GEOMOK

GEOLOGY | ENGINEERING | ENVIRONMENT

REGIONE ABRUZZO

PROVINCIA DELL'AQUILA

COMUNE DI CAPISTRELLO



LAVORI DI SISTEMAZIONE DELLA S.P. N. 63 SIMBRUINA – TRATTO DI COMPETENZA DELLA PROVINCIA DELL'AQUILA

RELAZIONE DELLE INDAGINI

CUP: F47H21008480001

Committente: **Provincia dell'Aquila**

Rev	Data	Motivazioni			N° lavoro
00	*03/2025*	Emissione			*095/24*

Geomok S.r.l.
Via Chisimaio 141 – 33100 Udine (UD)
Tel. 0432/501628 e-mail: info@geomok.it

Provincia dell'Aquila Prot.0008059-01/04/2025-p_aq-PG-0337-001100020001-A 0025

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 5
2 MEOTDI 7
2.1 STAZIONE GEOMECCANICA 7
2.1.1 CLASSIFICAZIONE DI BIENIAWSKI (RMR) 7
2.1.2 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) 13
2.2 HVSR 14
2.3 MASW 15
2.4 SISMICA A RIFRAZIONE 16
2.5 GEORADAR 18
2.5.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA 20
2.6 ELETROMAGNETOMETRO FDEM 21
3 RISULTATI 24
3.1 STAZIONI GEOMECCANICHE 24
3.1.1 POINT LOAD TEST 24
3.1.2 STAZIONE GEOMECCANICA N°1 26
3.1.3 STAZIONE GEOMECCANICA N°2 27
3.1.4 STAZIONE GEOMECCANICA N°3 28
3.1.5 STAZIONE GEOMECCANICA N°4 29
3.1.6 STAZIONE GEOMECCANICA N°5 30
3.1.7 STAZIONE GEOMECCANICA N°6 31
3.1.8 STAZIONE GEOMECCANICA N°7 32
3.1.9 STAZIONE GEOMECCANICA N°8 33
3.1.10 RIASSUNTO CLASSIFICAZIONI 34
3.1.11 STIMA PARAMETRI GEOTECNICI 35
3.1.12 STIMA DEL VOLUME UNITARIO 36
3.2 HVSR 38
3.2.1 HVSR 1 38
3.2.2 HVSR 2 41
3.2.3 HVSR 3 45
3.2.4 COMMENTO RISULTATI HVSR 49

3.3 MASW 50
3.3.1 MASW 1 51
3.3.2 MASW 2 52
3.3.3 MASW 3 54
3.4 SISMICA A RIFRAZIONE 56
3.4.1 SISMICA A RIFRAZIONE N°1 56
3.4.2 SISMICA A RIFRAZIONE N°2 61
3.4.3 SISMICA A RIFRAZIONE N°3 66
3.5 GEORADAR 71
3.6 ELETTROMAGNETOMETRO 77
4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI 84
UBICAZIONE INDAGINI SISMICHE 86
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA 87

1 INTRODUZIONE

La presente campagna di indagini geologiche è finalizzata alla caratterizzazione geomeccanica-geotecnica e sismica dell'ammasso roccioso affiorante lungo la SP 63 "Simbruina" all'interno del territorio comunale di Capistrello in Provincia dell'Aquila. Le campagna di indagini ed i rilievi geologici si inseriscono all'interno dei *lavori di sistemazione della S.P. N.63 Simbruina – tratto di competenza della Provincia dell'Aquila* che interessano il tratto di viabilità compreso tra la progressiva chilometrica km 15+000 e km 20+950, in particolare il tratto di viabilità esposto al problema della caduta massi e di fenomeni gravitativi in roccia.

La campagna di indagini geofisiche ha previsto la realizzazione delle seguenti indagini:

- N°8 Stazioni geomeccaniche;
- N°3 indagini sismiche HVSR (*Horizontal to VHVSRical Spectral Ratio*);
- N°3 indagine sismiche a rifrazione in onde P;
- N°3 indagine sismica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves);
- N°1 rilievo geofisico tramite elettromagnetometro;
- N°1 rilievo geofisico tramite georadar;

Di seguito si riporta l'ubicazione del tratto di viabilità interessato dalle indagini sopra citate.

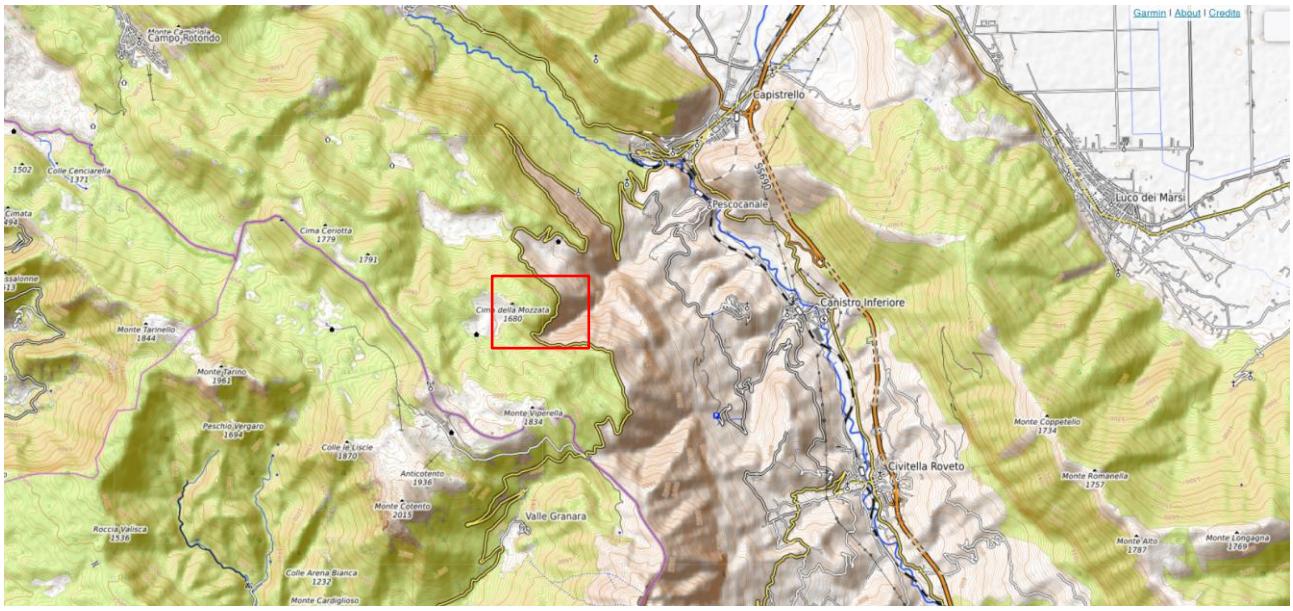


Fig. 1. Ubicazione dell'area d'indagine.

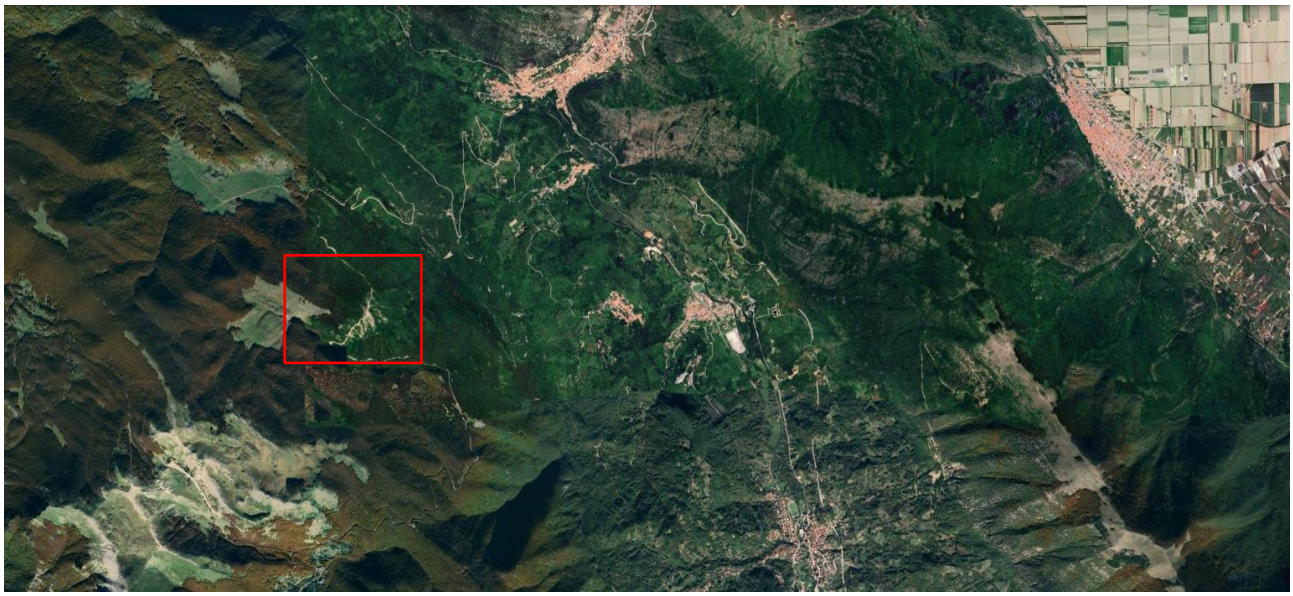


Fig. 2. Inquadramento satellitare dell'area indagine.

Nei capitoli a seguire verranno illustrati i risultati ottenuti in seguito all'esecuzione delle indagini sopracitate.

2 MEOTDI

2.1 STAZIONE GEOMECCANICA

2.1.1 CLASSIFICAZIONE DI BIENIAWSKI (RMR)

Nel campo della progettazione di infrastrutture di ingegneria civile, siano esse legate alla stabilità di un versante o alla stabilità di un'opera in sotterraneo, difficilmente si possono avere informazioni dettagliate sulle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso interessato alla progettazione. Allora diventa importante poter utilizzare uno schema che possa soddisfare le richieste, un metodo empirico che permetta di risolvere i problemi dovuti alla scarsa conoscenza o esperienza di una determinata area.

Le classificazioni di Beniawsky e Romana (la seconda è derivata dalla prima, che risultava troppo "conservativa") consentono di soddisfare i quesiti richiesti e le problematiche che si presentano.

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

A1 = resistenza a compressione uniassiale;

A2 = Rock Quality Designation Index (Indice RQD);

A3 = spaziatura delle discontinuità;

A4 = condizioni delle discontinuità;

A5 = condizioni idrauliche;

A6 = orientamento delle discontinuità.

Da questi sei parametri si ricava l'Rock Mass Rating (RMR, Beniawsky) e con le dovute correzioni apportate da Romana nel 1985 lo Slope Mass Rating (SMR).

L'RMR, nella pratica, viene differenziato come:

RMR di base = RMRb = A1 + A2 + A3 + A4 + A5

RMR corretto = RMRc = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) + A6

VALORE DI A1

A1 si può ricavare sia da prove di laboratorio (Point Load Test), sia da prove di campagna mediante sclerometro o da prove speditive (Standard ISRM), definendo la resistenza a compressione uniassiale Su.

La prova Point Load Test

La prova Point Load ha il vantaggio di essere portatile; da essa si deriva l'indice di carico puntuale Is che viene correlato alla resistenza alla compressione uniassiale Su mediante la relazione:

Su = K Is

K è un coefficiente moltiplicativo per il quale l'ISRM consiglia il valore 24, ma nella pratica si è evidenziato come tale valore non è univoco ma largamente variabile. Palmström suggerisce di variare K in funzione di Is secondo lo schema seguente:

Is (MPa)	K
< 3,5	14
3,5 – 6,0	16
6,0 – 1,0	20
> 6,0	25

Le prove sclerometriche

Il martello di Schmidt, noto come sclerometro, è ampiamente utilizzato come prova non distruttiva e volta a misurare la "durezza di rimbalzo" della roccia. Dalla prova si ricava l'indice di rimbalzo R che è possibile correlare alla resistenza alla compressione uniassiale mediante la relazione di Irfan e Dearman (1978):

$$Su = 0{,}775\ R + 21{,}3$$

Standard ISRM

In una fase preliminare delle indagini, mancando prove di campagna o di laboratorio, il valore di Su può essere stimata osservando la risposta della roccia alla sua percussione con il martello da geologo.

Dalla risposta della roccia si possono ricavare i seguenti valori:

La roccia si incide con l'unghia o si sbriciola con le mani	0,25 – 1 MPa
Si sbriciola sotto i colpi della punta, lastre sottili si rompono con facilità con le mani	1 – 5 MPa
La punta lascia deboli buchi, lastre sottili si rompono con forti pressioni delle mani	5 – 25 MPa
La roccia si frattura con un colpo	25 – 50 MPa
Si frattura dopo due-tre colpi	50 – 100 MPa
Si frattura solo dopo molti colpi	100 – 200 MPa
Si scheggia solamente	> 200 MPa

Definita la resistenza a compressione Su è possibile ricavare il valore del primo parametro A1.

Se si utilizzano prove Point Load o prove sclerometriche risulta più agevole, rispetto alle tabelle e ai grafici proposte da Beniawsky, ricavare il valore di A1 trasformando i grafici in forma di equazioni:

VALORE DI Su (MPa)	EQUAZIONE
<= 44,5	$A1=\frac{4}{44,5}S_u+1$
44,5 ÷ 93,75	$A1=\frac{4}{49,25}S_u+1,368$
93,75 ÷ 140	$A1=\frac{3}{46,25}S_u+2,919$
140 ÷ 180	$A1=0,0375S_u+6,75$
180 ÷ 240	$A1=0,025S_u+9$
> 240	A1 = 15

Qualora si utilizzi lo Standard ISRM si usa la tabella proposta da Beniawsky nell'ultima versione del sistema (1989):

Su (MPa)	> 200	100 - 200	50 - 100	25 - 50	5 – 25	1 - 5	< 1
Coefficiente A1	15	12	7	4	2	1	0

VALORE DI A2

Se si effettuano sondaggi è possibile ricavare il valore di RQD, da cui si ottiene il coefficiente A2, dal recupero di percentuale di carotaggio riferito alla somma degli spezzoni di carota con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm:

$$RQD=\frac{\sum L_c}{L_t}\cdot 100$$

dove:

Lc = somma delle lunghezze degli spezzoni di carota > 100 mm

Lt = lunghezza totale del tratto in cui si è misurata Lc.

In mancanza di carote di sondaggio, RQD si ricava dal numero di famiglie di discontinuità caratterizzanti l'ammasso roccioso e dalla misura della loro spaziatura. Dalla relazione di Palmström (1982) si ha:

RQD = 115 – 3,3 Jv

dove Jv è il numero di fratture per metro cubo di roccia.

In forma alternativa RQD si può ricavare dalla formula di Priest e Hudson (1981):

$$RQD = 100\ e(0{,}1\ n)\ (0{,}1\ n + 1)$$

con n numero medio di giunti per metro.

Calcolato RQD con uno di questi metodi, si ricava il coefficiente A2 mediante le equazioni, che derivano sempre dai grafici di Beniawsky:

VALORE DI RQD %	EQUAZIONE
<= 26,5	$A2 = \frac{3}{26{,}6} RQD + 3$
26,5 ÷ 39	$A2 = \frac{2}{12{,}4} RQD + 1{,}71$
39 ÷ 76,6	$A2 = \frac{7}{37{,}6} RQD + 0{,}739$
> 76,6	$A2 = \frac{5}{23{,}4} RQD - 1{,}367$

VALORE DI A3

Una volta calcolata la spaziatura media, cioè la distanza media tra due discontinuità adiacenti, è possibile ricavare il valore del coefficiente A3, mediante le seguenti relazioni:

SPAZIATURA (m)	EQUAZIONE
<= 0,2	$A3 = 15\,s + 5$
0,2 ÷ 0,4	$A3 = 10\,s + 6$
0,4 ÷ 0,66	$A3 = 7{,}752\,s + 5{,}9$
0,66 ÷ 0,94	$A3 = 7{,}067\,s + 7{,}35$
0,94 ÷ 1,6	$A3 = 6{,}07\,s + 8{,}288$
1,6 ÷ 2,0	$A3 = 5\,s + 10$
> 2,0	A3 = 20

VALORE DI A4

Determinare dalle tavole di classificazione di Beniawsky il valore numerico relativo alla condizione delle discontinuità, invece, risulta molto soggettivo.

Perciò per valutare correttamente A4 conviene procedere sommando alcuni parametri numerici attribuibili alla persistenza del giunto, all'apHVSRura del giunto, alla rugosità dello stesso, all'alterazione delle pareti, e al materiale di riempimento:

$$A4 = v1 + v2 + v3 + v4 + v5$$

I valori da assegnare sono:

v1 – Persistenza del giunto

PERSISTENZA (m)	v1
< 1	6
1 ÷ 3	4
3 ÷ 10	2
10 ÷ 20	1
> 20	0

v2 – Apertura del giunto

APERTURA (mm)	v2
Completamente chiuso	6
< 0,1	5
0,1 ÷ 1	4
1 ÷ 5	1
> 5	0

v3 – Rugosità del giunto

RUGOSITA'	v3
Molto Rugosa	6
Rugosa	5
Leggermente rugosa	3
Liscia	1
Levigata	0

v4 – Alterazione delle pareti

ALTERAZIONE	v4
Non alterate	6
Leggermente alterate	5
Mediamente alterate	3
Molto alterate	1
Decomposte	0

v5 – Riempimento delle discontinuità

RIEMPIMENTO (mm)	RIEMPIMENTO	v5
-	Assente	6
< 5	Compatto	4
> 5	Compatto	2
< 5	Soffice	2
> 5	Soffice	0

VALORE DI A5

Questo valore viene derivato dalle condizioni idrauliche riferite ad un fronte di 10 m. Dalle tabelle fornite da Beniawsky si ottiene:

Venute d'acqua su 10 m di lunghezza	Nessuna	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
Condizione	Asciutta	Umida	Bagnata	Deboli venute	Forti venute
Coefficiente A5	15	10	7	4	0

VALORE DI A6

Per l'orientamento delle discontinuità si applica un coefficiente di correzione A6, a seconda che si tratti di gallerie, fondazioni o pendii.

APPLICAZIONE	Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Gallerie	0	-2	-5	-10	-12
Fondazioni	0	-2	-7	-15	-25
Pendii	0	-5	-25	-50	-60

VALORE DI RMR (ROCK MASS RATING) E PARAMETRI CARATTERISTICI DELL'AMMASSO

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

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

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

coesione di picco cp (kPA) = 5 RMRb

angolo di attrito di picco ϕp = 0,5 RMRb + 5

modulo di deformazione E (GPa) = 2 RMRb – 100

La formula per la determinazione di E è da considerarsi valida per RMR superiori a 50. Per valori inferiori si utilizza la seguente relazione:

modulo di deformazione E (GPa= = $10^{((RMRb-10)/40)}$

2.1.2 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)

Il GSI (Geological Strength Index) è un sistema di classificazione dell'ammasso roccioso sviluppato nell'ambito della meccanica. Le caratteristiche geologiche della roccia, insieme alla valutazione visiva dello stato di fratturazione dell'ammasso, vengono utilizzate come input diretto per la selezione dei parametri per la stima della resistenza e della deformabilità della massa rocciosa. Al fine di ridurre la soggettività che sta dietro le osservazioni visive per la valutazione del GSI, sono stati sviluppati diversi approcci che consentono una quantificazione più oggettiva delle proprietà dell'ammasso roccioso e che tengano conto sia dell'intensità della fratturazione sia delle caratteristiche delle discontiuità. Hoek et al. 2013 ha inserito una scala sull'asse A e B del diagramma GSI. La scala A definisce la qualità superficiale dell'ammasso roccioso avvalendosi del parametro 1,5JCond89, ottenibile dalla valutazione del parametro A4 della classificazione di Beniawski 1989. La scala B, invece, rappresenta il grado di suddivisione della massa rocciosa ed è definita come RQD/2 nel diagramma GSI di base. Il valore del GSI è così ottenibile secondo la relazione:

GSI = 1.5JCond89 + RQD/2

2.2 HVSR

La tecnica HVSR consiste nella misura passiva di rumore sismico ambientale (microtremori), ovvero di oscillazioni continue di piccola ampiezza originate dalla sovrapposizione di effetti generati sia da sorgenti naturali (pHVSRurbazioni meteorologiche a larga scala, vento, onde oceaniche,...) che da sorgenti antropiche (traffico, attività industriali,…), lungo tre assi ortogonali tra loro (N-S, E-W, U-D).

Le linee guida della tecnica per l'ottimizzazione del rilievo sono state illustrate dal progetto SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitation).

Il risultato dell'indagine HVSR è un grafico frequenza–ampiezza del rapporto tra il moto delle particelle lungo le componenti orizzontali e il moto delle particelle lungo la componente vHVSRicale (H/V).

Ciascun picco non industriale nel grafico H/V corrisponde generalmente ad una variazione di impedenza acustica I tra due mezzi (I=ρv, dove ρ è la densità del mezzo attraversato e v è la velocità di propagazione delle onde sismiche nello stesso). Generalmente, il picco HVSR di origine naturale è determinato da una depressione nello spettro di ampiezza della componente vHVSRicale rispetto alle componenti orizzontali; i picchi di natura industriale, invece, si presentano come picchi positivi, di diversa ampiezza, su tutte e tre le componenti.

Nell'esempio semplificato di un sistema omogeneo e isotropo a due strati, quando all'interfaccia tra i due mezzi il rapporto delle impedenze è significativo, si genera un picco sulla curva del rapporto spettrale H/V in corrispondenza della frequenza di risonanza del sito (f0); tale frequenza dipende dalla profondità dell'interfaccia che genera il contrasto di impedenza (H) e dalla velocità media di propagazione delle onde di taglio (Vs) nello strato superficiale secondo la formula semplificata:

$$f_0 = Vs/4H$$

Da ciò ne consegue che, a parità di Vs dello strato più superficiale, maggiore è la frequenza del picco di risonanza del sito e minore è la profondità della discontinuità che lo genera all'interno del sottosuolo. Viceversa, l'assenza di picchi di risonanza significativi sulla curva del rapporto spettrale H/V, indica sostanziale omogeneità all'interno del sottosuolo; tale situazione si verifica o in siti su roccia o in siti in cui la velocità di propagazione delle onde di taglio aumenta gradualmente con la profondità, senza significative variazioni di impedenza all'interno dello stesso.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'acquisizione in campagna è stata effettuata mediante un sismografo triassiale denominato SR04HS Geobox della ditta Sara Srl; per l'esecuzione corretta di queste misure sono state tenute in considerazione le indicazioni contenute nel Progetto SESAME (Site EffectS Assessment using Ambient Excitations, 2004).



Fig. 3. Strumentazione utilizzata per le misure di microtremore.

2.3 MASW

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio Vs, basandosi sulla dispersione delle onde superficiali generate meccanicamente in un punto della superficie e registrate da uno stendimento lineare di geofoni collegati ad un sismografo. La dispersione è il fenomeno fisico per il quale le diverse frequenze con le quali si propagano nel sottosuolo le onde di superficie viaggiano con velocità di fase diverse, funzione dalle caratteristiche del mezzo attraversato. Le componenti a frequenza minore (lunghezze d'onda maggiori) sono influenzate dalla parte più profonda, mentre le componenti a frequenza maggiore (lunghezze d'onda minori) dipendono dalle caratteristiche più superficiali del sottosuolo; questo metodo consente quindi di ottenere una distribuzione delle velocità con la profondità, in funzione della frequenza. Generalmente, il metodo MASW prevede l'acquisizione in campagna di due classi di onde di superficie, le Onde di Rayleigh e le Onde di Love. Le onde di Rayleigh vengono generate da una sorgente ad impatto verticale (la classica martellata) e registrate tramite comuni geofoni a componente verticale (con frequenza propria di 4.5 Hz) (configurazione ZVF) o, in alternativa, registrate tramite geofoni orizzontali (sempre con frequenza propria di 4.5 Hz) con asse allineato nella direzione di stendimento (configurazione RVF). Le onde di Love vengono generate invece con una sorgente di taglio e registrate tramite geofoni orizzontali, in questo caso però con asse allineato ortogonalmente alla direzione di stendimento (configurazione THF).

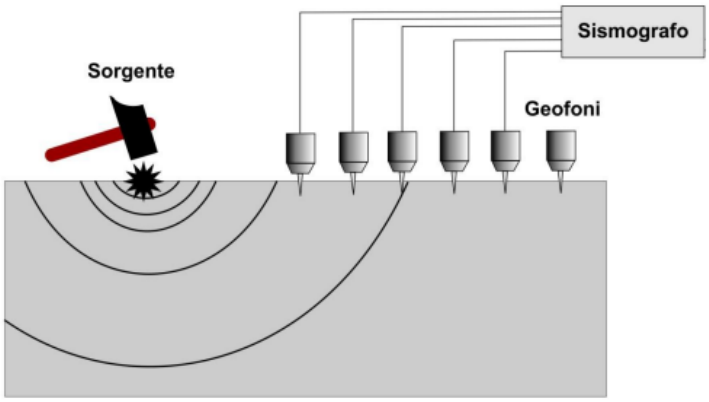


Fig. 4. Tipica configurazione di acquisizione con sorgente ad impatto verticale

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'acquisizione è avvenuta tramite sismografo Geode della Geometrics Inc., collegato a 12 geofoni verticali a frequenza propria 4,5Hz in configurazione ZVF per acquisire la componente verticale delle onde di Rayleigh e, in un secondo tempo, a 12 geofoni orizzontali a frequenza propria di 4,5Hz in configurazione THF per acquisire la componente trasversale dell'onda di Love e RVF per la componente radiale dell'onda di Rayleigh.

2.4 SISMICA A RIFRAZIONE

La prospezione sismica consiste nell'inviare al terreno un impulso elastico e di rilevare, mediante una serie di sensori chiamati geofoni, le caratteristiche di propagazione delle onde generate. Nell'indagine a rifrazione un numero di geofoni generalmente pari o superiore a 12 viene steso lungo un allineamento in superficie, e il terreno viene energizzato in diversi punti, almeno agli estremi e al centro dello stendimento; un aumento dei punti di energizzazione si risolve in una maggiore quantità di dati e in un miglior rapporto segnale/disturbo. I geofoni ricevono l'impulso elastico e lo trasmettono allo strumento di registrazione, dal quale passa al computer esterno di controllo dove viene visualizzato e registrato, permettendo una prima analisi dei sismogrammi.

L'incontro di materiali a caratteristiche differenti presenti nel sottosuolo perturba il moto delle onde sismiche e genera treni di arrivi molto complessi ai sensori; nel metodo a rifrazione è importante rilevare i tempi dei primi arrivi delle onde che ritornano in superficie dopo essere state rifratte in profondità. Le parti principali di una traccia sismica sono l'onda diretta, quella riflessa e quella rifratta secondo l'angolo critico. La rifrazione dell'onda avviene al confine tra due strati dei quali il più profondo ha velocità maggiore, situazione abbastanza comune nella pratica. Per posizioni geofoniche vicine alla sorgente sismica le prime onde sismiche che arrivano sono quelle dirette, che viaggiano nel primo strato. Oltre una certa distanza i primi arrivi sono relativi all'onda rifratta critica proveniente dal secondo strato, caratterizzato da velocità maggiore. Le procedure di interpretazione prevedono tutte la lettura preliminare (picking), quanto più precisa possibile, dei tempi di tragitto dei primi arrivi ad ogni postazione geofonica, per ogni diversa energizzazione, per poter poi calcolare le velocità sismiche degli strati e la profondità delle superfici di rifrazione.

L'analisi dei risultati conduce, attraverso l'elaborazione di opportuni diagrammi spazio-tempo chiamati "dromocrone", alla ricostruzione di un profilo del sottosuolo, distinto in vari orizzonti differenziati sulla base della velocità di trasmissione delle onde elastiche. I procedimenti di calcolo per la ricostruzione delle sezioni si basano su formule derivate dalla legge di Snell dell'ottica. L'inversione tomografica si differenza dai metodi classici perché non prevede vincoli geometrici per gli strati ottenendo in genere i migliori risultati quando i contrasti di velocità non sono bruschi ma graduali, esiste cioè un gradiente di velocità anzichè esserci un passaggio netto di velocità da un mezzo all'altro; è indicata inoltre quando vi siano variazioni orizzontali della velocità e quando si sia in presenza di una topografia accidentata. Quanto più queste condizioni sono accentuate tanto più i metodi tradizionali di interpretazione daranno risultati falsati.

Il metodo di interpretazione prevede che sia fornito un modello iniziale di velocità (generalmente generato da una inversione effettuata con un metodo speditivo che usi i tempi delay, come ad esempio il metodo time-term). Il modello offre una prima distribuzione delle velocità e l'intervallo di velocità da fornire alla successiva procedura di ray-tracing.

L'obiettivo principale è di ricercare il minimo tempo di tragitto tra la sorgente e il ricevitore per ogni coppia degli stessi; il problema è risolvibile solo attraverso un procedimento iterativo ai minimi quadrati. Per il ray-tracing il modello viene diviso in celle a velocità costante e quindi si attiva una procedura automatica che traccia iterativamente sul modello le tracce dei raggi sismici, con l'obiettivo di minimizzare l'errore quadratico medio (RMS) tra i tempi osservati e quelli calcolati. Valutato il risultato, l'operatore può intervenire sul modello variando sia l'andamento dei confini tra strati che le velocità degli stessi e facendo ripartire il ray-tracing, ottenendo un nuovo RMS. La procedura può essere ripetuta più volte al fine di ottenere un modello finale soddisfacente.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E SETUP ACQUISIZIONE

L'acquisizione è avvenuta tramite sismografo Geode della Geometrics Inc., collegato a 24 geofoni verticali a frequenza propria 14 Hz.

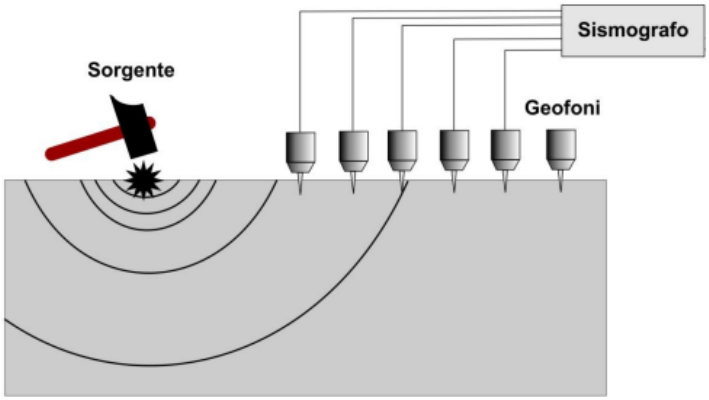


Fig. 5. Tipica configurazione di acquisizione con sorgente ad impatto verticale

2.5 GEORADAR

La tecnica GPR (Ground Penetrating Radar) si basa sull'immissione di brevi impulsi elettromagnetici ad alta frequenza nel sottosuolo.

Il sistema radar è costituito da una coppia di antenne, una trasmittente e una ricevente, poste all'interno di uno stesso contenitore con funzione di schermatura e mosse sul terreno in modo da ottenere un profilo radar mantenendo inalterata la loro separazione (offset). L'antenna trasmittente è collegata ad un dispositivo che la alimenta con un'oscillazione di corrente dalla forma ben precisa e confinata nel tempo in un determinato intervallo (transiente), mentre l'antenna ricevente viene utilizzata in maniera passiva, ovvero rileva l'oscillazione di corrente prodotta dagli echi generati dall'antenna trasmittente. Successivamente avviene la digitalizzazione del segnale campionato sia nel tempo sia nel valore di corrente misurato (ampiezza) dall'unità di controllo centrale, la quale provvede anche alla sincronizzazione delle due antenne (timing). I valori discreti vengono organizzati in "tracce"; ogni traccia rappresenta la registrazione dell'ampiezza in funzione del tempo per una determinata posizione delle antenne. L'insieme di più tracce costituisce la "sezione" o "profilo" GPR (radargramma). La modalità di acquisizione dati utilizzata è di tipo "single fold" (a copertura singola), dove ogni punto in profondità viene illuminato dalla radiazione elettromagnetica una sola volta. Quando l'impulso elettromagnetico nel propagarsi in profondità incontra una superficie che separa due mezzi aventi caratteristiche fisiche diverse, una parte dell'energia incidente viene riflessa ed una parte prosegue nel secondo mezzo. Le onde riflesse dalla superficie di discontinuità ritornano in superficie e vengono rilevate dall'antenna ricevente, mentre la parte di energia trasmessa che procede oltre la discontinuità stessa è disponibile per altre riflessioni su eventuali discontinuità più profonde.

La quantità di energia che viene riflessa dipende dal coefficiente di riflessione e dalle impedenze dei mezzi attraversati. I parametri fisici che determinano la propagazione dell'onda elettromagnetica sono la conduttività e la permettività dielettrica del mezzo attraversato; per tale ragione, ad esempio, in mezzi conduttivi (argille) o in presenza di acqua (terreni saturi) si avrà un forte assorbimento dell'onda elettromagnetica ed una scarsa penetrazione del segnale.

