

COMUNE DI ASCOLI SATRIANO
Provincia di Foggia
Regione PUGLIA

Nome Progetto / Project Name

PROGETTO DEFINITIVO
Centrale fotovoltaica denominata LIMES 14 della potenza di 11,712 kWp

committente



Titolo documento /Document title

RELAZIONE SULLE INDAGINI SISMICHE

Sottotitolo documento /Document subtitle

0		Emissione			
N.	Data Revisione	Descrizione revisione	Preparato	Vagliato	Approvato

Consulenza / Advice



Consulenza / Advice

Dott. Geol. Laurita Salvatore - Via Valle di Todaro, 63/G
85100 – Potenza (PZ) e-mail: salvalaurita@gmail.com
PEC: salvatorelaurita@epap.sicurezzapostale.it



Progettista / Planner

SUNNERG DEVELOPMENT s.r.l.
Via San Pietro all'Orto, 10 - 20121 (MI)
P.IVA 11085630967
PEC sunnergdevelopment@legalmail.it

Documento Numero

Commessa	Origine	Tipo documento	N. Progressivo	Revisione

Scala:

PREMESSA.....	2
- 1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	3
2. GEOMETRIA DELLO STENDIMENTO SISMICO	4
2.1 INDAGINE SISMICA MASW MULTICOMPONENTE.....	4
2.2 INDAGINE HOLISURFACE.....	4
2.3 STENDIMENTO DI SISMICA A RIFRAZIONE	5
3. METODOLOGIA	5
3.1 INDAGINE SISMICA DI TIPO MASW	5
3.2 INDAGINE HOLISURFACE.....	7
3.3 MISURA DI MICROTREMORI A STAZIONE SINGOLA	8
3.4 SISMICA A RIFRAZIONE.....	9
4. INTERPRETAZIONE E RISULTATI	10
4.1 SISMICA A RIFRAZIONE.....	10
4.2 MISURE DI MICROTREMORI A STAZIONE SINGOLA	12
4.3 INDAGINE SISMICA DI TIPO MASW MULTICOMPONENTE.....	13
- 4.2.1. MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO – INDAGINI MASW	15
4.4 INDAGINE HOLISURFACE.....	17
4.4.1 Indagine HS1	17
4.4.2 Indagine HS2	20
4.4.3 Indagine HS3	23
4.4.4 Indagine HS4	25
4.4.5 Indagine HS5	28
4.4.6 Indagine HS6	31
Riferimenti bibliografici	35
6. ELABORATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE	35
SISMICA A RIFRAZIONE R1	35
SISMICA A RIFRAZIONE R2	37
7. ELABORATI DELLA MISURA DI MICROTREMORI A STAZIONE SINGOLA	39
HVSR1	39
HVSR2	42

HVSR3.....	45
HVSR4.....	48
HVSR5.....	51
HVSR6.....	54
- 8. ELABORATI DELL'INDAGINE MASW	57
- 9. ELABORATI DELLE INDAGINI HOLISURFACE	59
HS1	59
HS2	59
HS3	60
HS4	61
HS5	62
HS6	63

PREMESSA

La Sunnerg Development S.r.l ha incaricato lo scrivente, Dr. Salvatore LAURITA (iscritto all'albo dei Geologi di Basilicata al n. 470), di eseguire n. 2 acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves), n. 6 indagini sismiche secondo la metodologia congiunta HoliSurface® (Holistic analysis of Surface waves - HS) + HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), n. 2 sismiche a rifrazione e n. 6 misure di microtremori a stazione singola al fine di ricostruire, secondo le prescrizioni delle N.T.C. D.M. 17/01/18, il profilo di velocità delle onde sismiche P e S e il modello sismostratigrafico del sottosuolo relativamente al progetto **“per la realizzazione di un impianto fotovoltaico nel Comune di Ascoli Satriano (FG)”**.

La campagna delle indagini sismiche di tipo attivo e passivo ha consentito di definire l'andamento della velocità delle onde di taglio (V_s) del sottosuolo. Tale ricostruzione permette di calcolare il parametro $V_{s,eq}$ (in m/s) utile alla definizione della categoria del suolo secondo le N.T.C. D.M. 17/01/18 e definire la risposta sismica locale del sito.

Le indagini sono state svolte il 02/09/2021 (documentazione fotografica in Fig. 1) e la loro ubicazione è riportata in (Fig. 1b).



Stendimento sismico MASW1 e sismica a rifrazione R1, HoliSurface HS1



Stendimento sismico MASW2 e sismica a rifrazione R2 HoliSurface HS2



Indagine sismica HoliSurface HS3 e misura di microtremori HVSR3



Indagine sismica HoliSurface HS4 e misura di microtremori HVSR4



Indagine sismica Holisurface HS5 e misura di microtremori HVSR5



Indagine sismica Holisurface HS6 e misura di microtremori HVSR6

Fig. 1 – Documentazione fotografica relativa alle indagini MASW multicomponente e multioffset, Holisurface, sismica a rifrazione e alle misure di microtremori a stazione singola.

- 1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione per l'acquisizione dei sismogrammi relativi alla prospezione sismica MASW e a rifrazione sono costituite da:

- sistema di energizzazione di onde P e S: costituito da una mazza del peso 10 kg battente su una piastra metallica del diametro di 25 cm e per la generazione di onde P ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionabili; la generazione delle onde S è stata effettuata attraverso energizzazioni agli estremi di una traversina in legno;
- un sistema di trigger: consiste in un geofono indipendente posto a fianco della piastra di battuta e della traversina in legno, che fornisce il segnale di start al sismografo;
- un sistema di ricezione delle onde P e S: costituito da 24 geofoni verticali con frequenza propria a 4,5 Hz, collegati a 12/24 canali dotati di memoria e convertitori a/d in grado di digitalizzare il segnale già in corrispondenza del cavo (sismografo Do.Re.Mi della Sara); i canali a loro volta sono collegati ad un'unità di testa collegata ad un personal computer portatile.

