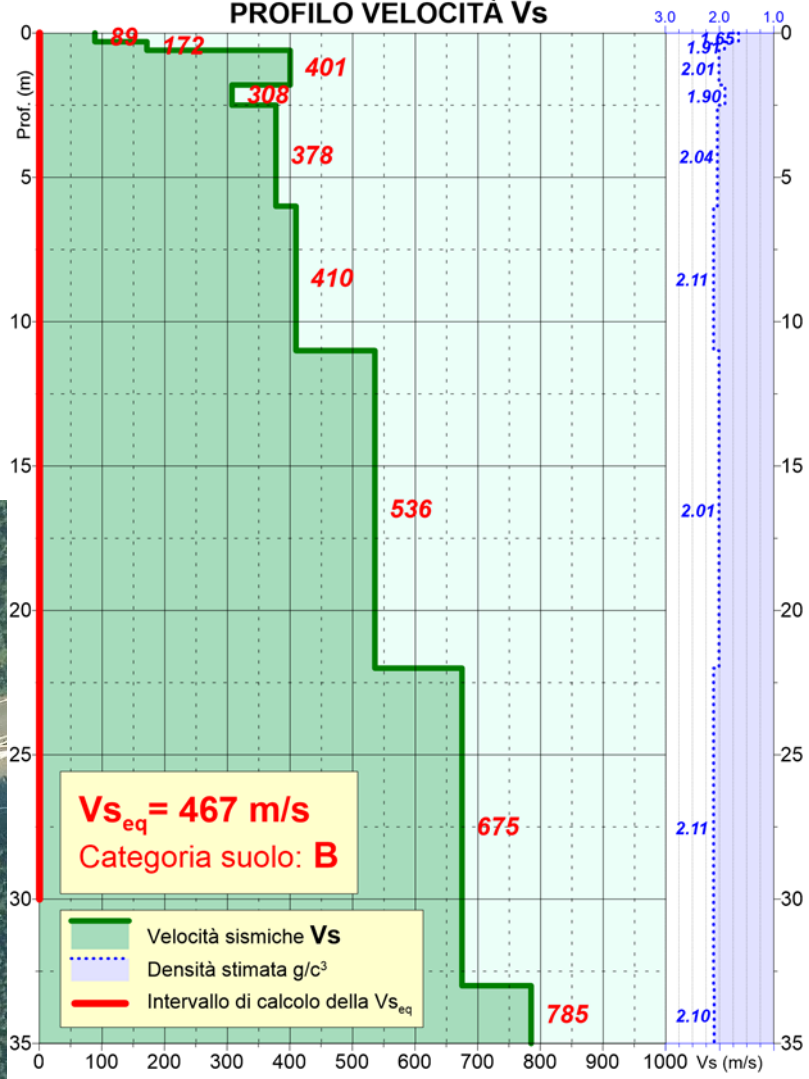
PROVA REMI - Spettro medio



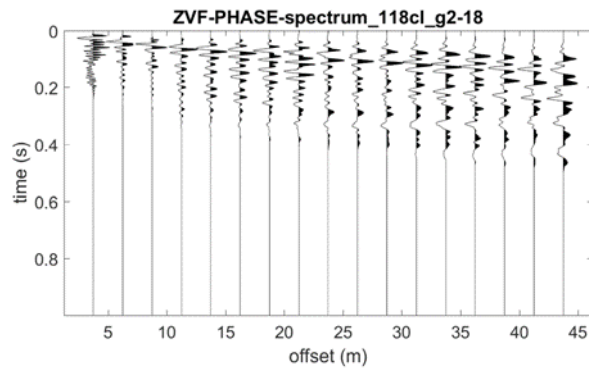
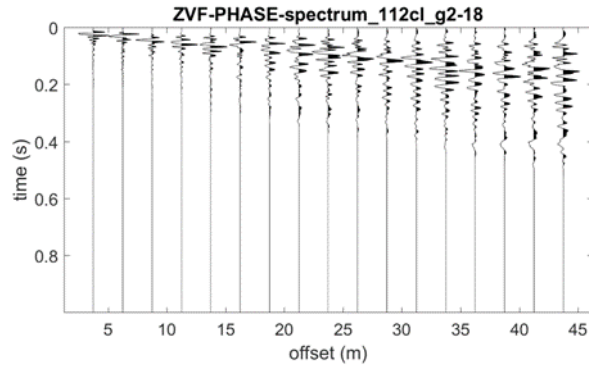
Ubicazione prova



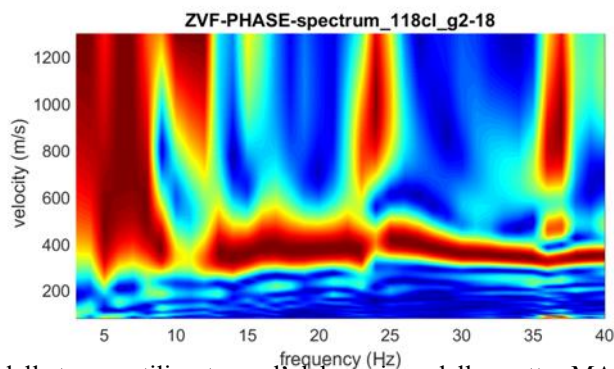
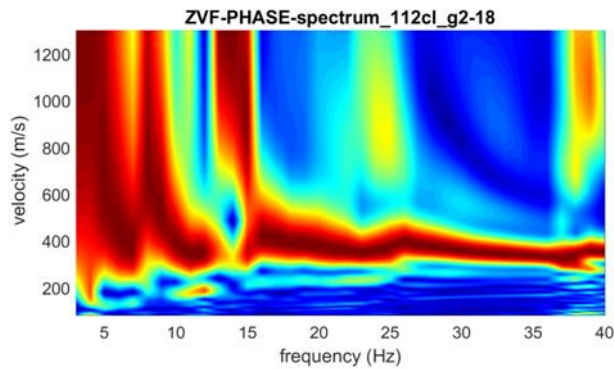
PROFILO VELOCITÀ Vs



Prova Masw – Acquisizioni elaborate per BR-R5



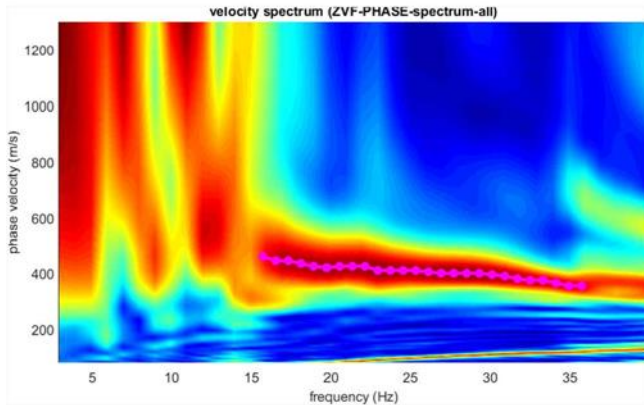
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



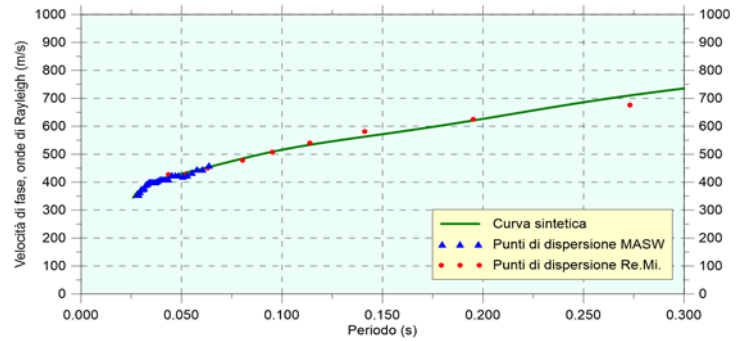
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio.

Prova Masw/Re.Mi. – BR-R6

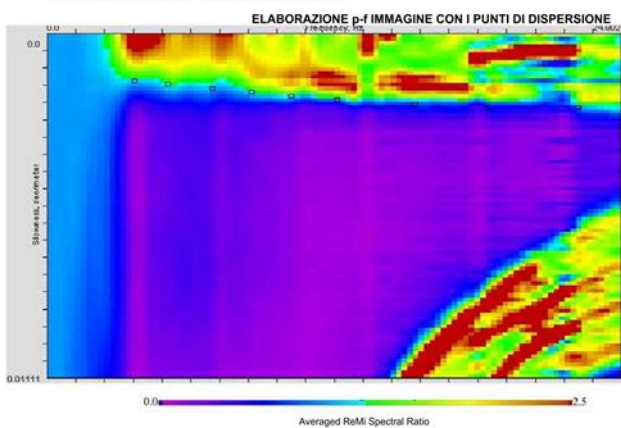
PROVA MASW - Spettro medio



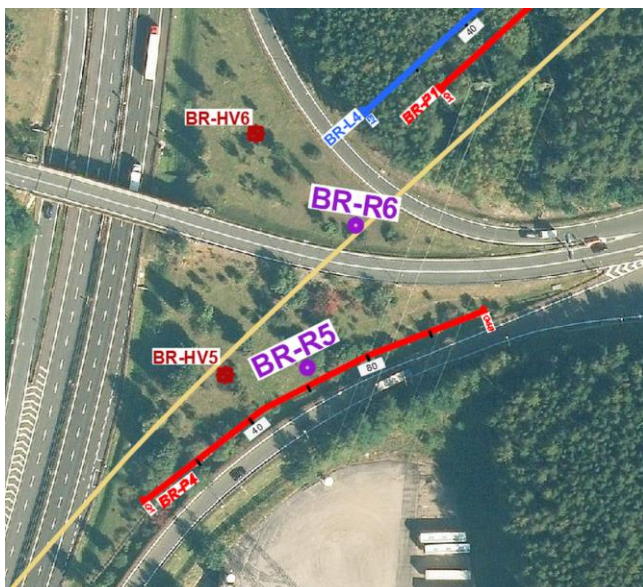
CURVA DI DISPERSIONE



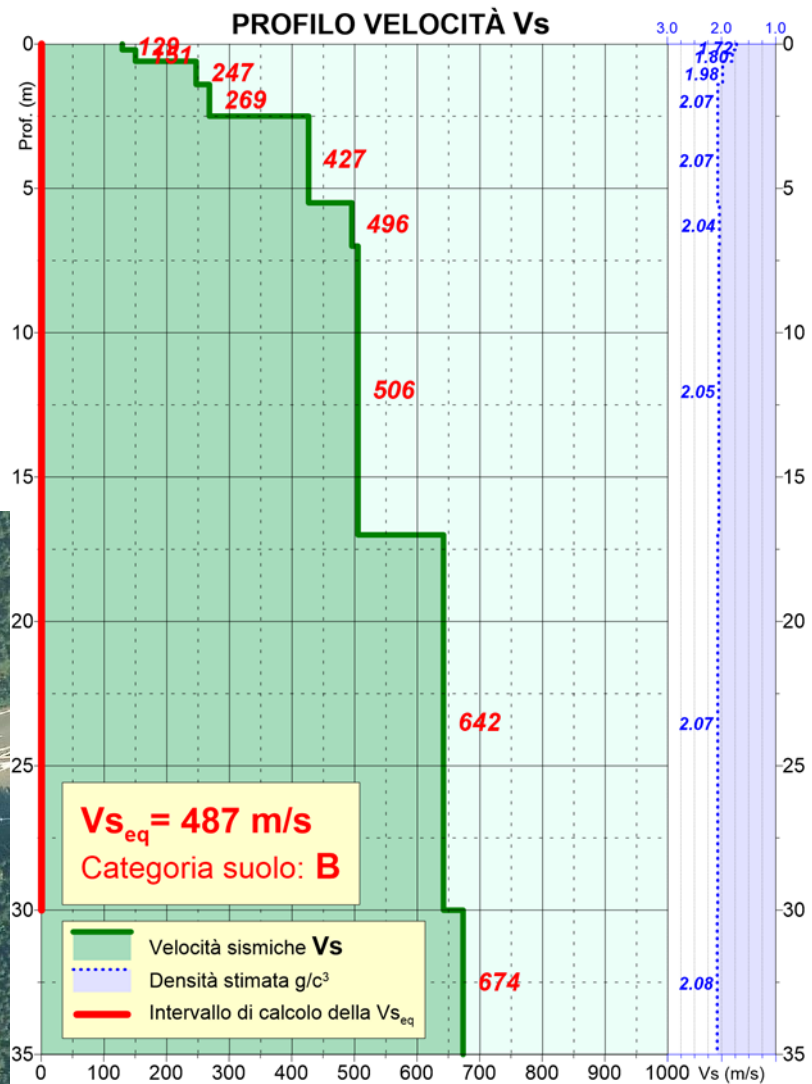
PROVA REMI - Spettro medio



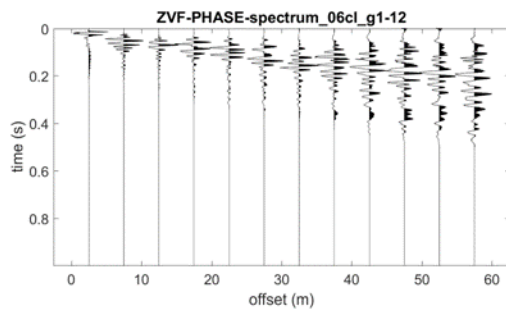
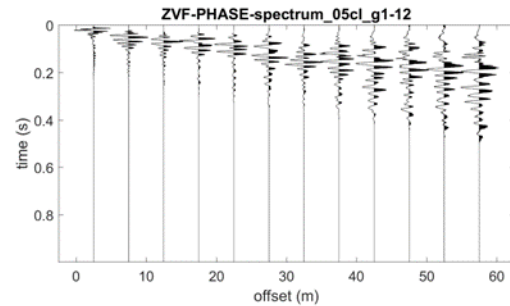
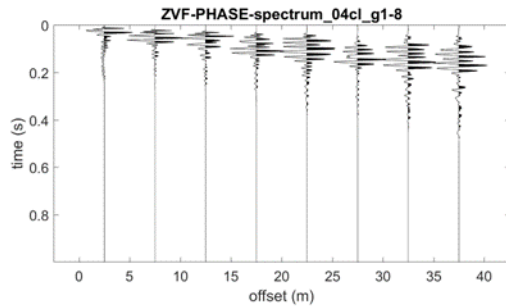
Ubicazione prova



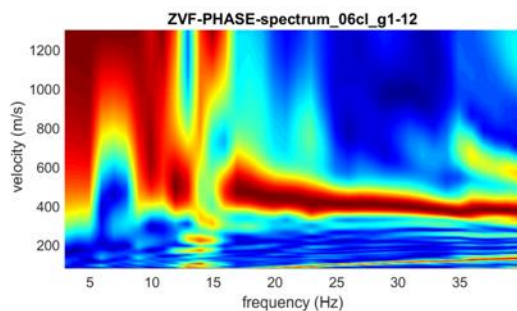
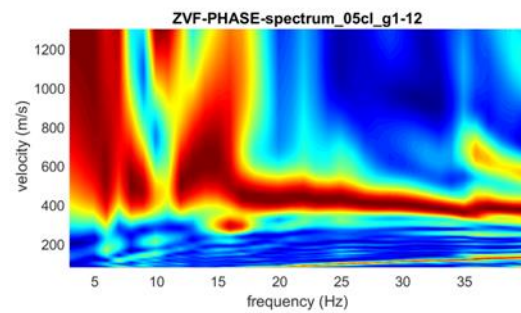
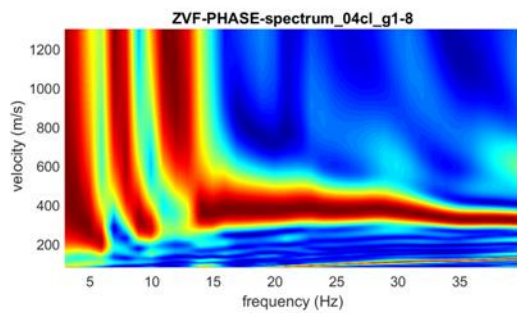
PROFILO VELOCITÀ Vs