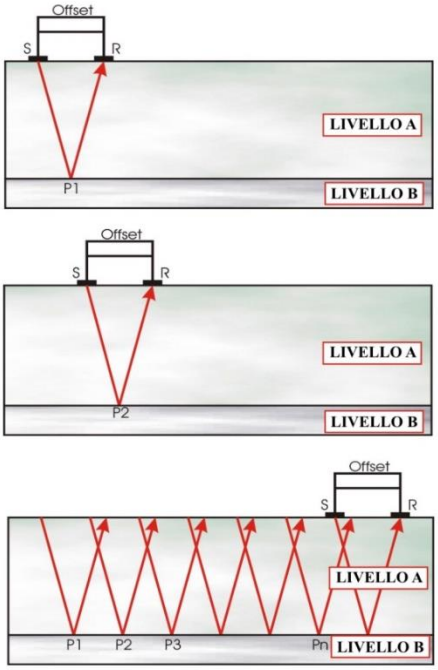


Fig. 6. Modalità di acquisizione "single fold"

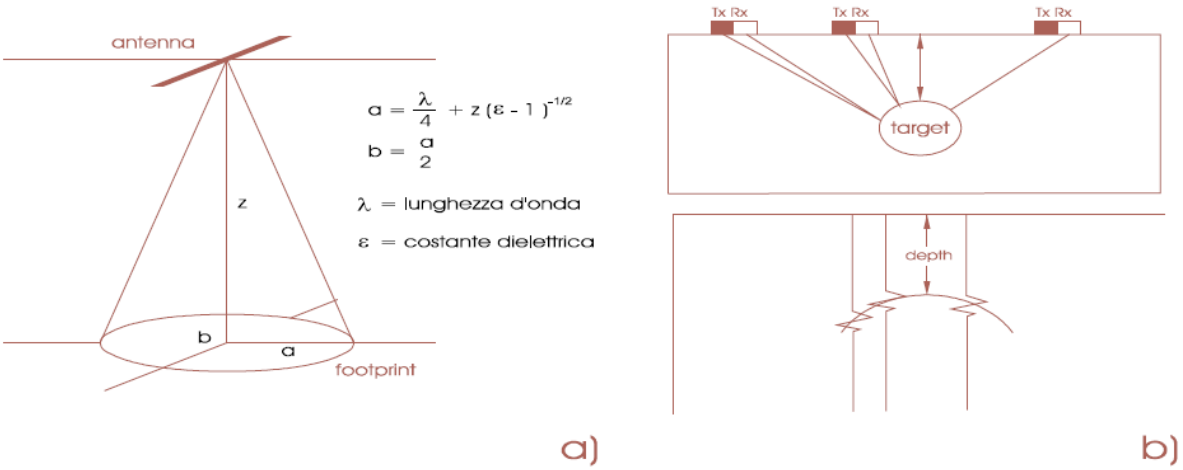


Fig. 7. Angolo solido di emissione dell'onda e footprint dell'antenna sul riflettore (a) e responso di individuazione di un target (iperbole di diffrazione) (b)

Il sistema georadar funziona con diversi tipi di frequenza delle antenne utilizzate, da quelle più basse (50-100 MHz) a quelle più alte (superiori ai 1000 MHz); in generale, ad una minore frequenza del segnale emesso (lunghezza d'onda maggiore), corrisponde una maggiore penetrazione, mentre la capacità di discriminare due discontinuità prossime tra loro (risoluzione) diminuisce.

2.5.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'indagine è stata realizzata mediante l'utilizzo di un georadar Proceq GS800, costituito da un'unità centrale all'interno della quale viene generato il segnale ad onde continue a frequenza modulata ed inviato alla sezione trasmittente. Il segnale inviato viene ricevuto dall'antenna e successivamente viene elaborato dalla stazione.



Fig. 8. Georadar Proceq GS8000

Le caratteristiche della strumentazione sono le seguenti:

- Antenna da 40 - 3440 MHz con lunghezza di banda effettiva pari a 3200 MHz;
- Ricevitore GNSS;
- Unità di visualizzazione iPad Pro per la visualizzazione in tempo reali dei risultati acquisti;
- Software di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Il limite tecnologico della metodologia georadar 2D e 3D, è in ogni caso rappresentato dalla profondità della tavola d'acqua, poiché essa assorbe completamente il segnale elettromagnetico e dal contenuto d'acqua presente all'interno dei sedimenti indagati.

2.6 ELETROMAGNETOMETRO FDEM

I metodi EM possono classificarsi in passivi o attivi a seconda che si misuri l'interazione fra fonti naturali di energia elettromagnetica ed il sottosuolo (metodi magnetotellurici), oppure che venga usata una sorgente di energia elettromagnetica con l'impiego di trasmettitori artificiali aventi caratteristiche note di frequenza e ampiezza del segnale emesso. Questi ultimi possono essere sfruttati nel dominio delle Frequenze (FDEM, Frequency Domain Electromagnetic) o nel dominio del tempo (TDEM, Time Domain Electromagnetic): nel primo si utilizzano una o più frequenze, nel secondo le misure sono una funzione del tempo. In generale tutti i metodi elettromagnetici vengono applicati allo scopo di caratterizzare il suolo sulla base della sua conducibilità elettrica. Per il caso in esame è stato selezionato il metodo attivo a induzione in dominio frequenza che offre elevata risoluzione in superficie. Le acquisizioni possono essere svolte mantenendo la strumentazione sollevata dal suolo senza che ci sia un contatto diretto, e di conseguenza le indagini risultano essere veloci e con ottima risoluzione orizzontale registrando una grandissima quantità di dati per unità di superficie investigata. Il limite di questa tecnica potrebbe essere la presenza di terreni troppo poco conduttivi nei quali potrebbe essere difficile generare correnti sufficientemente grandi per cui il campo magnetico secondario possa essere misurato nel range dinamico strumentale. Il metodo elettromagnetico a induzione si basa sull'impiego di un elettromagnetometro (conduttivimetro) costituito almeno da due bobine, una trasmittente e una ricevente poste ad una certa distanza fissa; viene generato un campo elettromagnetico primario di ampiezza e frequenza noti tramite il passaggio di corrente alternata attraverso la bobina trasmittente. In presenza di un mezzo conduttivo, viene generato un campo elettrico indotto secondario nel terreno, il quale a sua volta produrrà una componente magnetica registrata dalla bobina ricevente. Il campo magnetico misurato sarà "distorto" rispetto al primario in funzione delle caratteristiche fisiche del sottosuolo. Nello specifico la porzione di campo magnetico primario che giunge al sottosuolo induce una corrente elettrica con la stessa frequenza del campo primario ma sfasata di 90°. Il rapporto fra il campo EM secondario e primario consente di calcolare la conducibilità del terreno e l'insieme di questi processi si definisce Induzione Elettromagnetica.

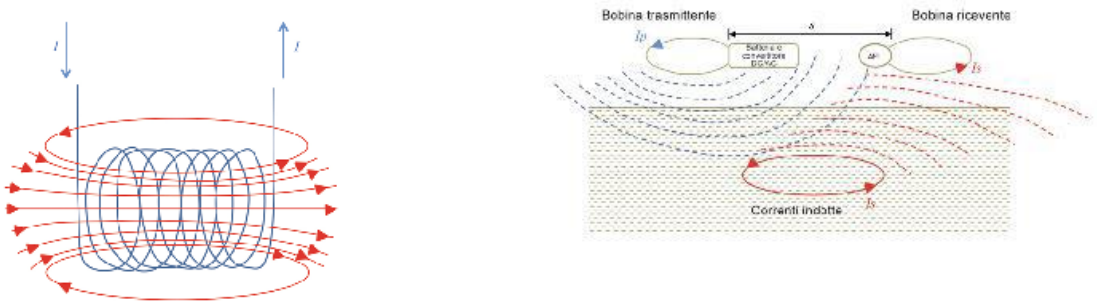


Fig. 9. Schematizzazione dell'induzione elettromagnetica: corrente elettrica alternata (campo primario, linee in blu) che attraversando la bobina genera un campo magnetico (campo secondario, linee in rosso).

Occorre specificare che le correnti indotte dal campo elettrico primario fluiscono nel sottosuolo seguendo la Legge di Ohm come per i metodi geoelettrici:

$$I = \Delta V/R$$

dove ΔV è la differenza di potenziale ed R la resistenza elettrica.

Il campo magnetico secondario avrà uno sfasamento ϕ che dipende dalla frequenza f e dalla resistenza del conduttore attraversato:

$$\phi = 2\pi f\, L/R$$

Infine dalla conducibilità σ si può matematicamente calcolare la resistività ρ (rho, in ohm*m), più propriamente utilizzata perché proprietà intrinseca dei materiali, tramite la seguente:

$$\rho = 1/\sigma$$

Ecco perché l'elettromagnetometro è anche chiamato conduttivimetro, poiché il dato viene restituito in termini di conducibilità o resistività dei materiali.

La maggior parte delle rocce presenta caratteri di conducibilità o resistività di tipo elettrolitico dato che, con le eccezioni di alcuni minerali metallici, quasi tutti i minerali sono isolanti.

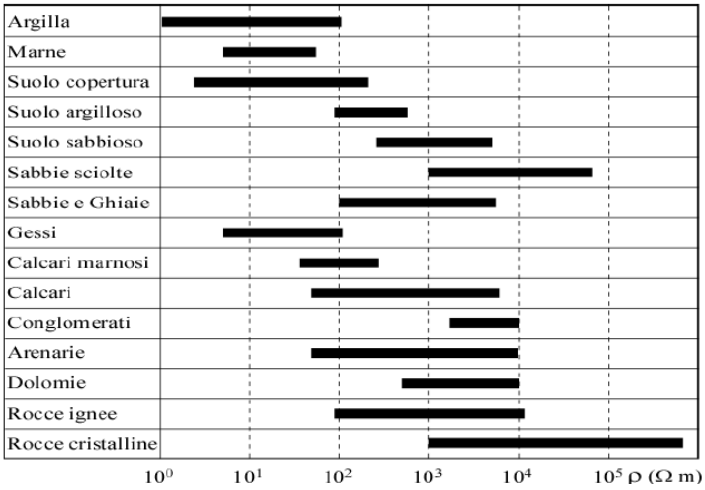


*Fig. 10. Resistività tipica dei sedimenti in ohm*m.*

- Rocce Ignee e Metamorfiche: questi tipi di rocce hanno generalmente bassa conducibilità elettrica a causa della loro composizione prevalentemente di minerali silicatici con pochi o nessun fluido conducente.
- Rocce Sedimentarie: la conducibilità varia notevolmente in base alla porosità e al contenuto di fluidi. Rocce sedimentarie porose con acqua contenuta tendono a mostrare una maggiore conducibilità rispetto a quelle secche.
- Materiali Non Consolidati: materiali come sabbia e ghiaia mostrano conducibilità variabile a seconda della quantità di acqua presente. Materiali secchi hanno generalmente conducibilità molto bassa.
- Suoli: la conducibilità del suolo dipende dalla composizione, dalla presenza di materia organica, e dall'umidità. I suoli agricoli tendono ad avere una conducibilità più alta rispetto ai terreni secchi.

- Materiali Speciali: i minerali metallici mostrano conducibilità estremamente alta a causa della presenza di metalli che conducono molto bene l'elettricità. L'acqua marina ha una conducibilità molto alta a causa della presenza di sali disciolti, mentre l'acqua dolce varia notevolmente in base alla concentrazione di minerali disciolti.

I principali fattori che Influenzano la Conducibilità Elettrica sono:

- Contenuto d'Acqua: più alto è il contenuto d'acqua, maggiore è la conducibilità.
- Salinità dei Fluidi: fluide saline aumentano significativamente la conducibilità.
- Temperatura: la conducibilità aumenta con l'aumento della temperatura, poiché aumenta la mobilità degli ioni.
- Composizione Mineralogica: minerali metallici e altri materiali conduttivi aumentano la conducibilità.

In alcuni strumenti vengono misurati altri parametri molto importanti, come la componente in fase espressa in ppt (parts per thousand) e la suscettività magnetica (H/m), proporzionali non allo sfasamento del campo magnetico ma bensì alla sua intensità. Nel metodo FDEM a basso numero di induzione applicato alle indagini sui terreni, vengono usati in genere elettromagnetometri costituiti da una bobina trasmittente e una o più bobine riceventi a diverse spaziature (multiprofondità) oppure elettromagnetometri multifrequenza come nel caso in esame. La profondità d'indagine aumenta in maniera inversamente proporzionale alla frequenza impiegata anche se essa rimane puramente teorica e non si possono fornire informazioni precise sulla quota del target.

Il GEM-2 è progettato per offrire tecnologia all'avanguardia con semplicità d'uso e, grazie alla sua leggerezza (3,6 kg) e maneggiabilità, può essere impiegato come sensore portatile o su un drone. La sua programmabilità in frequenza permette di adattare la rilevazione in base ai target e alle condizioni ambientali, oltre a replicare la configurazione di altri strumenti.

Di seguito alcune caratteristiche tecniche del GEM-2:

- Capacità di gestire simultaneamente fino a 10 frequenze;
- Posizionamento in tempo reale tramite ricevitore GPS mediante sistema di riferimento delle coordinate RDN2008 / UTM zone 33 N (EPSG:6708);
- Rilevamento in tempo reale della conducibilità elettrica e della suscettibilità magnetica;
- Possibilità di output opzionale formattato in file di testo (.csv);
- Ampia gamma di frequenze: da 30Hz a 93kHz;
- Peso di 3,6 kg;
- Dimensioni: Lunghezza 183 cm, Larghezza 12,5 cm

3 RISULTATI

3.1 STAZIONI GEOMECCANICHE

3.1.1 POINT LOAD TEST

Su alcuni campioni di roccia prelevati in situ è stata realizzata una prova point load test finalizzata alla determinazione dell'indice di carico puntuale per provini aventi diametro pari a 50 mm **Is_{50}**.

Il test è stato eseguito mediante l'utilizzo di strumentazione Matest A125.

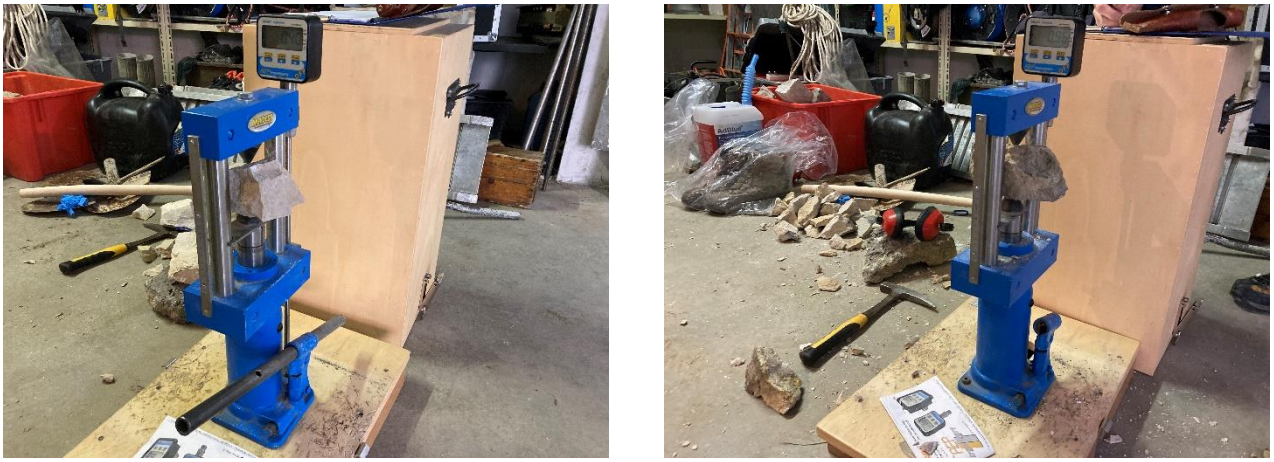
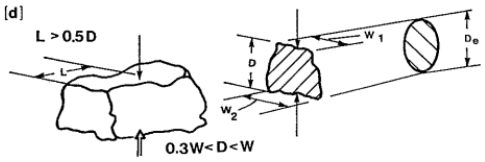


Fig. 11. Fasi di esecuzione della prova.

Per blocchi con forma irregolare il valore di Is_{50} è calcolato tramite le seguente relazione:

$$Is_{50} = Is = 0.138 * \frac{P}{(D*W)^{0.75}}$$

Dove P è il carico a rottura espresso in kN, D è la distanza tra le punte in mm e W è la lunghezza della sezione nel punto di carico mm



A partire da Is_{50} è possibile derivare il valore resistenza alla compressione monoassiale Is sulla base di un fattore moltiplicativo K secondo la seguente relazione:

$$Su = K* Is_{50}$$

Dove K assume i seguenti valori:

Is50 Mpa	**K**
< 3.5	14
3.5-6.0	16
6.0-10.0	20
>10.0	25

Di seguito si riportano i valori ottenuti dalle prove:

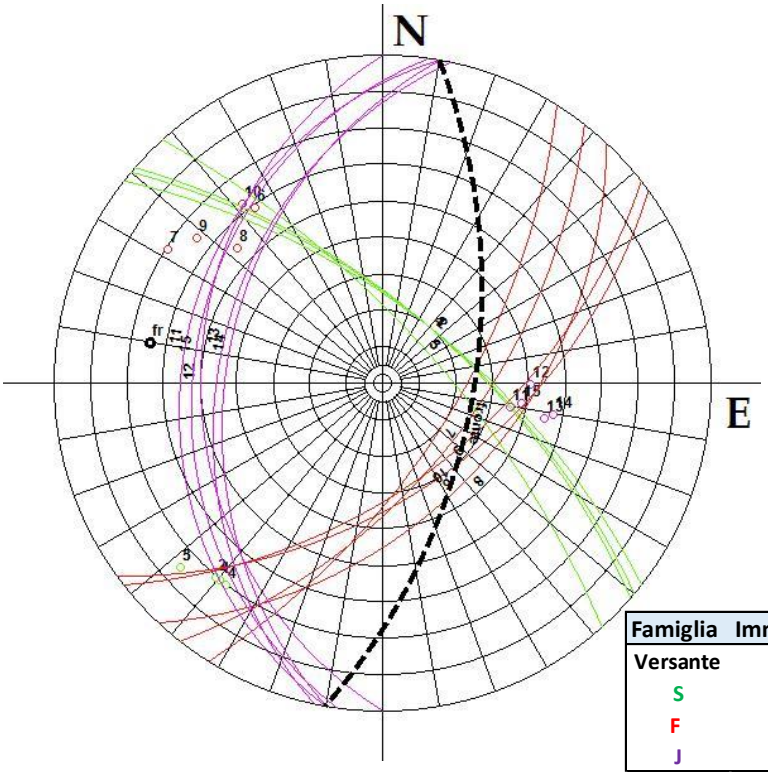
N	D	W1	W2	W	P	Is50	Su
	mm	mm	mm	mm	kN	MPa	MPa
1	51	95	97	96	28	6.6	132
2	57	116	97	106.5	9.07	1.8	25
3	62	72	66	69	18.7	4.9	78
4	40	68	72	70	13.3	4.8	76
5	54	96	92	94	17.4	4.0	64
6	57	87	83	85	17.3	4.1	66
7	35	80	96	88	8	2.7	37
8	32	80	92	86	7.14	2.6	36
9	51	100	140	120	29	5.8	93
10	66	139	100	119.5	24	4.0	63
11	51	78	86	82	17	4.5	72
12	69	73	61	67	23.3	5.7	92
13	67	73	34	53.5	9.6	2.9	40
14	74	136	14	75	31	6.7	133
15	51	87	96	91.5	18.95	4.6	74
16	67	132	96	114	4.3	0.7	10
17	59	90	93	91.5	17.22	3.8	60
18	51	86	80	83	9.76	2.6	36
19	68	120	115	117.5	7.1	1.2	16
20	74	90	87	88.5	47.66	9.0	181
21	66	70	76	73	31.5	7.5	150
22	64	105	82	93.5	27.92	5.7	91
23	66	82	105	93.5	29.34	5.8	93
24	80	84	81	82.5	11.56	2.2	31
25	53	60	62	61	10.04	3.2	45
26	48	70	75	72.5	18.7	5.7	91
27	55	90	135	112.5	18.7	3.7	59
28	62	121	133	127	18.7	3.1	43
29	51	102	76	89	18.7	4.7	75
30	53	84	93	88.5	18.7	4.6	73

Da cui si ricavano i seguenti valori di resistenza alla compressione monoassiale:

Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]		
min	media	max
10	71	181

3.1.2 STAZIONE GEOMECCANICA N°1

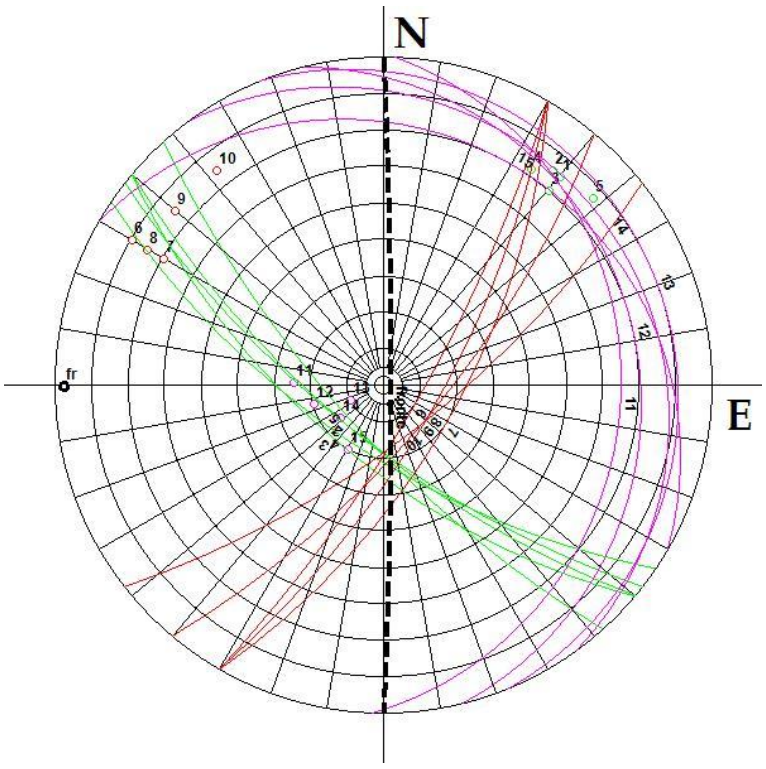
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	13	**4**
A3	Spaziatura [m]	0.13	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	liscia	1
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**12**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**44**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	12	**18**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**11**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	13	6
	RQD = 110 - 2.5*Jv	33	16
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**29**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	100	65
S	43	72
F	134	63
J	278	41

3.1.3 STAZIONE GEOMECCANICA N°2

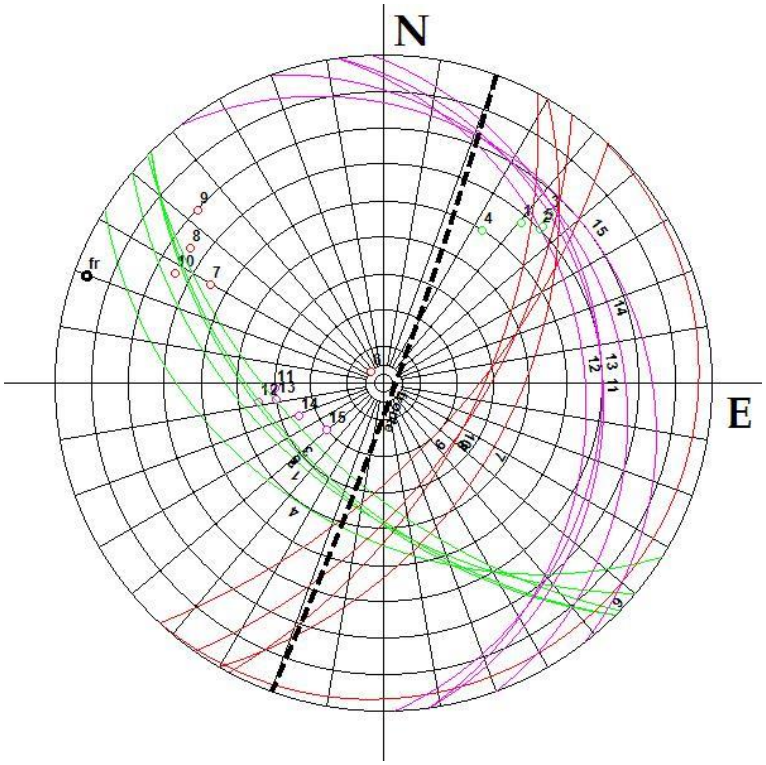
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	23	**6**
A3	Spaziatura [m]	0.15	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	liscia	1
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**12**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**45**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	12	**18**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**16**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	23	11
	RQD = 110 - 2.5*Jv	40	20
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**34**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	90	88
S	220	74
F	126	75
J	64	18

3.1.4 STAZIONE GEOMECCANICA N°3

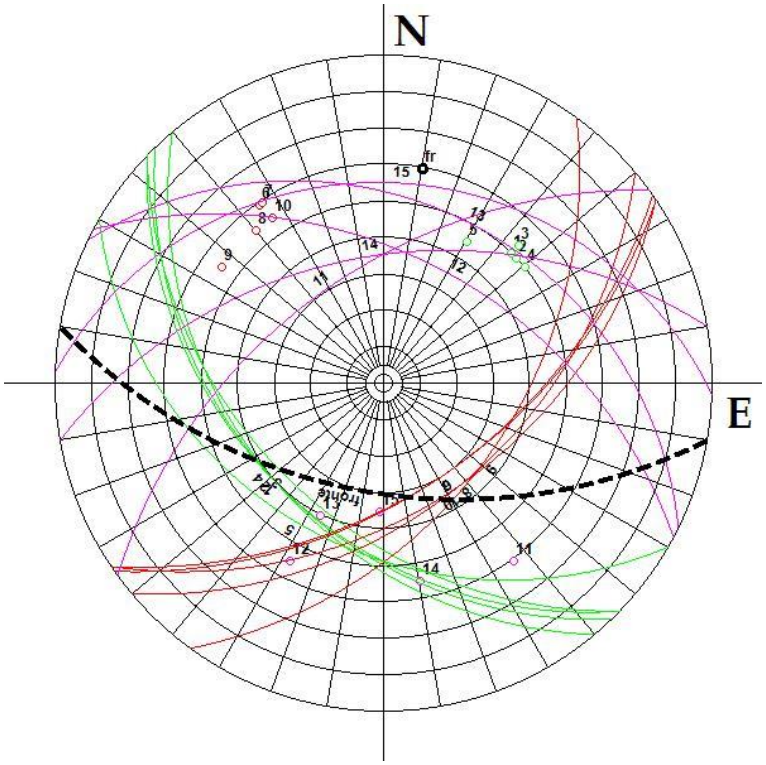
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	39	**7**
A3	Spaziatura [m]	0.17	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	liscia	1
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**12**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**47**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	12	**18**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**23**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	39	20
	RQD = 110 - 2.5*Jv	53	26
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**41**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	110	87
S	221	59
F	126	52
J	75	28

3.1.5 STAZIONE GEOMECCANICA N°4

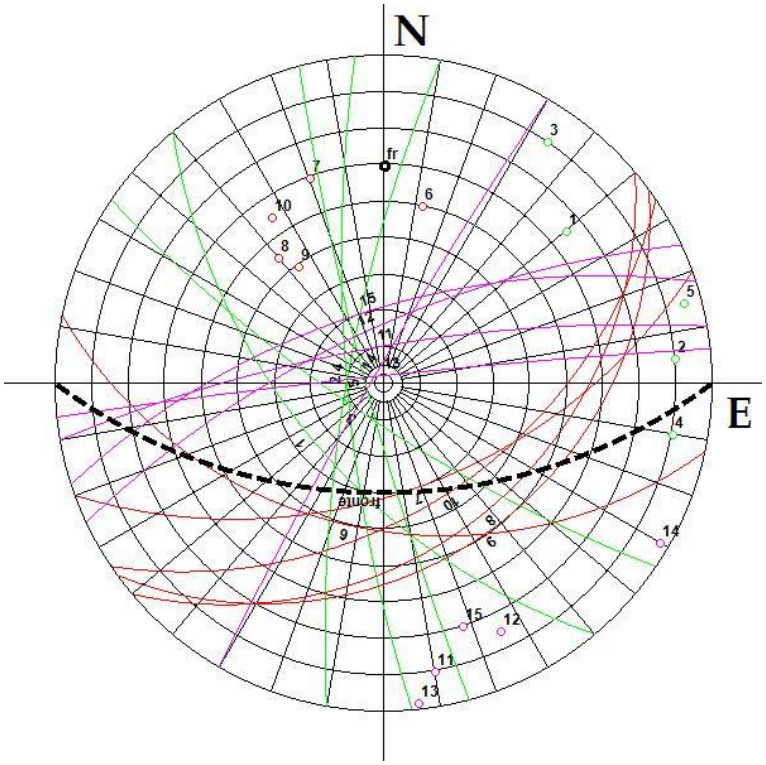
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	36	**7**
A3	Spaziatura [m]	0.19	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	liscia	1
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**12**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**46**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	12	**18**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**21**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	36	18
	RQD = 110 - 2.5*Jv	50	25
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**39**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	190	60
S	223	50
F	141	57
J	350	49

3.1.6 STAZIONE GEOMECCANICA N°5

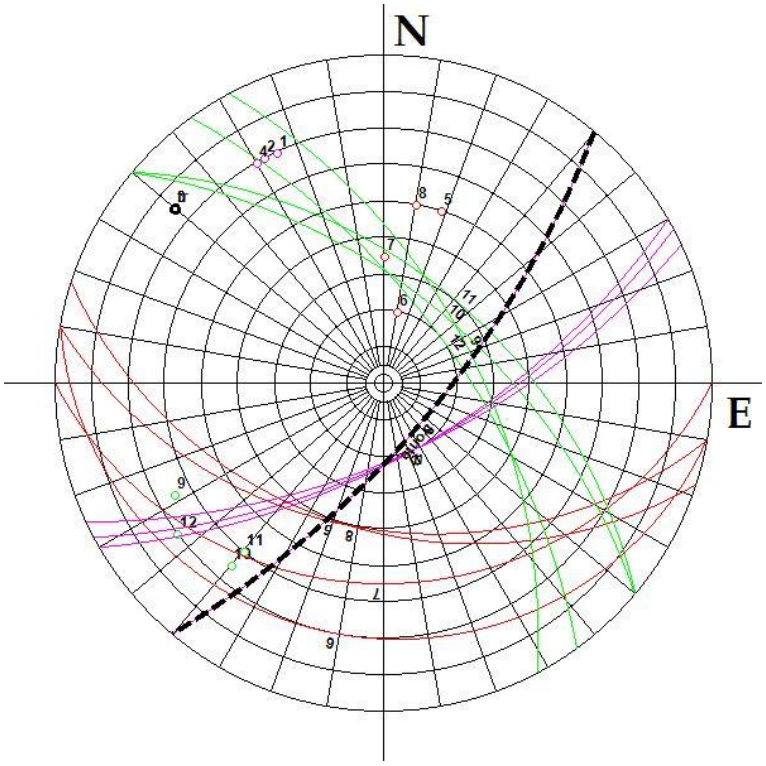
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	36	**7**
A3	Spaziatura [m]	0.17	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	levigata	0
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**11**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**45**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	11	**17**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**21**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	36	18
	RQD = 110 - 2.5*Jv	50	25
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**38**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	180	60
S	249	78
F	156	50
J	335	83

3.1.7 STAZIONE GEOMECCANICA N°6

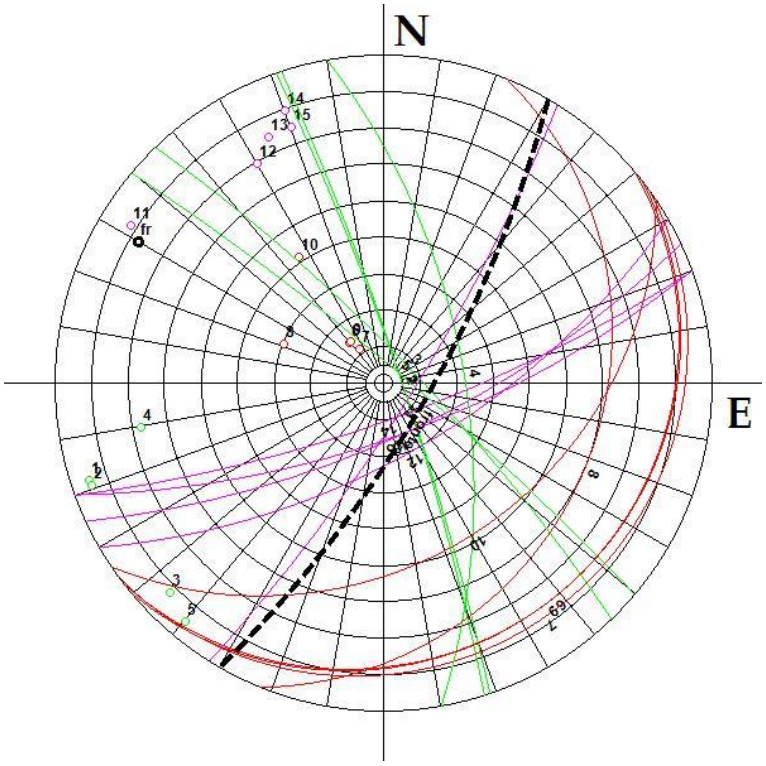
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	29	**6**
A3	Spaziatura [m]	0.15	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	levigata	0
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**11**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**44**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	11	**17**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**19**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	29	15
	RQD = 110 - 2.5*Jv	45	23
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**35**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	130	75
S	49	65
F	190	39
J	147	71