L'indagine sismica di tipo Holisurface è stata effettuata utilizzando un sismografo SR04-GEOBOX della SARA Electronic Instrument s.r.l., equipaggiato con una terna di geofoni con una frequenza propria di 4,5 HZ ed un cavo della lunghezza di 60 m collegato ad un trigger. Il sistema di energizzazione per le misure Holisurface è analogo a quello utilizzato le indagini di tipo MASW e consente l'acquisizione del segnale sismico generato dalla sorgente a partire dal tempo zero fissato dal trigger. Il posizionamento dello strumento è stato eseguito orientando opportunamente il lato lungo dello stesso in direzione della sorgente (in assetto radiale rispetto alla sorgente).

te) e centrando la bolla sferica per garantire l'orizzontalità dello strumento. La procedura di acquisizione ha sfruttato il modulo LOG-MT del software SEISMOWIN. La misura di microtremori a stazione singola è stata effettuata utilizzando il geofono triassiale e ha avuto una durata di circa 20 minuti.

2. GEOMETRIA DELLO STENDIMENTO SISMICO

2.1 INDAGINE SISMICA MASW MULTICOMPONENTE

L'analisi dello spettro di velocità delle onde di Rayleigh è stata effettuata disponendo i 24 geofoni verticali della MASW1 e MAW2 lungo uno stendimento lineare con una distanza intergeofonica di 3 m; dieci energizzazioni con una sorgente verticale sono state fatte a 3 m dal primo geofono (configurazione ZVF di Fig. 2). Le singole acquisizioni MASW sono state sommate tra di loro (stacking) in modo tale da migliorare il rapporto segnale/rumore.

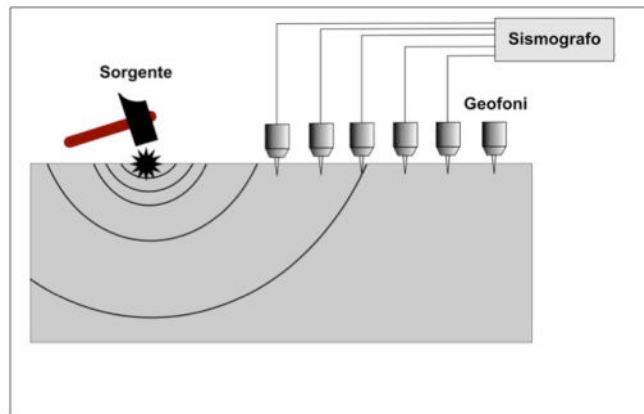


Fig. 2 - Stendimento sismico con configurazione ZVF.

2.2 INDAGINE HOLISURFACE

Le indagini Holisurface HS1, HS2, HS3, HS4, HS5 e HS6 sono state effettuate disponendo il geofono triassiale ad una distanza di 50 m dalla sorgente (fig. 1b). Sono state registrate un numero variabile da 12 a 15 di energizzazioni con sorgente verticale (mazzata verticale sulla piastra di battuta) e orizzontale (battuta di taglio sulla traversina in legno). Le singole acquisizioni di tipo VF e HF (Fig. 3) sono state sommate tra di loro (stacking) in modo tale da migliorare il rapporto segnale/rumore.