Prova Masw – Acquisizioni elaborate per BR-R6



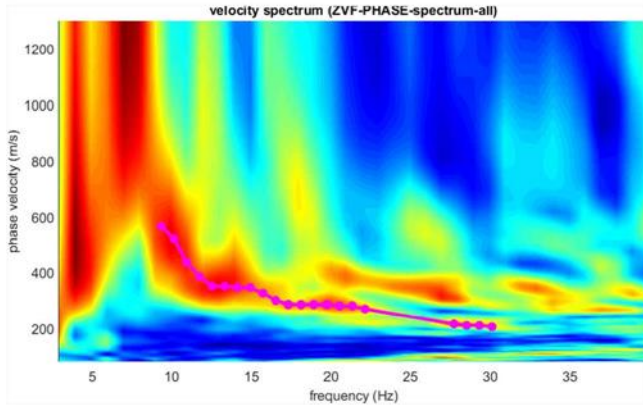
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



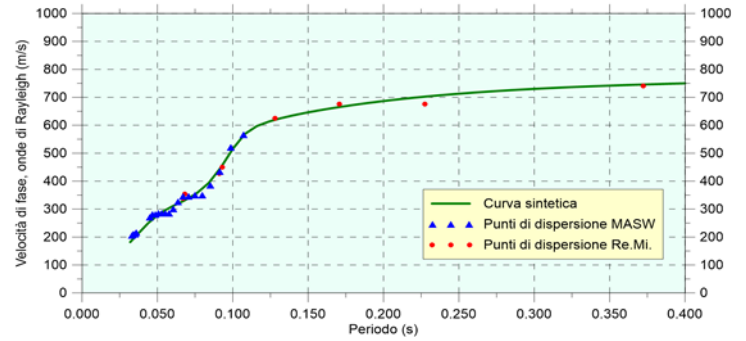
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio.

Prova Masw/Re.Mi. – BR-R7

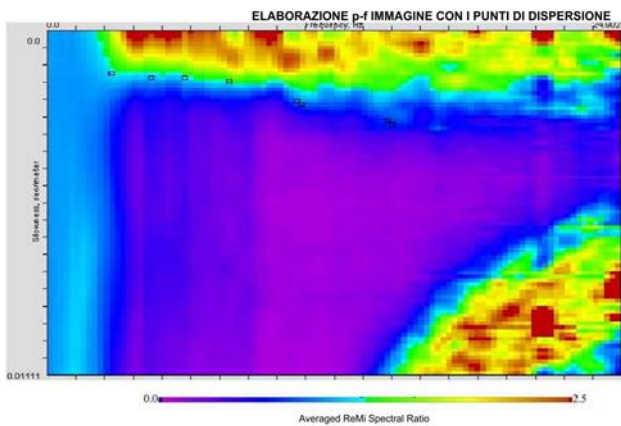
PROVA MASW - Spettro medio



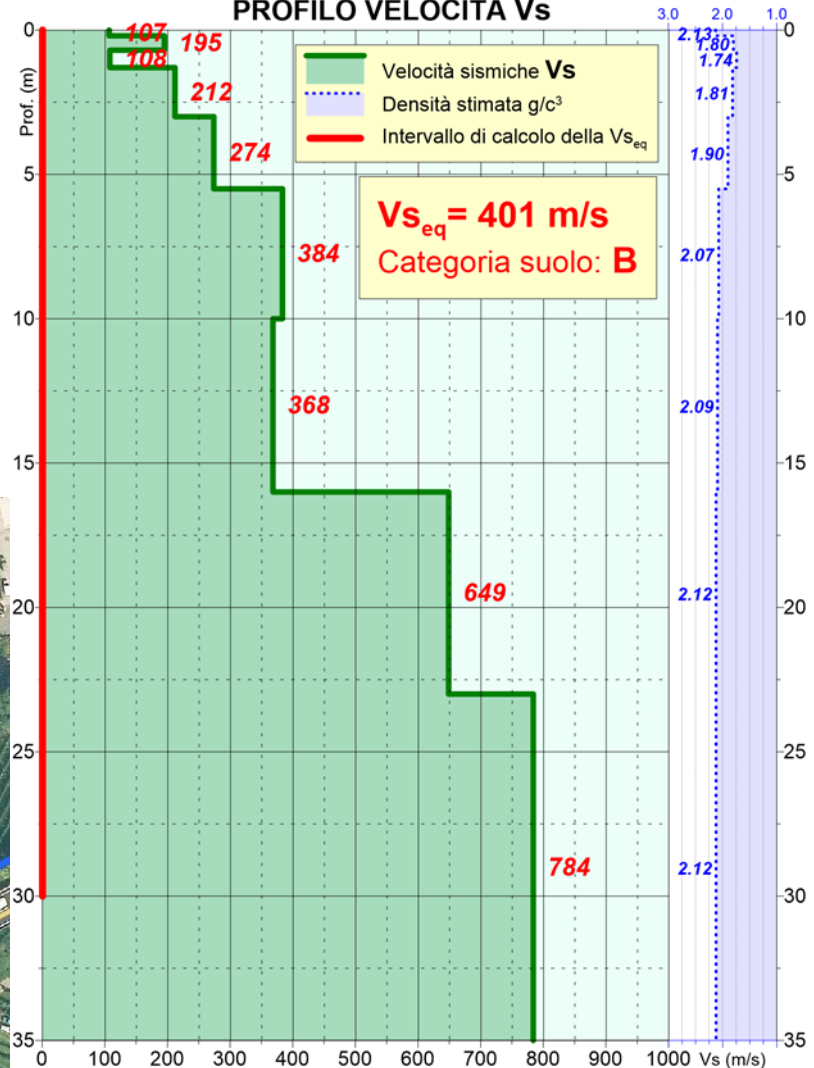
CURVA DI DISPERSIONE



PROVA REMI - Spettro medio



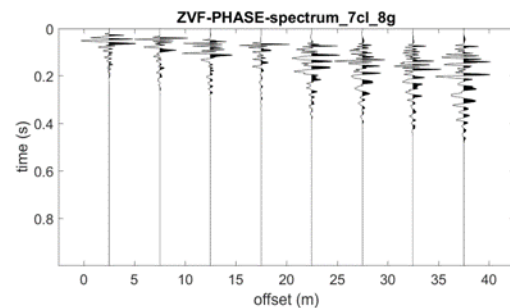
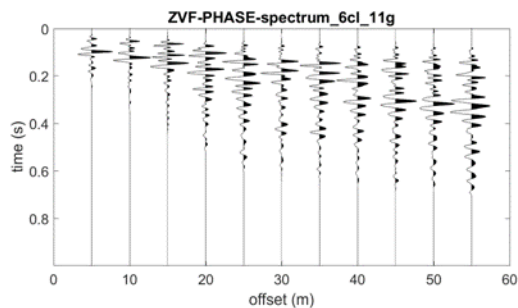
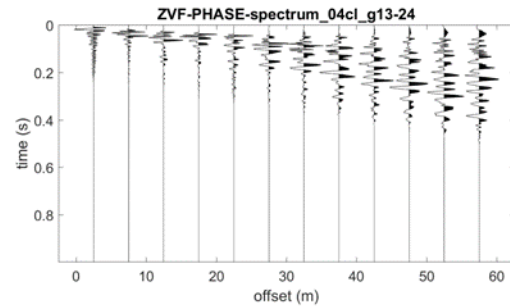
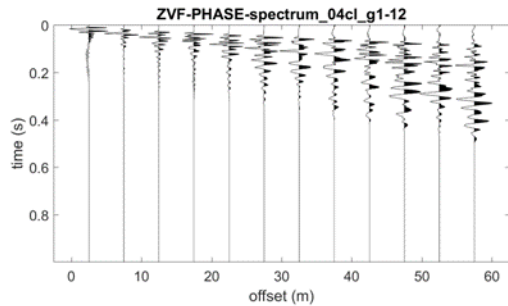
PROFILO VELOCITÀ Vs



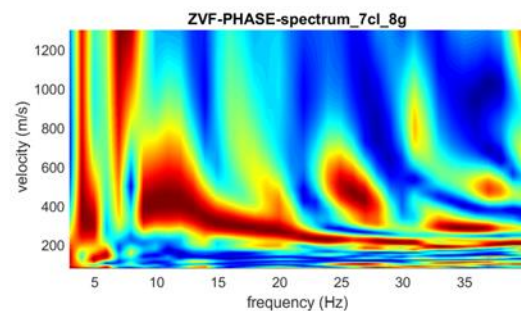
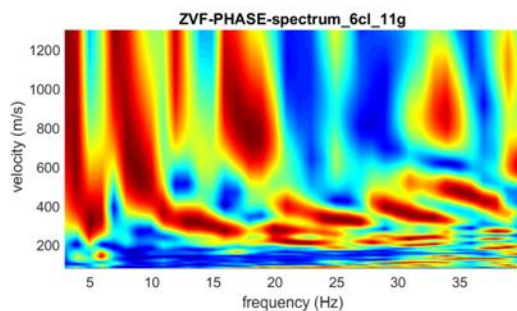
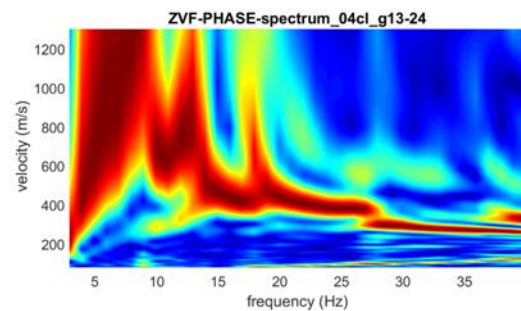
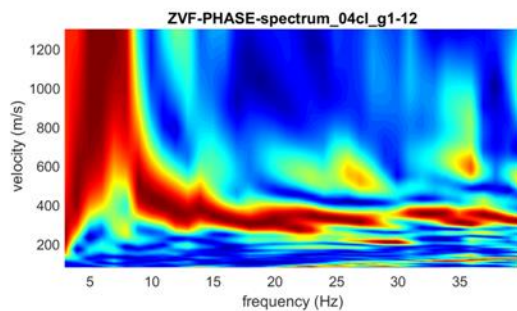
Ubicazione prova



Prova Masw – Acquisizioni elaborate per BR-R7



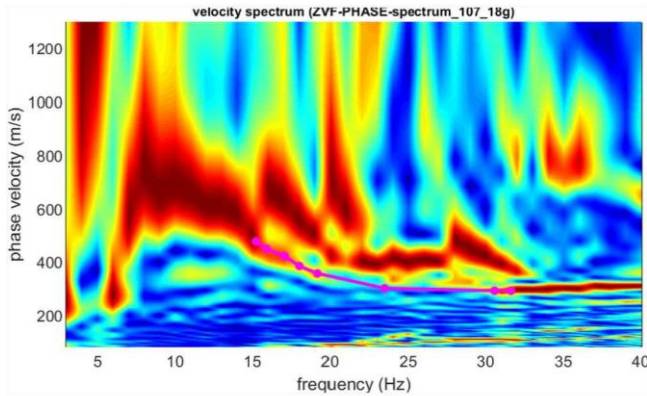
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



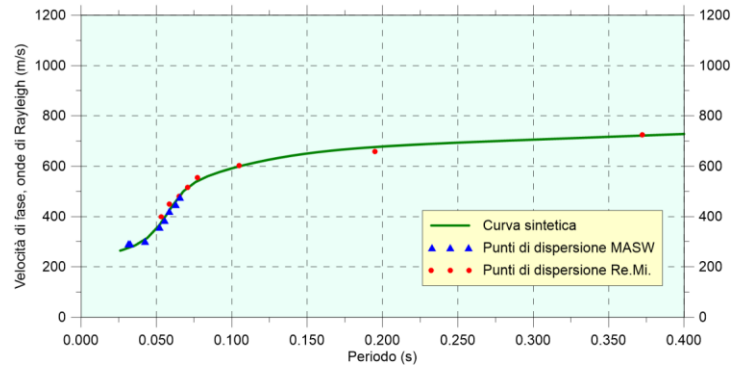
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro MASW medio.