3.1.8 STAZIONE GEOMECCANICA N°7

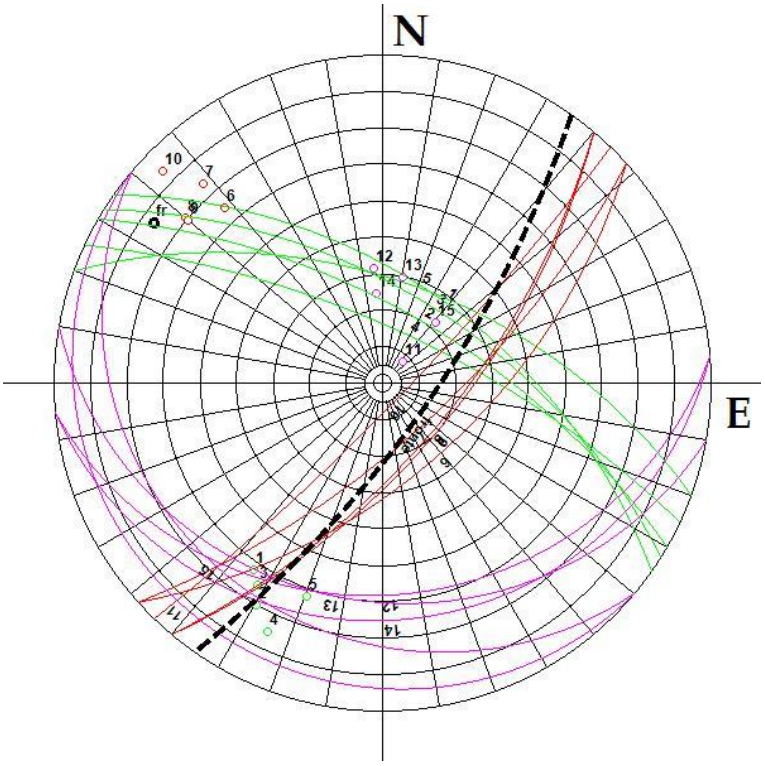
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	23	**6**
A3	Spaziatura [m]	0.15	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	liscia	1
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**12**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**45**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	12	**18**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**16**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	23	11
	RQD = 110 - 2.5*Jv	40	20
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**34**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	120	78
S	62	81
F	137	23
J	147	77

3.1.9 STAZIONE GEOMECCANICA N°8

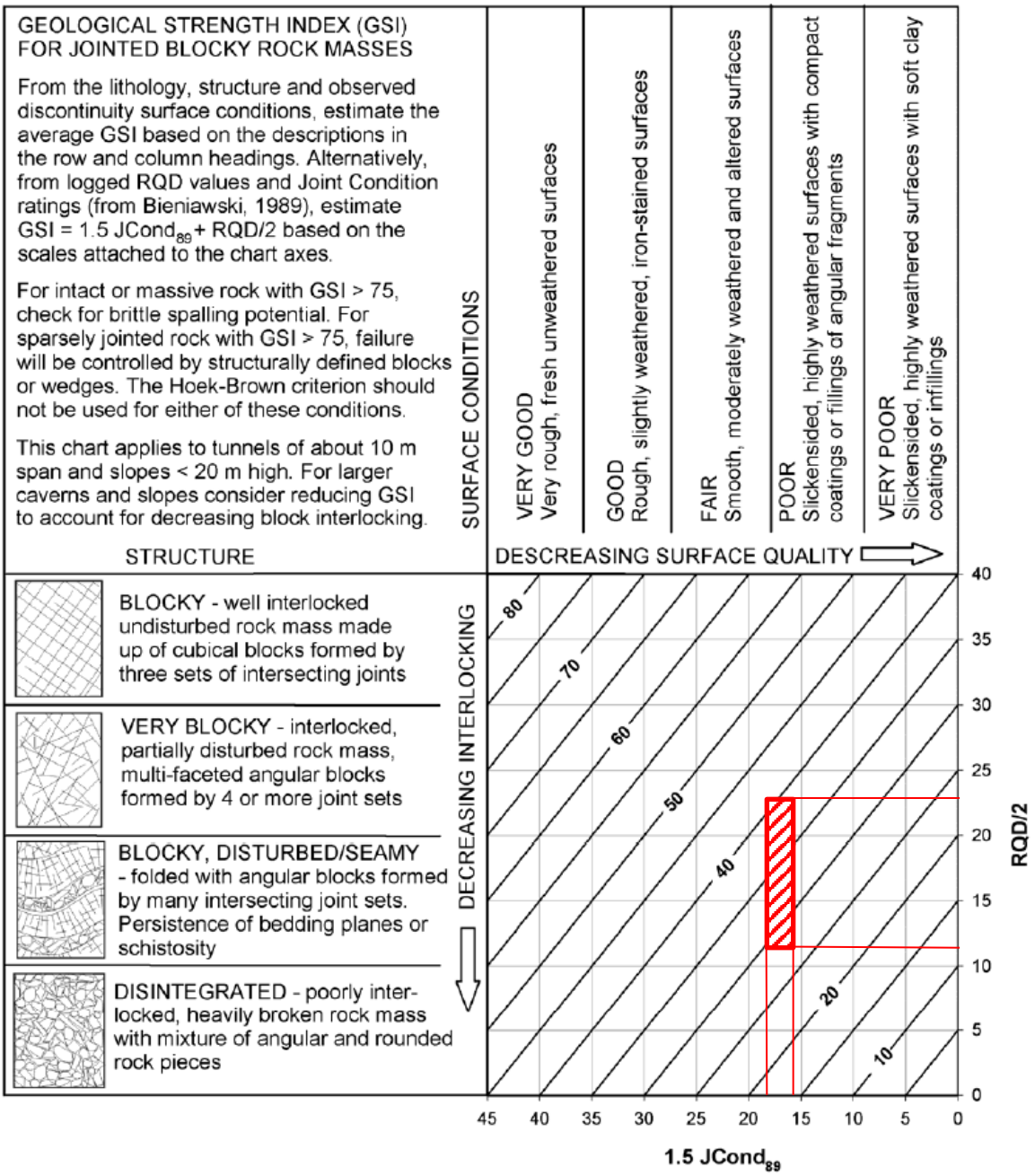
Rock Mass Rating RMR - Beniawski 1989			
Descrizione		**Valore**	**Parametro**
A1	Resistenza alla compressione monoassiale Su [MPa]	71	**7**
A2	Rock Quality Designation - RQD	13	**4**
A3	Spaziatura [m]	0.08	**5**
v1	Persistenza [m]	>20	0
v2	Apertura [mm]	>5	0
v3	Rugosità	liscia	1
v4	Alterazione	legg. alterata	5
v5	Riempimento	assente	6
A4	Condizioni discontinuità - Jcond89		**12**
A5	Venute d'acqua	nessuna	**15**
	Rock Mass Rating di base	RMRb	**44**
Geological Strength Index GSI - Hoek et al. 2013			
1	Condizioni della discontinuità - 1.5*Jcond89	12	**18**
2	Rock Quality Designation - RQD/2		**11**
	RQD = 115 - 3.3*Jv	13	6
	RQD = 110 - 2.5*Jv	33	16
	Geological Strengh Index = 1.5Jcond89+RQD/2	GSI	**29**



Famiglia	Immersione	Inclinazione
Versante	125	77
S	28	67
F	134	73
J	190	24

3.1.10 RIASSUNTO CLASSIFICAZIONI

N	RMRb	Assetto giacitura	RMR	Classificazione	GSI
1	44	sfavorevole	<20	Molto scadente	29
2	45	sfavorevole	<20	Molto scadente	34
3	47	sfavorevole	<20	Molto scadente	41
4	46	sfavorevole	<20	Molto scadente	39
5	45	sfavorevole	<20	Molto scadente	38
6	44	sfavorevole	<20	Molto scadente	35
7	45	sfavorevole	<20	Molto scadente	34
8	44	sfavorevole	<20	Molto scadente	29



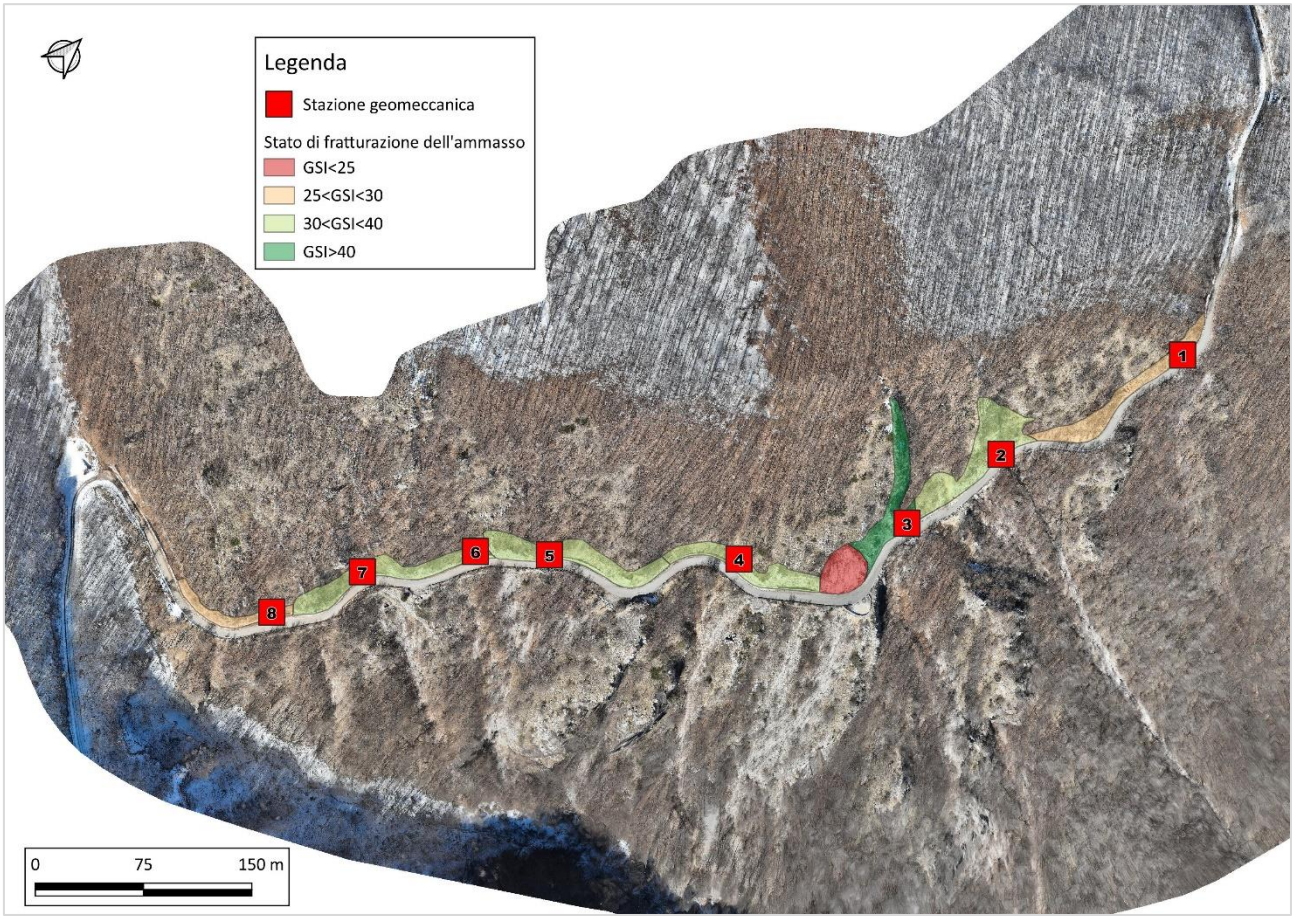


Fig. 12. Stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e ubicazione delle stazioni geomeccaniche.

3.1.11 STIMA PARAMETRI GEOTECNICI

N	RMRb	Coesione	Angolo d'attrito	Modulo di deformazione	Resistenza a compressione monoassiale
		c [kPa]	phi [°]	E [GPa]	Su [MPa]
1	44	218	27	6.9	71
2	45	224	27	7.4	71
3	47	233	28	8.2	71
4	46	231	28	8.0	71
5	45	226	28	7.6	71
6	44	222	27	7.3	71
7	45	224	27	7.4	71
8	44	218	27	6.9	71

3.1.12 STIMA DEL VOLUME UNITARIO

A partire dai valori di spaziatura determinati attraverso le stazioni geomeccaniche eseguite è possibile calcolare il volume unitario dei blocchi separati dai sistemi di discontinuità presenti.

Il calcolo è stato condotto utilizzando i valori di spaziatura massima.

Il numero di discontinuità per metro cubo di roccia è espresso con il parametro Jv, e si ottiene dalla somma dei reciproci delle spaziature espresse in metri.

$$Jv = 1/S1 + 1/S2 + 1/S3 + \ldots 1/Sn$$

Sulla base del valore attribuito a Jv è possibile stimare il volume unitario:

$$Vb = \beta \times Jv^{-3}$$

Dove β è in funzione della forma dei blocchi:

β = 27 per diedri rocciosi cubici

β = da 28 a 32 per diedri rocciosi prismatici

β = da 33 a 59 per diedri rocciosi moderatamente allungati o moderatamente piatti

β = da 60 a 200 per diedri rocciosi allungati o piatti

β > 200 per diedri rocciosi molto allungati o molto piatti

Comunemente si assume β = 36, oppure lo si determina con la seguente formula:

$$\beta \approx 20 + 7a3/a1$$

Dove a1 e a3 sono rispettivamente la minore e la maggiore delle dimensioni del blocco.

Sulla base delle stazioni geomeccaniche eseguite si ottengono i seguenti valori:

Numero stazione	Spazitura max [m]			Jv	β	V1
	S	F	J			mc
1	0.15	0.16	0.19	18	29	0.005
2	0.40	0.20	0.36	10	34	0.03
3	0.50	0.20	0.25	11	38	0.03
4	0.24	0.27	0.70	9	40	0.05
5	0.24	0.27	0.30	11	29	0.02
6	0.20	0.30	0.30	12	31	0.02
7	0.30	0.21	0.25	12	30	0.02
8	0.18	0.09	0.11	26	34	0.00

Una seconda correlazione è fornita dalle spaziature delle varie famiglie di fratture:

Calcolando Sa secondo la seguente formula:

$$Sa = (S1 + S2 + S3 + \ldots + Sn)/n$$

È possibile determinare il volume unitario nel seguente modo

$$Sa \approx \sqrt[3]{Vb}$$

Sulla base delle stazioni geomeccaniche eseguite si ottengono i seguenti valori:

Numero stazione	Spazitura media m	V2 mc
1	0.17	0.005
2	0.32	0.03
3	0.32	0.03
4	0.40	0.07
5	0.27	0.02
6	0.27	0.02
7	0.25	0.02
8	0.13	0.00

In definitiva, si ottengono i seguenti risultati

Numero stazione	V1 mc	V2 mc	V medio mc
1	0.005	0.005	0.005
2	0.03	0.03	0.03
3	0.03	0.03	0.03
4	0.05	0.07	0.06
5	0.02	0.02	0.02
6	0.02	0.02	0.02
7	0.02	0.02	0.02
8	0.00	0.00	0.00

3.2 HVSR

Il dato HVSR è stato acquisito mediante un sismografo triassiale denominato SR04HS Geobox della ditta Sara Srl; per l'esecuzione corretta di queste misure sono state tenute in considerazione le indicazioni contenute nel Progetto SESAME (Site EffectS Assessment using Ambient Excitations, 2004). Per tutte le acquisizioni condotte la durata della registrazione è stata pari a 20 minuti con l'asse NS geografico. L'accoppiamento al terreno non è risultato sempre ottimale data la morfologia del pendio.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata mediante software Winmasw Academy della ditta Eliosoft.

3.2.1 HVSR 1

L'elaborazione è stata condotta utilizzando i parametri riportati qui di seguito.

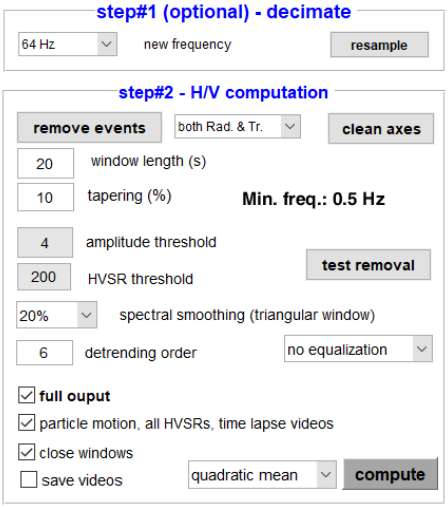


Fig. 13. Parametri utilizzati nell'elaborazione

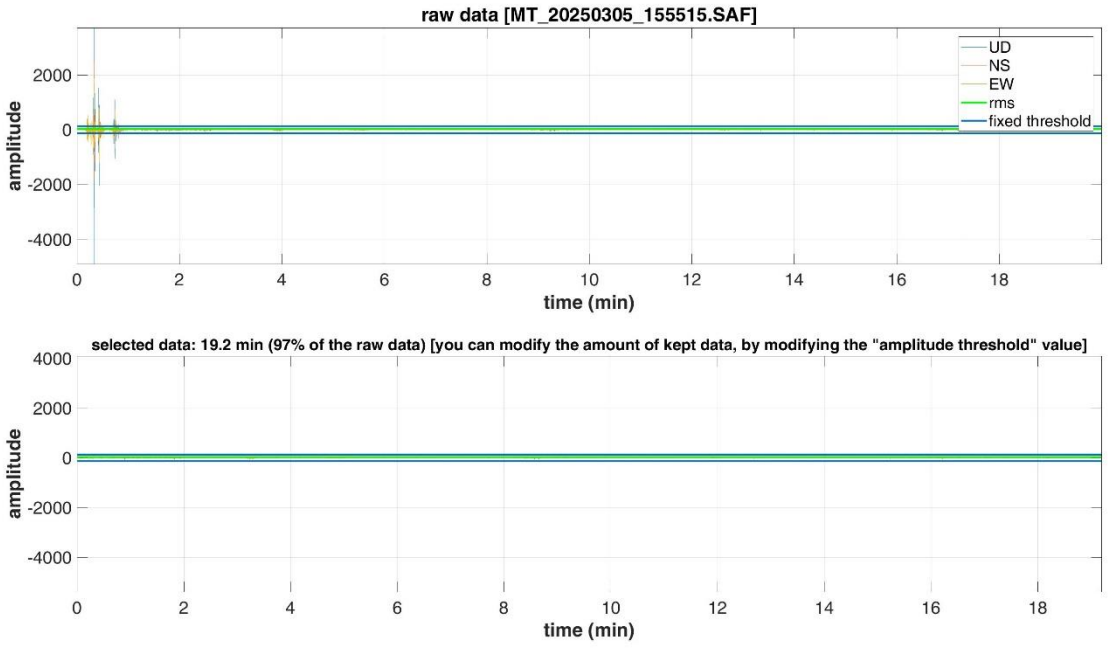


Fig. 14. Dati originali e soglie applicate per la rimozione di eventuali transienti.

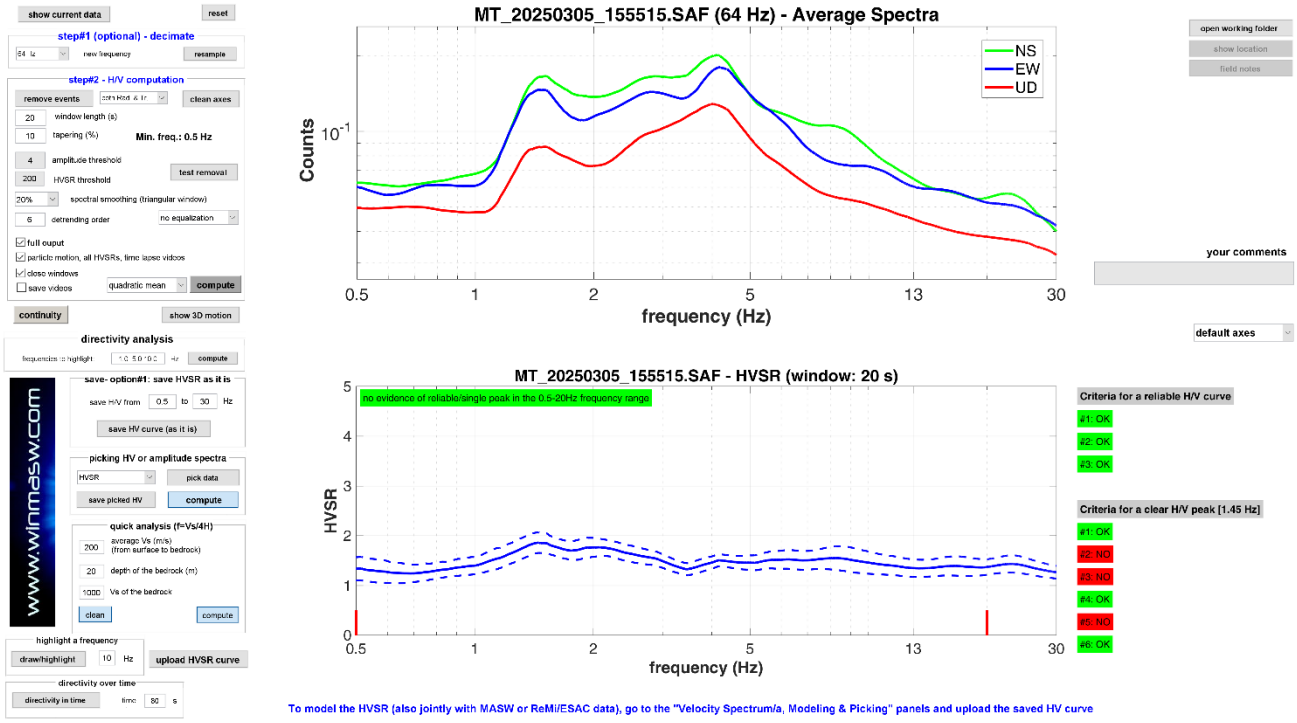


Fig. 15. Spettri di ampiezza (smussati) e, in basso, curva HVSR finale (rimosse le curve outlier).

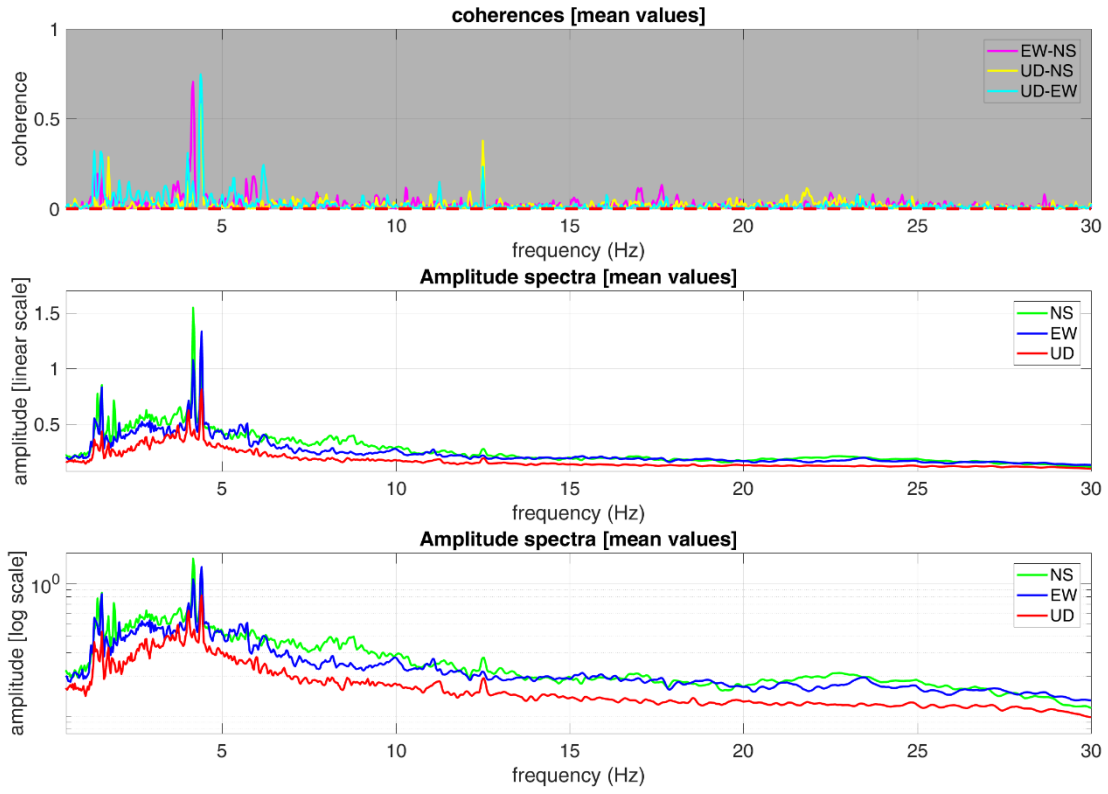


Fig. 16. Funzioni di coerenza per le tre coppie di sensori indicati, spettri di ampiezza (smoothing del 15%) delle tre componenti con scala verticale lineare, spettri di ampiezza con scala verticale logaritmica.

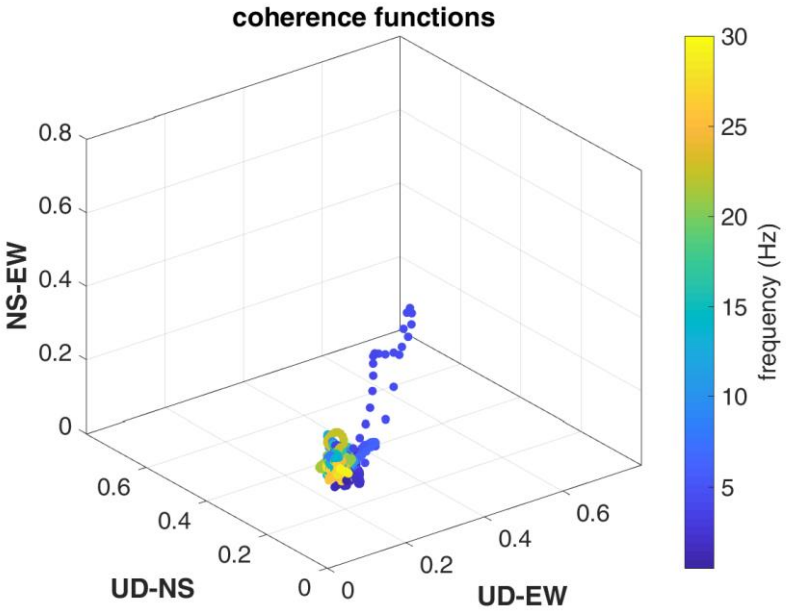


Fig. 17. *Funzioni di coerenza in funzione della frequenza e spettri di ampiezza in scala lineare e bilogaritmica.*

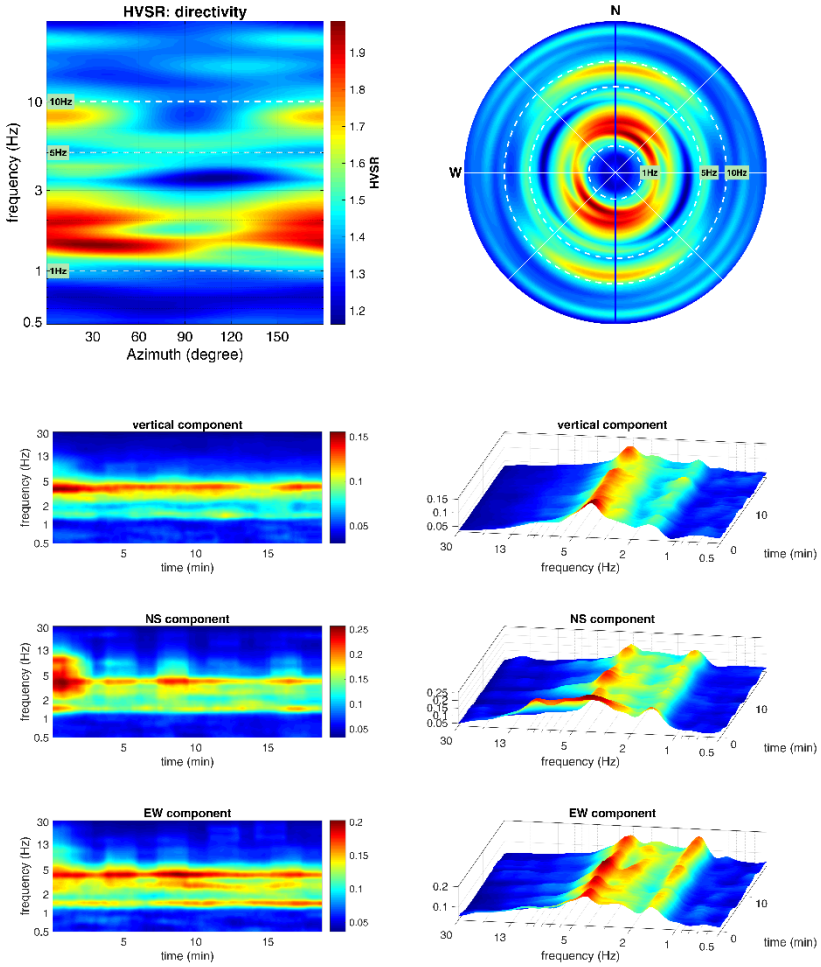


Fig. 18. *Persistenza del segnale e direzionalità del segnale per ogni singola componente*

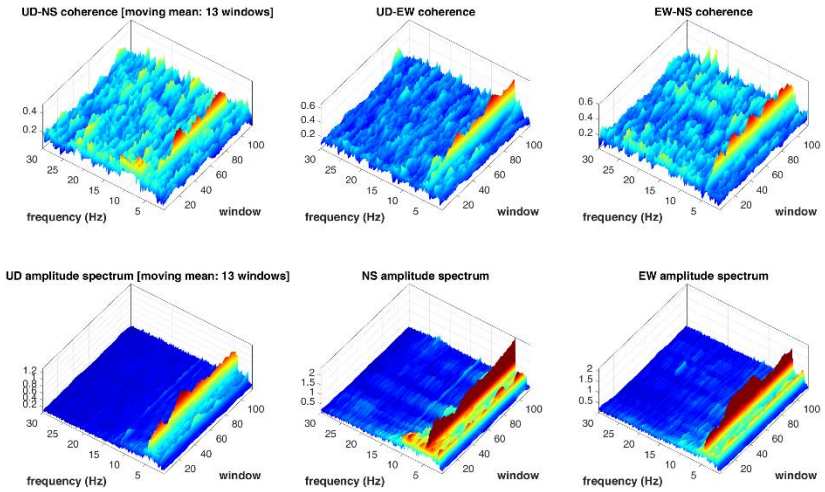


Fig. 19. Funzioni di coerenza nel tempo per le tre coppie di sensori e, sotto, spettri di ampiezza nel tempo per le componenti UD, NS e EW (spettrogrammi).

3.2.2 HVSR 2

L'elaborazione è stata condotta utilizzando i parametri riportati qui di seguito.