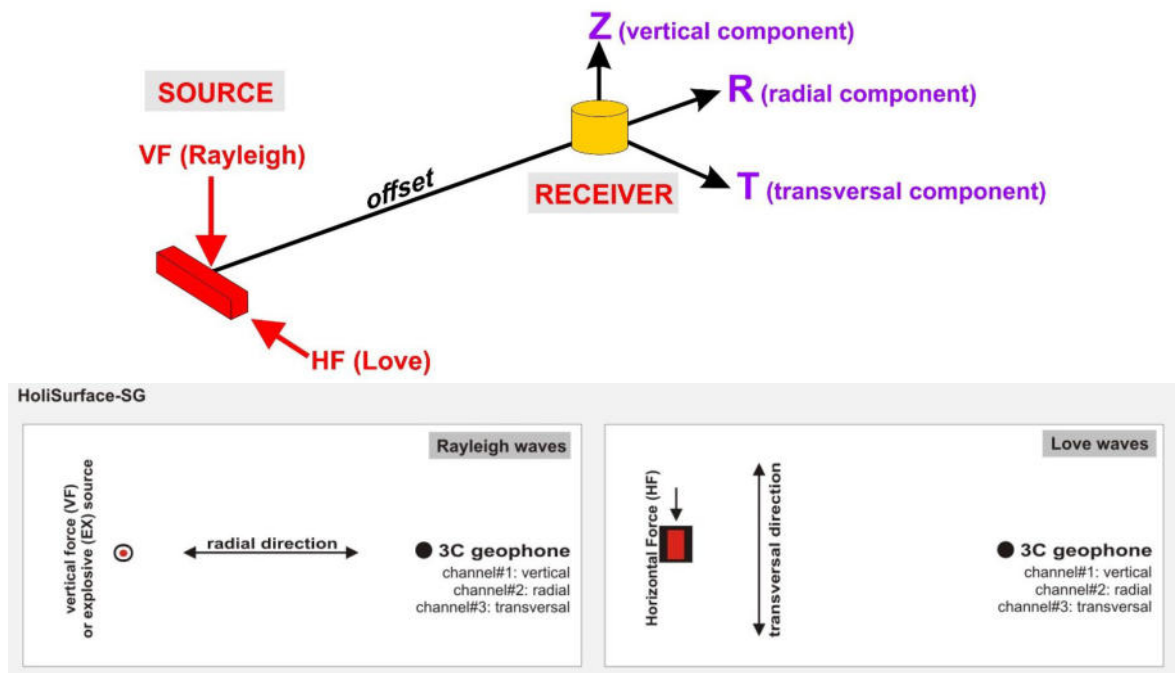


Fig. 3 – Schema della disposizione del geofono triassale e della sorgente nelle indagini Holisurface. Il geofono è disposto in assetto radiale rispetto alla sorgente e tale geometria consente di acquisire, nel caso si utilizzi una sorgente ad impatto verticale, sia la componente Z che R delle onde di Rayleigh. (si veda lo schema in basso a sinistra).

2.3 STENDIMENTO DI SISMICA A RIFRAZIONE

La prospezione sismica a rifrazione R1 in onda P è stata eseguita lungo lo stesso allineamento della prova MASW1. I 24 geofoni verticali della sismica a rifrazione R1 sono stati disposti lungo uno stendimento lineare con una distanza intergeofonica di 3 m e due energizzazioni sono state fatte, all'esterno dello stendimento, a 3 m dal primo e dall'ultimo geofono; altre 6 energizzazioni sono state effettuate a distanze regolari all'interno dello stendimento sismico. La prospezione sismica a rifrazione R2 in onda P è stata eseguita lungo lo stesso allineamento della prova MASW2. I 24 geofoni verticali sono stati disposti lungo uno stendimento lineare con una distanza intergeofonica di 3 m e due energizzazioni sono state fatte, all'esterno dello stendimento, a 3 m dal primo e dall'ultimo geofono; altre 6 energizzazioni sono state effettuate a distanze regolari all'interno dello stendimento sismico.

3. METODOLOGIA

3.1 INDAGINE SISMICA DI TIPO MASW

La tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), proposta da Park et al. (1999), è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo delle onde Vs, sulla base della misura delle onde superficiali registrate da diversi geofoni posti sul p.c. Il principio base è piuttosto semplice: le varie componenti (frequenze) del segnale sismico che si propaga viaggia-

no ad una velocità che dipende dalle caratteristiche del mezzo.

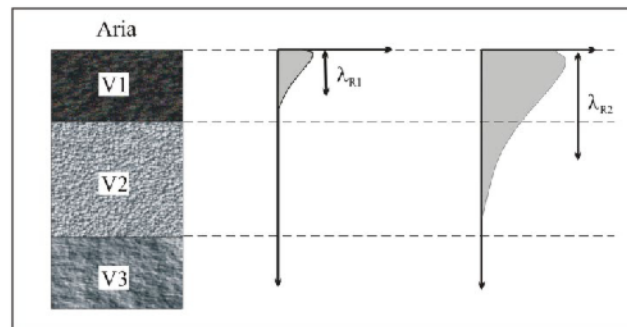


Fig. 4 - La profondità investigata dalle onde di Rayleigh e Love dipende dalla lunghezza d'onda (λ_R), dalla velocità delle onde di taglio V_s e dalla frequenza.

Più specificatamente, le lunghezze d'onda più ampie (cioè le frequenze più basse) sono influenzate dalla parte più profonda (in altri termini risentono delle caratteristiche fisiche degli strati più profondi), mentre le piccole lunghezze d'onda (le frequenze più alte) dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale. Infatti, in un mezzo stratificato le onde di superficie sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh e Love dipende dalla frequenza di propagazione (Fig. 4). La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi forniscono le informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo (Fig. 4).

L'analisi spettrale del segnale registrato consente di produrre un grafico Frequenza/Velocità di Fase. Da questi grafici, per inversione congiunta delle curve di dispersione delle onde superficiali di Rayleigh e Love si ottiene il profilo verticale delle V_s .

La MASW standard consiste nella registrazione della propagazione di una classe di onde di superficie (specificatamente delle onde di Rayleigh, componente ZVF in Fig. 2, 3): le onde di Rayleigh vengono generate da una sorgente ad impatto verticale (la classica martellata) o da un cannoncino, e vengono poi registrate tramite comuni geofoni a componente verticale a frequenza propria di 4.5 Hz e l'interpretazione, in genere attraverso il picking della curva del moto fondamentale visibile nello spettro di velocità di fase, di un solo oggetto di analisi che potrebbe corrispondere ad un numero elevato di profili di velocità delle onde S.