Prova Masw/Re.Mi. - BR-R8

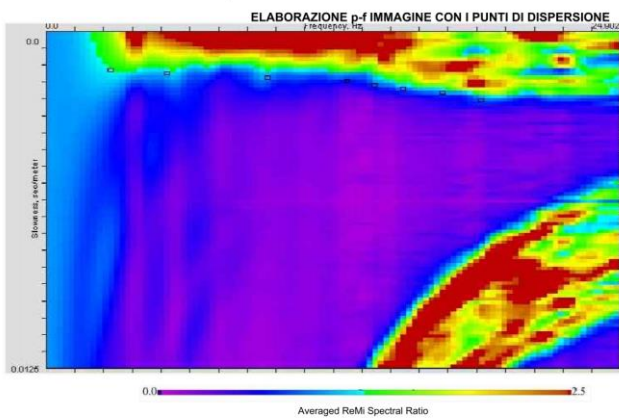
PROVA MASW - Spettro medio



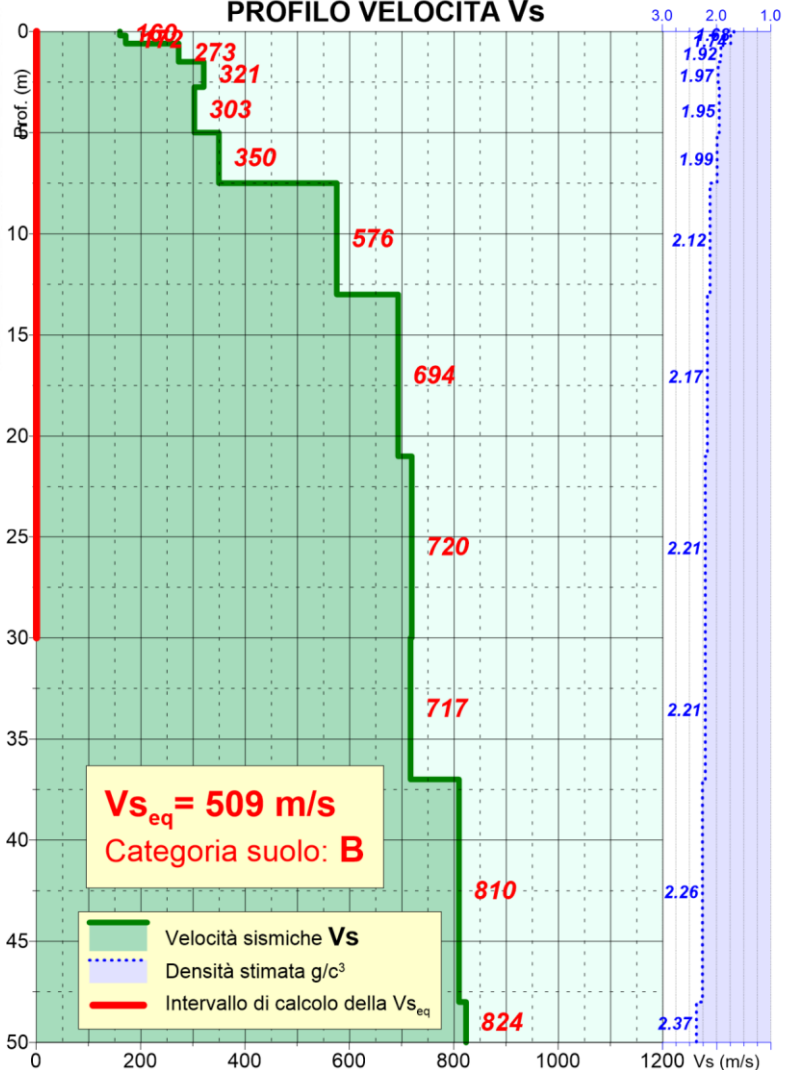
CURVA DI DISPERSIONE



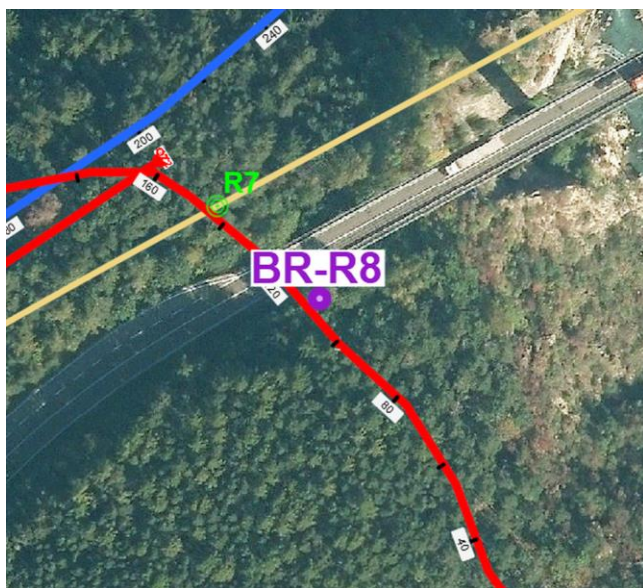
PROVA Re.Mi. - Spettro medio



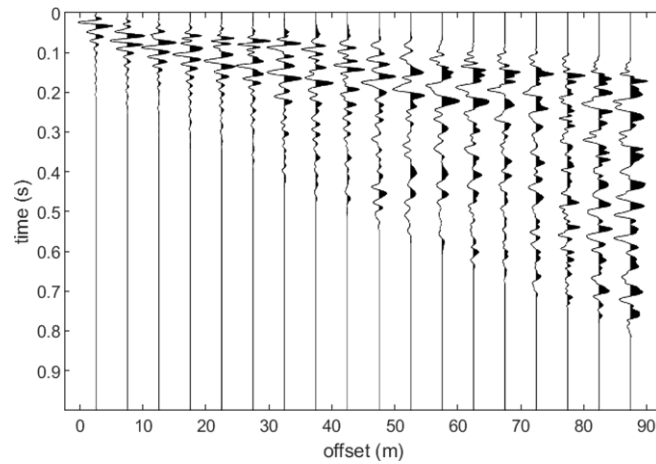
PROFILO VELOCITÀ Vs



Ubicazione prova



Prova Masw – Acquisizioni elaborate per **BR-R8**



Traccia utilizzata per l'elaborazione dello spettro MASW medio.

4 RILIEVI SISMICI HVSR

Sono state eseguite n.4 specifiche misure HVSR a stazione singola denominate da BR-HV3 a BR-HV6, l'ubicazione territoriale dei punti d'indagine è riportata nella foto aerea in Fig. 19.



Fig. 19 - Inquadramento territoriale delle prove HVSR.

Le misure HVSR, sono state effettuate con tromografo Tromino[®], con frequenza di campionamento di 256 Hz e tempo di acquisizione pari a 20 minuti, così da poter effettuare eventuali pulizie del segnale ed avere comunque sufficienti finestre utili per l'elaborazione.

I dati registrati sono stati elaborati a stazione singola mediante il software Grilla[®]; gli esiti, sono graficizzati nell'allegato 2.

4.1 Cenni teorici

La superficie terrestre è costantemente percorsa da onde di varia natura, generate da sorgenti naturali (prevalentemente perturbazioni atmosferiche e oceaniche che eccitano le basse frequenze, < 1 Hz, Gutenberg 1931; 1936) ed antropiche (che eccitano per lo più le medio-alte frequenze, > 1 Hz). Questo insieme di onde, che prende il nome di microtremore sismico ambientale, può essere immaginato come un rumore bianco, sebbene non sia propriamente così, che viene filtrato dal sottosuolo che attraversa e che un sismometro sufficientemente sensibile posato sul terreno potrà registrare ovunque.

Un'opportuna analisi sarà in grado di inferire - a partire dal segnale filtrato - alcune informazioni sul filtro, ossia sul sottosuolo attraversato dalle onde.

Nel microtremore sono presenti onde di tutti i tipi (di volume, P e S, e di superficie, Rayleigh e Love), tuttavia poiché le onde di superficie si attenuano meno velocemente con la distanza rispetto alle onde di volume, il campo del microtremore sismico è costituito principalmente da onde di superficie. Queste ultime hanno velocità molto prossime a quelle delle onde di taglio S (circa 10% inferiori) e sono usate come stimatori di queste ultime da molte tecniche geofisiche di ultima generazione.

In un sistema alluvioni su roccia per esempio, alla frequenza di risonanza dello strato alluvionale si assiste ad un annullamento dello spettro della componente verticale dell'onda di Rayleigh (V), pertanto sarebbe sufficiente analizzare i rapporti 1/V per far emergere i 'picchi di risonanza' del sottosuolo. Nella pratica, poiché i valori spettrali assoluti variano in funzione del livello di rumore che cambia naturalmente con le condizioni atmosferiche ed antropiche, è prassi usare il rapporto H/V (dove H è la media delle componenti spettrali orizzontali) che agisce da efficace normalizzatore. Tale rapporto si mantiene infatti sufficientemente stabile nel tempo.

Dalla formula della risonanza

$$f = n \frac{V_s}{4H} \quad (n=1, 3, 5, ..)$$

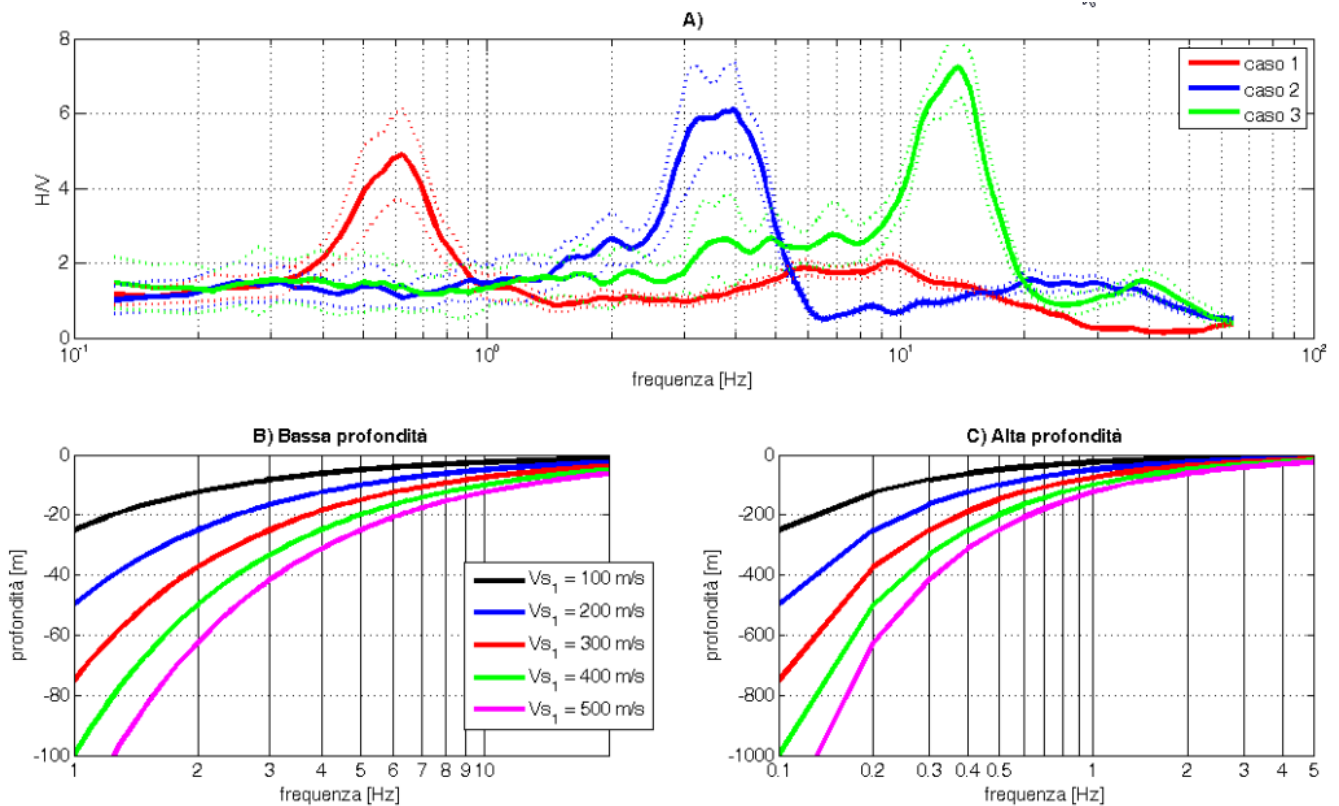
si comprende come la tecnica H/V abbia una prima applicazione stratigrafica pratica perché a partire da una misura di microtremore ambientale, nota la V_s delle coperture, si può stimare la profondità dei principali riflettori sismici.

4.2 Metodologia

Nella pratica una misura di microtremore deve avere una durata commisurata alla frequenza d'indagine d'interesse. Nella già citata ipotesi che una misura d'interesse ingegneristico ricada nell'intervallo 1-20 Hz (frequenze dei modi di vibrare della maggior parte delle strutture), segue che un campionamento adeguato deve durare almeno 10-15 min., in modo da poter analizzare il segnale su finestre di almeno 30 s di lunghezza e da avere almeno 20-30 finestre su cui effettuare una media, considerando anche che qualcuna potrà essere rimossa per la presenza di disturbi che alterano lo spettro medio.

Le serie temporali registrate nelle tre componenti del moto vengono analizzate secondo procedure spettrali più o meno classiche (FFT o wavelet) fino alla produzione delle curve H/V, dove H è la media di due componenti spettrali orizzontali ortogonali (SESAME, 2004).

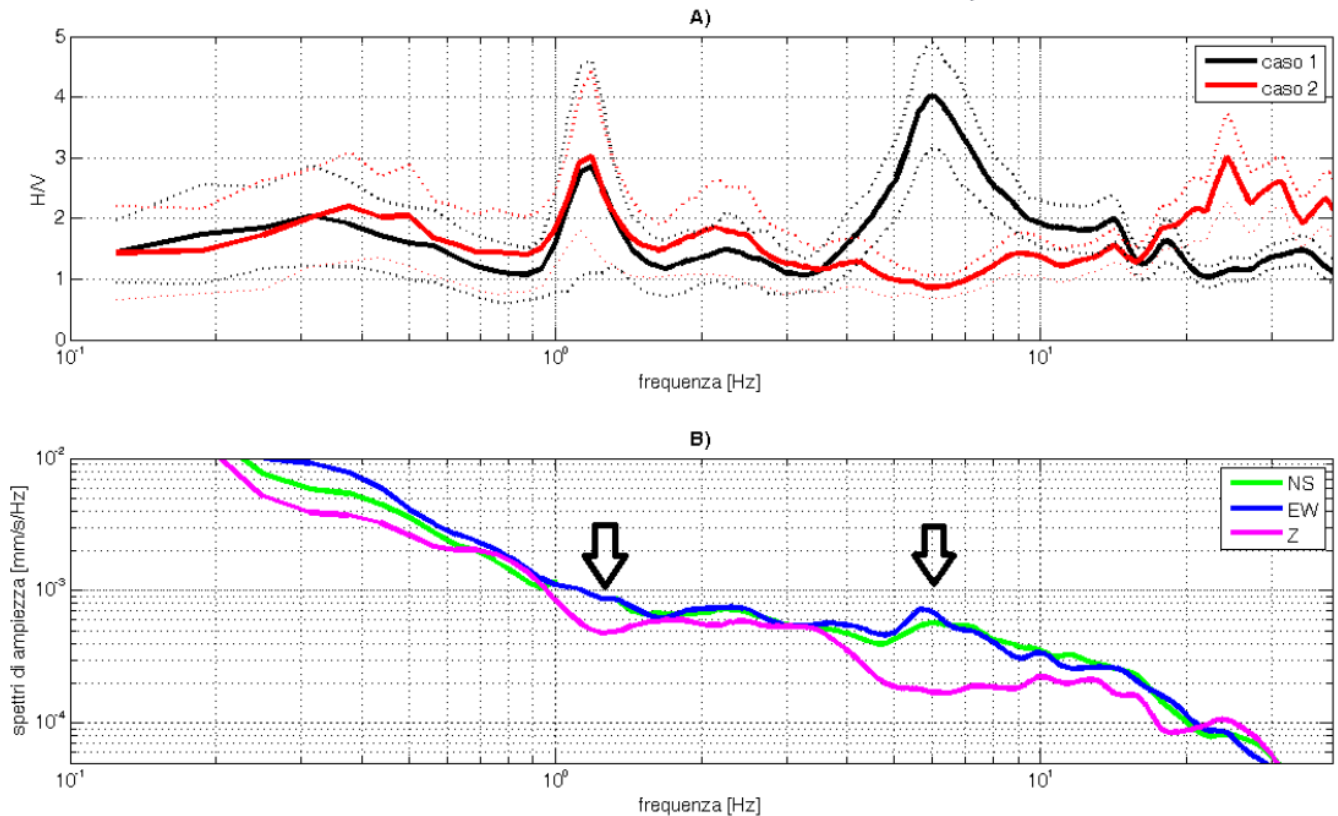
Un esempio di come appaiono i picchi di risonanza in una curva H/V è visibile nel riquadro A della Fig. 20 (tratta da Castellaro S.). Nei riquadri B e C sono invece illustrati i rapporti f-H-Vs (coperture) secondo la citata equazione, da cui si comprende che il picco di risonanza a 0.6 Hz (curva 1) si riferisce alla presenza di un riflettore sismico a circa 200 m di profondità, il picco di risonanza a 4 Hz (curva 2) si riferisce alla presenza di un riflettore sismico a circa 15 m ed il picco di risonanza a 12 Hz (curva 3) si riferisce alla presenza di un riflettore sismico entro 5 m di profondità.


Fig. 20.

La tecnica H/V permette di rilevare variabilità spaziali laterali. Nella Fig. 21 riquadro A (tratta da Castellaro S.) è illustrato il caso di due misure effettuate a 40 m di distanza reciproca, una delle quali effettuata su terreno limoso (caso 2), l'altra effettuata sullo stesso terreno ma che presenta – a circa 12 m di profondità – un paleo alveo di ghiaie (caso 1). È evidente come nel primo caso si generi a 6 Hz una risonanza dei limi sopra le ghiaie, del tutto assente nel secondo sito. Nonostante la vicinanza dei luoghi, il sito 1 è più sfavorevole dal punto di vista degli effetti sismici di sito rispetto al sito 2 per strutture con modi propri attorno a 6-8 Hz.