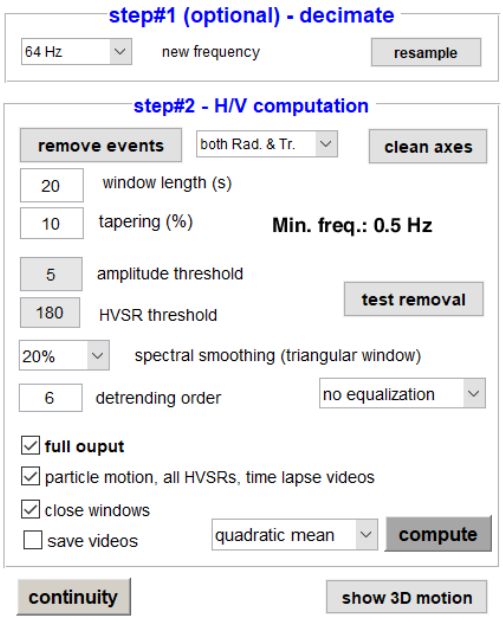


Fig. 20. Parametri utilizzati nell'elaborazione

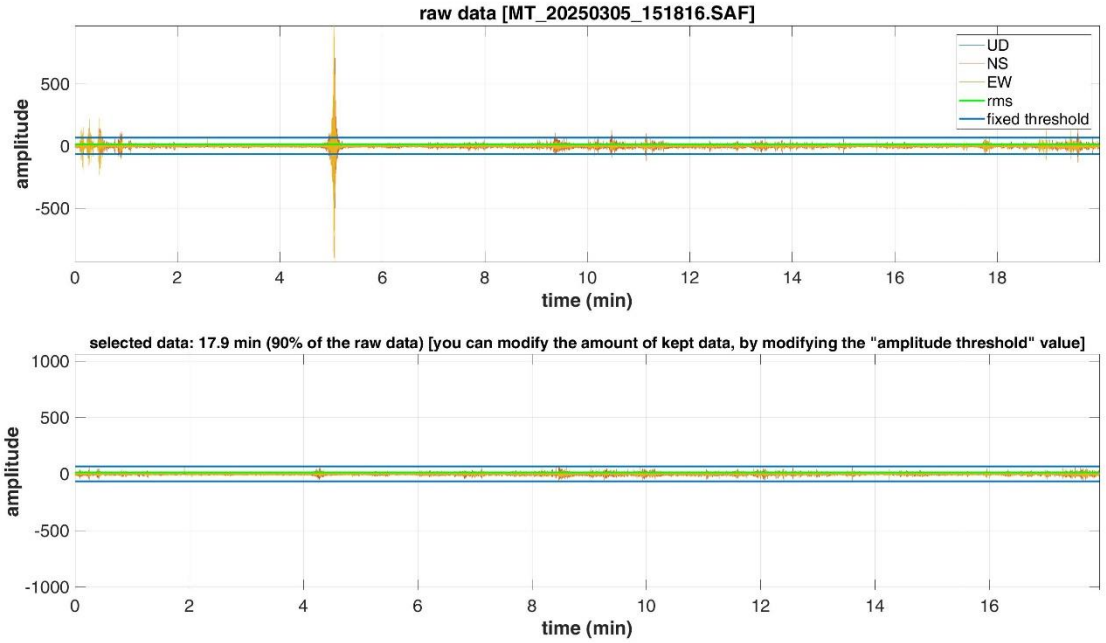


Fig. 21. Dati originali e soglie applicate per la rimozione di eventuali transienti.

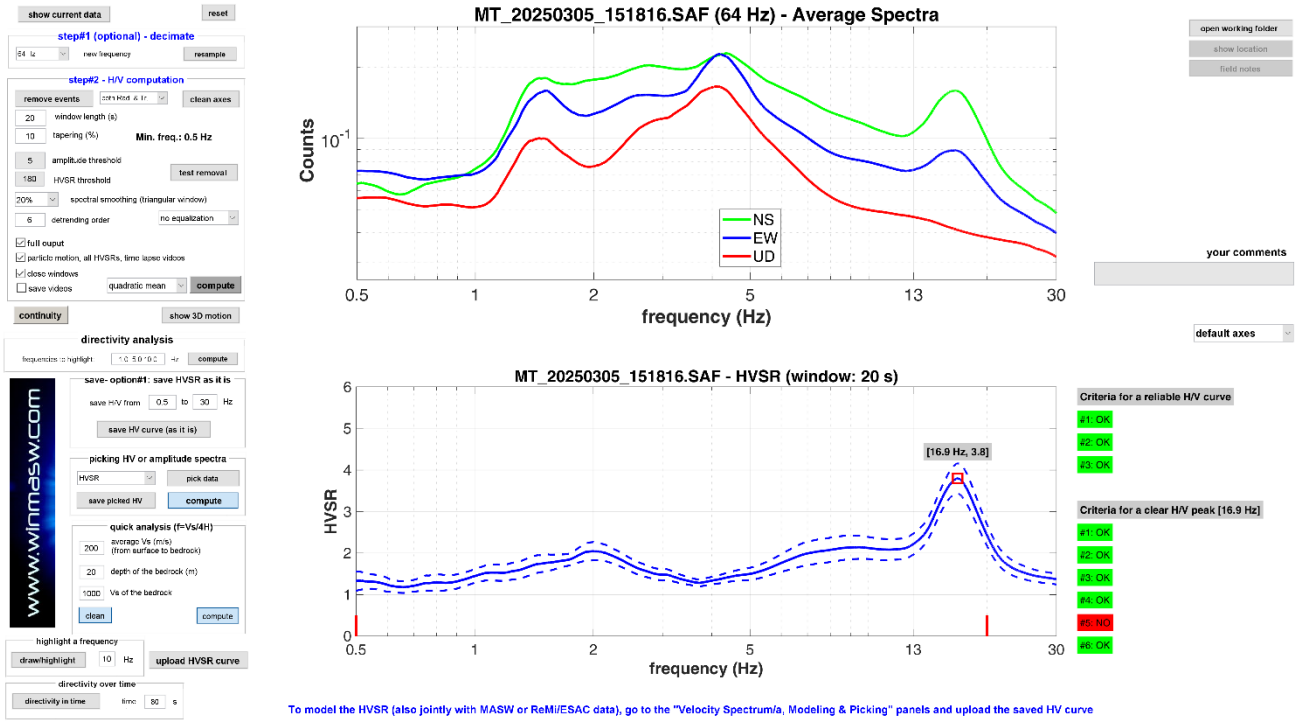
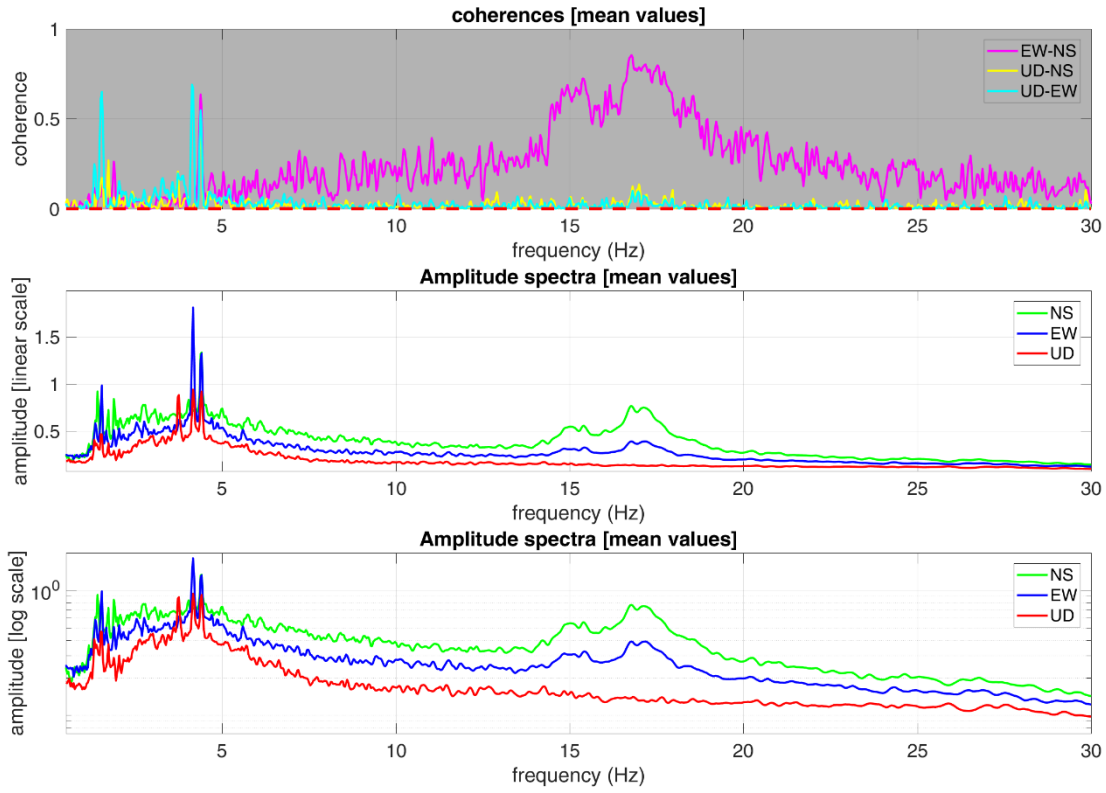


Fig. 22. Spettri di ampiezza (smussati) e, in basso, curva HVSR finale (rimosse le curve outlier).



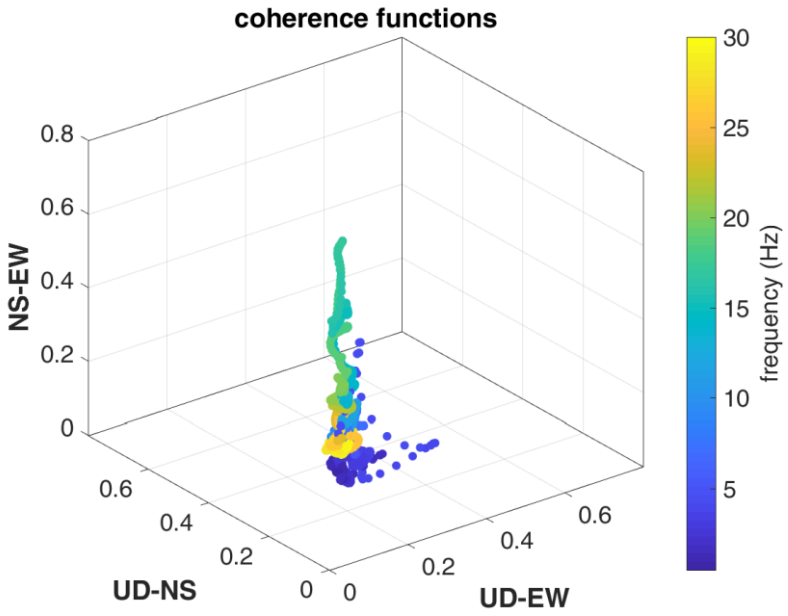


Fig. 23. Funzioni di coerenza in funzione della frequenza e spettri di ampiezza in scala lineare e bilogaritmica.

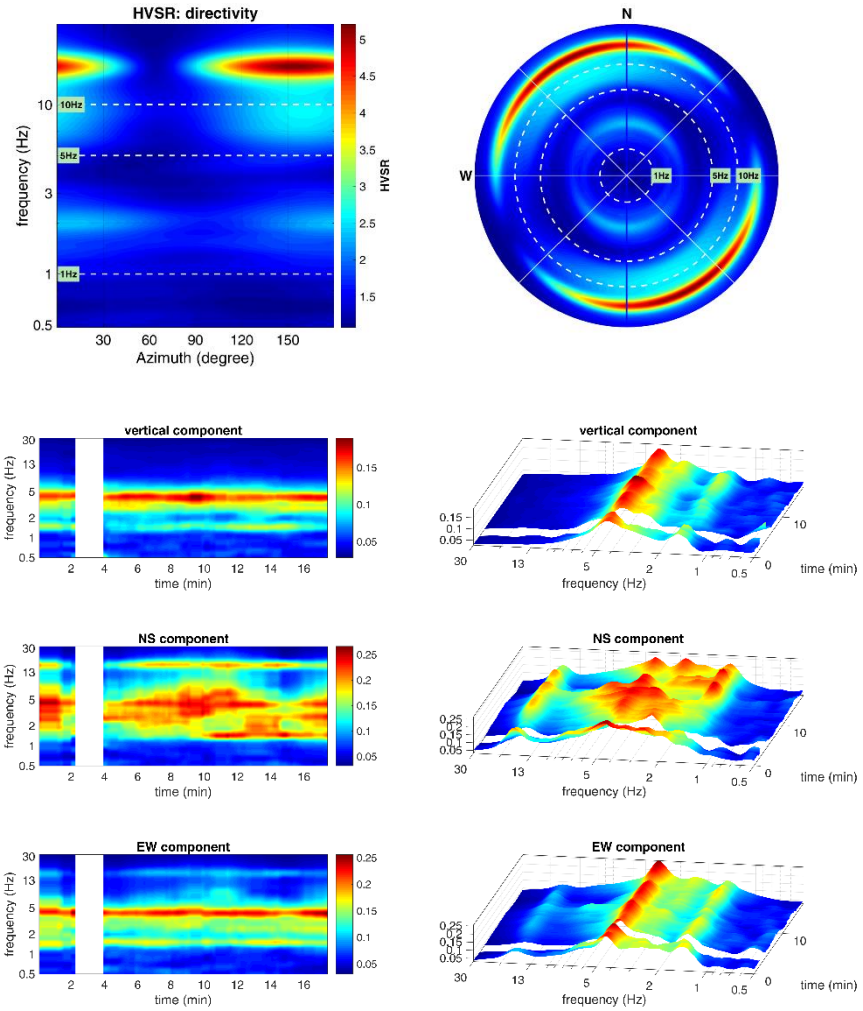


Fig. 24. Persistenza del segnale e direzionalità del segnale per ogni singola componente

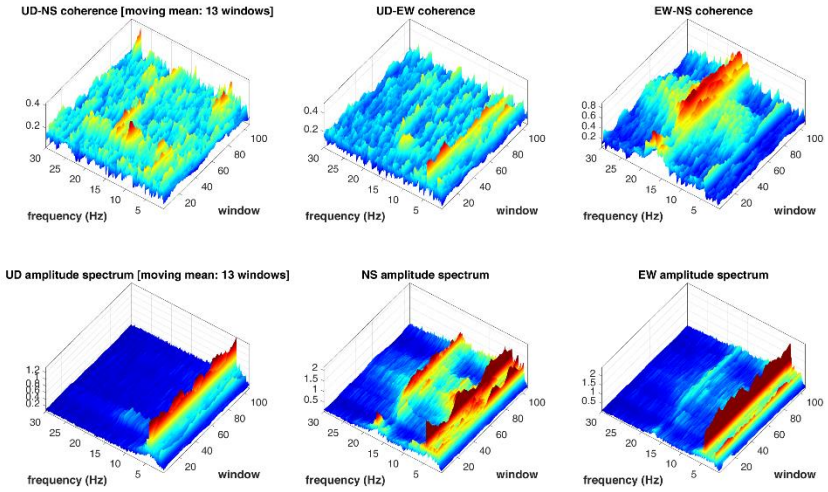


Fig. 25. Funzioni di coerenza nel tempo per le tre coppie di sensori e, sotto, spettri di ampiezza nel tempo per le componenti UD, NS e EW (spettrogrammi).

3.2.3 HVSR 3

L'elaborazione è stata condotta utilizzando i parametri riportati qui di seguito.

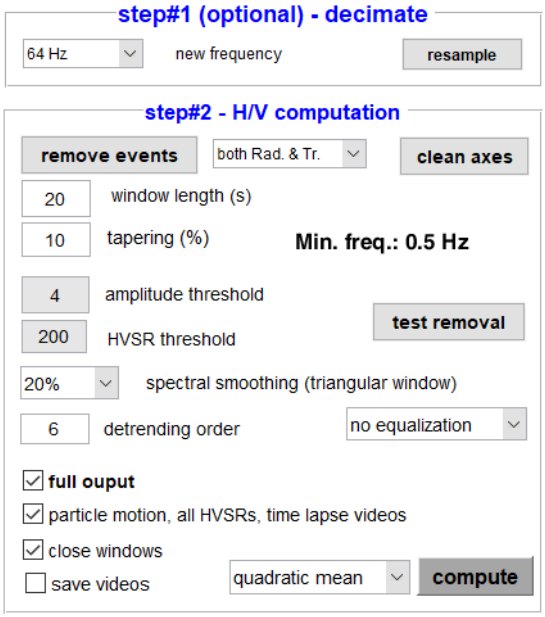


Fig. 26. Parametri utilizzati nell'elaborazione

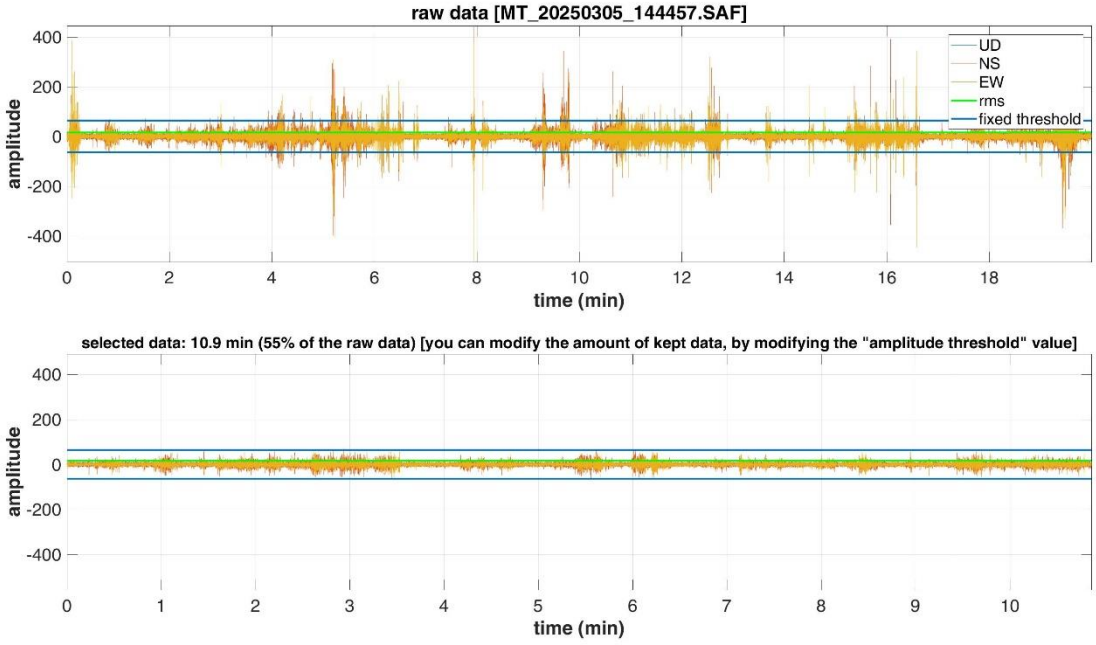


Fig. 27. Dati originali e soglie applicate per la rimozione di eventuali transienti.

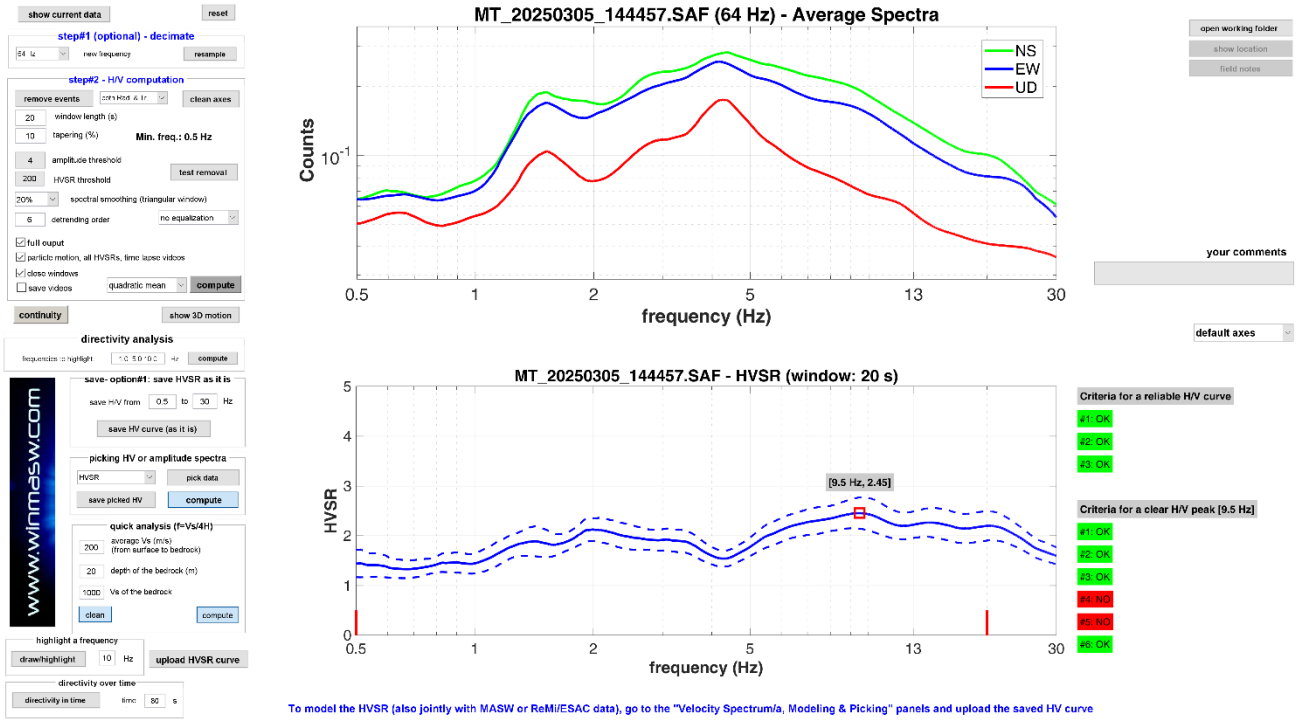


Fig. 28. Spettri di ampiezza (smussati) e, in basso, curva HVSR finale (rimosse le curve outlier).

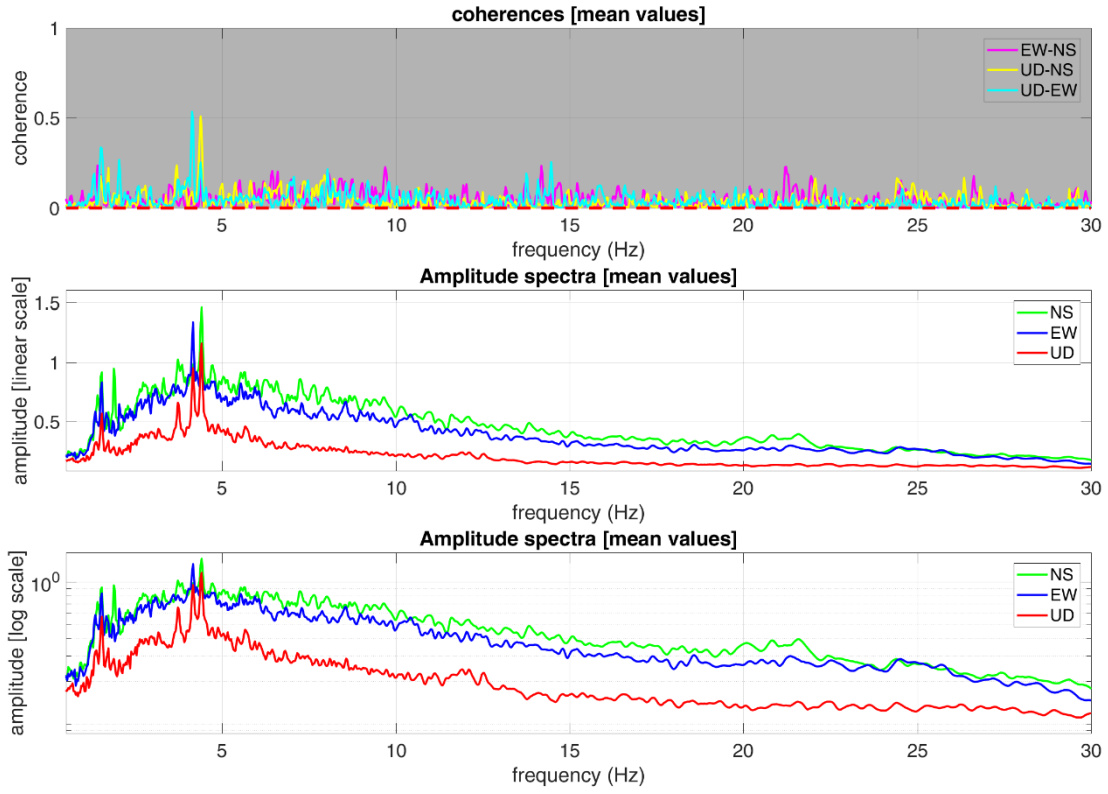


Fig. 29. Funzioni di coerenza per le tre coppie di sensori indicati, spettri di ampiezza (smoothing del 15%) delle tre componenti con scala vHVSRicale lineare, spettri di ampiezza con scala vHVSRicale logaritmica.

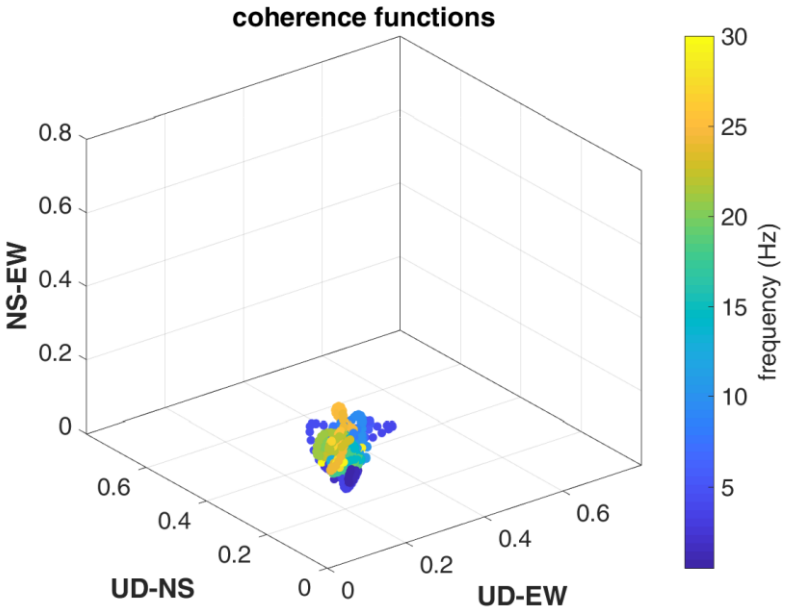


Fig. 30. *Funzioni di coerenza in funzione della frequenza e spettri di ampiezza in scala lineare e bilogaritmica.*

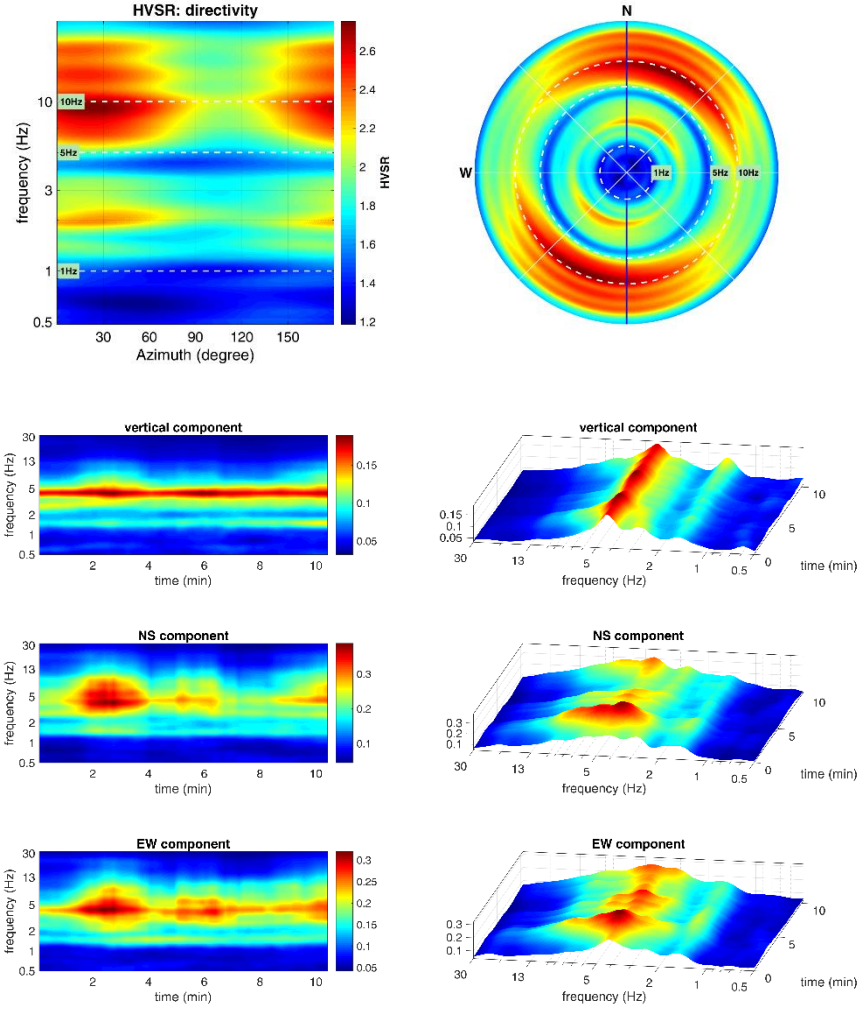


Fig. 31. *Persistenza del segnale e direzionalità del segnale per ogni singola componente*

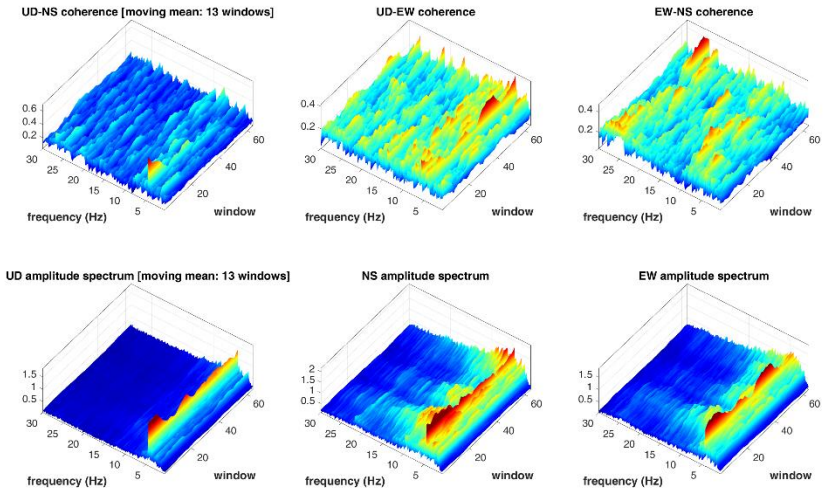


Fig. 32. Funzioni di coerenza nel tempo per le tre coppie di sensori e, sotto, spettri di ampiezza nel tempo per le componenti UD, NS e EW (spettrogrammi).

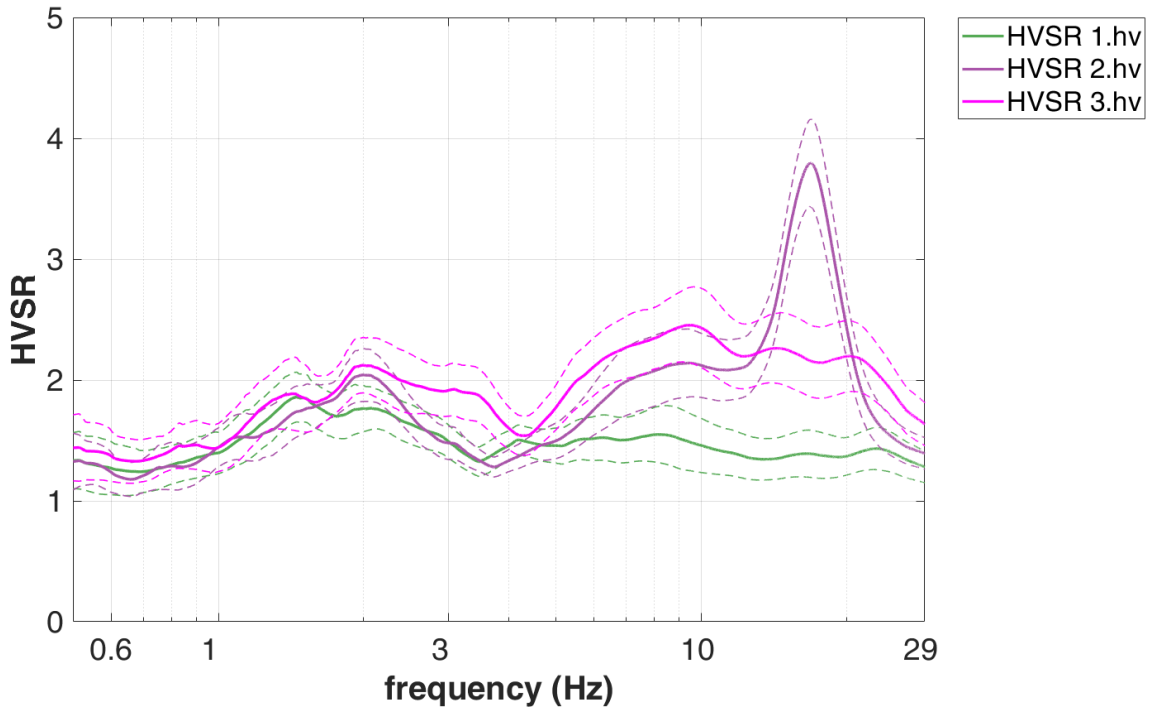


Fig. 33. Confronto tra le tre curve H/V acquisite

3.2.4 COMMENTO RISULTATI HVSR

Le tre curve HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) acquisite lungo la viabilità, non evidenziano massimi (eccetto per la curva HV 2 a circa 16 Hz) e risultano sostanzialmente piatte, suggerendo la presenza di:

- Presenza di roccia affiorante o poco profonda: l'assenza di picchi significativi nelle curve HVSR indica che non c'è un forte contrasto di impedenza tra i materiali superficiali e quelli sottostanti. Questo è compatibile con l'ipotesi di una roccia poco profonda, che potrebbe non differire in modo sostanziale dai materiali sovrastanti;
- Bassa amplificazione sismica locale: Le curve piatte mostrano che non ci sono risonanze importanti nella risposta del suolo a livello locale. Questo è tipico di terreni rigidi o di suoli sottili su roccia dura, dove le onde sismiche non subiscono un'amplificazione rilevante. Ciò suggerisce che, in caso di eventi sismici, il sito potrebbe non essere soggetto a effetti di amplificazione significativi;
- Omogeneità del materiale: La mancanza di variazioni nella risposta spettrale è indicativa di una stratigrafia omogenea, dove i materiali superficiali e sottostanti non presentano forti discontinuità meccaniche. Questa uniformità si riflette nelle curve piatte, che indicano una struttura geologica prevalentemente uniforme e compatta.