Accanto a questo tipo di acquisizione (che presenta molti problemi dettagliati nella vasta letteratura scientifica a disposizione, cfr. Dal Moro, 2012; 2019), le recenti raccomandazioni di specialisti del settore sostengono fortemente anche l'acquisizione di onde di Love da analizzare congiuntamente alle onde di Rayleigh per meglio definire il substrato e superare talune ambiguità interpretative che possono presentarsi sugli

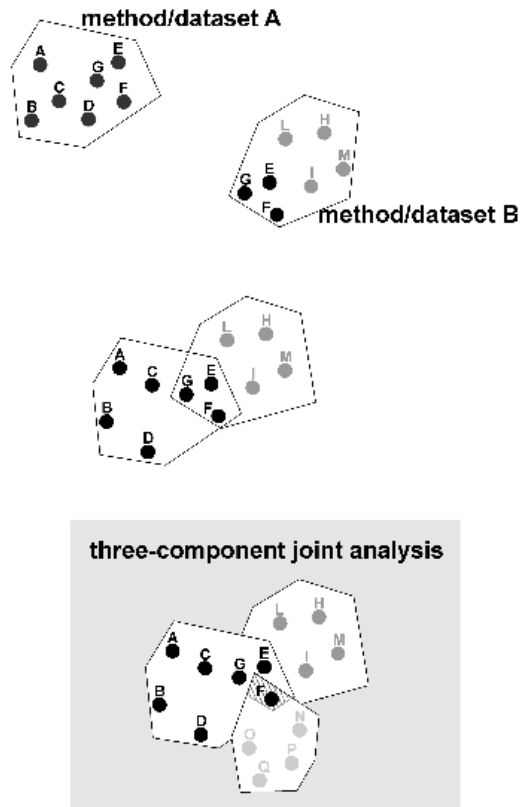


Fig. 5 – Schema mostrante l'utilità dell'analisi congiunta da dati MASW multi-componente. L'inversione congiunta dello spettro di velocità di fase delle onde di Rayleigh e di quello di Love, unito alla curva HVSR (in basso, inversione di 3 oggetti), consente di restringere l'ambiguità (non univocità) che, altrimenti, caratterizza una classica indagine MASW basata sul solo picking della curva di dispersione delle onde di Rayleigh.

spettri di velocità riferiti alle onde di Rayleigh. Infatti, è ampiamente dimostrato che gli spettri delle onde di Rayleigh sono frequentemente di ardua interpretazione in relazione alla possibile prevalenza di modi superiori nello spettro di velocità, alla presenza di forti segnali “scatterati” e all'intrecciarsi di diversi modi (si ricorda che i modi superiori sono segnale utilissimo ma che in taluni casi può risultare arduo “battezzare” ciascun segnale con il pertinente modo, cfr. Dal Moro, 2019). Le acquisizioni in onde di Love (componente THF in Fig. 3) non possono sostituire completamente quelle in onde di Rayleigh ma la maggiore chiarezza dei loro spettri di velocità di fase risulta di estrema utilità nel caso in cui si proceda ad un'inversione congiunta degli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh e Love e della curva HVSR utile a determinare in modo maggiormente robusto e vincolato il profilo delle Vs (si veda lo schema concettuale riportato in Figura 5).

3.2 INDAGINE HOLISURFACE

La tecnica Holisurface (Holistic analysis of Surface waves – HS) è una procedura di acquisizione ed analisi di dati di sismica attiva che considera in modo congiunto (olistico) tutta una serie di oggetti di analisi (observables) che, nel loro insieme, descrivono in maniera appunto olistica la propagazione delle onde di Rayleigh e Love (Dal Moro et al., 2015). Tale tipo di indagine è una evoluzione (oggetto di brevetto – www.holisurface.com) del metodo di analisi delle velocità di

gruppo tramite MFA (Multiple Filter Analysis) e/o FTAN (Frequency Time ANalysis), quindi basata sulla dispersione delle onde di superficie (velocità di gruppo; rapporto tra spazio e tempo di arrivo dell'onda frequenza per frequenza) e la sua analisi secondo l'approccio FVS (Full Velocity Spectrum). L'acquisizione dei dati HS (attivi) avviene grazie ad un unico geofono triassiale (evidentemente triggerabile). Lo stesso geofono è poi utilizzato per registrare i dati passivi utili a definire il rapporto spettrale H/V. L'acquisizione tanto dei dati HS (attivi) che HVSr (passivi) avviene grazie ad un semplice geofono triassiale triggerabile. Acquisire un dato per analisi HoliSurface® non è molto diverso rispetto alle tradizionali acquisizioni di sismica attiva finalizzate, ad esempio, ad effettuare analisi MASW o a rifrazione (lo zero dei tempi è determinato dal trigger, il quale dà inizio alla registrazione). Rispetto la cosiddetta tecnica MASW (ma tale acronimo è stato abbondantemente frainteso – vedi libro “Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica” pubblicato per la Flaccovio nel 2019), la differenza sostanziale sta nel fatto che per effettuare acquisizioni e analisi HoliSurface, invece di utilizzare n geofoni a componente singola, si utilizza un unico geofono a tre componenti (geofono triassiale) opportunamente orientato in modo da poter definire nell'ordine la componente verticale (Z), quella radiale (R) e la trasversale (T). Le acquisizioni HS consentono di ricavare diversi osservables (spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale (Z), radiale (R) e trasversale (T), Radial-to-Vertical Spectral Ratio – RVSr e curve Rayleigh-wave Particle Motion, RPM) che, anche congiuntamente alla curva HVSr, consentono di impostare un'inversione congiunta utile a determinare in modo robusto e puntuale il profilo VS (vedi schema concettuale riportato in Figura 5 e tratto da Dal Moro, 2019).

Per il presente lavoro sono state considerate le componenti Z, R (componente verticale e radiale dell'onda di Rayleigh) e T (onde di Love) unitamente alla curva HVSr [Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio]. I dati (attivi e passivi) sono poi analizzati congiuntamente secondo i principi del fronte di Pareto così come presentato ad esempio in Dal Moro et al. (2015; 2019).