Questi esempi mostrano come la tecnica H/V sia molto sensibile alle variazioni stratigrafiche laterali, permettendo pertanto di discriminare geometrie 1D da geometrie 2D, ovviamente entro i limiti di visibilità imposti dalla nota legge $\lambda f = V$ (lunghezza d'onda x frequenza = velocità).

Le curve H/V non vanno mai osservate da sole ma sempre congiuntamente agli spettri delle singole componenti da cui derivano. Questo permette di discernere agevolmente i picchi di natura stratigrafica da quelli di natura antropica. In condizioni normali le componenti spettrali NS, EW e Z (verticale) hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza, come si è detto, si genera un picco H/V legato ad un minimo locale della componente spettrale verticale che determina una forma “a ogiva” come quella indicata dalle frecce nella Fig. 21 riquadro B. Questa forma è indicativa di risonanze stratigrafiche (cfr. anche Castellaro e Mulargia, 2009).


Fig. 21.

4.3 Sintesi e commento dei dati registrati

Di seguito si trasmette la tabella di sintesi dei picchi di frequenza (Hz) in ordine di ampiezza relativi alle stazioni acquisite.

Stazione	f0	f1	f2
BR-HV3	1.25	1.47	1.88
BR-HV4	8.13		
BR-HV5	1.78		
BR-HV6	1.94		

- Prove BR-HV3, BR-HV5 e BR-HV6: non mostrano contrasti di impedenza particolarmente significativi fino a frequenze ≥ 2 Hz, al di sotto appaiono contrasti in tutte e tre le prove e potrebbero verosimilmente rappresentare il bed-rock al di sotto di un importante pacco di materiale sciolto senza nette variazioni di Vs al suo interno;
- Prova BR-HV4: mostra un segnale antropico particolarmente forte in bassa frequenza che ne compromette la lettura al di sotto dei 4 Hz. È invece individuabile un picco a circa 8 Hz che può essere interpretato con la discontinuità posta a circa 8-9 m di profondità, verosimilmente il passaggio sabbia-ghiaia del S11.

ALLEGATO 2

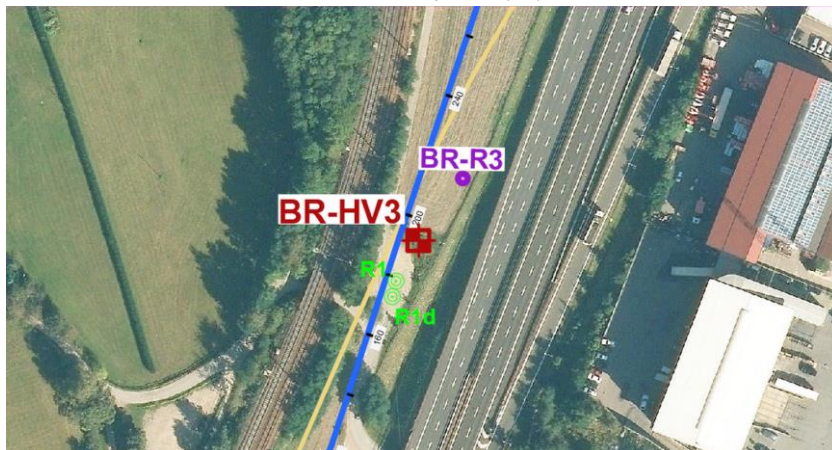
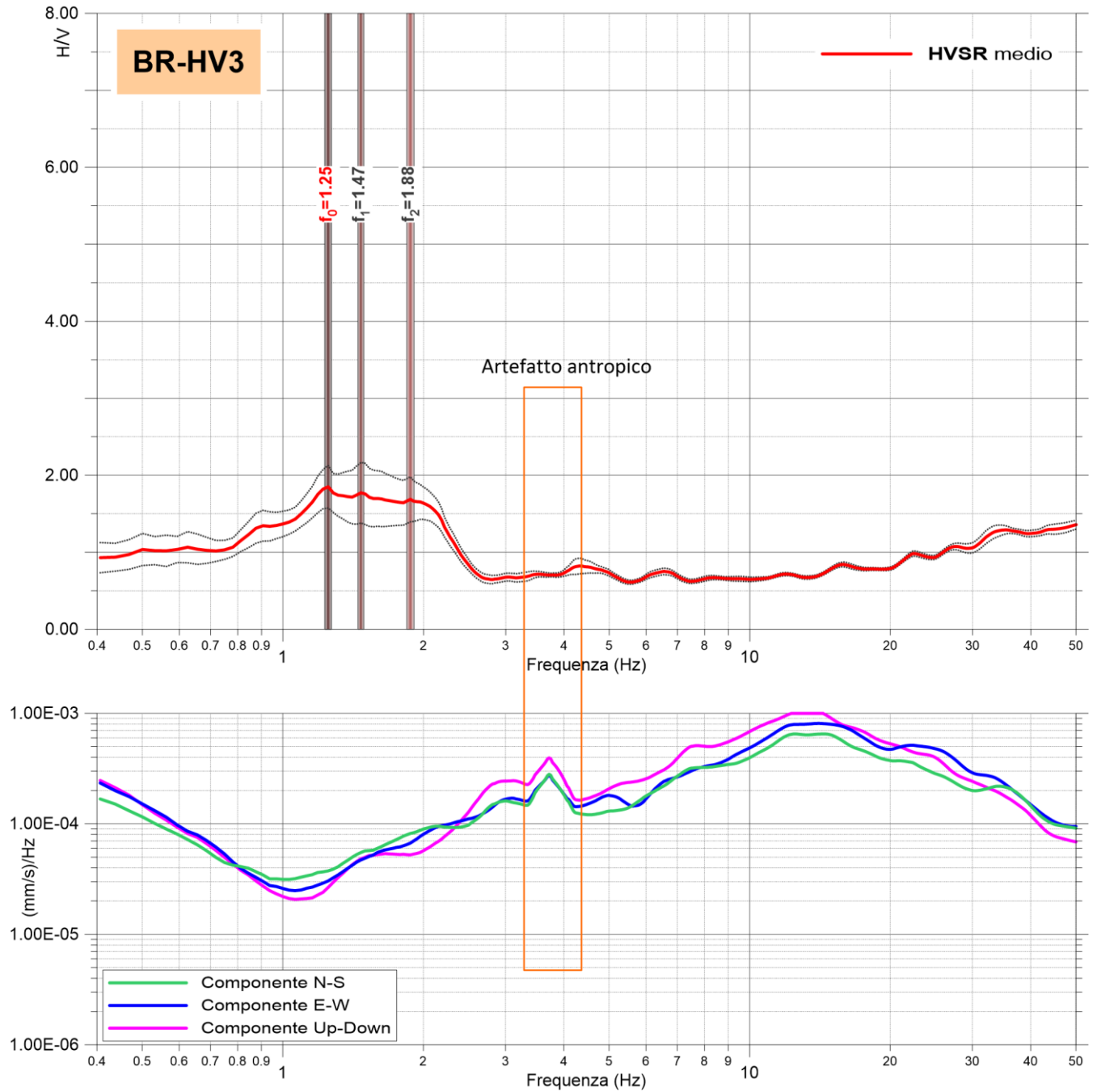
STAZIONI HVSR

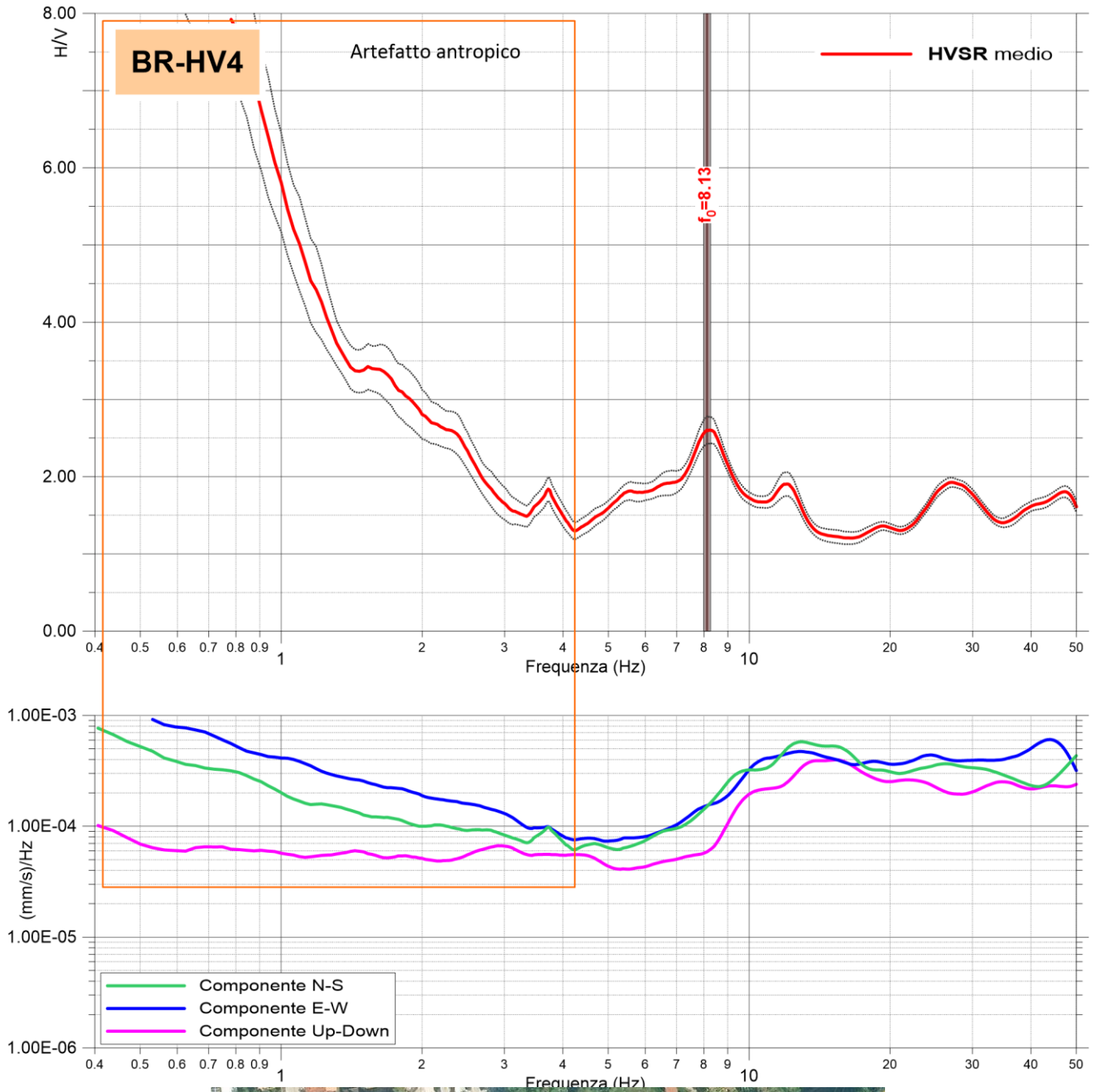
GRAFICO HVSR MEDIO

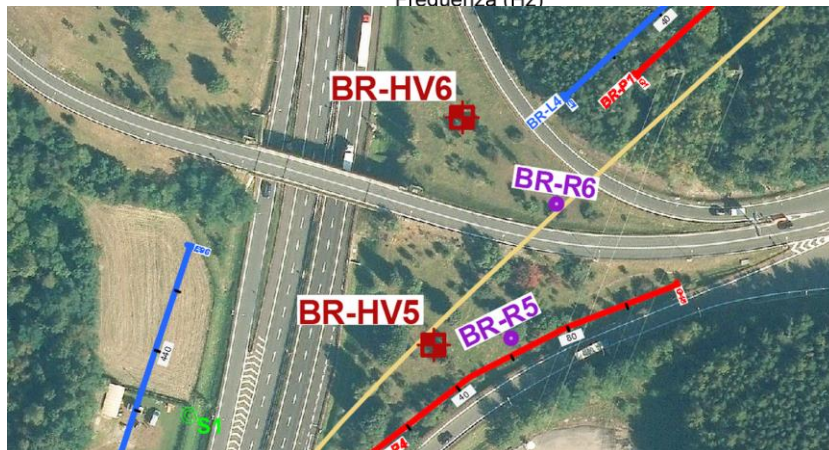
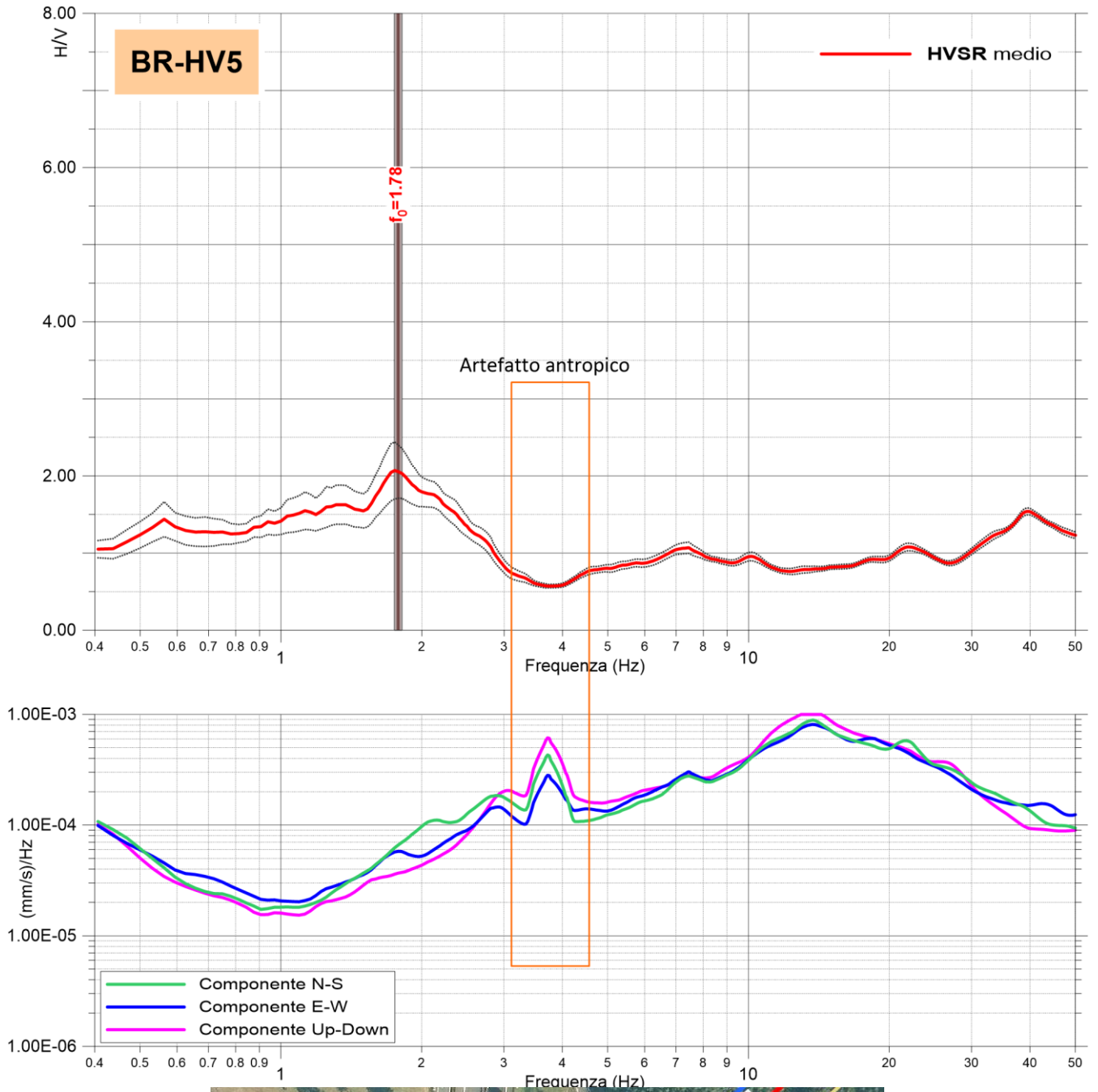
GRAFICO DELLE TRE COMPONENTI N-S / E-W / Up-Down