Le curve HVSR piatte acquisite lungo la viabilità suggeriscono la presenza di roccia affiorante o poco profonda con una stratigrafia geologica omogenea e rigida. Questo comportamento è coerente con un terreno roccioso o molto compatto, con bassi effetti di amplificazione sismica, e una struttura solida che non presenta variazioni significative di impedenza tra i materiali superficiali e quelli più profondi.

3.3 MASW

L'indagine sismica MASW è stata acquisita mediante utilizzo di sismografo Geode della Geometrics Inc., collegato a 24 geofoni verticali a frequenza propria di 4,5Hz in configurazione:

- ZVF per acquisire la componente verticale delle onde di Rayleigh;
- THF per acquisire la componente orizzontale delle onde di Love;

Per l'analisi dei dati si è adottato il software WinMASW Academy della ditta Eliosoft e Zond ST2D.

L'approccio utilizzato per l'analisi dei dati MASW ha previsto una modellazione diretta del sottosuolo modificando Vs e spessore degli strati, a partire dalle conoscenze stratigrafiche note, cercando la maggiore coerenza possibile tra la distribuzione di energia nello spettro di velocità e le curve di dispersione e la curva HV. Il secondo approccio FVS (Full Velocity Spectrum), basato sull'analisi dell'intero spettro di velocità, senza passare attraverso la fase di interpretazione delle curve modali, ha confermato la validità del modello precedentemente generato e generalmente si osserva un buon misfit tra lo spettro di velocità del modello (linee di contour nere) rispetto allo spettro di velocità del dato di campagna (colori in sottofondo). Il modello proposto di distribuzione delle velocità delle onde S è stato sviluppato anche tenendo conto dei dati bibliografici raccolti per l'area di indagine. Il modello di velocità delle onde S proposto si basa sull'analisi congiunta dei seguenti osservabili:

- Componente verticale delle onde di Rayleigh ZVF
- HVSR
- Bibliografia

3.3.1 MASW 1

Sul terreno è stato materializzato n°1 stendimento dalla lunghezza di 54 m utilizzando n°24 geofoni posti ad una distanza intergeofonica pari a 2 m. L'intervallo temporale di campionamento adottato è stato di 1 millisecondo e la durata di ogni singola registrazione è stata di 2 secondi (frequenza di campionamento 1000 Hz). Per attenuare il rumore incoerente è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute pari a 10. La sorgente è stata posizionata esternamente allo stendimento, ad una distanza di 5.0 m.

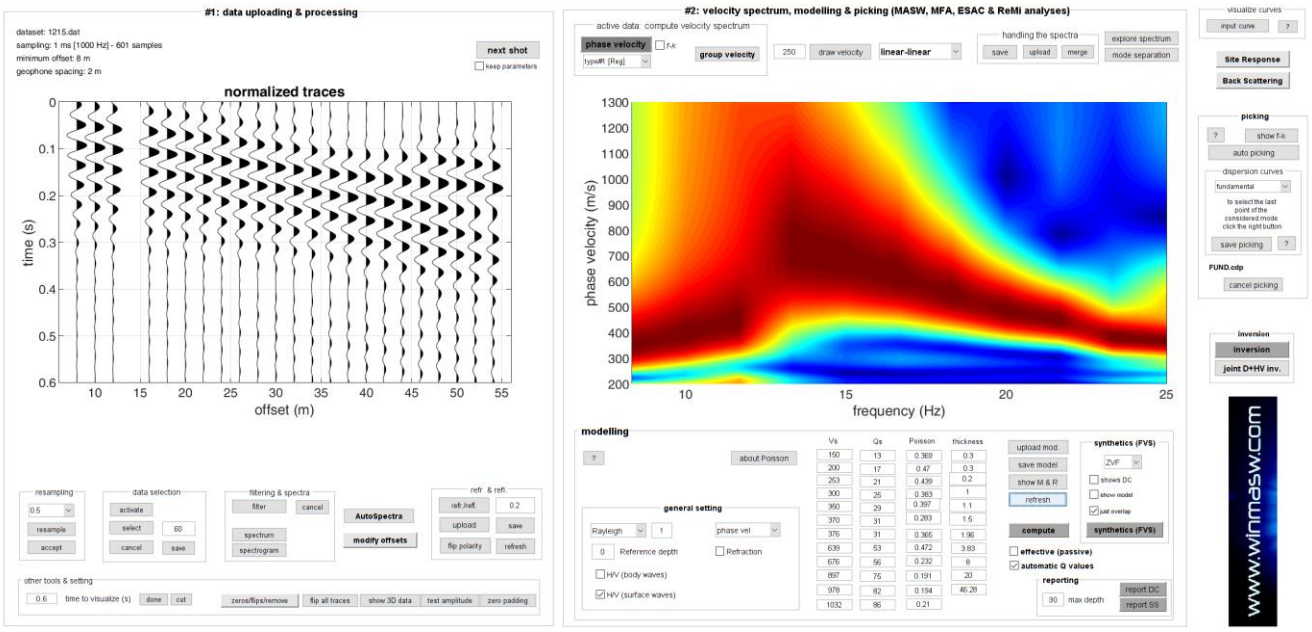


Fig. 34. Dataset originale per la componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF

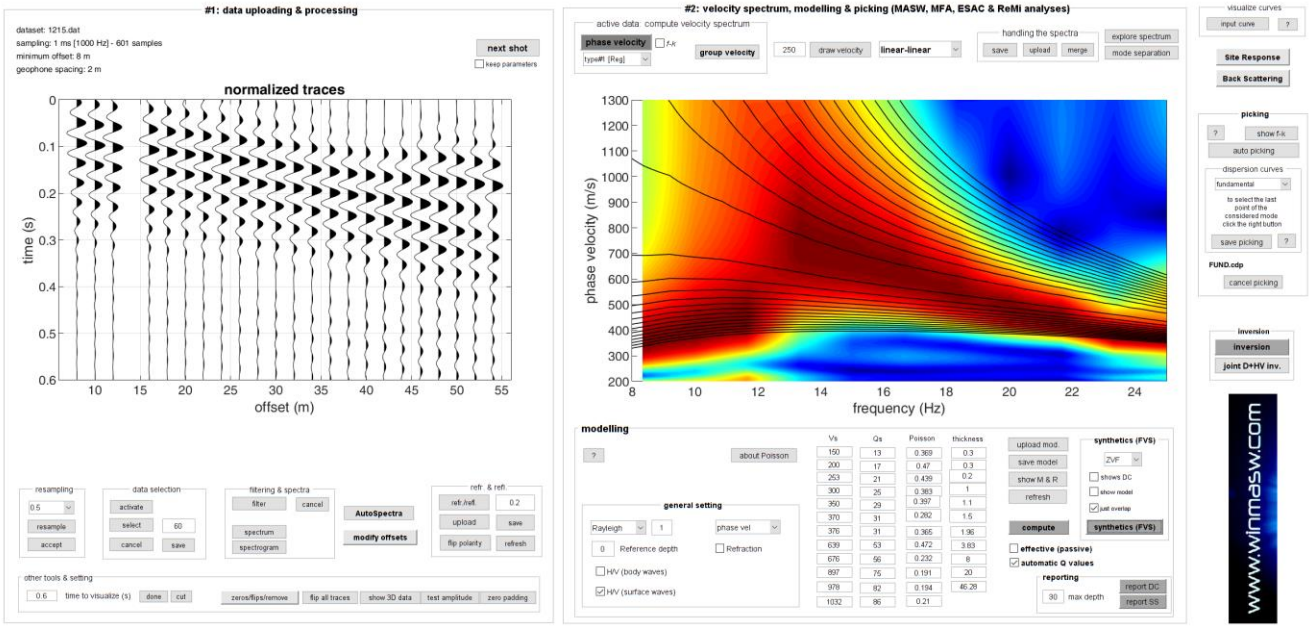


Fig. 35. Analisi FVS per componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF

3.3.2 MASW 2

Sul terreno è stato materializzato n°1 stendimento dalla lunghezza di 44 m utilizzando n°12 geofoni posti ad una distanza intergeofonica pari a 4.0 m. L'intervallo temporale di campionamento adottato è stato di 1 millisecondo e la durata di ogni singola registrazione è stata di 2 secondi (frequenza di campionamento 1000 Hz). Per attenuare il rumore incoerente è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute pari a 10. La sorgente è stata posizionata esternamente allo stendimento, ad una distanza di 6.0 m.

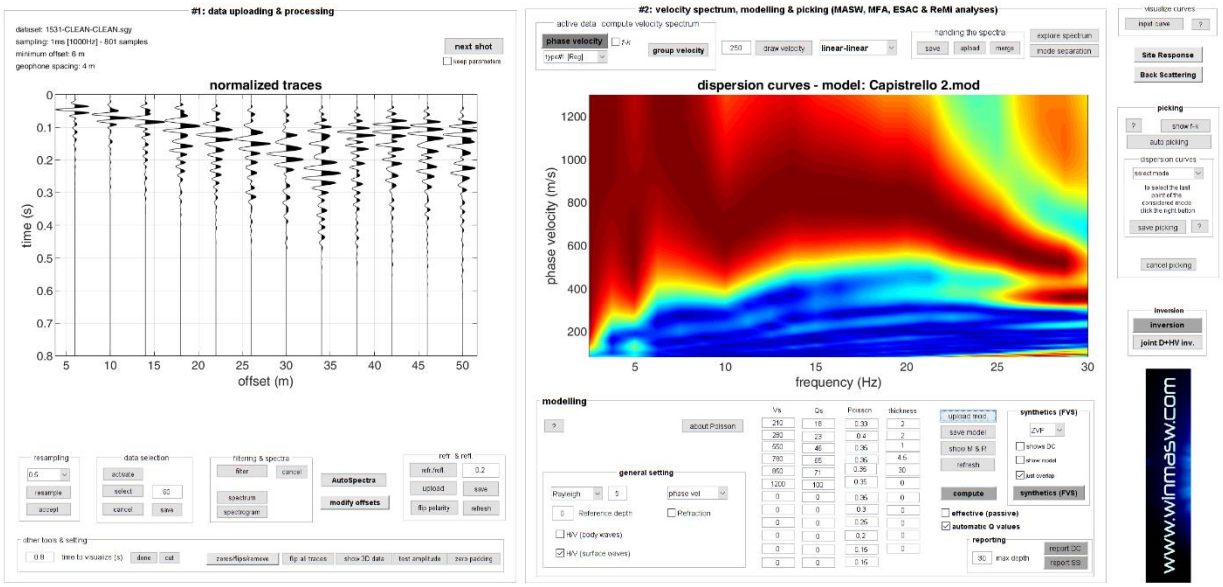


Fig. 36. Dataset originale per la componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF

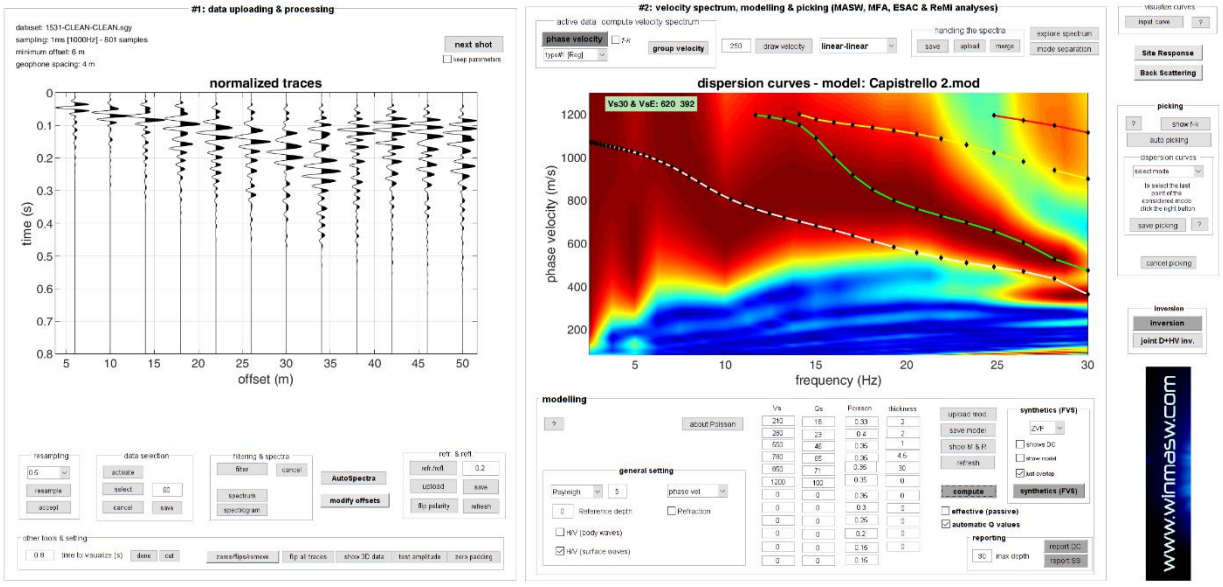


Fig. 37. Analisi secondo le curve modali per la componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF

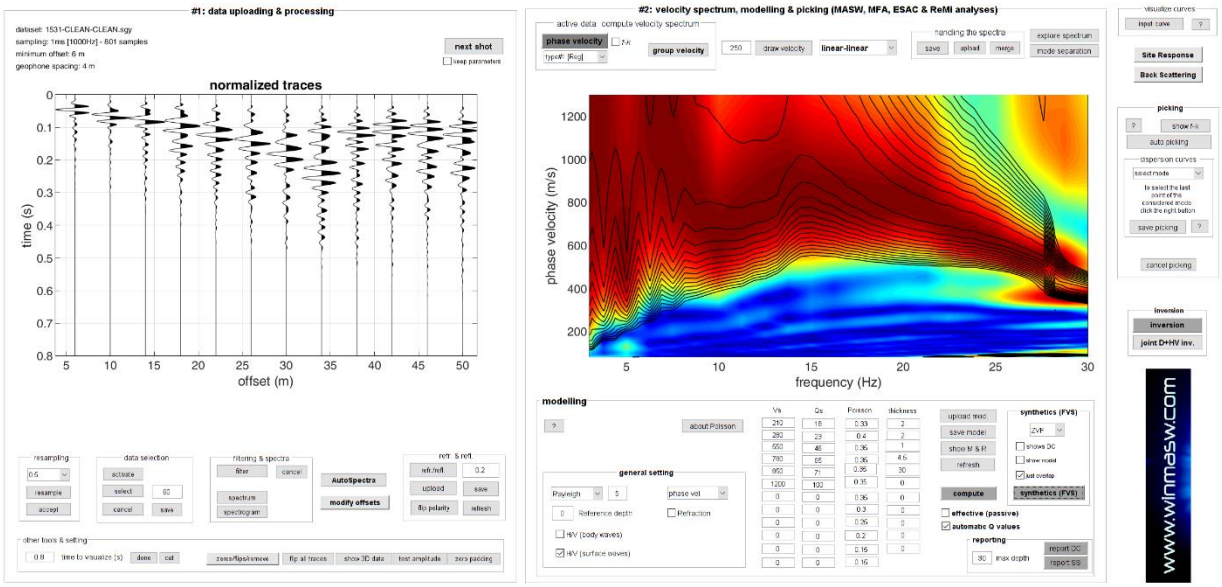
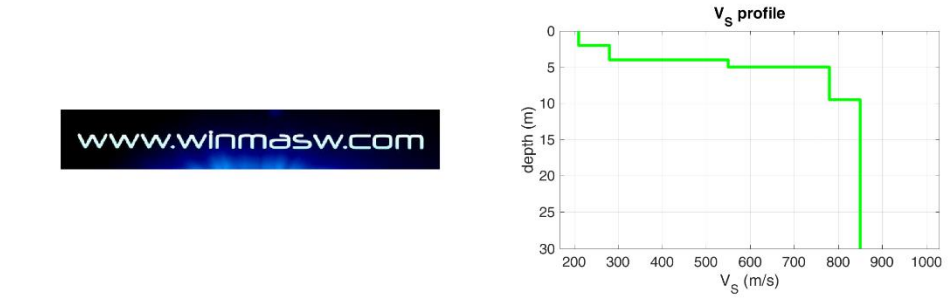


Fig. 38. Analisi FVS per componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF



layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	210	2	2
2	280	2	4
3	550	1	5
4	780	4.5000	9.5000
5	850	30	39.5000
6	1200	0	0

Vs model (Vs30 & VsE: 620 392 m/s)

Fig. 39. Modello VS del sottosuolo proposto

La velocità equivalente calcolata è pari a 392 m/s e pertanto si può classificare il sito come appartenente alla categoria 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*) dei suoli fondazionali, secondo le NTC 2018.

3.3.3 MASW 3

Sul terreno è stato materializzato n°1 stendimento dalla lunghezza di 44 m utilizzando n°12 geofoni posti ad una distanza intergeofonica pari a 4.0 m. L'intervallo temporale di campionamento adottato è stato di 1 millisecondo e la durata di ogni singola registrazione è stata di 2 secondi (frequenza di campionamento 1000 Hz). Per attenuare il rumore incoerente è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute pari a 10. La sorgente è stata posizionata esternamente allo stendimento, ad una distanza di 6.0 m.

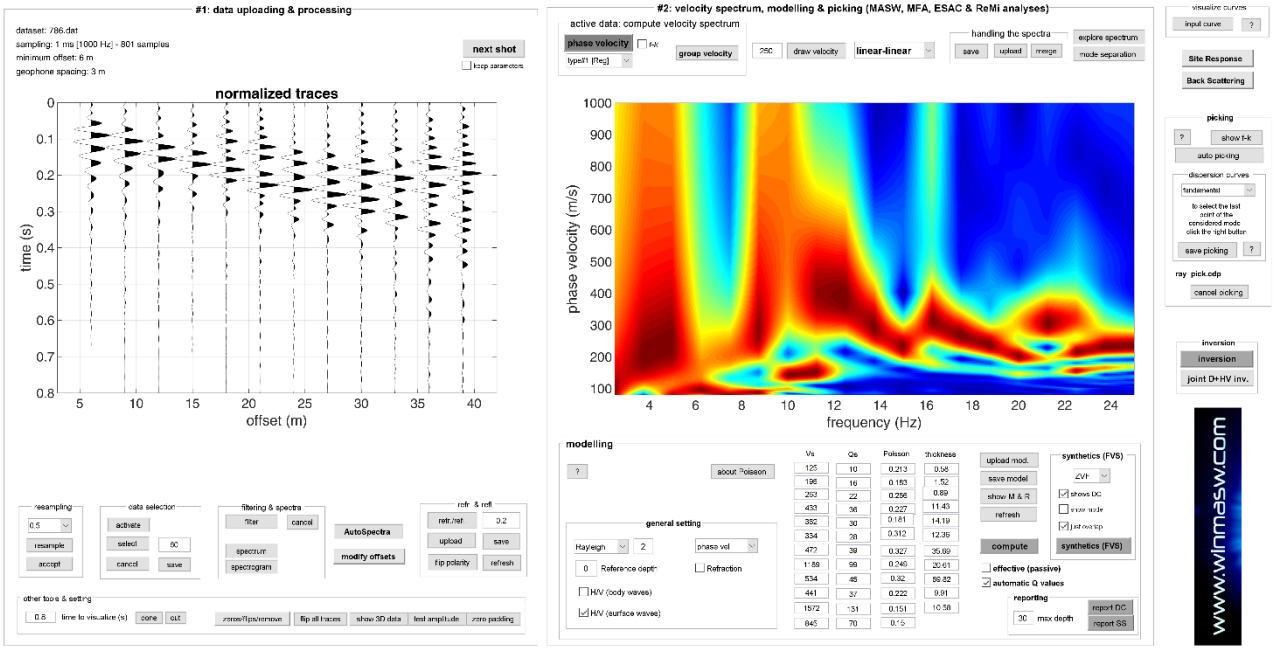


Fig. 40. Dataset originale per la componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF

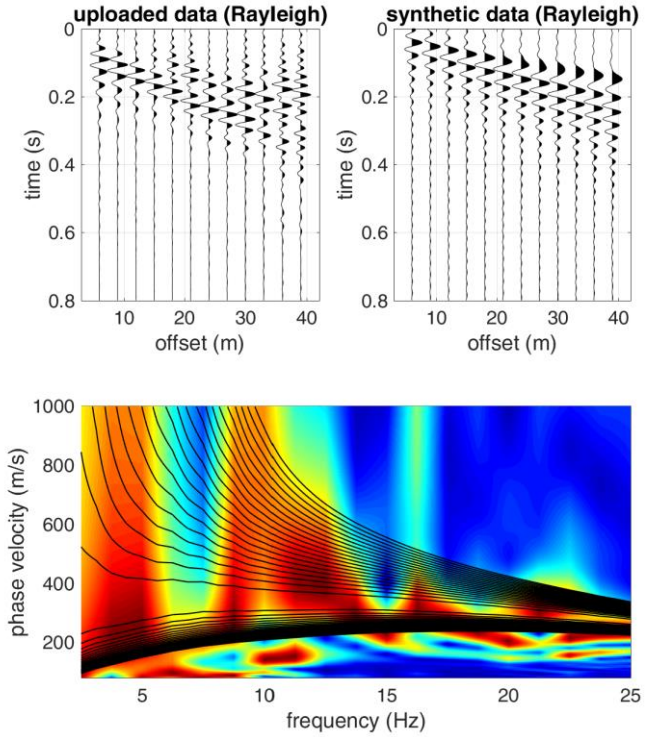


Fig. 41. Analisi FVS per componente verticale dell'onda di Rayleigh ZVF

3.4 SISMICA A RIFRAZIONE

3.4.1 SISMICA A RIFRAZIONE N°1

Sul terreno è stato materializzato n°1 stendimento dalla lunghezza di 45.0 m utilizzando n°24 geofoni posti ad una distanza intergeofonica pari a 1.50 m. L'intervallo temporale di campionamento adottato è stato di 0.500 millisecondi e la durata di ogni singola registrazione è stata di 0.30 secondi.

Per attenuare il rumore incoerente è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute pari a 10 realizzando un numero complessivo di energizzazioni pari a 7 (G1 -5.0 m; G1 -0.75 m G6/G7; G12/G13; G16/G17; G24 +0.75 m, G24 +5.0 m).

Per l'analisi dei dati si è adottato il software ZONDST2D.

D A T I D I C A M P A G N A

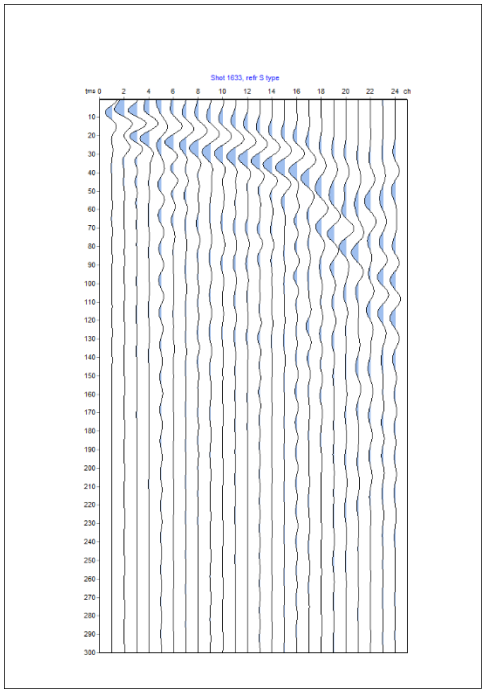


Fig. 42. Shot 1633_G1 -5.00

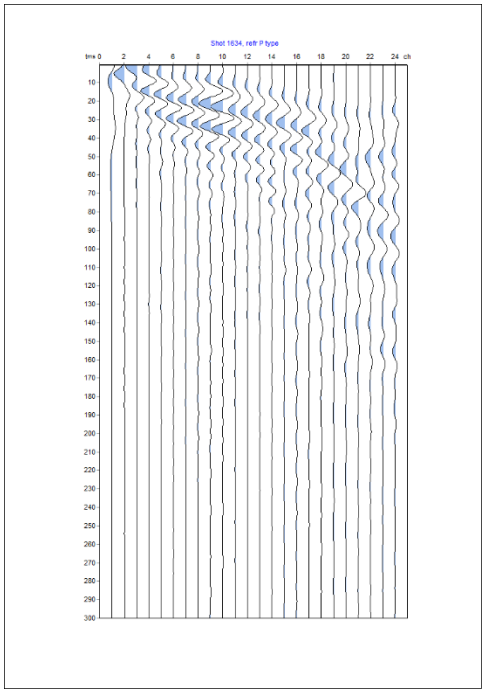


Fig. 43. Shot 1634_G1 -0.75

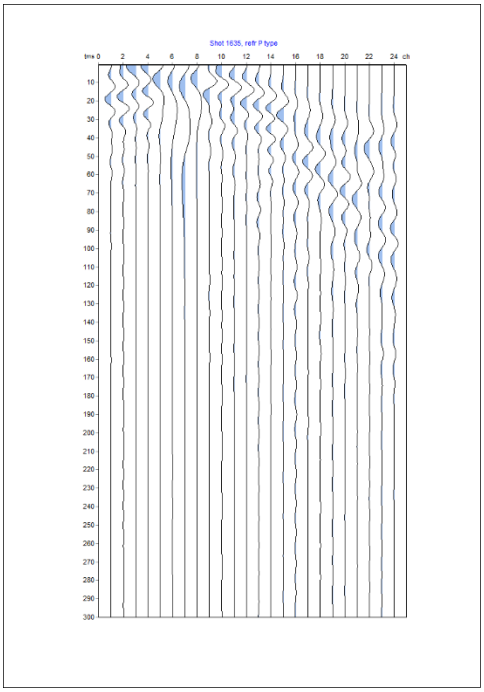


Fig. 44. Shot 1635_G6-G7

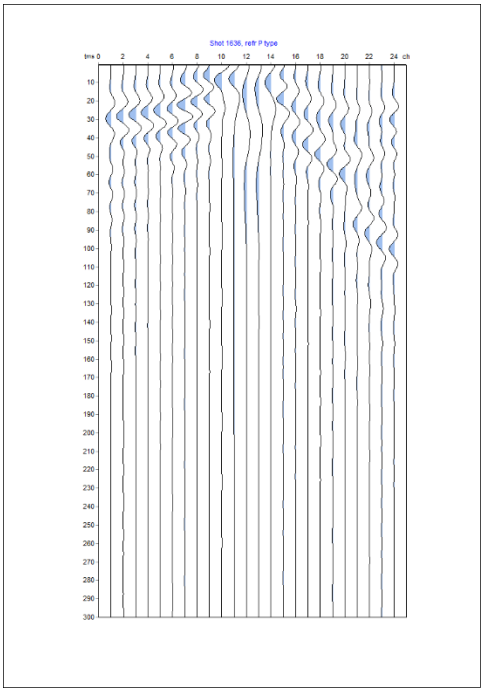


Fig. 45. Shot 1636_G12-G13

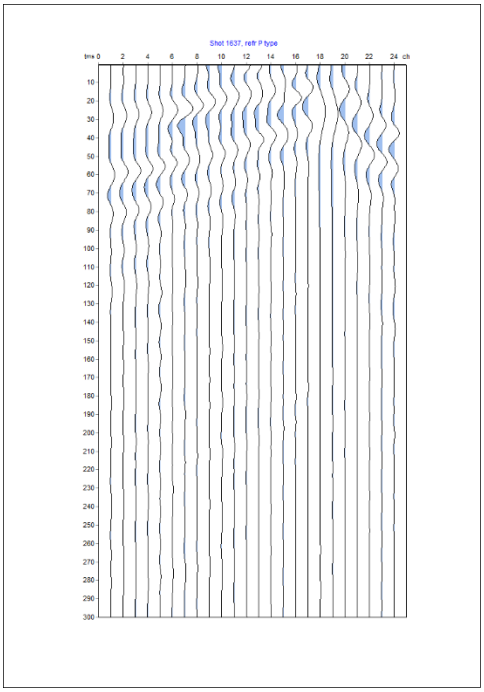


Fig. 46. Shot 1637_G18-G19

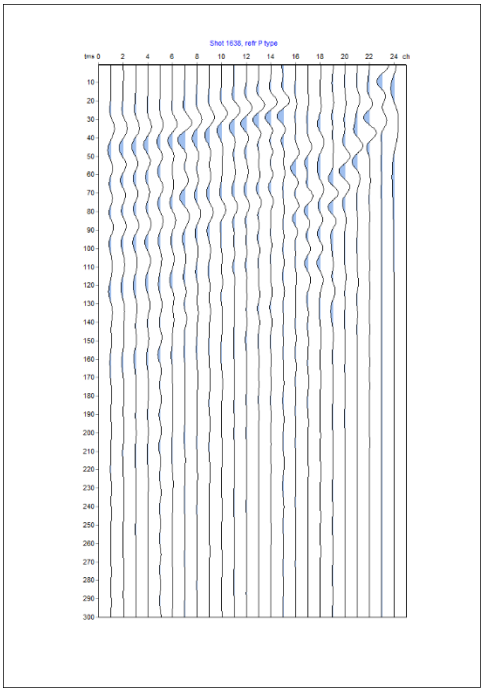


Fig. 47. Shot 1638_G24 +0.75

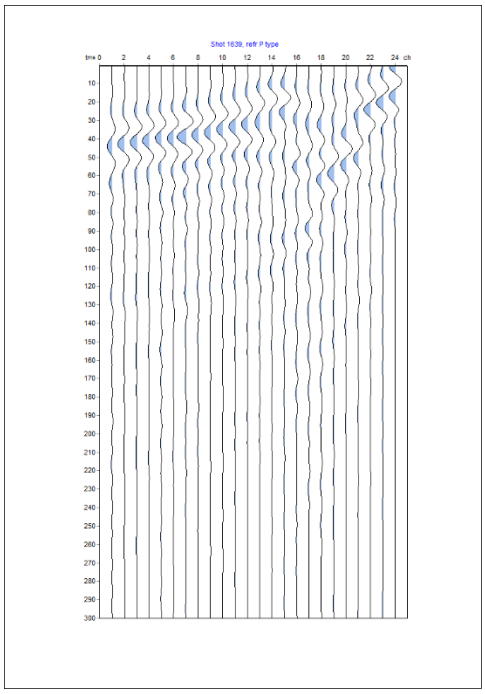
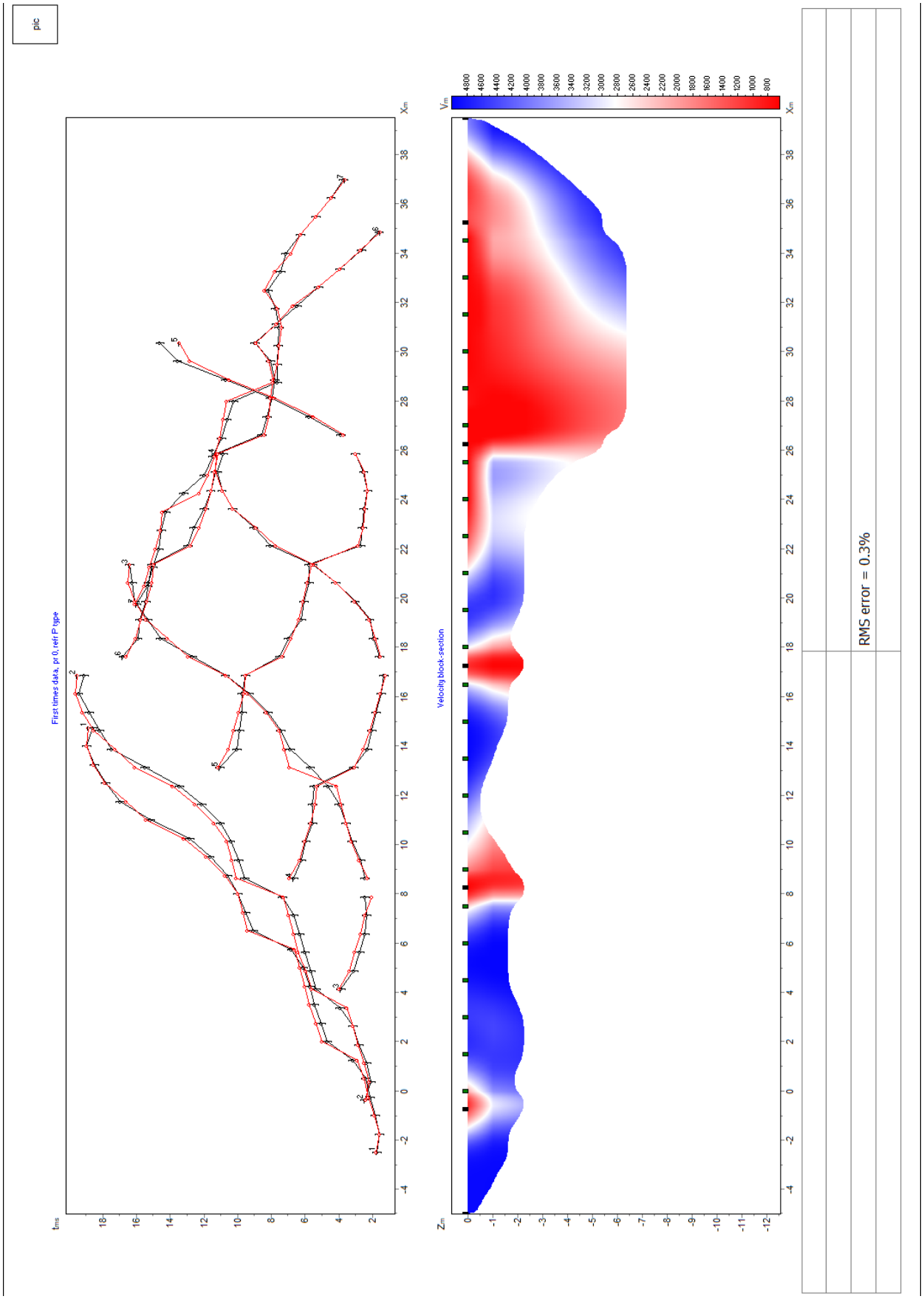
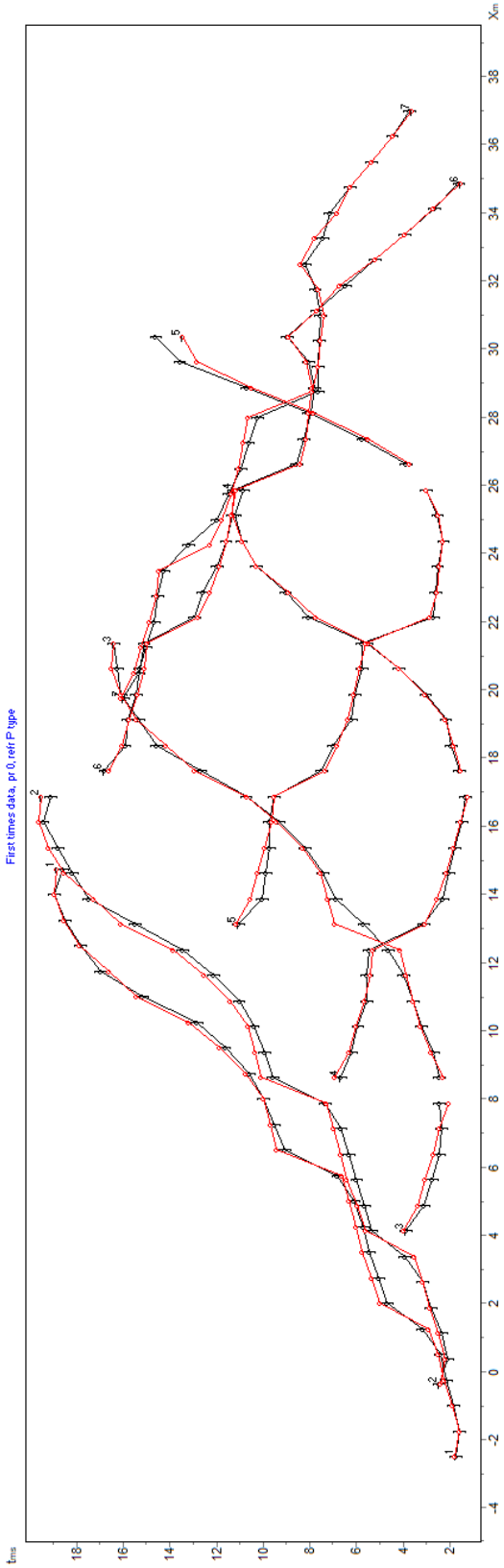