3.3 MISURA DI MICROTREMORI A STAZIONE SINGOLA

La misura di microtremori a stazione singola è un'indagine di sismica passiva che determina il rapporto tra la componente orizzontale e quella verticale del “rumore” sismico a diverse frequenze (HVSr, Nakamura, 1989). L'indagine sismica ricostruisce, utilizzando una terna di geofoni (due orizzontali e uno verticale) con la medesima risposta/sensibilità in termini di ampiezza, una curva HVSr, la cui robustezza e significatività dal punto di vista statistico è misurata attraverso i ben noti criteri SESAME (Sesame Project, 2000). I criteri SESAME analizzano sia la curva nel suo insieme che il livello di significatività di eventuali picchi. L'analisi delle curve H/V e degli spettri da cui esse derivano (componenti spettrali nelle direzioni N-S, E-O e verticale o spettri di Fourier), è possi-

bile ottenere informazioni sui principali contatti sismostratigrafici; i cui picchi di risonanza, rappresentativi dei contrasti di impedenza, ci indicano il valore di amplificazione espresso dal rapporto H/V (dove H è la componente orizzontale del moto del suolo; V è la componente verticale del moto del suolo; il rapporto H/V rappresenta la funzione di trasferimento della radiazione sismica alla superficie) alle rispettive frequenze. Inoltre, noto il modello del sottosuolo con le relative velocità delle onde sismiche, è possibile ottenere anche informazioni sulla profondità dei contatti sismostratigrafici (Sesame Project, 2000).

I picchi della curva HVSR che forniscono informazioni sulle principali discontinuità sismostratigrafiche del sottosuolo hanno due principali caratteri (Dal Moro, 2012): i) la componente verticale del moto assume valori più bassi di quella orizzontale in corrispondenza del picco (forma a ogiva delle componenti del moto); ii) il picco "stratigrafico" è generalmente confinato in un *range* maggiore di frequenze rispetto ai picchi antropici.

3.4 SISMICA A RIFRAZIONE

La tecnica di sismica a rifrazione utilizzata si basa sulla rilevazione delle onde dirette e rifratte (Palmer, 1982), che tra i diversi tipi di onde registrate dai geofoni sono le prime ad arrivare. La tecnica, ormai consolidata, si basa sull'individuazione dei primi arrivi sulle tracce sismiche, in modo tale da ricostruire la dromocrona nel piano spazio-tempo delle onde dirette e rifratte (Fig. 6). Le rotture di pendenza (punti di ginocchio) della dromocrona delle onde dirette e rifratte evidenziano la presenza di una superficie di separazione tra due strati con differente velocità di propagazione; in particolare, la velocità dello strato inferiore deve essere maggiore di quella dello strato superiore.

I raggi sismici che arrivano ai geofoni più vicini al punto di energizzazione sono quelli che hanno viaggiato orizzontalmente nello strato più superficiale; mentre i raggi che incontrano la superficie di separazione tra lo strato superficiale e uno inferiore con velocità di propagazione superiore verranno riflessi e rifratti nel punto in cui l'angolo di incidenza con la normale alla superficie è pari all'angolo limite i_c ; il raggio incidente verrà rifratto a 90° secondo la legge di Snell: $\sin i_c = V_1/V_2$.

Il raggio rifratto viaggia lungo la superficie di discontinuità e rifrange continuamente verso l'alto energia elastica che ritorna in superficie. Alla presenza di più di due sismostrati, la dromocrona sarà caratterizzata da altri punti di ginocchio oltre a quello che separa le onde dirette da quelle rifratte (Fig. 6). I primi arrivi delle tracce acquisite durante l'esecuzione delle prospezioni sismiche a rifrazione sono stati inoltre processati con il metodo tomografico. Tale elaborazione, eseguita con il software RAYFRACT, ha consentito di ottenere un modello bidimensionale delle caratteristiche sismostratigrafiche del sottosuolo. I primi arrivi delle tracce acquisite durante l'esecuzione delle prospezioni sismiche a rifrazione sono stati inoltre processati con il metodo tomografico. La tomografia sismica in onda P è una tecnica che utilizza la velocità di propagazione delle onde sismiche di

compressione, al fine di ottenere informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali che sono attraversati dal fronte d'onda. Tale metodo di indagine permette di determinare la velocità di propagazione in funzione della profondità, evidenziando eventuali discontinuità laterali e interfacce non piane tra gli strati a diverse caratteristiche.

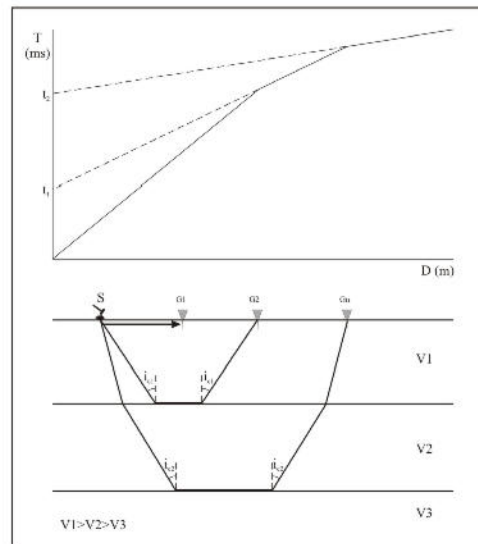


Fig. 6 – schema mostrante i percorsi delle onde dirette e rifratte e le relative dromocrone.

4. INTERPRETAZIONE E RISULTATI

4.1 SISMICA A RIFRAZIONE

La metodologia utilizzata nella prospezione di sismica a rifrazione consta di diverse fasi di elaborazione. Preliminarmente, sono stati individuati nei sismogrammi i primi arrivi corrispondenti alle onde dirette e rifratte. Dopo aver rilevato i tempi dei primi arrivi sono state tracciate le dromocrone nel diagramma distanza-tempo. I primi arrivi di ciascun sismogramma sono stati poi processati con il software RAYFRACT al fine di ottenere un modello tomografico bidimensionale delle Vp.