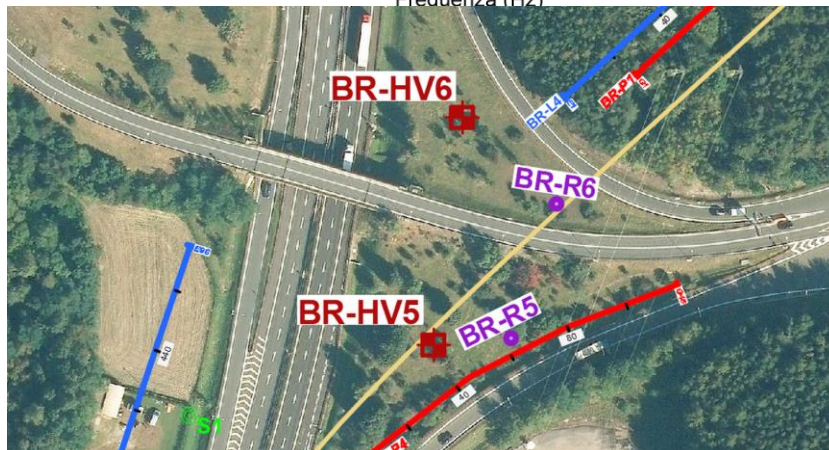
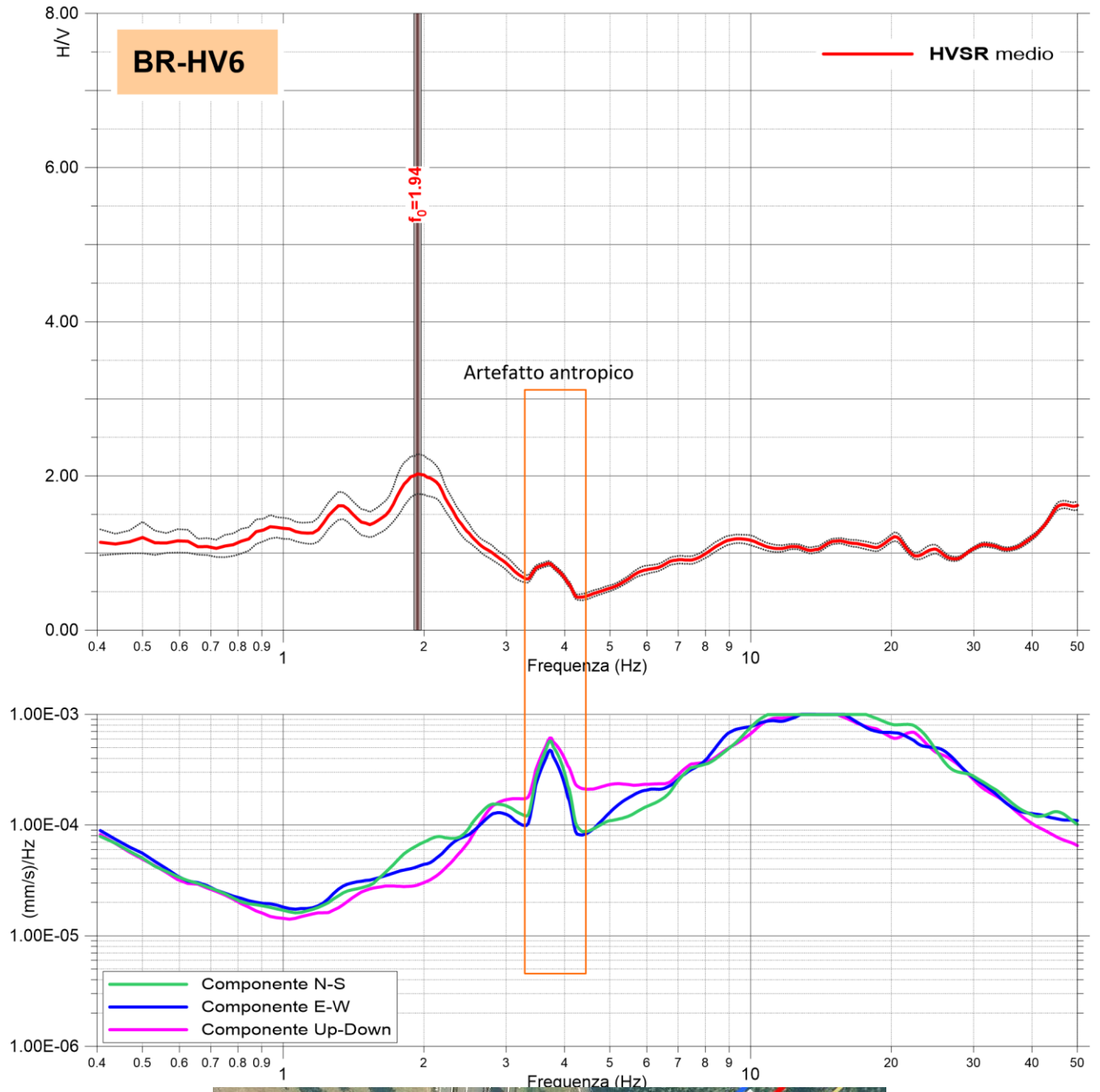
UBICAZIONE PLANIMETRICA SU FOTO AEREA

BR-HV3 / BR-HV4 / BR-HV5 / BR-HV6









5 PROVA DOWN-HOLE

Per la definizione dei valori di V_p , V_s e $V_{s_{eq}}$ ai sensi delle NTC 2018 e dei moduli dinamici dei terreni carotati, in corrispondenza del sondaggio **R2**, opportunamente attrezzato, è stata effettuata n.1 prova Down-Hole denominata **DH-1** della quale ne è riportata l'ubicazione planimetrica nell'elaborato grafico **PROGR. 001** in scala 1:2.000.

In Fig. 22 se ne riporta l'ubicazione su foto aerea.



Fig. 22 – Ubicazione territoriale della prova Down-Hole DH-1 con il rispettivo foro di sondaggio R2 da foto aerea.

5.1 Descrizione / acquisizione prova D-H

La tecnica del Down-Hole consiste nel misurare i tempi di arrivo delle onde sismiche P e S generate da una specifica sorgente ad un geofono tridimensionale (costituito da tre geofoni orientati secondo le tre direzioni spaziali) posto in un foro di sondaggio a profondità crescenti.

Le Onde di compressione (P) sono state create con impulsi verticali generati da una massa battente agente in prossimità del sondaggio (Fig. 23).

Le onde di taglio (S), sono state generate con impulsi orizzontali ottenuti battendo su lati opposti di due tavole rese solidali con il terreno dal peso del veicolo d'appoggio.

In fase di elaborazione di tali registrazioni sono stati analizzati e integrati i “primi arrivi” relativi ad entrambe le battute.

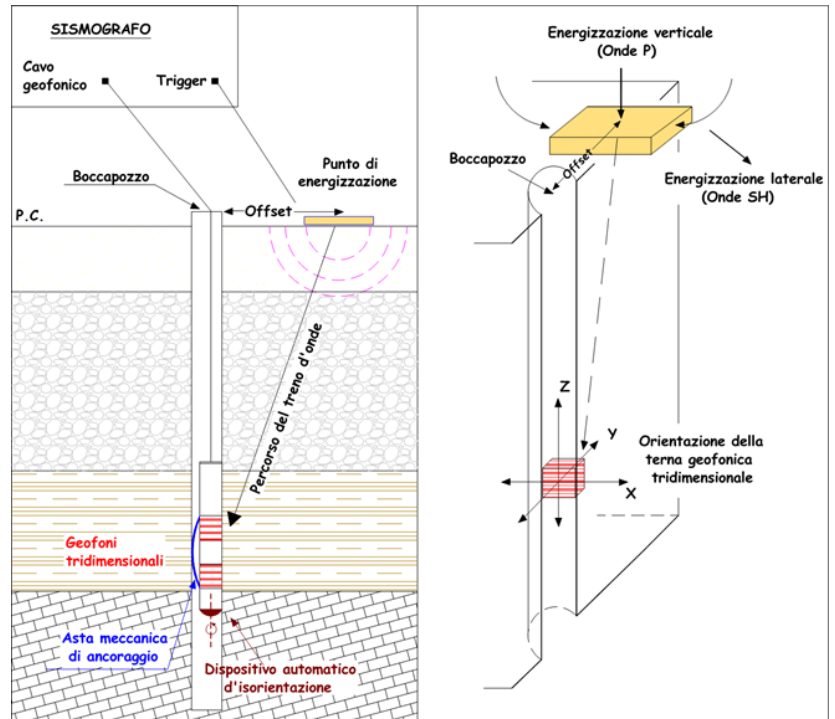


Fig. 23 – Schema prova Down-Hole.

5.2 Elaborazione e restituzione dei dati

Dai sismogrammi registrati sono stati “letti” i tempi di arrivo (picking) delle onde sismiche P e delle onde S, ad ogni intervallo di profondità raggiunto dal geofono. Il calcolo delle velocità sismiche infatti è stato realizzato attraverso la misura della differenza di tempi fra posizioni differenti del geofono ed il punto di energizzazione.

Nei grafici in Allegato 2 sono visualizzati i sismogrammi acquisiti, con il relativo “picking”, l’andamento delle velocità sismiche V_p e V_s calcolate per ciascun intervallo e le tabelle di sintesi dei dati elaborati, unitamente ai moduli dinamici, calcolati sulla base dei parametri sismici e degli specifici valori di peso di volume (γ) delle litologie presenti. In dettaglio sono riportati:

- Velocità Onde P= V_p ;
- Velocità Onde S= V_s ;
- Rapporto V_p/V_s ;
- Rapporto di Poisson σ ;
- Modulo di taglio G din;
- Modulo di Young E din;
- Modulo di compressione E_v .

L’analisi dei dati relativi alla velocità delle onde di taglio (V_s) ha consentito inoltre di definire la categoria sismica del suolo: valore di V_{s30} pari a **399 m/s** (H_{rif} =da 0.0 a 30.0 m da p.c.) definisce un suolo di **Categoria B**.

ALLEGATO 3

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA E COMMENTO

UBICAZIONE PLANIMETRICA

SISMOGRAMMI VP – VS

GRAFICO VELOCITÀ VP – VS

TABELLA PARAMETRI

DOHN-HOLE

DH-1

Documentazione fotografica Down-Hole DH-1

Piazzola

Ubicazione territoriale



Energizzazione onde P



Energizzazione onde S

Commento

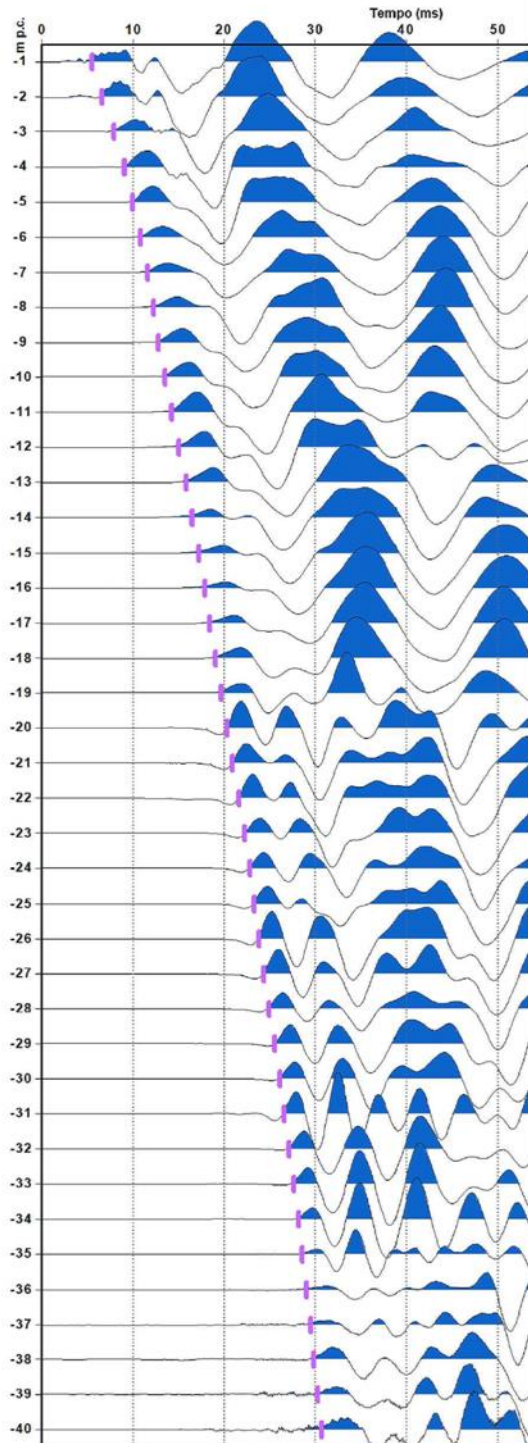
- Relativamente alle velocità sismiche V_p nei primi 7.0m di spessore si registrano velocità progressivamente crescenti che di poco superano i 1000 m/s. Al di sotto di tale profondità si registra un marcato incremento di velocità con alternanze di valori compresi tra 1250 e 1600 m/s fino a -23.0m dal p.c. Tra -24.0 e -34.0 m dal p.c. si registra un ulteriore deciso incremento delle velocità V_p , con alternanze di valori compresi tra 1700 e 2000 m/s. Da -35.0 m dal p.c. fino a fondo foro le velocità V_p superano i 2000 m/s, crescendo progressivamente fino a 2500 m/s.

- Per le velocità delle **Vs** si descrive complessivamente un progressivo aumento dei valori senza mai superare i 500 m/s fino a -16.0m da p.c., segue un leggero incremento di velocità con un'alternanza di valori che tuttavia nei valori massimi non raggiungono i 700 m/s fino -34.0 m dal p.c. Al di sotto le velocità **Vs** crescono progressivamente, superando i 700 m/s e attestandosi a circa 900 m/s a fondo foro.