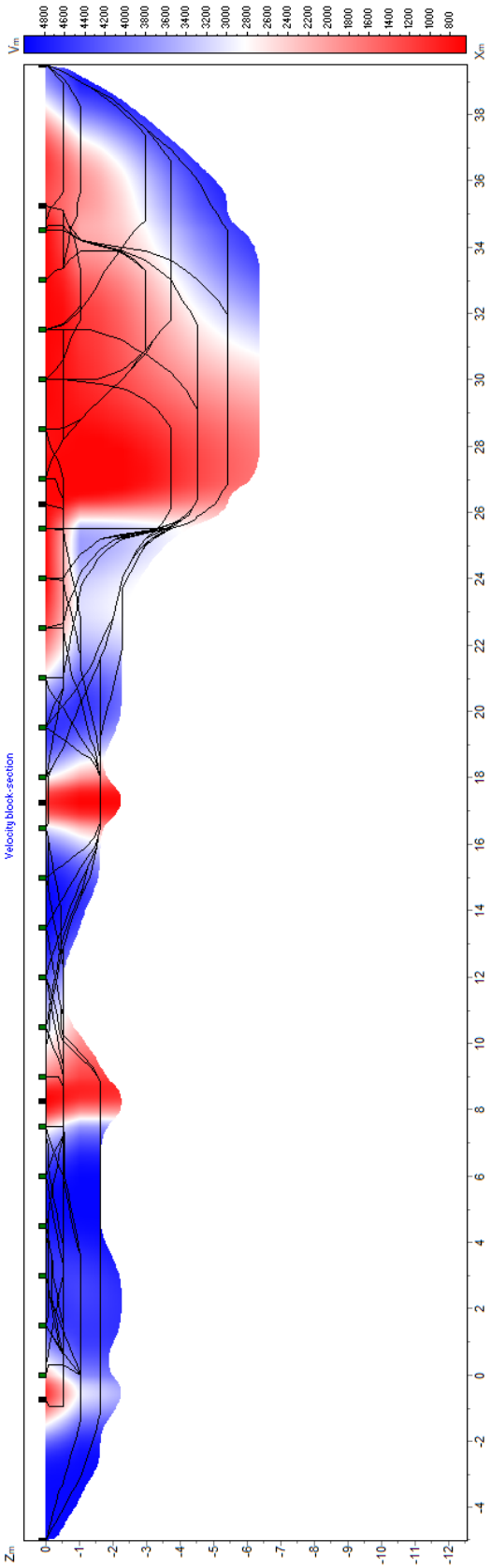
Fig. 48. Shot 1639_G24 +5

MODELLO TOMOGRAFICO



pic





RMS error = 0.3%

3.4.2 SISMICA A RIFRAZIONE N°2

Sul terreno è stato materializzato n°1 stendimento dalla lunghezza di 54.0 m utilizzando n°24 geofoni posti ad una distanza intergeofonica pari a 2.0 m. L'intervallo temporale di campionamento adottato è stato di 0.500 millisecondi e la durata di ogni singola registrazione è stata di 0.30 secondi.

Per attenuare il rumore incoerente è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute pari a 10 realizzando un numero complessivo di energizzazioni pari a 7 (G1 -3.0 m; G1 -1.00 m G6/G7; G12/G13; G16/G17; G24 +1.00 m, G24 +4.0 m).

Per l'analisi dei dati si è adottato il software ZONDST2D.

D A T I D I C A M P A G N A

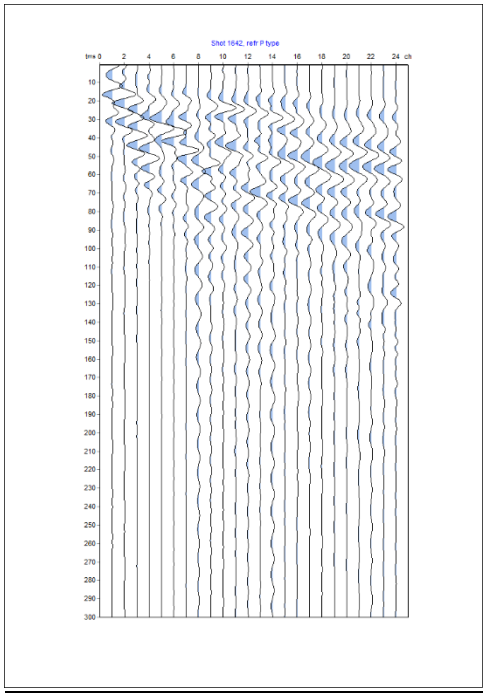


Fig. 49. Shot 1642_G1 -3.00

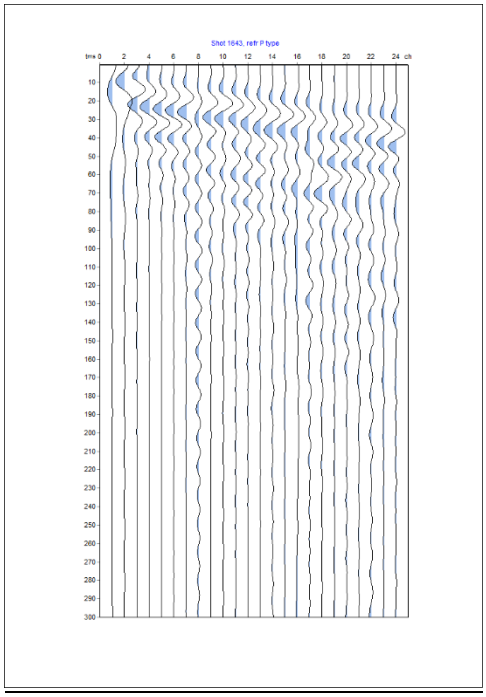


Fig. 50. Shot 1643_G1 -1.00

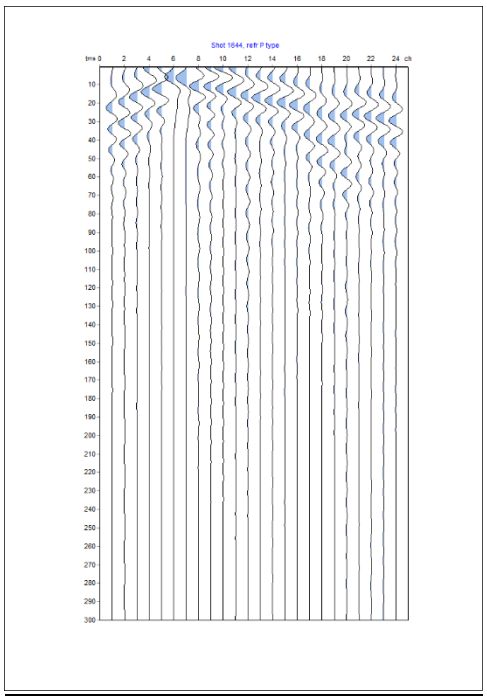


Fig. 51. Shot 1644_G6-G7

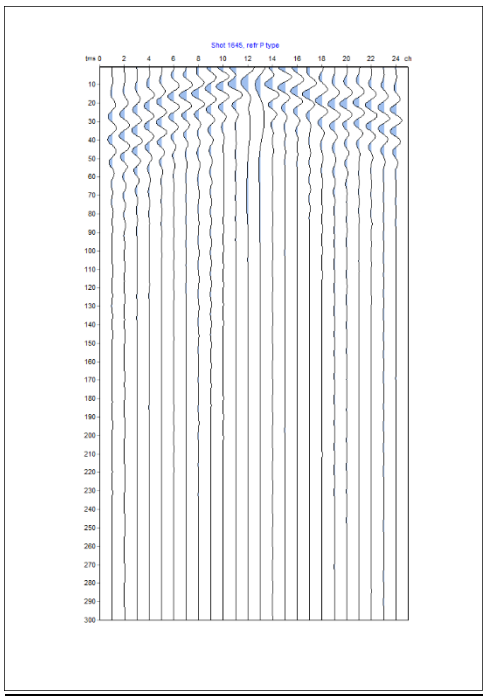


Fig. 52. Shot 1645_G12-G13

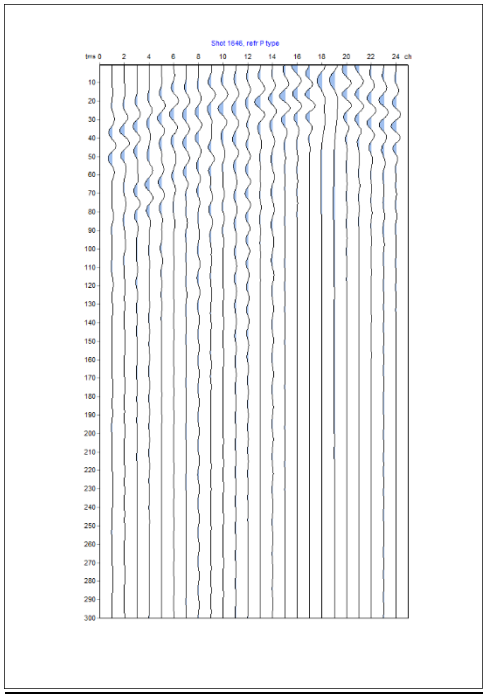


Fig. 53. Shot 1646_G18-G19

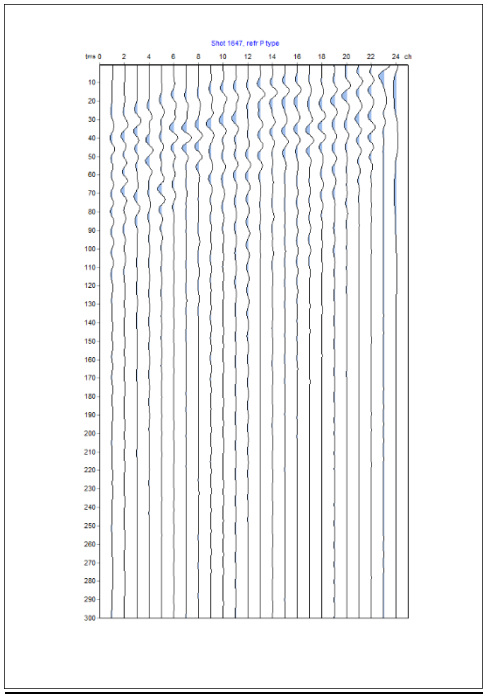


Fig. 54. Shot 1647_G24 +1.00

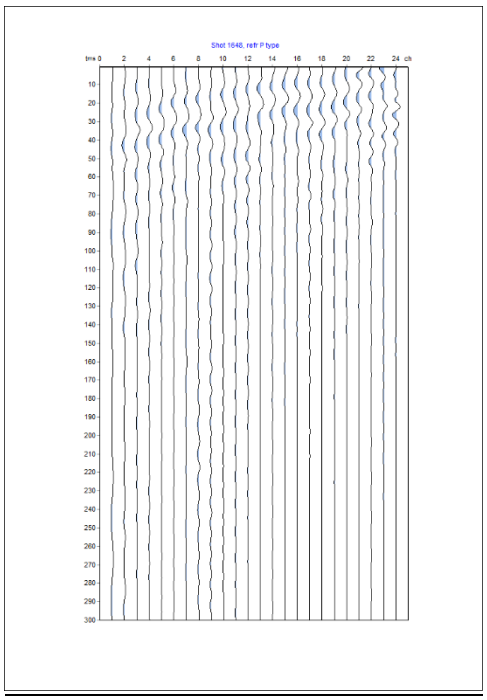
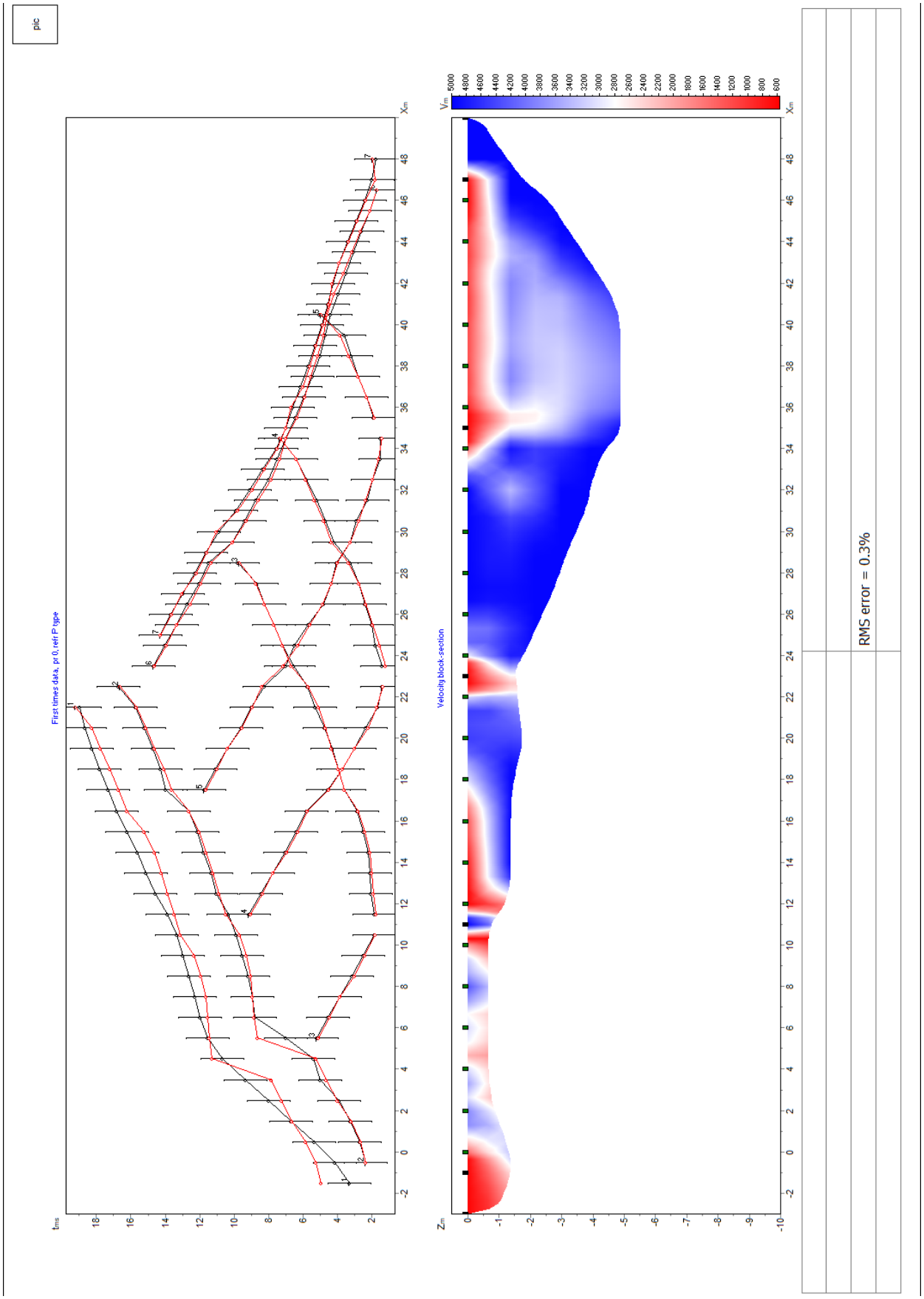
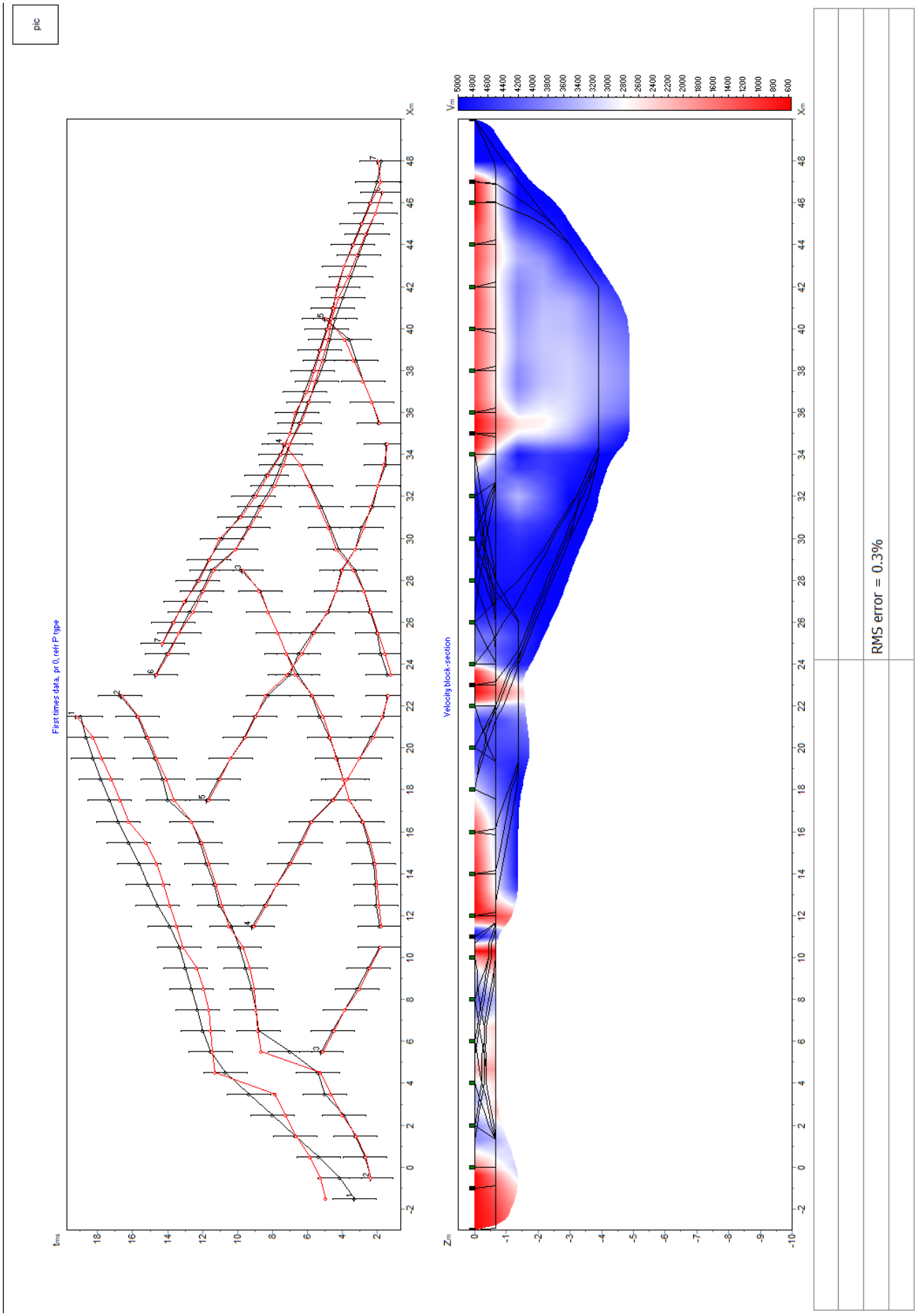


Fig. 55. Shot 1648_G24 +4

MODELLO TOMOGRAFICO




pic
First times data, pr 0, refr P type
Velocity block-section
RMS error = 0.3%

3.4.3 SISMICA A RIFRAZIONE N°3

Sul terreno è stato materializzato n°1 stendimento dalla lunghezza di 74.0 m utilizzando n°24 geofoni posti ad una distanza intergeofonica pari a 3.0 m. L'intervallo temporale di campionamento adottato è stato di 0.500 millisecondi e la durata di ogni singola registrazione è stata di 0.30 secondi.

Per attenuare il rumore incoerente è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute pari a 10 realizzando un numero complessivo di energizzazioni pari a 7 (G1 -5.0 m; G1 -1.50 m G6/G7; G12/G13; G16/G17; G24 +1.50 m, G24 +5.0 m).

Per l'analisi dei dati si è adottato il software ZONDST2D.

D A T I D I C A M P A G N A

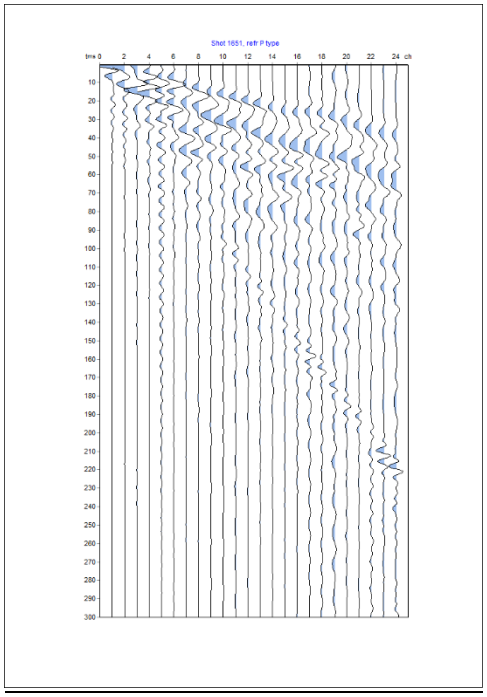


Fig. 56. Shot 1651_G1 -5.00

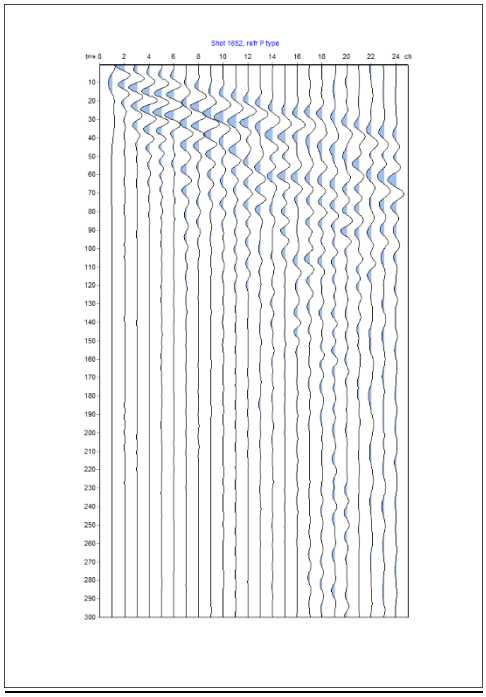


Fig. 57. Shot 1652_G1 -1.50

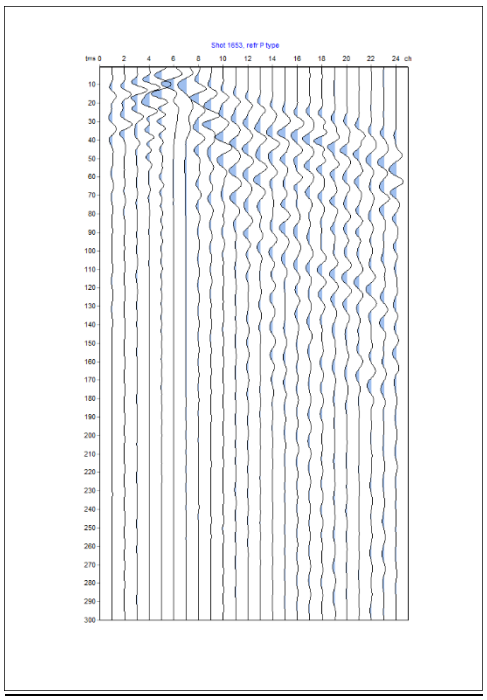


Fig. 58. Shot 1653_G6-G7

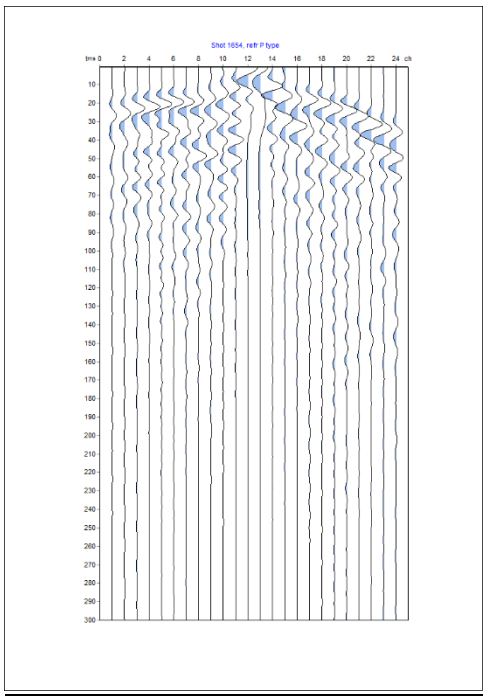


Fig. 59. Shot 1654_G12-G13

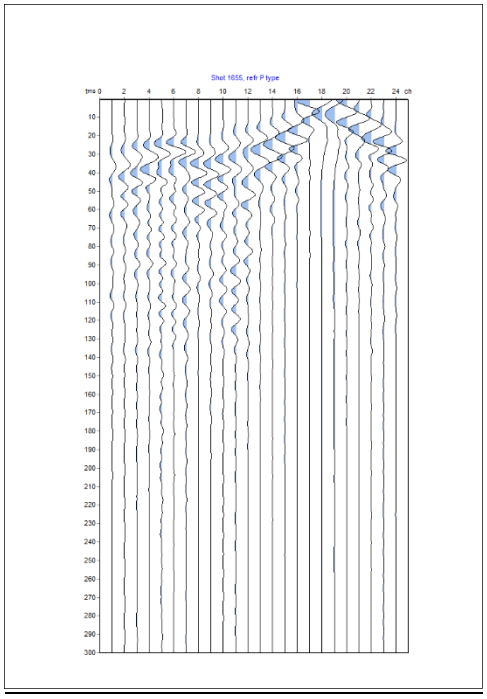


Fig. 60. Shot 1655_G18-G19

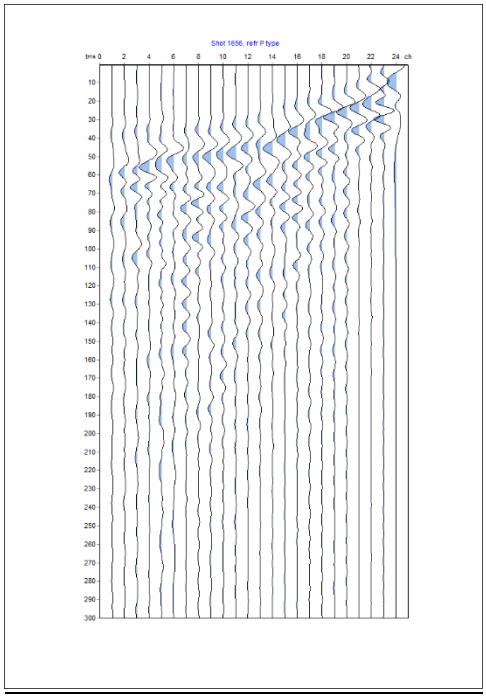


Fig. 61. Shot 1656_G24 +1.50

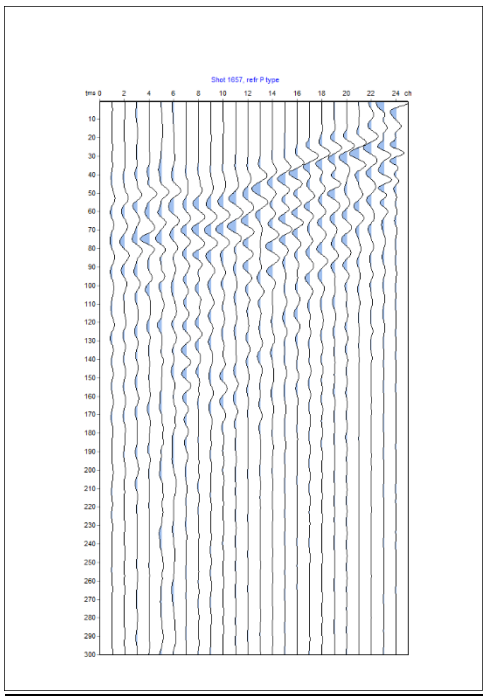
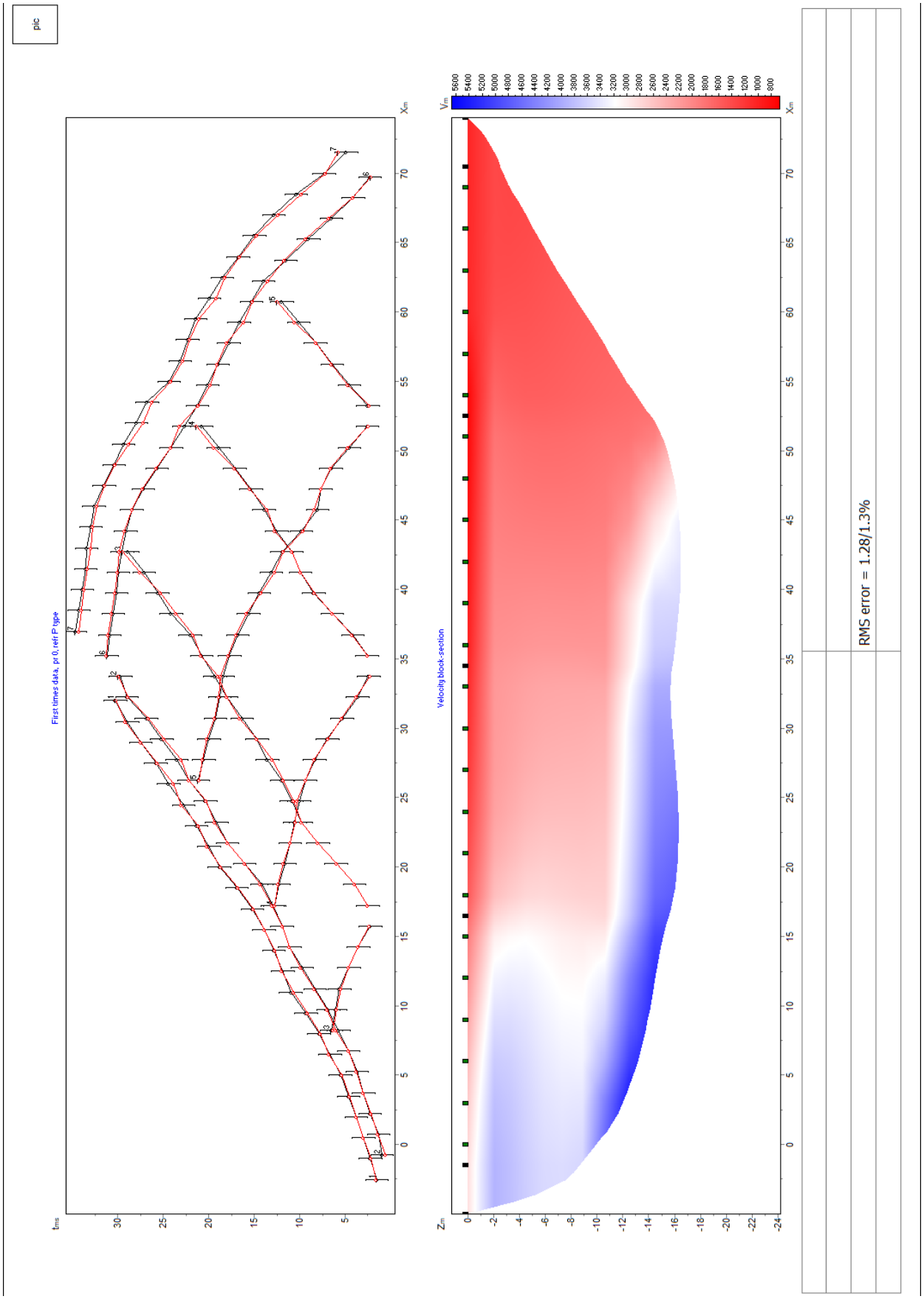
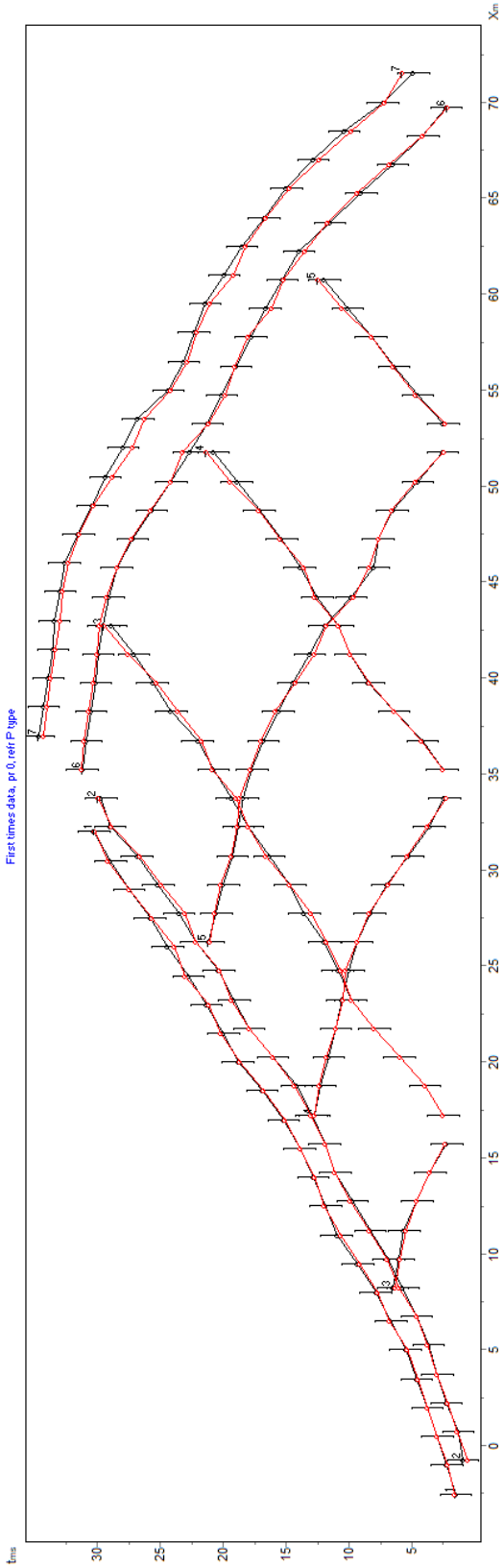