L'elaborazione dei dati prevede l'esecuzione del picking manuale dei primi arrivi delle onde P, il cui risultato è generalmente visualizzato sotto forma di dromocrone (grafici rappresentanti i tempi di primo arrivo in funzione della distanza dalla sorgente). Dopo aver rilevato i tempi dei primi arrivi sono state tracciate le dromocrone nel diagramma distanza-tempo. I tempi di primo arrivo, espressi in millisecondi, insieme alle coordinate spaziali di ogni geofono, sono poi forniti in input al programma di inversione, il quale effettua una prima interpretazione attraverso il metodo classico della sismica a rifrazione e crea un modello di primo tentativo per poter inizializzare il processo di inversione. Il programma procede suddividendo la sezione in celle alle quali asse-

gna un certo valore di velocità delle onde di compressione, dedotto dal modello di primo tentativo generato preliminarmente. Dopo viene simulata l'energizzazione in ogni punto di scoppio. Si suppone che la traiettoria dei raggi sismici dal punto di scoppio al singolo geofono sia curvilinea e che la velocità di propagazione lungo tale traiettoria sia differente a seconda della velocità che è stata assegnata dal programma ad ogni singola cella attraversata dal percorso sismico. I tempi di primo arrivo ricavati dalla simulazione vengono poi confrontati con i tempi di primo arrivo sperimentali e, in base agli scarti, vengono corrette le velocità relative alle celle attraversate dai percorsi sismici. Il processo di inversione è iterativo e si ottiene il risultato finale quando il valore degli scarti è inferiore ad un valore soglia deciso dall'operatore oppure dopo un particolare numero di iterazioni, anch'esso deciso dall'operatore.

Il risultato consiste in una sezione verticale con andamento delle velocità delle onde P nel sottosuolo e una sezione con i valori di "copertura" che riporta per ogni cella della sezione stessa il numero di raggi sismici che la attraversano nell'ultima iterazione.

La sezione della "copertura" dei raggi sismici (valori più elevati di raggi sismici che incidono su ciascuna cella) e l'individuazione dei punti di flessi sulle dromocrone consentono l'individuazione dei principali rifrattori del sottosuolo.

Il modello bidimensionale ricavato dal metodo tomografico R1 (Fig. 7) ha evidenziato la presenza di un sismostrato più superficiale non continuo. Tale sismostrato è caratterizzato dai più bassi valori di velocità con un gradiente di 400 m/s nel primo metro di profondità, visibile nella parte iniziale della sezione tomografica (geofoni 1-4) e nella porzione finale dello stendimento. La sezione tomografica è caratterizzata da un progressivo aumento delle V_p , correlabile con l'isolinea di 1500 m/s, alla profondità di 10-12 metri. Oltre a questo sismostrato la sezione tomografica mostra un successivo incremento di velocità con i valori delle V_p superiori ai 2000 m/s.

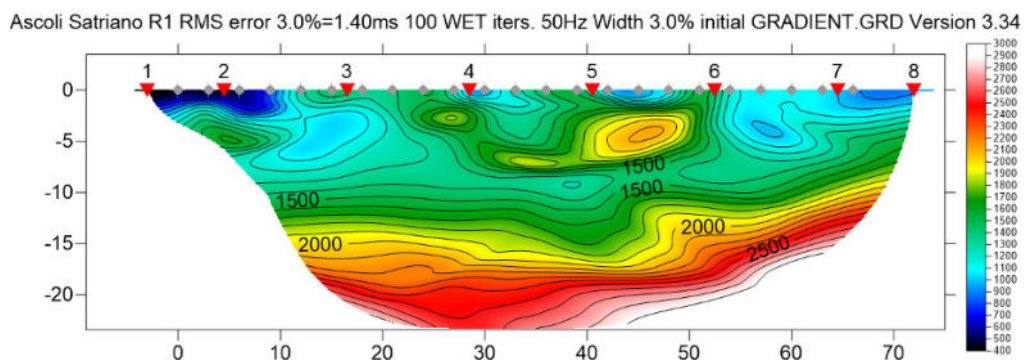


Fig. 7 – Tomografia sismica (in scala) ricavata dall'inversione dei primi arrivi della sismica a rifrazione R1.

Analogamente a quanto emerso dall'elaborazione tomografica R1, anche la sezione tomografica R2 (Fig. 8) mostra la presenza di uno primo sismostrato, non continuo, con i più bassi valori di velocità con un gradiente di circa di 400 m/s nei primi 2-3 m di profondità. Il secondo sismostrato è carat-

terizzato da velocità sismiche corrispondenti ad un gradiente compreso tra circa 1000-1100 m/s. Verso il basso le velocità tendono ad aumentare progressivamente.

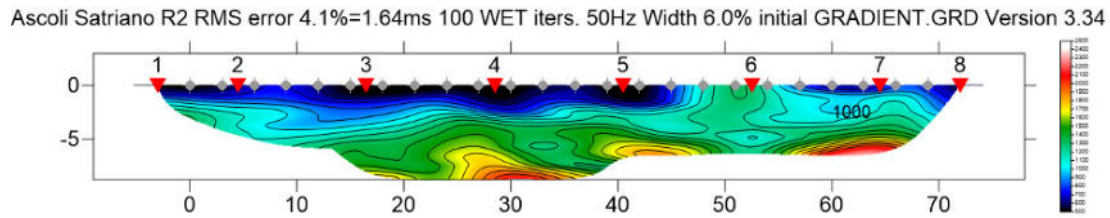


Fig. 8 – Tomografia sismica (in scala) ricavata dall'inversione dei primi arrivi della sismica a rifrazione (R2).