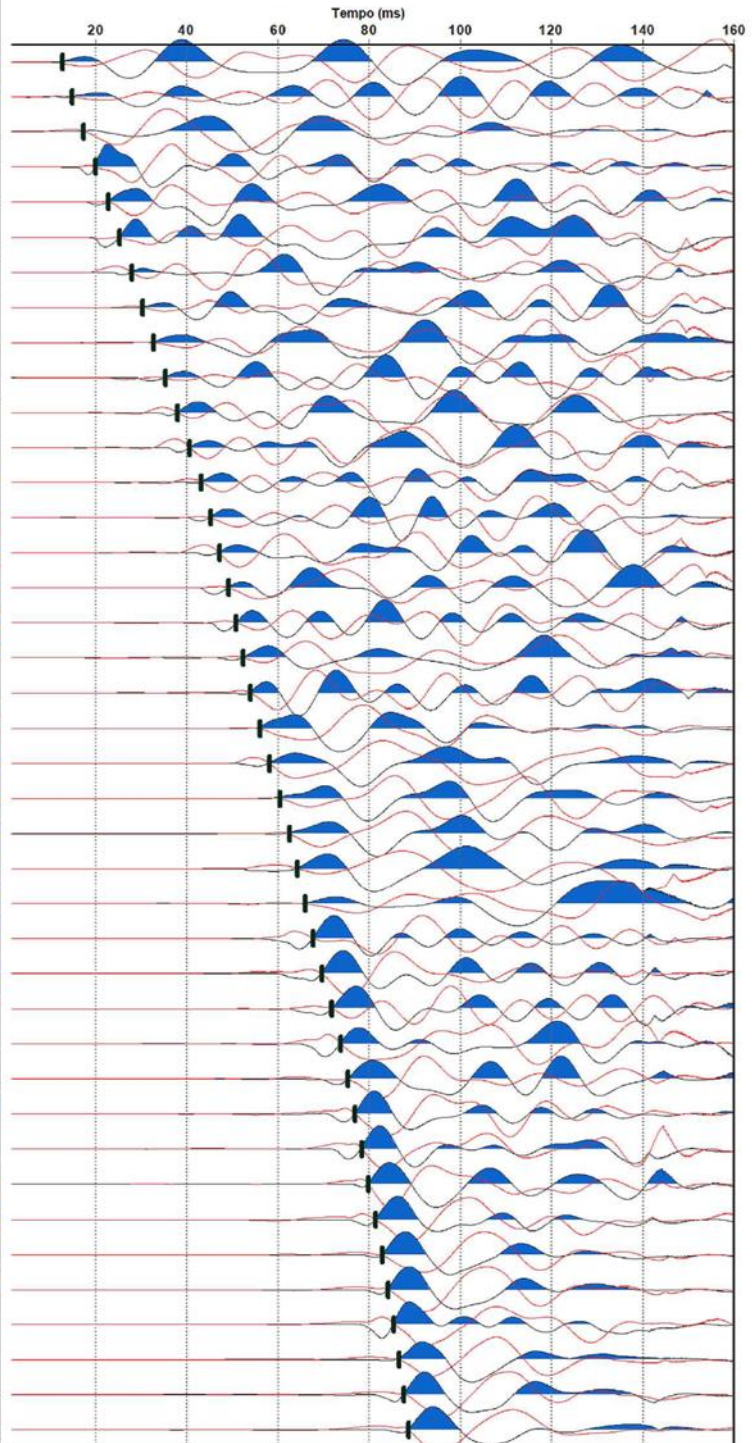
SISMOGRAMMI

DOWN HOLE

**DH-1
R2**



Registrazione Onde P

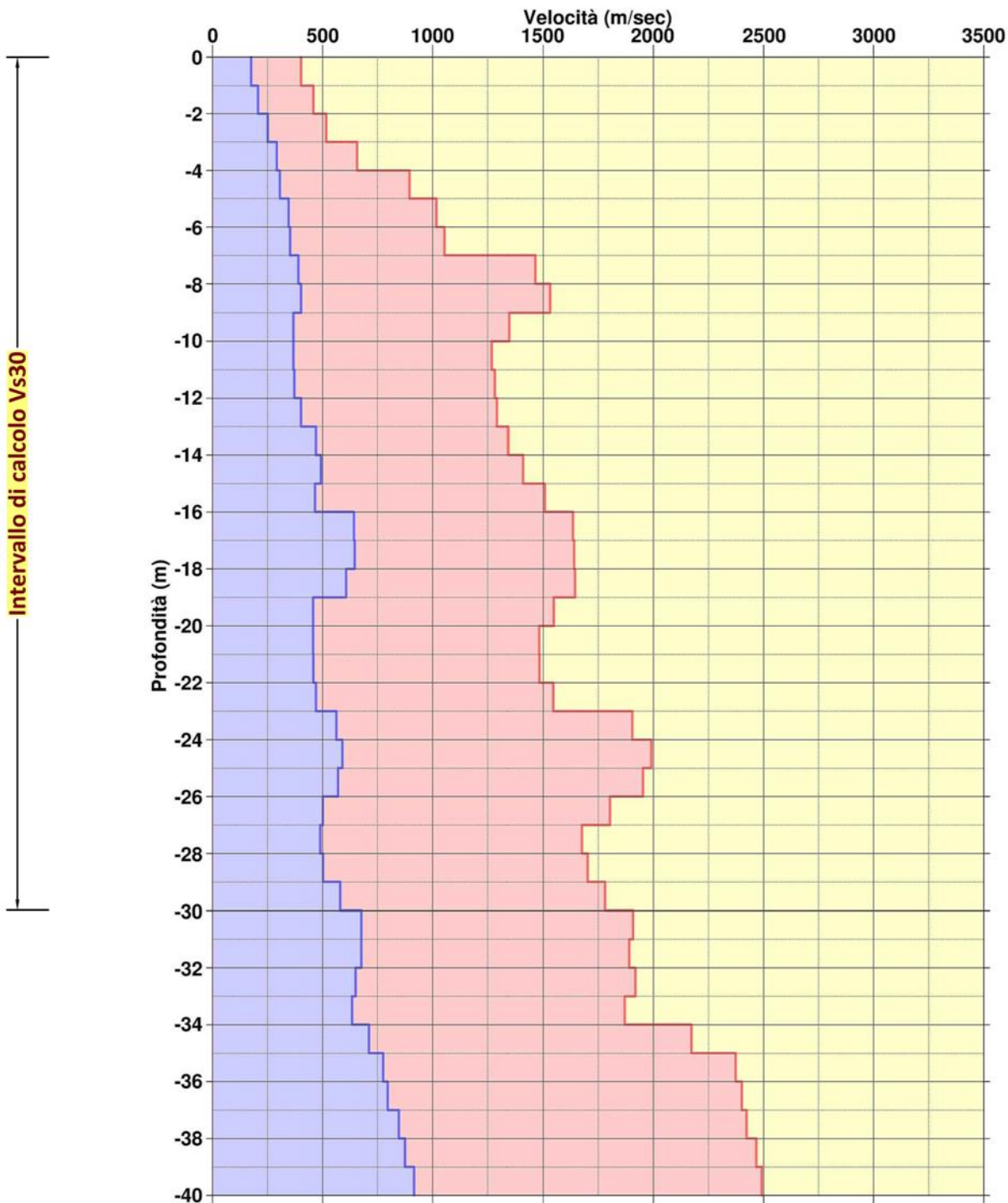


Registrazione Onde S

GRAFICO VELOCITÀ

DOWN HOLE

**DH-1
R2**



Velocità
Onde VSH



Velocità
Onde VP

$V_{s30} = 399$ m/sec
calcolata da 0.0 a 30.0 m p.c.
Classificazione sismica del
suolo di fondazione:
Categoria B

6 PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE (VP - VS)

Sono state eseguite n. 5 prospezioni sismiche a rifrazione con registrazione delle velocità delle onde sismiche **P** (onde di compressione) e **S** (onde di taglio), denominate da **BR-P1** a **BR-P5**.

I n. 5 profili sismici a rifrazione sono costituiti rispettivamente da n. 96 (BR-P1), n.72 (BR-P2), n.48 (BR-P3 e BR-P4) e n. 82 (BR-P5) geofoni posizionati ad interdistanza di 2.5 m. Lo sviluppo lineare in lunghezza dei profili è rispettivamente di 237.5 m, 177.5 m, 117.5 m e 202.5 m. L’ubicazione planimetrica è riportata negli elaborati grafici **PROGR. 001** in scala 1:2000 e **PROGR. 003** in scala 1:5000.

La Fig. 24 sintetizza l’ubicazione delle stese sismiche su foto aerea.



Fig. 24 - Ubicazione territoriale delle indagini sismiche a rifrazione P – S.

6.1 Cenni teorici

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura dei tempi di percorso delle onde sismiche di volume (**P** e **S**) dirette e rifratte che, partendo in un istante noto da una sorgente artificiale di posizione nota, arrivano ai diversi geofoni (sensori collocati a distanze note dalla sorgente). Le onde dirette sono quelle che si propagano direttamente dalla sorgente ai geofoni, senza scendere in profondità, invece, le onde rifratte sono quelle che, dopo essere penetrate in profondità nel sottosuolo, incontrano un rifrattore (superficie di aumento brusco della velocità di propagazione) e vengono da esso trasmesse in superficie (a causa del fenomeno dell'incidenza critica dei raggi sismici).

Pertanto, i dati ricavati da tale tipo di indagine consentono la definizione di un modello bidimensionale del sottosuolo. Utilizzando le distanze tra il punto di scoppio e i vari geofoni e i tempi di arrivo del segnale sismico, si ricavano delle curve tempo-distanza (dromocrone). Dalle dromocrone dei primi arrivi (curve che rappresentano la variazione del tempo di percorso in funzione della distanza sorgente - geofono) si risale al modello di velocità sismica del sottosuolo, fino alla base del rifrattore più profondo individuato (poiché i raggi sismici che scendono a profondità superiori non ritornano in superficie nei punti in cui sono collocati i geofoni).

6.2 Acquisizione dati

Negli stendimenti sono stati utilizzati geofoni “Geospace” con frequenza propria di 14 Hz per registrazioni **V_p** e di 4.5 Hz per registrazioni **V_s**, posizionati ad una distanza intergeofonica di 2.5 m.



Fig. 25 - Energizzazione Onde S.

In punti predefiniti del profilo, nello specifico ogni 3 geofoni, sono stati creati artificialmente degli impulsi elastici mediante l'utilizzo di una massa battente da 8.0 Kg; per ogni punto di energizzazione, per migliorare il rapporto segnale-rumore, sono state sommate diverse battute. Il “time-break”, tempo zero di inizio registrazione, è stato fissato attraverso l'apertura di un circuito elettrico posizionato sulla massa battente.



Fig. 26 - Energizzazione Onde S.

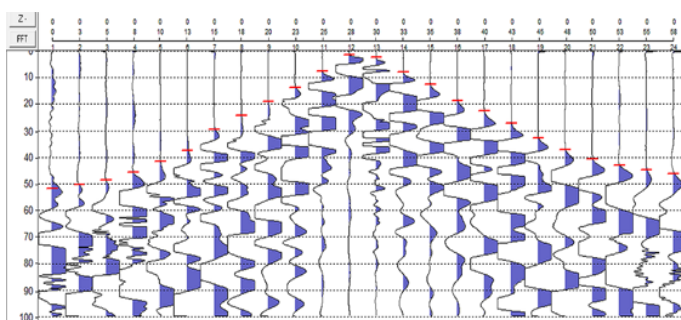


Fig. 27 – Fase di registrazione della sismica a rifrazione.

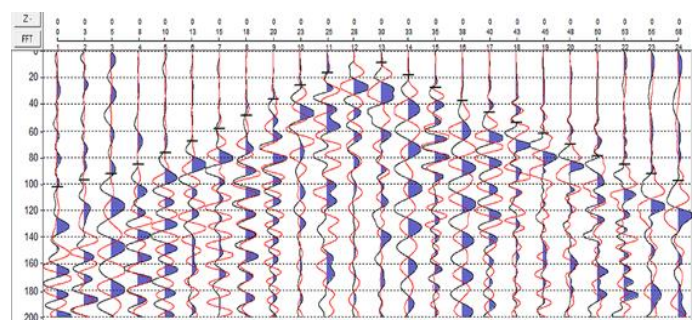
La registrazione dei sismogrammi è stata effettuata mediante sismografi digitali modello “Geode” della Geometrics a 24 canali.

Il tempo di acquisizione è stato di 1 secondo, con un passo di campionamento di 0.125 ms.

Di seguito un esempio di registrazione sismica utilizzata per il picking dei primi arrivi delle onde **P** tagliata a 0.100 secondi e delle onde **S** tagliata 0.200 secondi.



Esempio registrazione onde P.

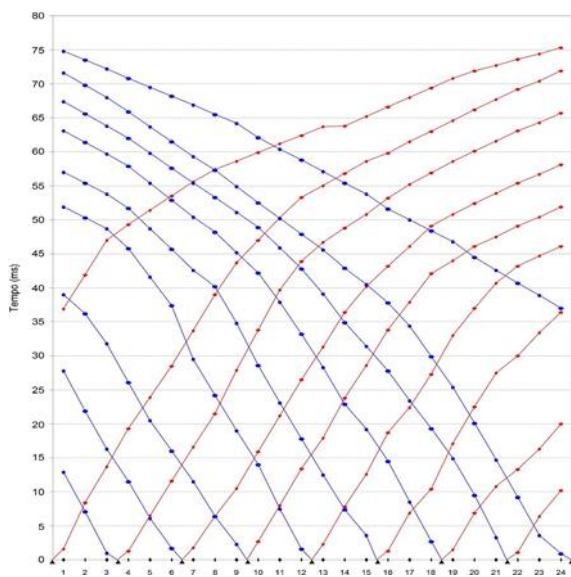


Esempio registrazione onde S

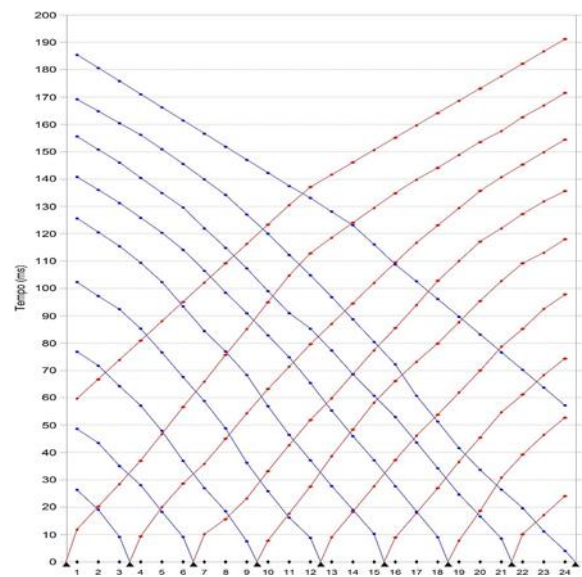
6.3 Elaborazione dati

Tramite software dedicato, sono stati letti i tempi di “primo arrivo” degli impulsi sismici ai vari geofoni (raggi diretti e rifratti) e ricostruiti i relativi diagrammi spazio-tempo.

Le dromocrone sono state interpretate applicando algoritmi di calcolo basati sul metodo “time delay” di Hawkins e sul metodo “delle intercette”. I risultati di tale interpretazione hanno consentito la caratterizzazione in termini di velocità sismica dei materiali costituenti il sottosuolo delle aree indagate e la ricostruzione geometrica delle unità sismiche caratterizzanti il sottosuolo stesso.

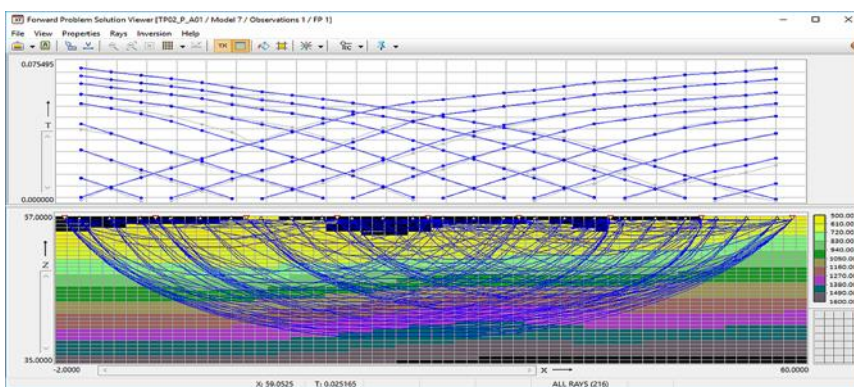


Esemplare Dromocrone Onde P.