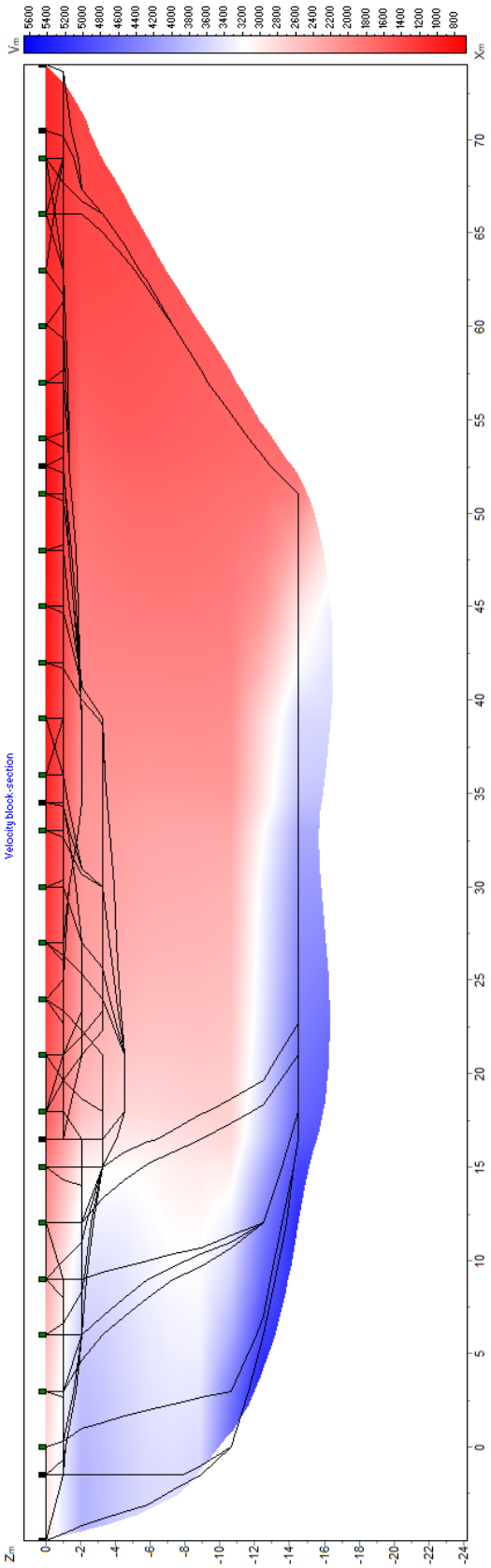
Fig. 62. Shot 1657_G24 +5

MODELLO TOMOGRAFICO



pic





RMS error = 1.28/1.3%

3.5 GEORADAR

L'area è stata indagata mediante una serie di scansioni longitudinali lungo la viabilità per un totale di circa 2500 ml di scansione.

Tutte le aree sono state acquisite con il georadar Proceq GS8000 collegato al GNSS mediante ricevitore MA8000 connesso tramite GSM alla rete. Il ricevitore GNSS è stato installato su palina avvitata nell'apposito supporto presente sul kart Proceq GS8000.

Il rilievo viene fornito georiferito mediante il sistema di riferimento delle coordinate RDN2008 / UTM zone 33N (EPSG:6708).

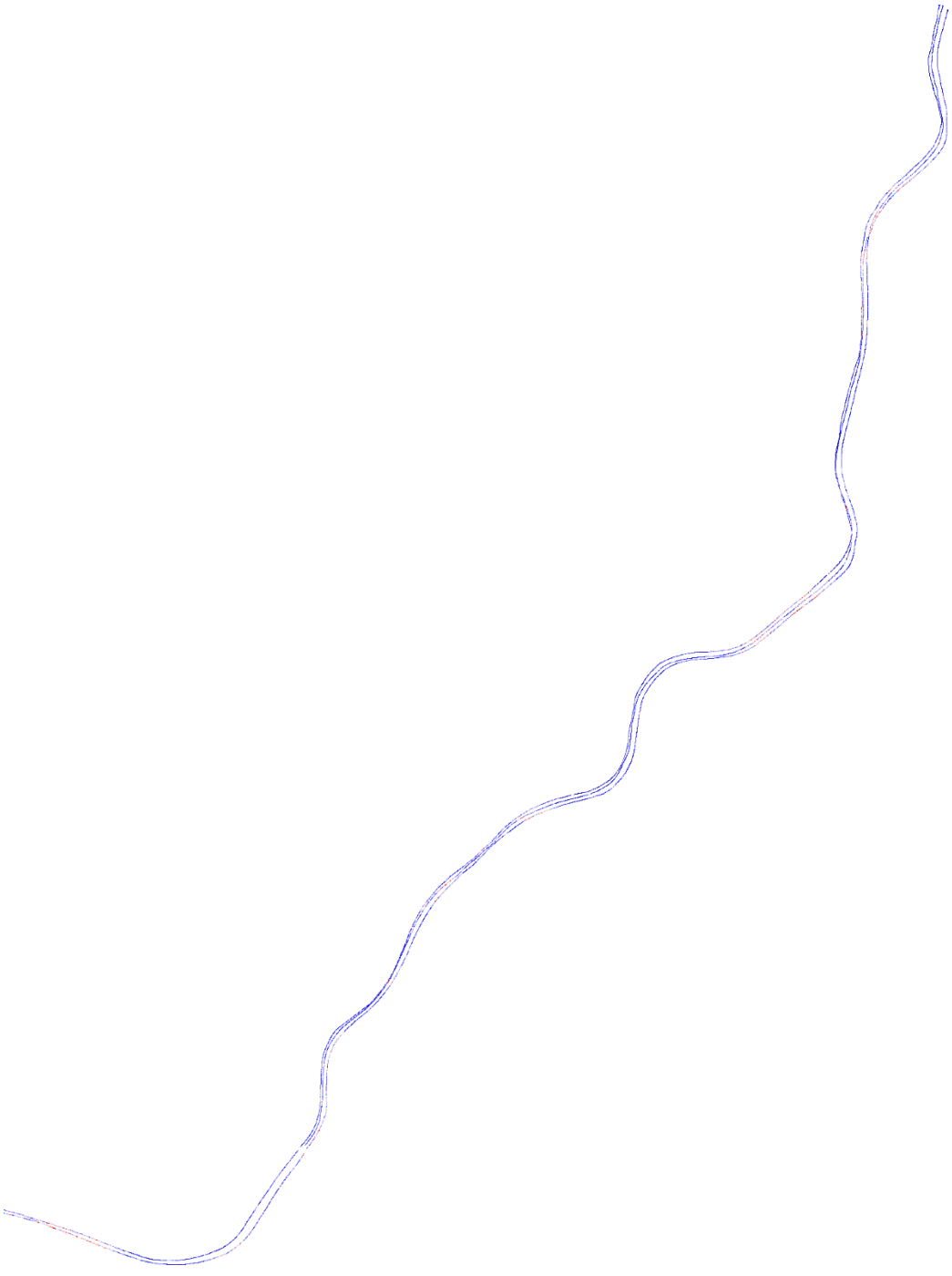


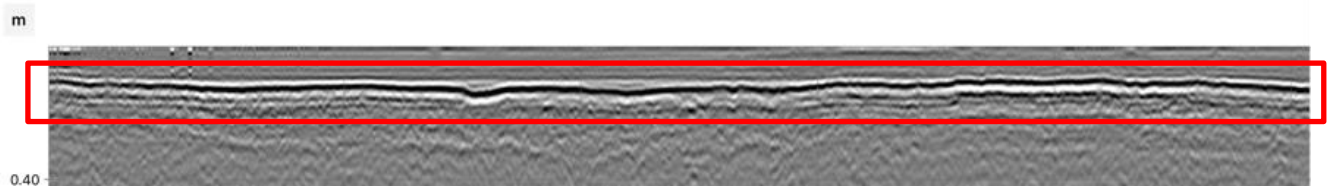
Fig. 63. Time slices del rilievo eseguito

L'elaborazione di ciascun profilo è stata effettuata applicando dei filtri nel dominio della frequenza con lo scopo di migliorare il rapporto tra segnale e rumore. Successivamente, tenendo in considerazione gli scopi dell'indagine, ogni profilo è stato trattato in modo da mettere in risalto le informazioni richieste.

Una volta ottenuta la sezione radar-stratigrafica, per ogni profilo viene effettuata la conversione dalla scala verticale in base tempi alla scala in profondità. Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche del mezzo attraversato, la quale può essere effettuata eseguendo il fitting delle iperboli di diffrazione presenti all'interno del profilo GPR la cui apertura dipende dalla costante dielettrica del mezzo e quindi della velocità dell'onda elettromagnetica. In alternativa, nei profili in cui non sono state identificate iperboli di diffrazione, la conversione tempi-profondità viene eseguita dallo strumento sulla base della tipologia del terreno indagato. Si vuole precisare che per il dato georadar bisogna considerare un errore di +/-0.15-0.20m sia per quanto riguarda la profondità dovute alla risoluzione dello strumento e/o interferenze e possibili errori sistematici sia per quanto riguarda il posizionamento del GNSS.

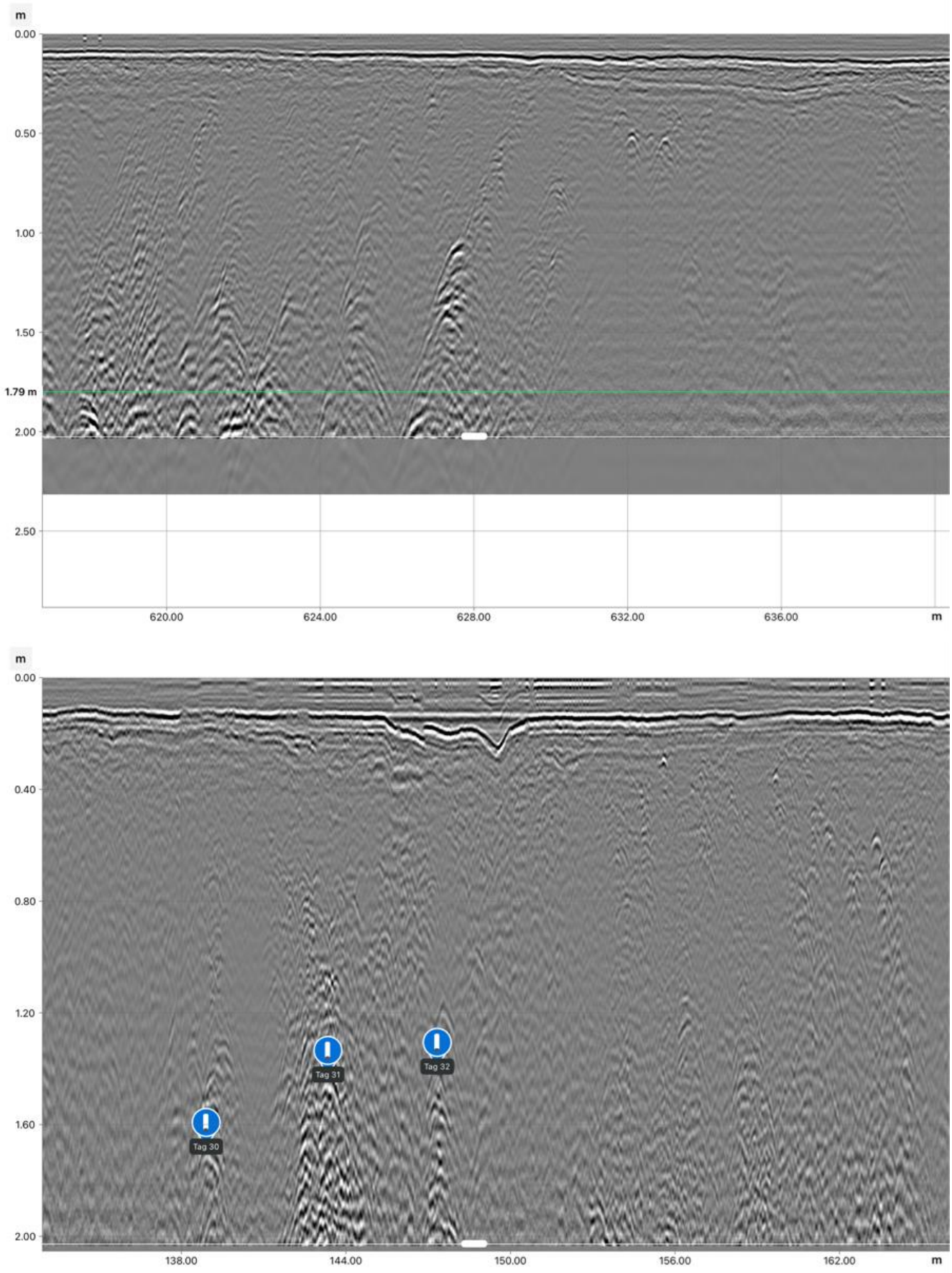
Il rilievo ha permesso di investigare il sedime stradale sino alla profondità di circa 1.80 m e di mettere in luce le seguenti caratteristiche:

- Lo spessore dello strato bituminoso superficiale è pressoché omogeneo lungo tutta l'areaindagata ed è pari a circa 0.15-0.20 m;



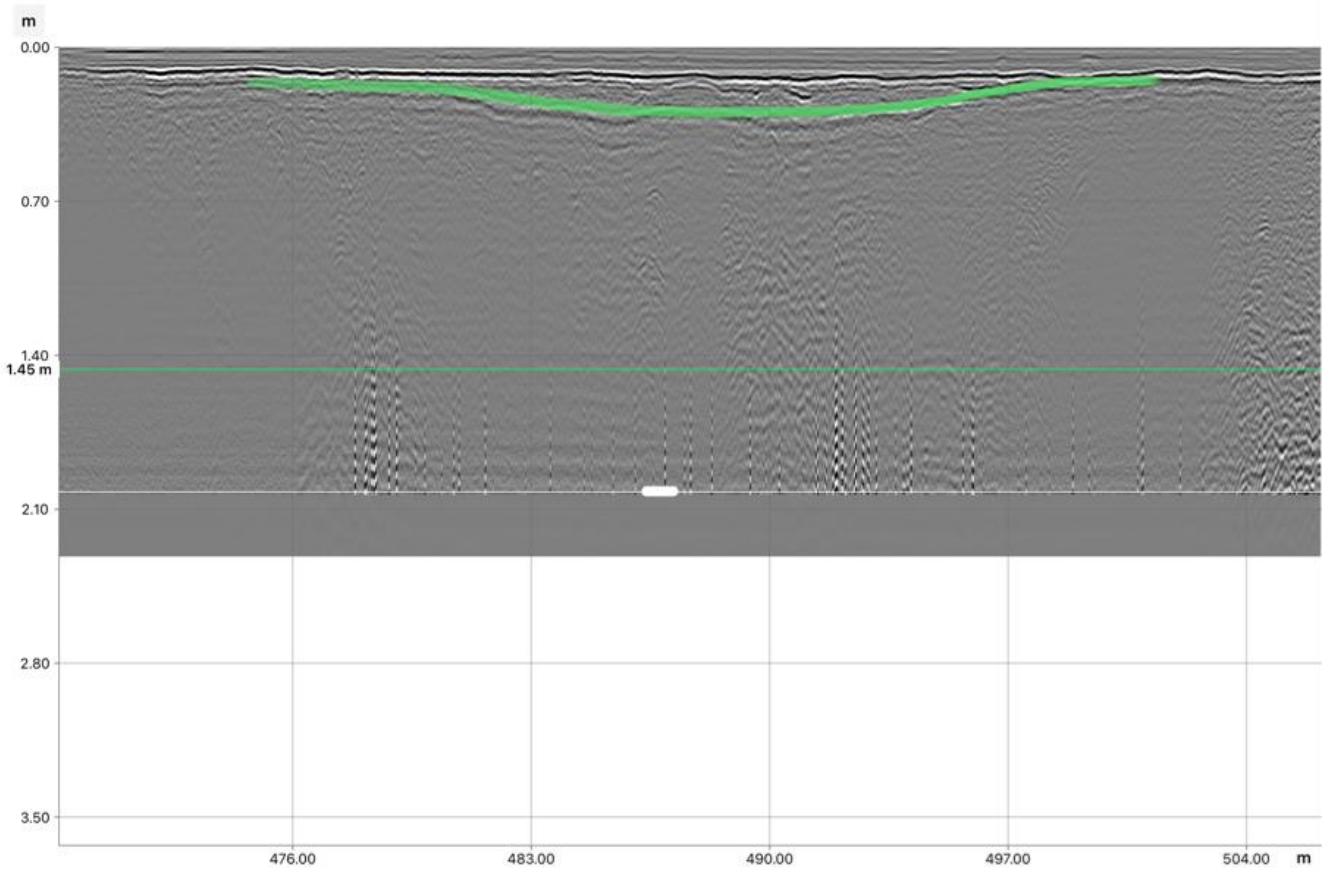
Particolare della sezione radar in cui si nota lo spessore del manto bituminoso di circa 15-20 cm

- Al di sotto dello strato superficiale di asfalto, il segnale radar è omogeneo lungo tutta la superficie indagata. Si notano locali difrattori di piccola e media entità dovuti probabilmente alla presenza di segnali isolati attribuibili all'ammasso roccioso. Localmente, a profondità oltre 1.0 m si trovano potenti difrattori che si ipotizza siano generati dalle barre di ancoraggio dei muri di sostegno posti a valle della sede stradale. Tutti i segnali sono stati individuati e riportati in cartografia sotto la voce di "Segnale isolato" (Fig. 64);



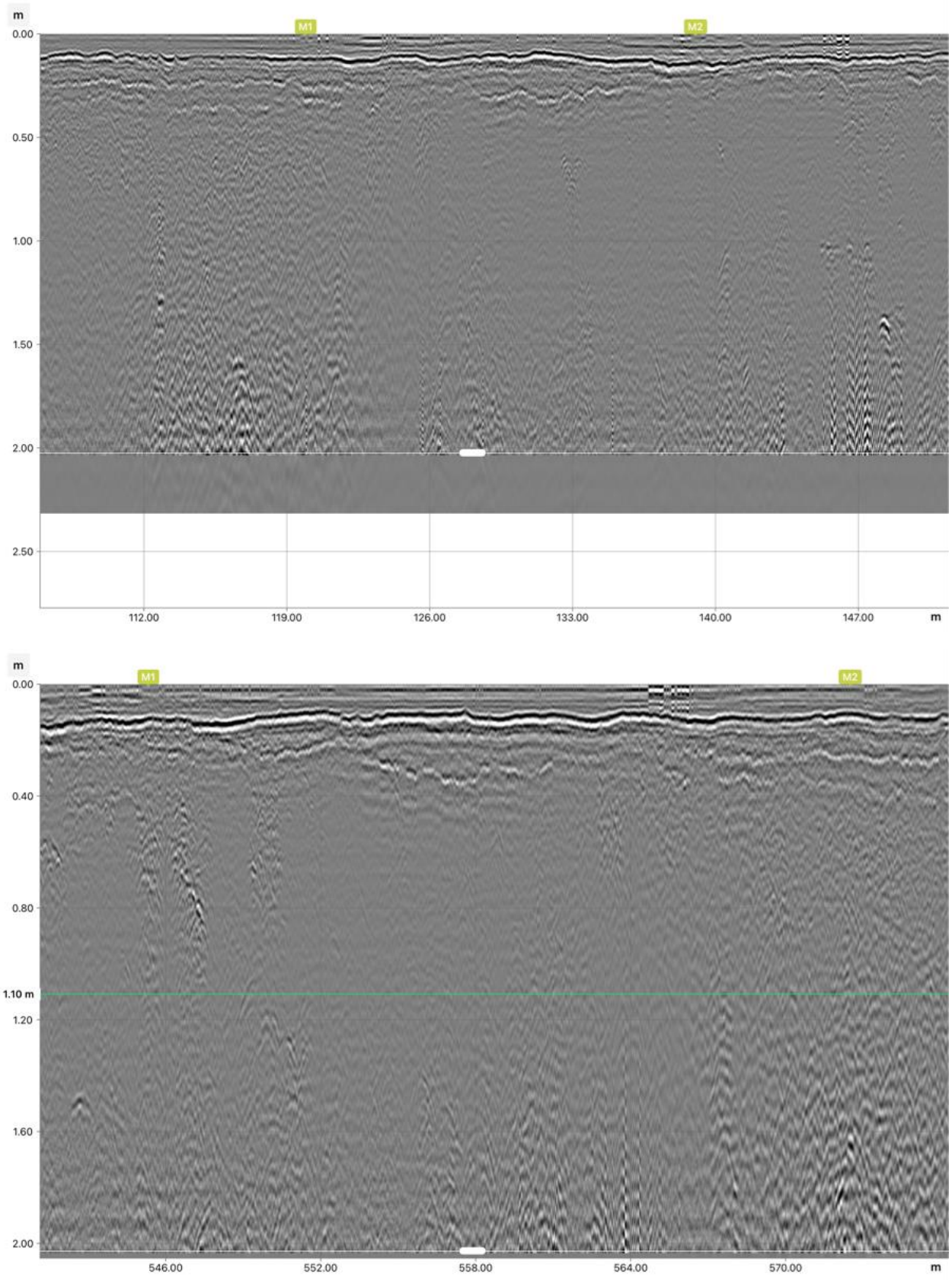
Particolare della sezione radar in cui si nota la presenza di segnali isolati oltre il metro di profondità

- Localmente sono stati individuati avvallamenti del sottofondo stradale



Particolare della sezione radar in cui si nota l'avvallamento del sottofondo stradale

- L’area attualmente in frana, dal punto di vista del radargramma, non mette in luce la presenza di vuoti e/o discontinuità al di sotto della sede stradale rimasta intatta



Particolare della sezione radar in cui tra i marker M1 ed M2 è collocata la sede stradale in cui, attualmente, parte di essa risulta franata



Fig. 64. Restituzione rilievo georadar

3.6 ELETTROMAGNETOMETRO

Per il rilievo elettromagnetico, lo strumento è stato mantenuto ad una altezza di circa 1 metro dal piano campagna e trasportato manualmente da un operatore. Sono state impostate 4 frequenze per lo studio delle aree e la conseguente ricerca delle masse ferromagnetiche nel sottosuolo. Le frequenze sono state scelte in modo da poter investigare sia porzioni profonde del sottosuolo, sia porzioni più superficiali. Basse frequenze permettono di raggiungere profondità maggiori rispetto ad alte frequenze. Ovviamente le profondità sono stimate, perché esse dipendono strettamente dalla composizione del sottosuolo; si possono quindi stimare dei range di profondità per ogni frequenza utilizzata. In questo caso sono state impostate le seguenti frequenze: 1525 Hz, 5325 Hz, 18325 Hz, 63025 Hz.

Il rilievo è stato eseguito mediante l'ausilio di un sistema di posizionamento GNSS portatile inquadrato nel sistema geodetico nazionale denominato RDN ETRS89 – ETRF2000 in grado di individuare la corretta posizione rispetto al perimetro dell'area oggetto di indagine.

Si ricorda che la profondità di penetrazione, come per tutti i metodi elettromagnetici, è funzione della conducibilità del mezzo (terreno) e della frequenza utilizzata. A titolo indicativo si riporta il nomogramma per il calcolo della profondità d'indagine, date la conducibilità del terreno e la frequenza utilizzata.