4.2 MISURE DI MICROTREMORI A STAZIONE SINGOLA

I dati di rumore sismico sono stati processati con il software winMASW 3C, selezionando le finestre temporali secondo le raccomandazioni fornite da Dolce et al. (2011): i) finestre con ampiezza di 20 s; ii) rimozione delle finestre con ampiezze superiori al 10% della frequenza centrale; iii) rimozione dei transienti sulla serie temporale. L'analisi degli spettri delle componenti del moto sismico suggeriscono che i picchi sono di natura stratigrafica.

La prova HVSR1 restituisce la curva H/V rappresentata in figura 9. Tale curva mostra un picco alla frequenza di 19.8 Hz. Lo spettro H/V della prova HVSR2 è mediamente piatto.

La curva H/V della prova HVSR3 (Fig. 9) evidenzia due picchi significativi, il primo abbastanza distinto in corrispondenza della frequenza media di 29.3 Hz, il secondo picco più basso in termini di ampiezza individuato ad una frequenza di circa 1 Hz. La prova HVSR4 restituisce la curva H/V rappresentata da un picco alla frequenza di 17.4 Hz. La curva H/V della prova HVSR5 (Fig. 9) mette in evidenza due picchi, il primo abbastanza distinto in corrispondenza della frequenza media di 19.5 Hz, il secondo picco più basso in termini di ampiezza individuato ad una frequenza di circa 1 Hz. Le curve HVSR, in precedenza riportate, sono utilizzate/confrontate al fine di ottenere la curva HVSR media poi utilizzata congiuntamente ai dati di dispersione (spettri di velocità di gruppo) (Fig. 9).

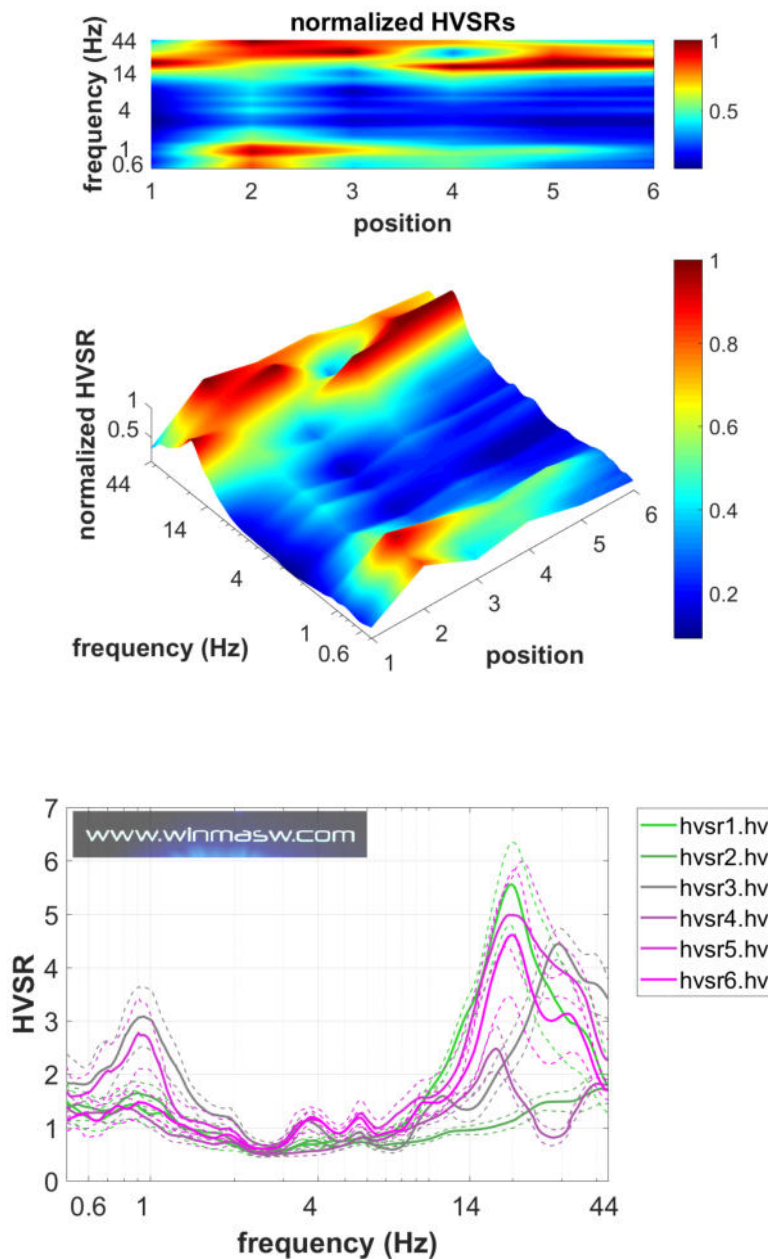


Fig. 9 – Curve HVSR relative alle 6 stazioni di misura di microtremori a stazione singola.