Esemplare Dromocrone Onde S.

Lo schema di velocità ottenuto è quindi stato utilizzato come modello iniziale per l’elaborazione tomografica. Il programma d’inversione tomografica utilizzato è “XTomo-LM3” di Xgeo.



La tecnica tomografica analizza e ricostruisce, tramite i tempi di primo arrivo, i percorsi dei raggi sismici grazie ad un algoritmo di “ray-tracing”. La sezione indagata viene suddivisa in celle di dimensioni regolari in modo che ogni elemento sia attraversato dai molteplici raggi sismici, compresi tra i punti di sparò e i punti di ricezione. La prima fase di “processing” prevede il calcolo, a

partire da un semplice modello iniziale, di un modello “diretto”, mentre la successiva inversione è basata su un algoritmo di ottimizzazione e regolarizzazione. La routine di “inversione” bidimensionale attraverso l’assegnazione di una velocità teorica ad ogni singola cella, per iterazioni successive, ne calcola la velocità “reale”. Le iterazioni vengono ripetute fino al raggiungimento del minor scarto possibile tra i valori di velocità teorica e calcolata.

Il risultato finale dell’elaborazione consiste in una sezione di velocità sismica nella quale ad ogni cella è stato assegnato un valore di velocità. Tali valori vengono infine elaborati graficamente tramite apposite “routine” di “gridding” e “countouring”. Queste sezioni non presentano una distinzione in unità sismiche caratterizzate da precisi valori di velocità sismica, ma da una variazione continua della velocità stessa, risultando particolarmente efficace nella individuazione delle variazioni laterali e/o con maggior gradiente di velocità sismica presenti lungo le sezioni.

6.4 Analisi dei risultati

Le sezioni sismiche a rifrazione hanno permesso di ricostruire i rapporti stratigrafici fra le differenti unità sismiche elaborate sulla base delle differenti velocità sismiche, la Fig. 28 mostra le scale colorimetriche utilizzate.

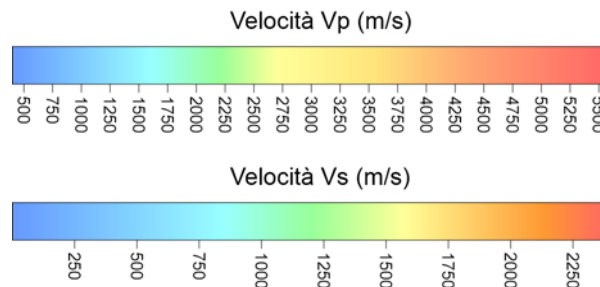


Fig. 28 – Scale colorimetriche di velocità Vp (sopra) e Vs (sotto).

Vengono di seguito esaminati le singole sezioni elaborate; si precisa che i profili BR-P1 e BR-P2, sono rappresentati con le progressive metriche di riferimento degli adiacenti profili elettrici.

I profili sismici acquisiti in prossimità del tracciato di progetto, sono illustrati con sequenza da Sud-Ovest a Nord Est.

Le sezioni sismiche ottenute, vengono inoltre visualizzate in modalità 3D attraverso il pacchetto software EVS (Earth Volumetric Studio) della C Tech. Il risultato di tale elaborazione viene riportato nell’elaborato grafico **PROGR. 003** e nelle Fig. 34 e Fig. 35.

6.4.1 Profilo BR-P4

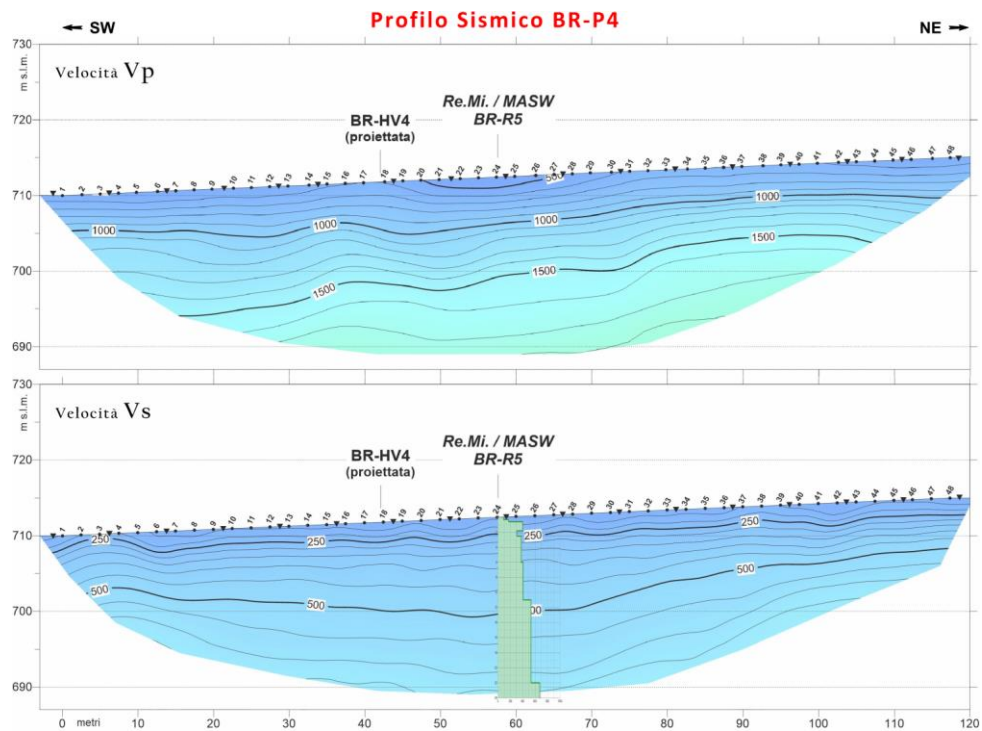


Fig. 29 – Sezione sismica BR-P4.

Si osserva un'unità superficiale sviluppata con continuità mediamente per spessori di 13.0 m caratterizzata da valori delle velocità sismiche V_p progressivamente crescenti da 500 a 1500 m/s (colore azzurro) e delle velocità sismiche V_s che si mantengono inferiori a 500 m/s, riferibili alla presenza di materiali di copertura di origine fluvioglaciale. L'unità, soprattutto nel profilo V_p , tende ad assottigliarsi passando dal settore sud-occidentale a quello nord-orientale della sezione.

In profondità le velocità sismiche V_p e V_s incrementano fino a raggiungere valori massimi rispettivamente di 1800 m/s (colore verde chiaro) e 650 m/s, indicativi di un graduale passaggio a materiali maggiormente competenti.

6.4.2 Profilo BR-P1

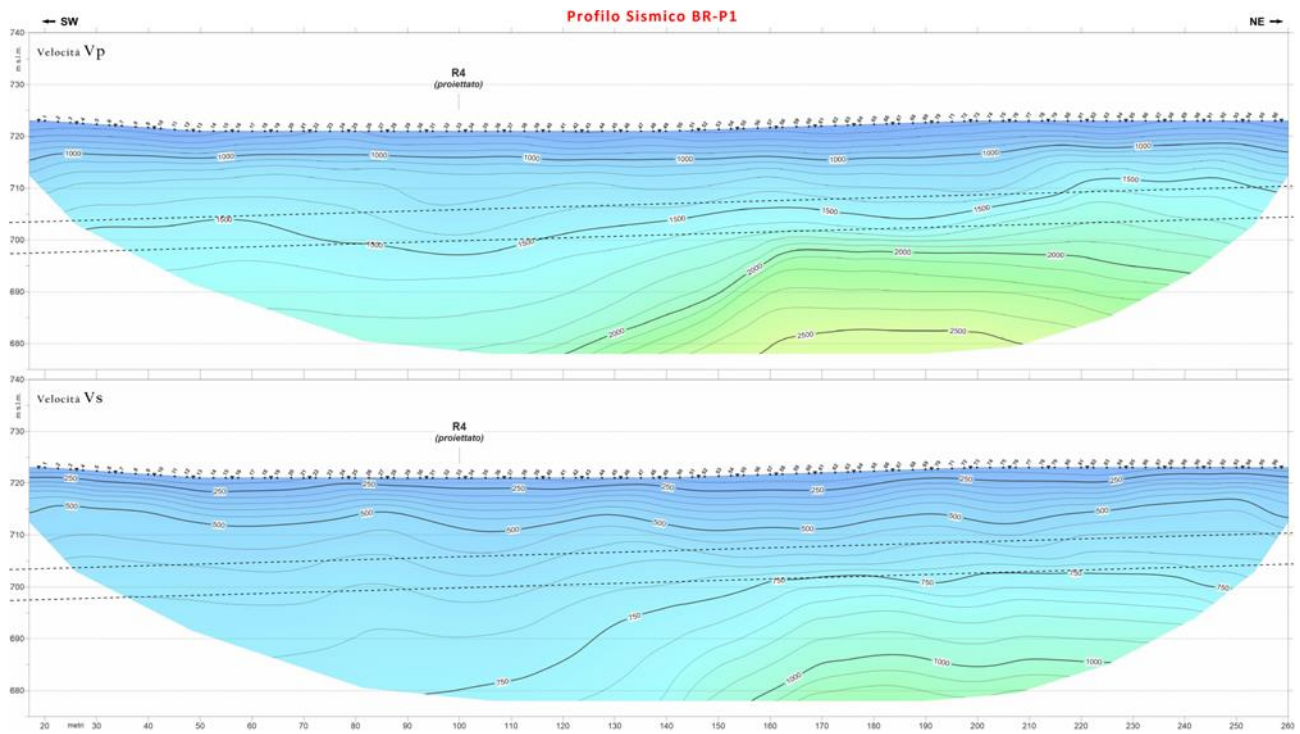


Fig. 30 – Sezione sismica BR-P1.

Si osserva un'unità superficiale, sviluppata con andamento regolare per uno spessore medio di circa 20.0 m, caratterizzata da velocità V_p inferiori a 1500 m/s (colore azzurro) e V_s inferiori a 600 m/s, riferibile ai materiali di copertura di origine fluvio-glaciale.

Al di sotto dell'unità superficiale si definiscono due condizioni sismostratigrafiche differenti:

- Un settore centro meridionale caratterizzato, fino ad oltre 40.0 m di profondità dal p.c., da un incremento dei valori delle velocità V_p fino a 1800 m/s (colore azzurro-verde chiaro) e V_s fino a 700 m/s, indicativi di un graduale passaggio a materiali maggiormente competenti;
- Un settore centro-settentrionale definito da valori di velocità sismiche V_p e V_s che superano rispettivamente i 2000 m/s e i 750 m/s a profondità di poco superiori ai 20.0 m dal p.c., tali valori sono riconducibili ad una ulteriore incremento di compattazione dei litotipi. Le velocità sismiche aumentano fino a raggiungere, alla base della sezione, valori massimi di V_p di 2500 m/s e V_s di 1100 m/s.

6.4.3 Profilo BR-P2

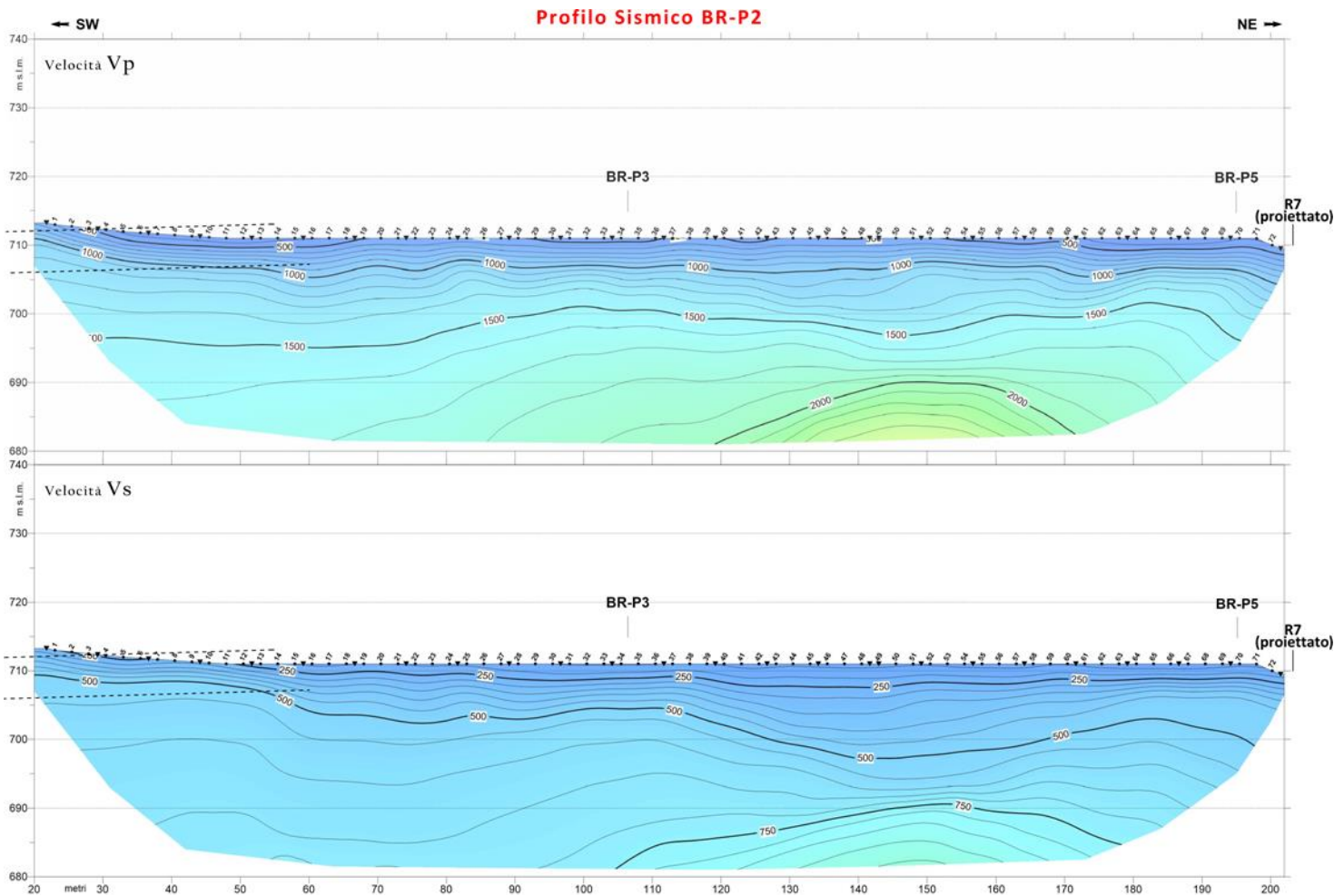


Fig. 31 – Sezione sismica BR-P2.

Si osserva un'unità superficiale sviluppata con continuità mediamente per spessori di 12.0/13.0 m caratterizzata da valori delle velocità sismiche Vp progressivamente crescenti fino a 1500 m/s (colore azzurro) e delle velocità sismiche Vs fino a 600 m/s, riferibili a materiali di copertura di origine fluvio-glaciale.