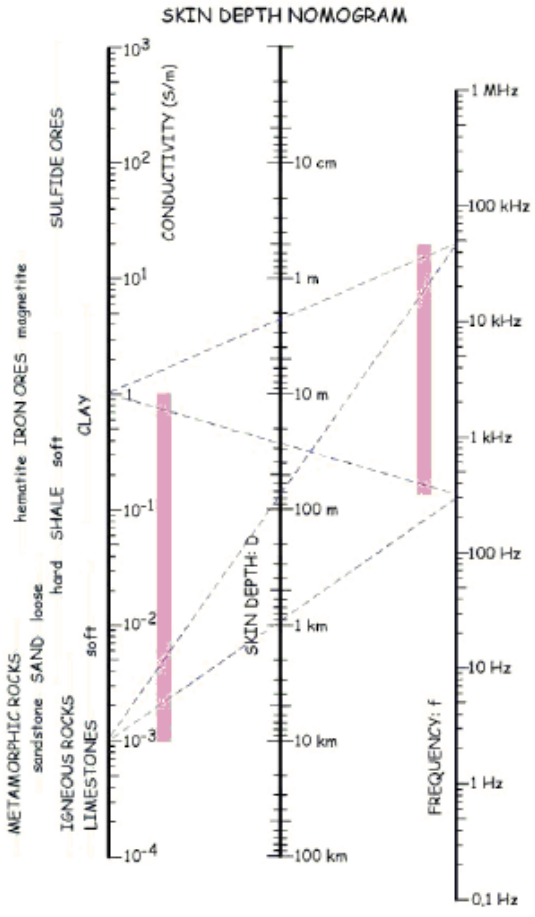
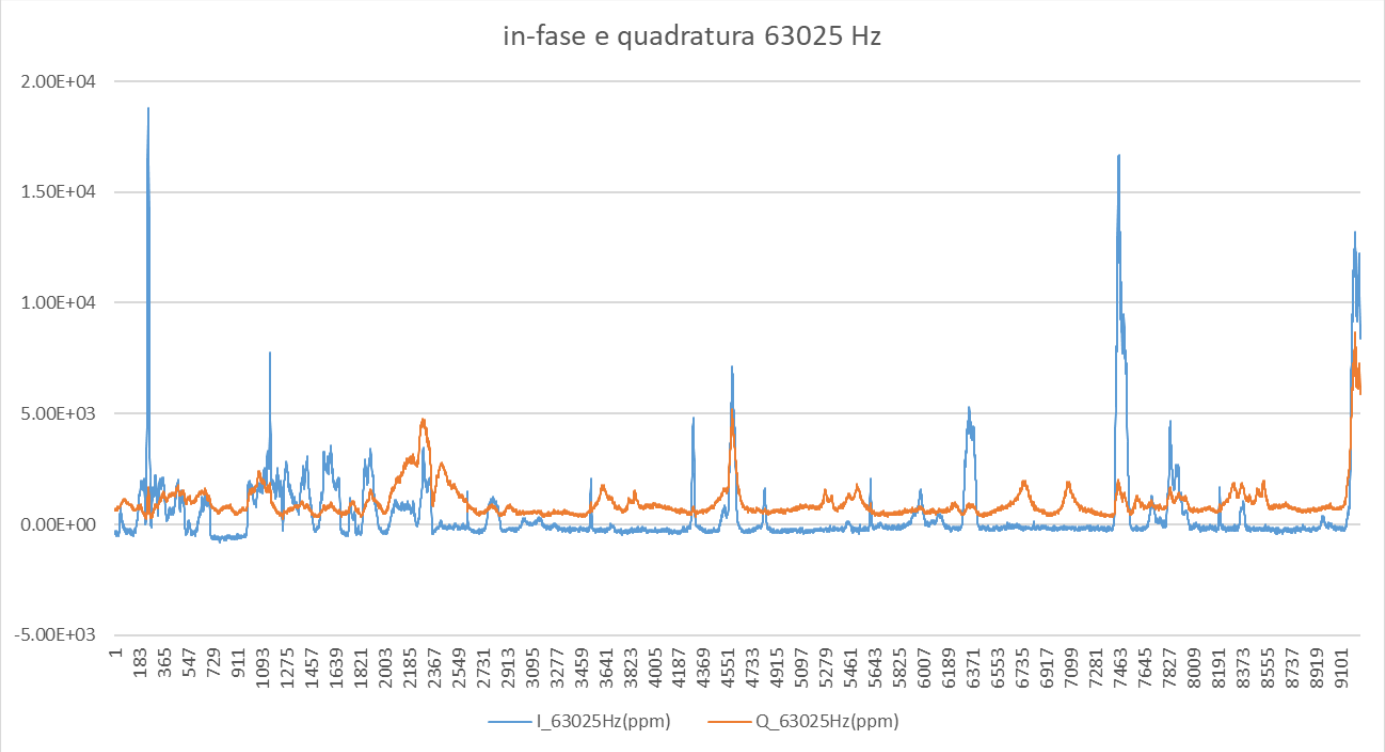
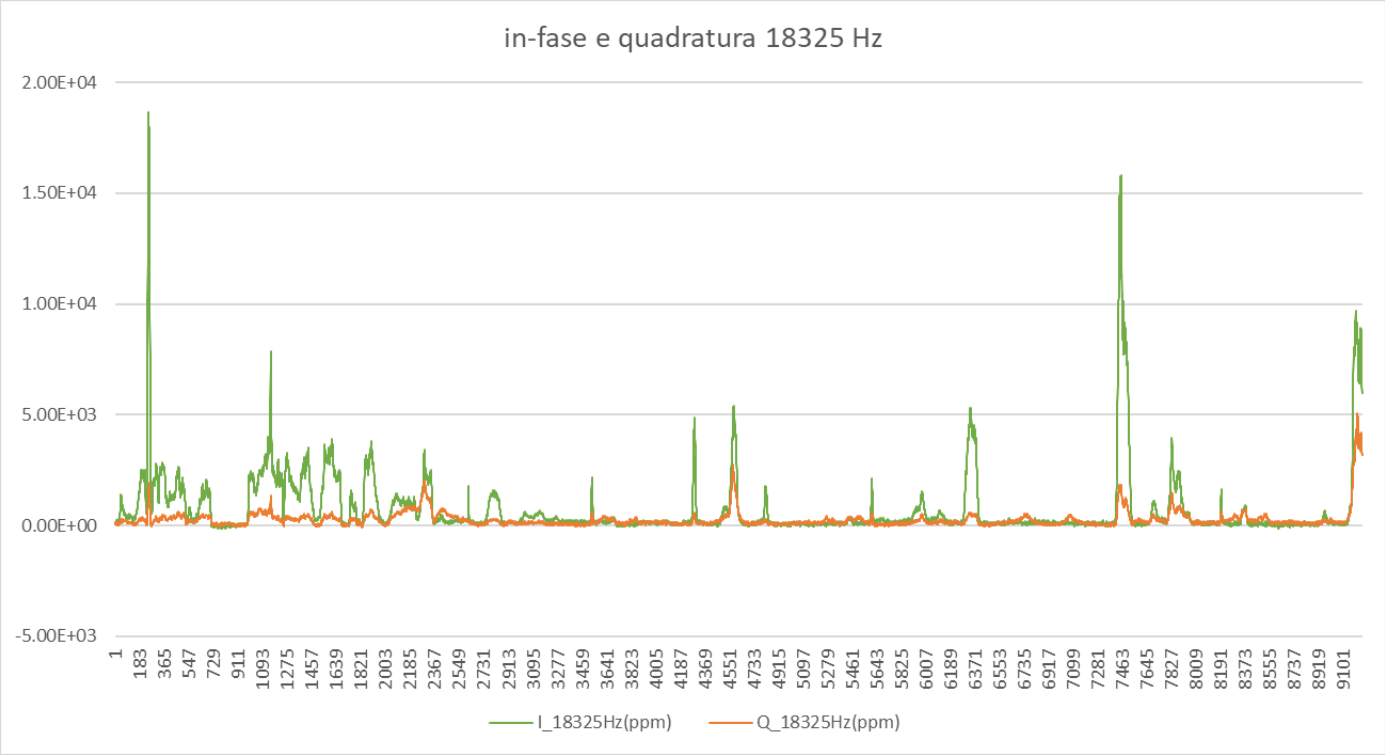
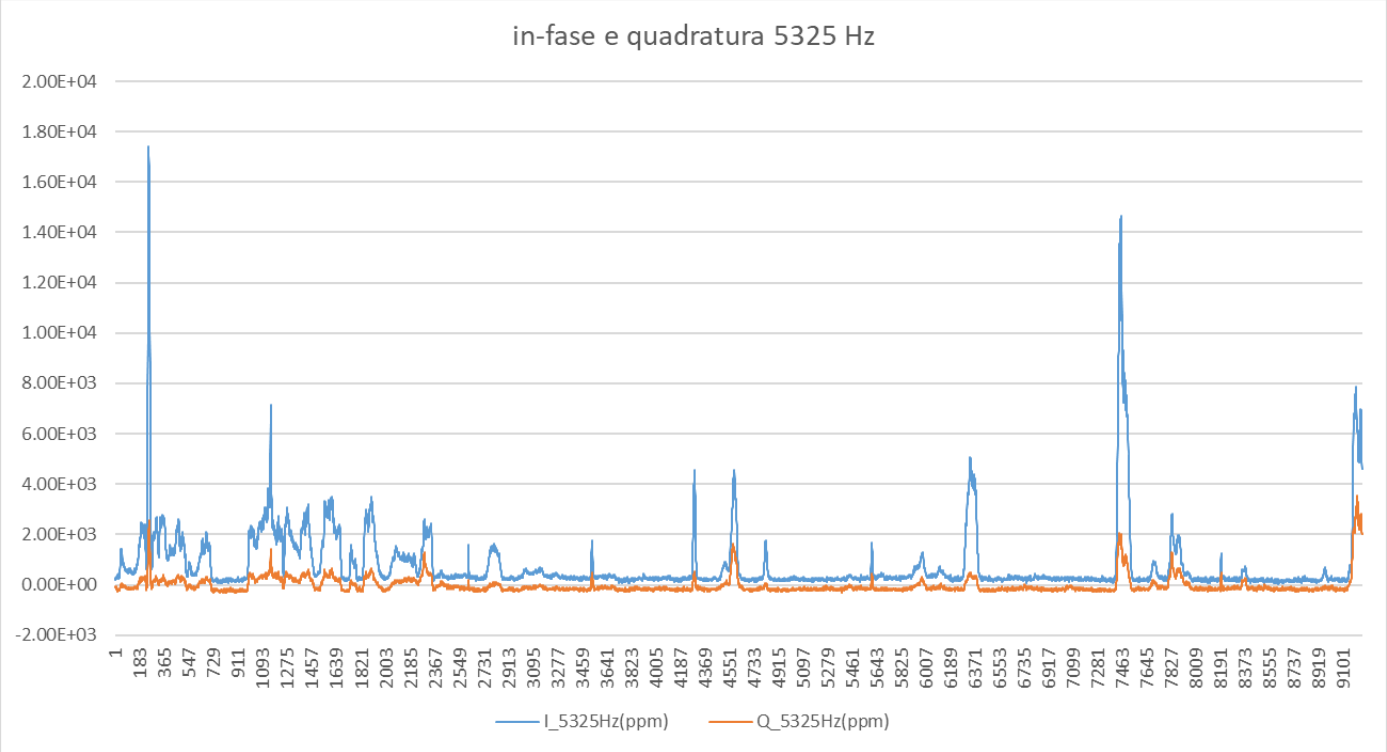
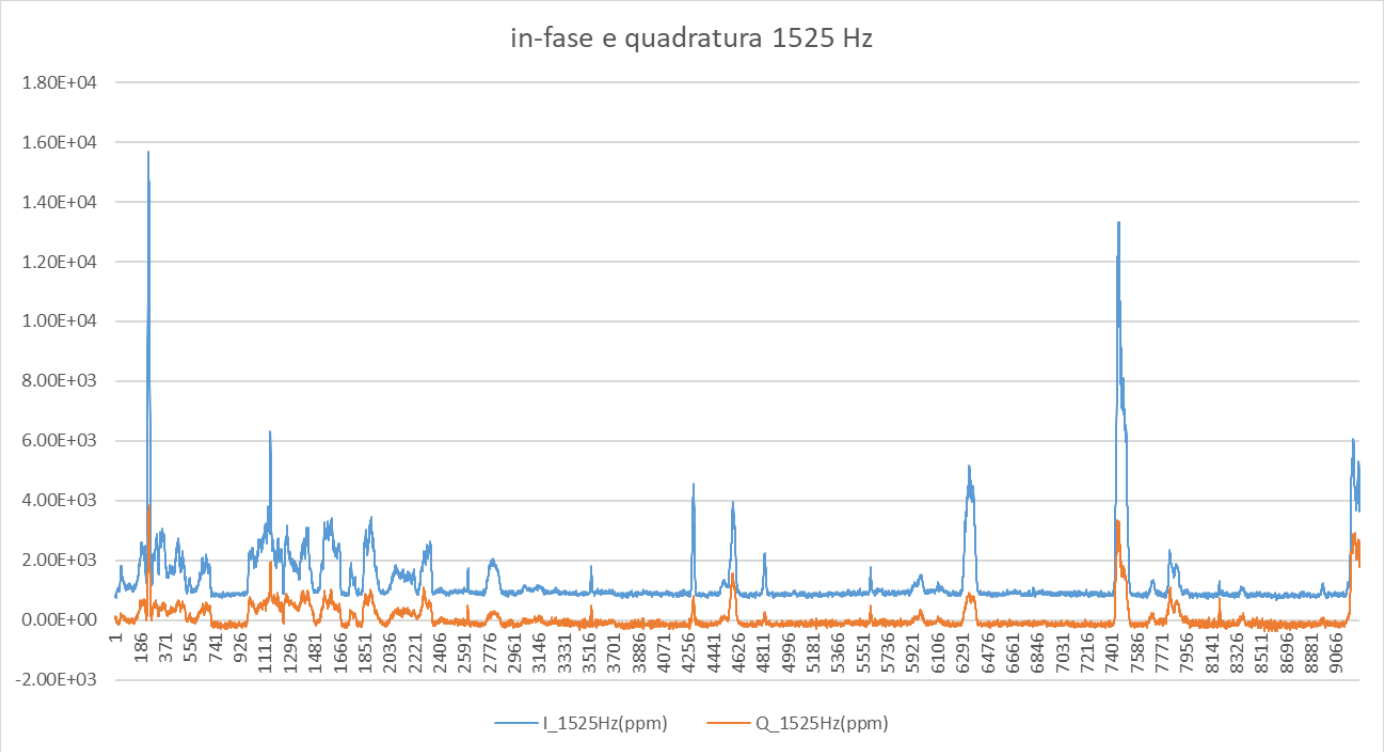


Fig. 65. Nomogramma per il calcolo della profondità di indagine


in-fase e quadratura 63025 Hz
2.00E+04
1.50E+04
1.00E+04
5.00E+03
0.00E+00
-5.00E+03
1
183
365
547
729
911
1093
1275
1457
1639
1821
2003
2185
2367
2549
2731
2913
3095
3277
3459
3641
3823
4005
4187
4369
4551
4733
4915
5097
5279
5461
5643
5825
6007
6189
6371
6553
6735
6917
7099
7281
7463
7645
7827
8009
8191
8373
8555
8737
8919
9101
I_63025Hz(ppm)
Q_63025Hz(ppm)


in-fase e quadratura 18325 Hz
2.00E+04
1.50E+04
1.00E+04
5.00E+03
0.00E+00
-5.00E+03
1
183
365
547
729
911
1093
1275
1457
1639
1821
2003
2185
2367
2549
2731
2913
3095
3277
3459
3641
3823
4005
4187
4369
4551
4733
4915
5097
5279
5461
5643
5825
6007
6189
6371
6553
6735
6917
7099
7281
7463
7645
7827
8009
8191
8373
8555
8737
8919
9101
I_18325Hz(ppm)
Q_18325Hz(ppm)


in-fase e quadratura 5325 Hz
2.00E+04
1.80E+04
1.60E+04
1.40E+04
1.20E+04
1.00E+04
8.00E+03
6.00E+03
4.00E+03
2.00E+03
0.00E+00
-2.00E+03
1
183
365
547
729
911
1093
1275
1457
1639
1821
2003
2185
2367
2549
2731
2913
3095
3277
3459
3641
3823
4005
4187
4369
4551
4733
4915
5097
5279
5461
5643
5825
6007
6189
6371
6553
6735
6917
7099
7281
7463
7645
7827
8009
8191
8373
8555
8737
8919
9101
I_5325Hz(ppm)
Q_5325Hz(ppm)


in-fase e quadratura 1525 Hz
1.80E+04
1.60E+04
1.40E+04
1.20E+04
1.00E+04
8.00E+03
6.00E+03
4.00E+03
2.00E+03
0.00E+00
-2.00E+03
1
186
371
556
741
926
1111
1296
1481
1666
1851
2036
2221
2406
2591
2776
2961
3146
3331
3516
3701
3886
4071
4256
4441
4626
4811
4996
5181
5366
5551
5736
5921
6106
6291
6476
6661
6846
7031
7216
7401
7586
7771
7956
8141
8326
8511
8696
8881
9066
I_1525Hz(ppm)
Q_1525Hz(ppm)

I dati sono stati interpretati allo scopo di individuare masse ferromagnetiche, ed eventuali altre strutture caratterizzanti il sottosuolo delle aree indagate.

In prima battuta è stata effettuata l'analisi della larghezza (o durata) delle componenti in fase e quadratura per ciascuna delle frequenze utilizzate per individuare le aree particolarmente conduttive.

Si ricorda che la componente in fase si riferisce alla parte del campo elettromagnetico che oscilla in sincronia con la sorgente, ed è proporzionale al campo elettrico indotto. In altre parole, la componente in fase è strettamente correlata alla resistività della formazione geologica: un elevato valore di questa componente indica generalmente un buon conduttore (i.e. bassa resistività). La componente di quadratura, invece, è la parte del campo elettromagnetico che è sfasata di 90° rispetto alla sorgente. Di conseguenza, essa è il risultato della risposta induttiva del sottosuolo, che rappresenta la capacità del terreno di immagazzinare e successivamente rilasciare energia elettromagnetica. Questa componente fornisce informazioni sull'induttività e la capacità dielettrica del mezzo. È utile per identificare le variazioni della resistività nel sottosuolo soprattutto per strati più resistivi rispetto a quelli più conduttivi.

Le componenti in fase e in quadratura in questa metodologia contribuiscono a fornire una visione completa del comportamento del sottosuolo rispetto alla corrente indotta. Analizzando queste componenti, è possibile ottenere informazioni cruciali per l'interpretazione geofisica, aiutando a delineare la resistività del terreno e a individuare eventuali anomalie o strutture geologiche di interesse.

Si segnala una sola area in cui il valore di in-phase risulta particolarmente elevato in tutte e 4 le frequenze utilizzate per l'esecuzione del rilievo. Tale valore è stato riscontrato in prossimità dell'attuale porzione di viabilità in frana e probabilmente è causato dal ristagno di acqua al di sotto della sede stradale stessa. Al momento del rilievo parte della neve presente era in fase di scioglimento. Al di fuori di quest'area non si rinvengono particolari situazioni.

Di seguito si riportano le tavole con i valori di conducibilità elettrica per le 4 frequenze utilizzate per l'esecuzione del rilievo.

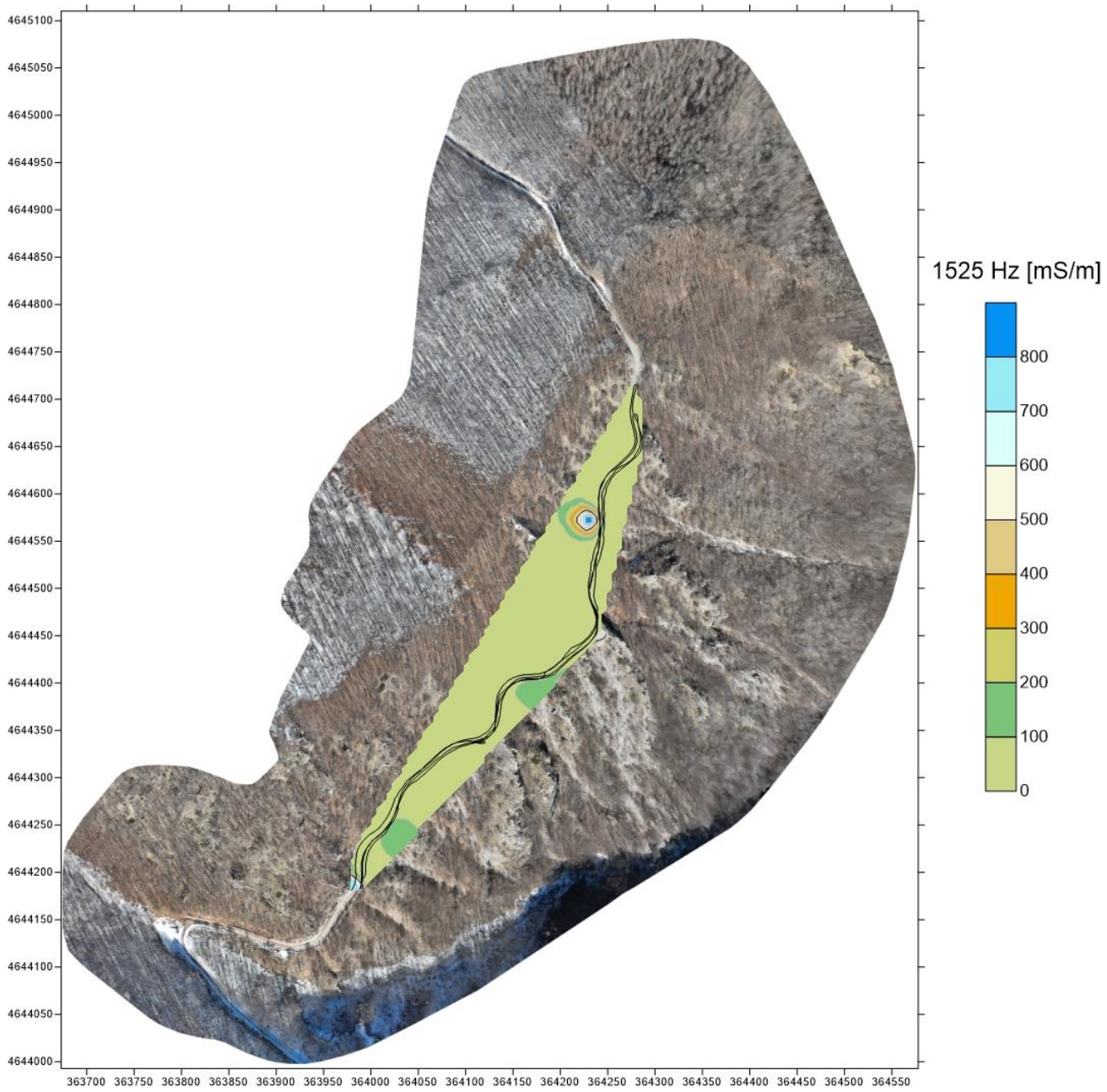


Fig. 66. Mappa della conducibilità elettrica per 1525 Hz

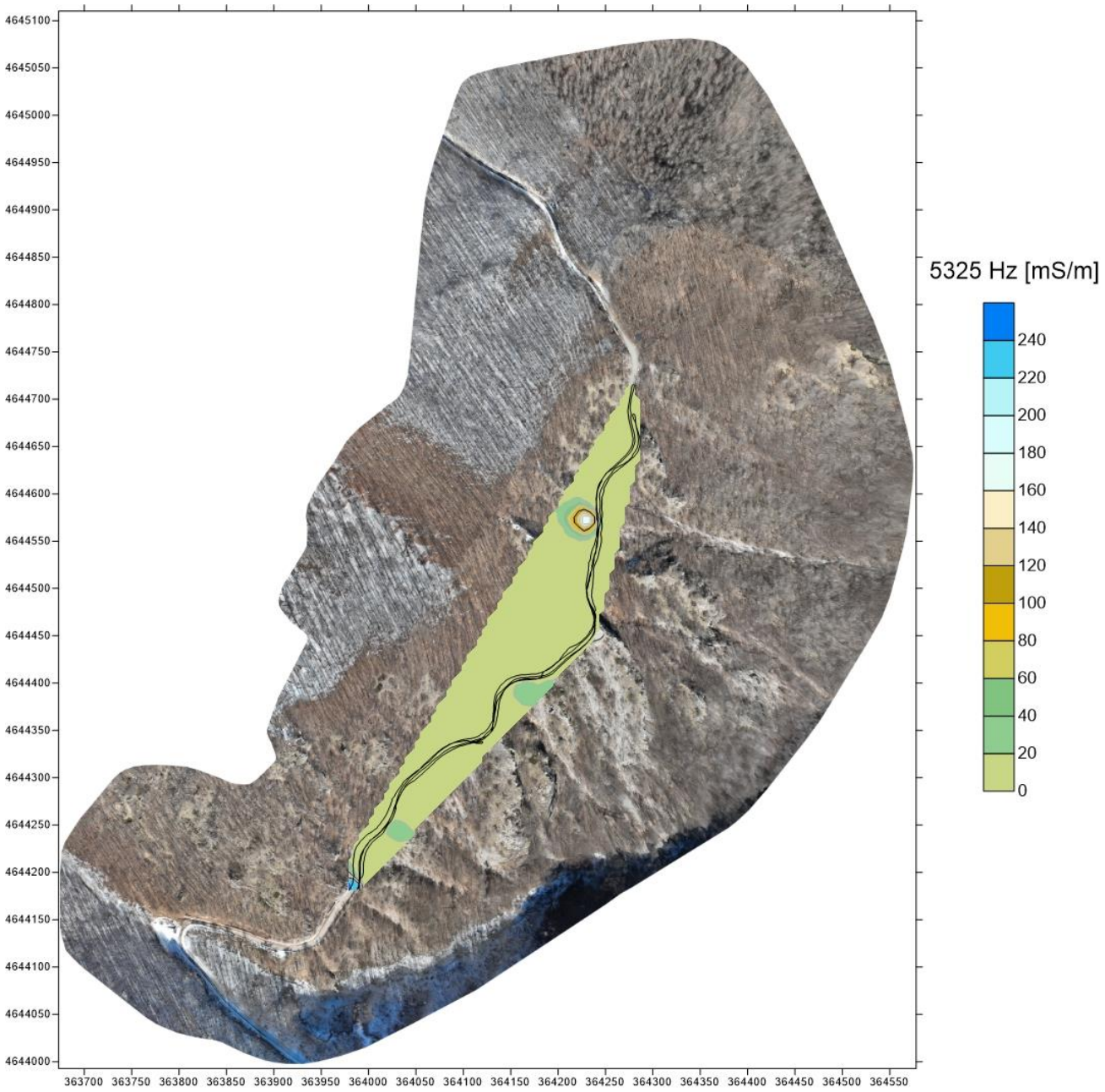


Fig. 67. Mappa della conducibilità elettrica per 5325 Hz

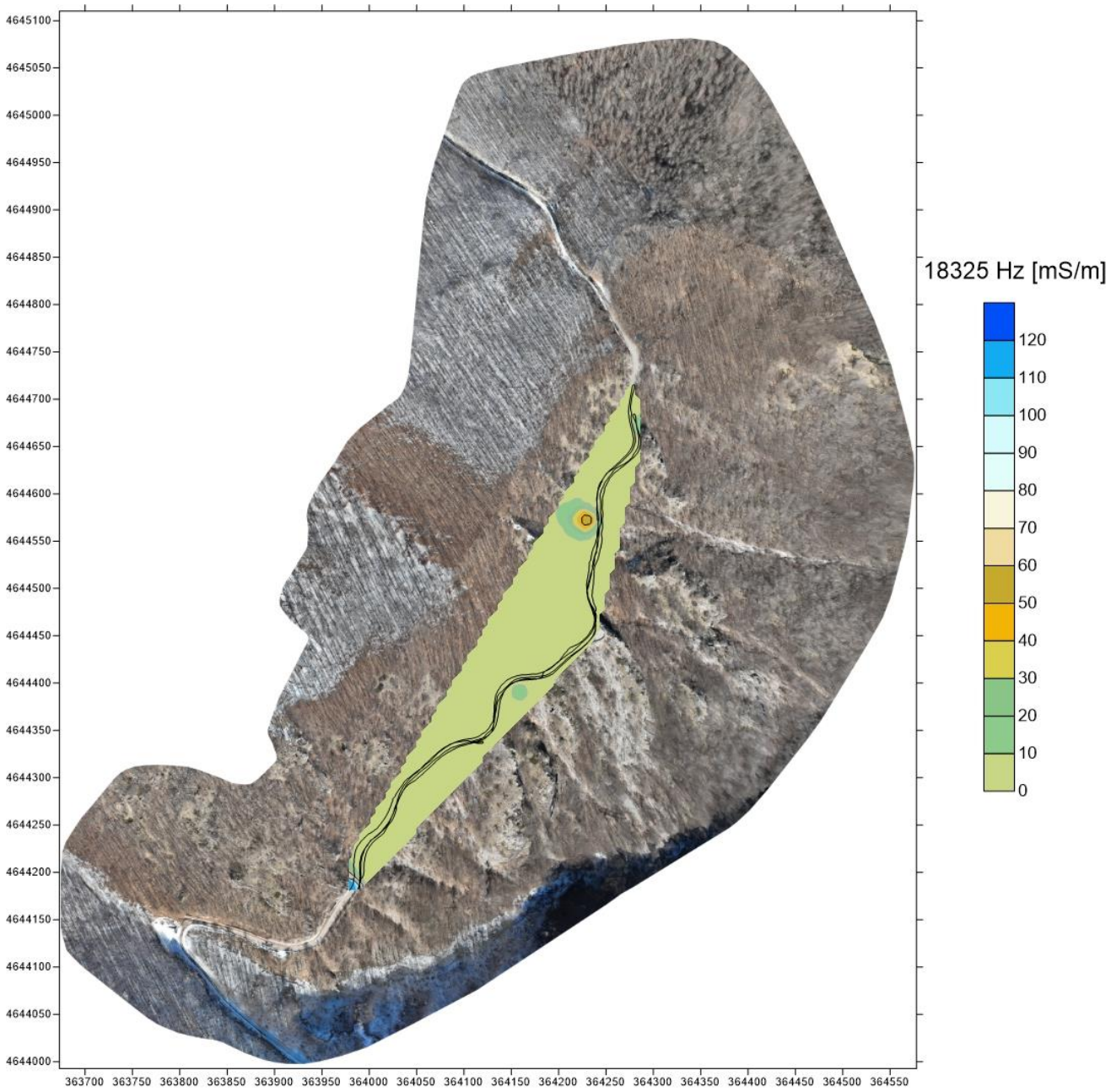


Fig. 68. Mappa della conducibilità elettrica per 18325 Hz

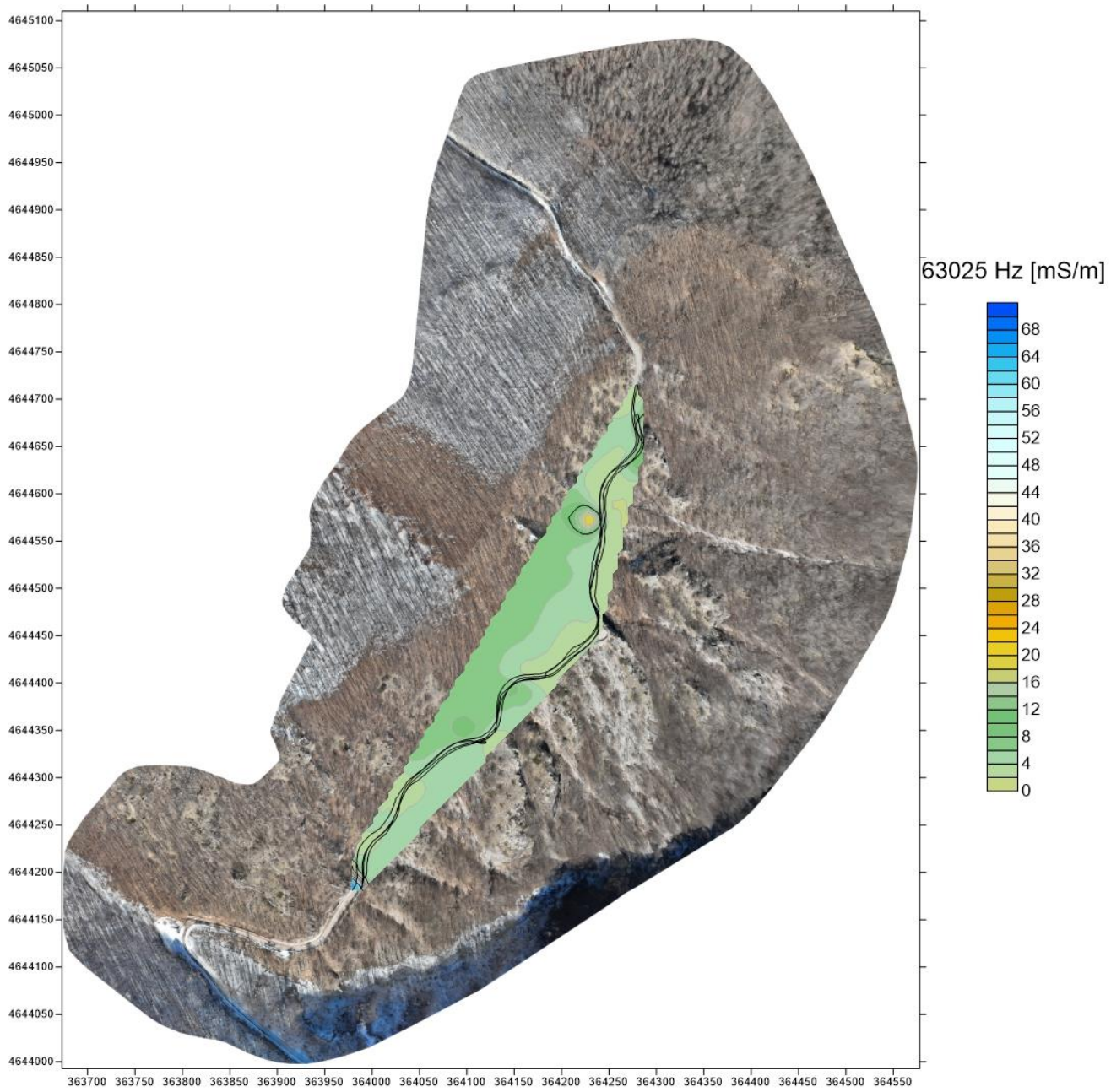


Fig. 69. Mappa della conducibilità elettrica per 63025 Hz

4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In questa sezione verranno brevemente discussi i risultati ottenuti a seguito della campagna di indagini realizzate in sito.

Le indagini sismiche a rifrazione in one P mettono in luce, specialmente per le indagini n°1 e n°2 che risultano pressochè identiche, valori di V_P compatibili con la roccia appena al di sotto della sede stradale.

L'indagine 3, invece, mostra come da Est verso Ovest il substrato si approfondisca e raggiunga quote prossime ai 5-6 m dal p.c. Non si esclude la presenza di blocchi rocciosi (*marocche*) nei primi metri.

Complessivamente, i sismostrati individuati posson essere così schematizzati:

- SISMOSTRATO 1: è quello più superficiale e presenta uno spessore esiguo; la Vp è compresa tra i 800m/s e i 2400 m/s (depositi di versante prevalentemente ghiaiosi);
- SISMOSTRATO 2: è costituito dal substrato roccioso da alterato ad integro dove la Vp è compresa tra i 2400m/s e i 4000 m/s.

Le 3 curve HVSR con andamento piatto, acquisite lungo la viabilità suggeriscono la presenza di roccia affiorante o poco profonda con una stratigrafia geologica omogenea e rigida. Questo comportamento è coerente con un terreno roccioso o molto compatto, con bassi effetti di amplificazione sismica, e una struttura solida che non presenta variazioni significative di impedenza tra i materiali superficiali e quelli più profondi.

Sui dati MASW ottenuti, permangono alcune incertezze legate principalmente alla logistica di acquisizione e alla situazione stratigrafica di campagna, che non rappresentano una situazione ideale per indagini di questo tipo; la presumibile assenza di situazioni stratigrafiche 1-D, unitamente all'elevatissima eterogeneità laterale, fa sì che le indagini condotte possano fornire solamente risultati indicativi circa la velocità di propagazione delle onde di taglio entro i depositi. In ogni caso, i risultati ottenuti sono compatibili con quanto evidenziato anche dalle indagini sismiche eseguite in quanto il modello di V_S ottenuto pone il substrato roccioso con V_S > 800 m/s alla profondità di circa 10 m dal p.c.

Per quanto riguarda i dati ottenuti dal rilievo effettuato mediante elettromagnetometro si segnala una sola area in cui il valore di in-phase risulta particolarmente elevato in tutte e 4 le frequenze utilizzate per l'esecuzione del rilievo. Tale valore è stato riscontrato in prossimità dell'attuale porzione di viabilità in frana e probabilmente è causato dal ristagno di acqua al di sotto della sede stradale stessa. Al momento del rilievo parte della neve presente era in fase di scioglimento. Al di fuori di quest'area non si rinvengono particolari situazioni.

È importante ricordare che le procedure di misura impiegate per l'indagine geofisica si basano su tecniche di esplorazione indiretta che, nonostante siano utilizzate allo stato dell'arte sia delle conoscenze scientifiche che degli avanzamenti tecnologici, hanno una serie di intrinseche limitazioni. L'indagine geofisica non può, infatti, sostituire integralmente l'esplorazione diretta.

Dott. Geol. Andrea Mocchiutti

Udine, Marzo 2025

UBICAZIONE INDAGINI SISMICHE



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



Fig. 70. *Stazione geomeccanica n°1.*



Fig. 71. *Stazione geomeccanica n°2.*



Fig. 72. Stazione geomeccanica n°3



Fig. 73. Stazione geomeccanica n°4.



Fig. 74. Stazione geomeccanica n°5.



Fig. 75. Stazione geomeccanica n°6.



Fig. 76. Stazione geomeccanica n°7.



Fig. 77. Stazione geomeccanica n°8.



Fig. 78. HVSR N°1



Fig. 79. HVSR N°2



Fig. 80. HVSR N°3



Fig. 81. Indagine sismica rifrazione n°1 e Masw n°1



Fig. 82. Indagine sismica rifrazione n°2 e Masw n°2



Fig. 83. Indagine sismica rifrazione n°3 e Masw n°3