Al di sotto si differenziano due condizioni sismostratigrafiche differenti:

- Un settore centro meridionale caratterizzato, fino ad almeno 25.0 m di profondità dal p.c., da un incremento dei valori delle velocità Vp fino a 1800 m/s (colore azzurro-verde chiaro) e Vs fino a 700 m/s, indicativi di un graduale passaggio a materiali a maggior grado di compattazione;

- Un settore settentrionale definito da valori di velocità sismiche Vp e Vs che superano rispettivamente i 2000 m/s e i 750 m/s a profondità minime prossime ai 20.0 m dal p.c. tra le progr. 140-160 m, associabili presumibilmente alla porzione sommitale del substrato roccioso (affiorante in sponda dx Isarco). In tale settore le velocità sismiche incrementano, fino a raggiungere alla base della sezione valori massimi di Vp di 2400 m/s e Vs di 950 m/s. Tale unità si approfondisce all'estremità settentrionale.

6.4.4 Profilo BR-P3

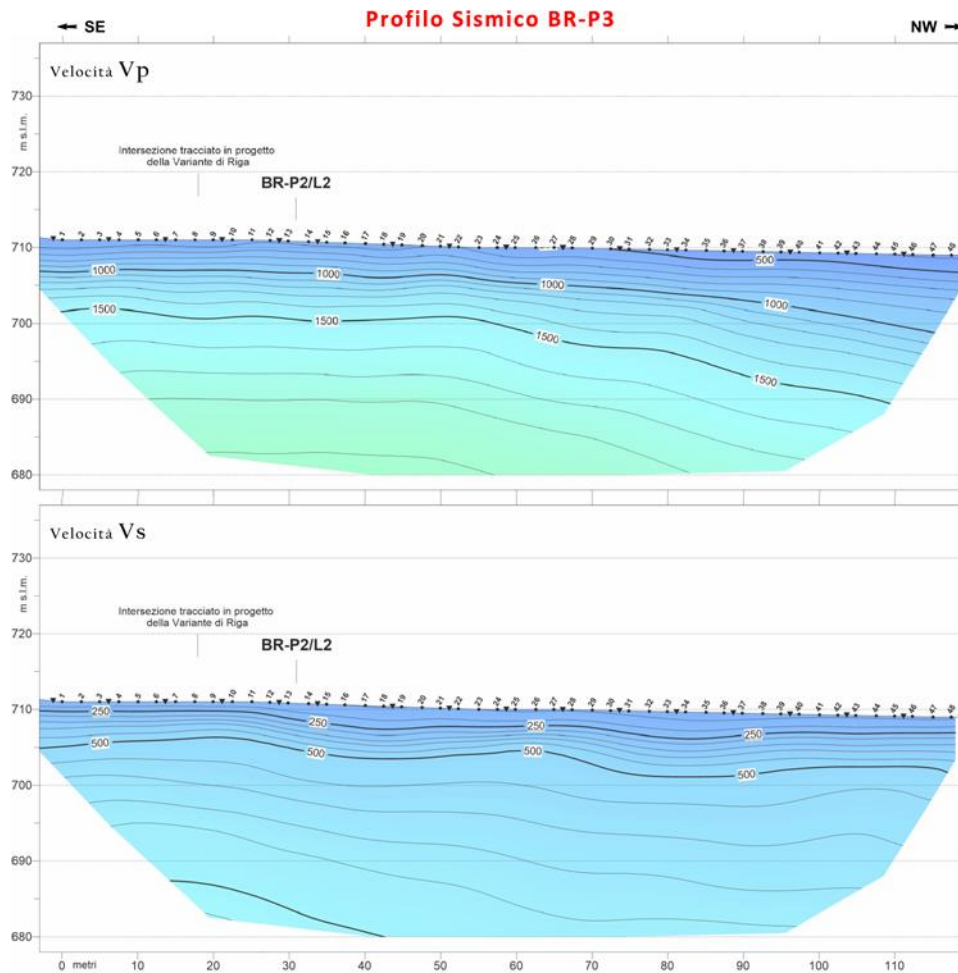


Fig. 32 – Sezione sismica BR-P3.

In questa sezione, sviluppata in senso ortogonale alla precedente, si osserva con regolarità un progressivo incremento delle velocità sismiche fino a raggiungere valori massimi di V_p di 1800/1900 m/s e V_s di 750/800 m/s fino ad almeno 20.0m di profondità, riferibili ad un graduale incremento del grado di competenza dei materiali. I valori massimi si registrano nel settore sud-orientale tra le progr. 20-40 m.

6.4.5 Profilo BR-P5

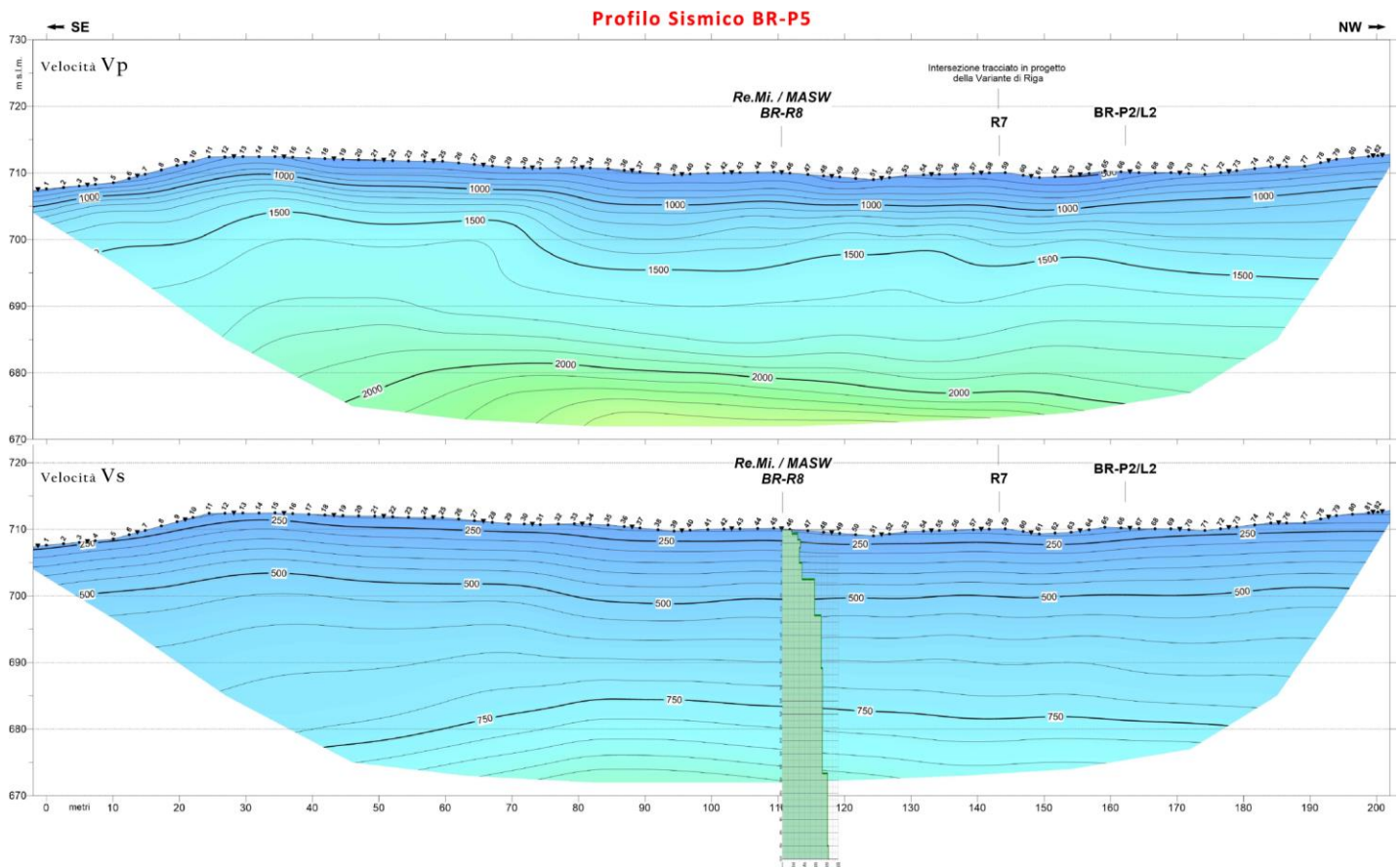


Fig. 33 – Sezione sismica BR-P5.

Si osserva un'unità superficiale, sviluppata con andamento piuttosto regolare per uno spessore medio di circa 12.0-14.0 m, caratterizzata da velocità V_p inferiori a 1500 m/s (colore azzurro) e V_s inferiori a 500 m/s, riferibile ai materiali di copertura di origine fluvio-glaciale.

Al di sotto dell'unità superficiale si definiscono altre n.2 unità sismiche:

- Un'unità intermedia costituita da valori delle velocità V_p fino a 2000 m/s (colore azzurro-verde chiaro) e V_s fino a 750 m/s, indicativi di un graduale passaggio a materiali maggiormente competenti, essa presenta spessore medio di circa 20.0 m dopo la progr. 60 m; prima di tale progressiva l'unità tende ad approfondirsi;
- Un'unità di fondo definita da valori di velocità sismiche V_p e V_s che superano rispettivamente i 2000 m/s e i 750 m/s a profondità oltre i 30.0 m dal p.c.. Le velocità sismiche incrementano, ove raggiungono alla base della sezione valori massimi di V_p di 2400 m/s e V_s di 950 m/s, associabili ad una porzione più compatta del substrato roccioso.

Per una visione d'insieme dei modelli descritti è stata elaborata una rappresentazione 3D, visibile in Fig. 34 e Fig. 35.

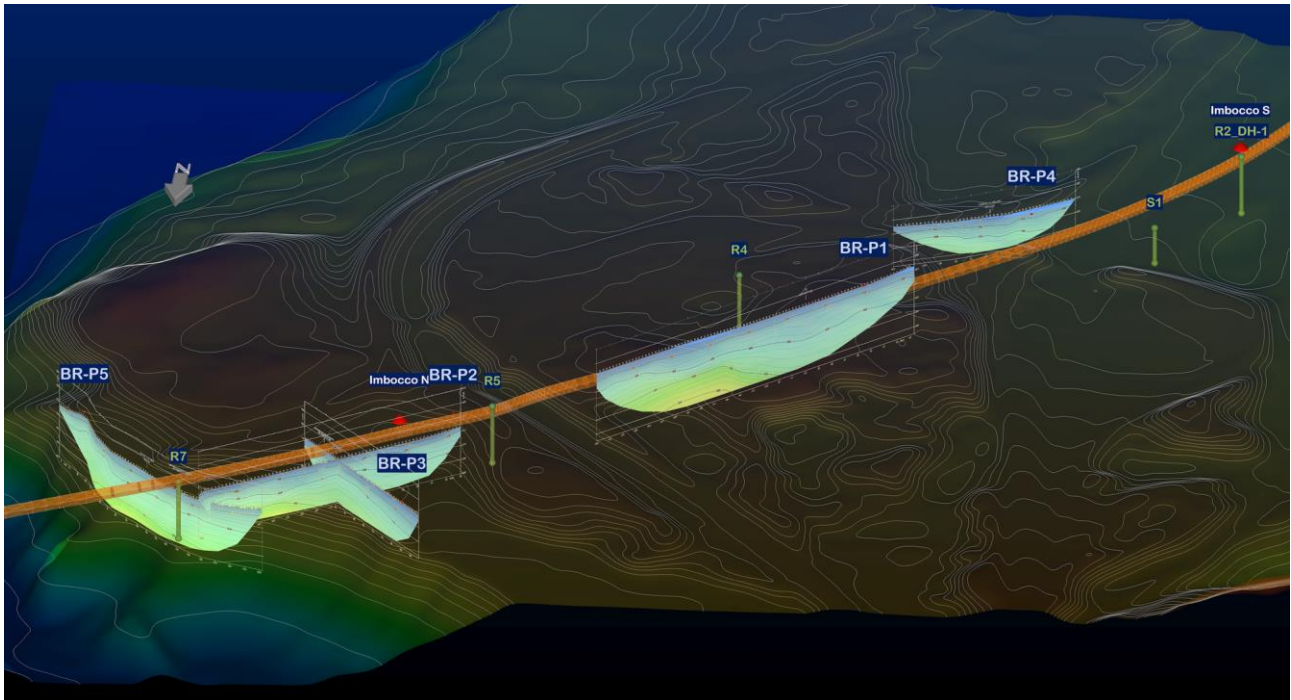


Fig. 34 – Vista 3D da Nord delle sezioni sismiche BR-P1, BR-P2, BR-P3, BR-P4 e BR-P5 in onde P, con ubicazione dei sondaggi geognostici eseguiti, andamento del tracciato (in arancione) e imbocchi della galleria della Variante di Riga in progetto.

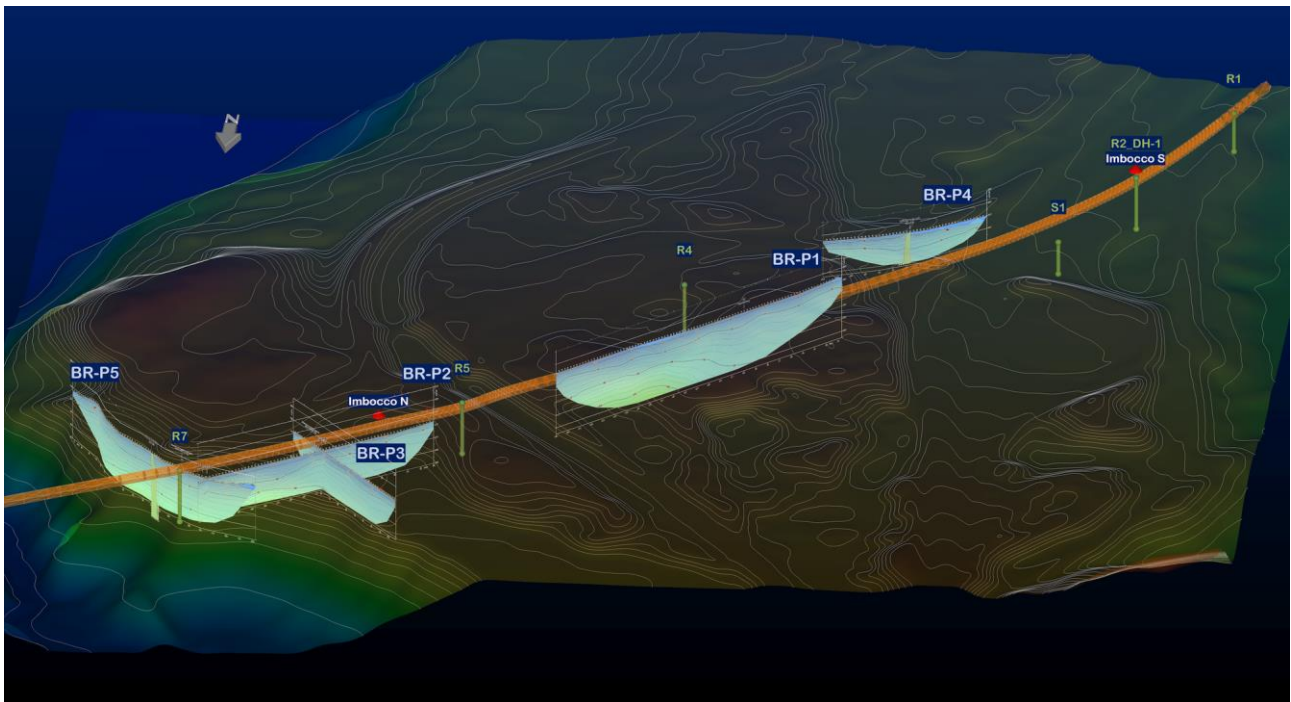


Fig. 35 – Vista 3D da Nord delle sezioni sismiche in onde S.