4.3 INDAGINE SISMICA DI TIPO MASW MULTICOMPONENTE

Le tracce relative delle componenti ZVF dell'indagine MASW sono state sommate per migliorare il rapporto segnale/rumore (S/N) e i sismogrammi derivanti da queste acquisizioni sono state successivamente elaborate ed interpretate utilizzando il software WINMASW 3C 2019. Ottenuti, gli spetti di velocità di fase delle onde di Rayleigh e Love, si è proceduto alla modellazione dei punti di massima intensità del segnale e al *picking* delle curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori; tale operazione ha consentito di ricostruire le curve di dispersione delle

onde di Rayleigh e Love, dalla cui inversione congiunta si è giunti al profilo verticale delle Vs.

Per la stima del valore di $V_{s,eq}$ è stata adottata la seguente formula:

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

dove: $V_{s,i}$ è la velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato

h_i è lo spessore dell'i-esimo strato

N è il numero di strati compresi tra il piano campagna e la profondità del bedrock sismico (nei primi 30 m se la profondità del bedrock è superiore a tale profondità)

H è la profondità del bedrock sismico e risulta uguale a 30 m se il bedrock è presente al di sotto di tale profondità.

I risultati dell'indagine MASW1 relativi alla componente ZVF sono riportati in Fig. 10, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh.

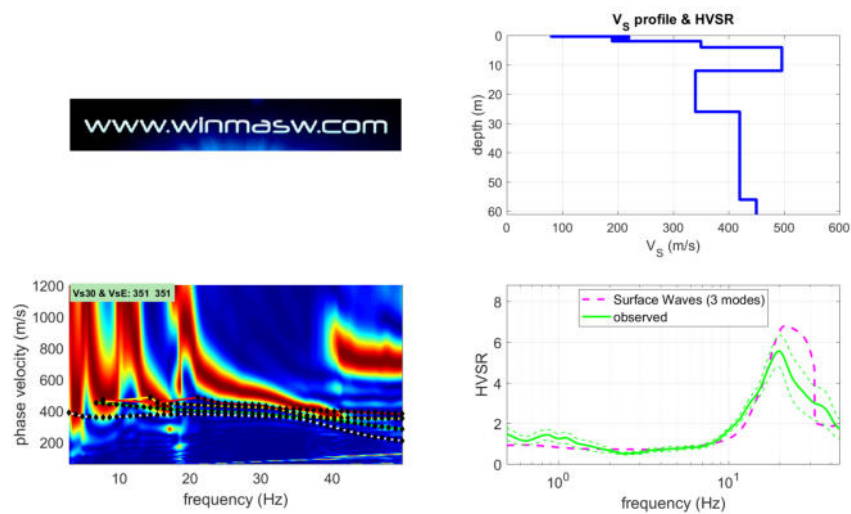


Fig. 10 – Sismogramma, spettro di velocità relativi alla componente ZVF (onde di Rayleigh) e curve di dispersione teoriche derivanti dal modello ricostruito dall'inversione degli spettri di velocità di fase della componente ZVF di Fig. 8.

I risultati dell'indagine MASW2 relativi alla componente ZVF sono riportati in Fig. 11, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh.

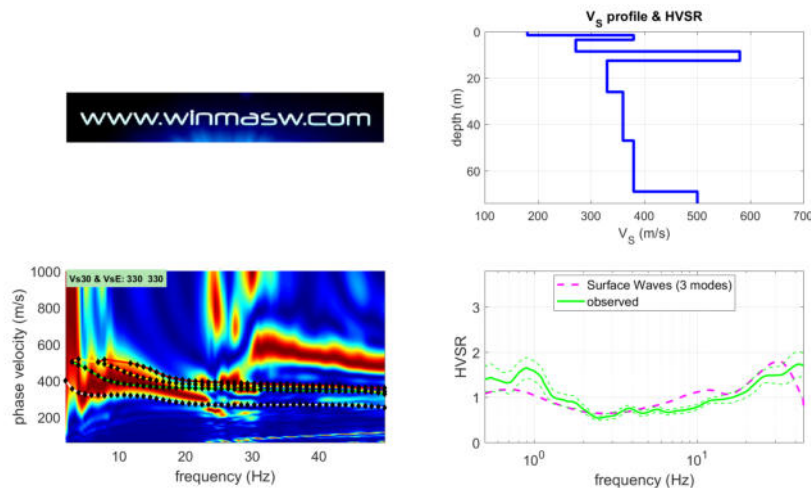


Fig. 11 – Sismogramma, spettro di velocità relativi alla componente ZVF (onde di Rayleigh, in alto) e THF (onde di Love, in basso), spettri di velocità di fase e curve modali derivanti dal modello ricostruito dall'inversione congiunta di Fig. 8.

- 4.2.1. MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO – INDAGINI MASW

Il modello del terreno ricavato dall'inversione congiunta dell'indagine sismica MASW1 multicomponente ricostruisce una profondità del bedrock sismico superiore ai 30 m. Le velocità delle onde S variano da 80 a 496 m/s (Fig. 13).

I valori di V_s nel primo metro di profondità sono comprese tra 80 e 220 m/s. A profondità maggiori si osserva un graduale aumento delle V_s con i valori delle velocità di 350 m/s fino a circa 3 m, mentre a 11 m da p.c., le velocità si attestano su valori pari a 496 m/s.

Oltre questo intervallo, il profilo delle V_s mostra una riduzione dei valori di velocità che raggiungono i 340 m/s fino a 25 m. (Fig. 13), poi le V_s si attestano su valori di 420 m/s.

La velocità media di propagazione delle onde S nei primi 30 m, tenendo conto degli spessori degli strati è pari a: $V_{s,eq} = 351$ m/s (Fig. 13). Tale dato permette di classificare il terreno di fondazione come tipo C.

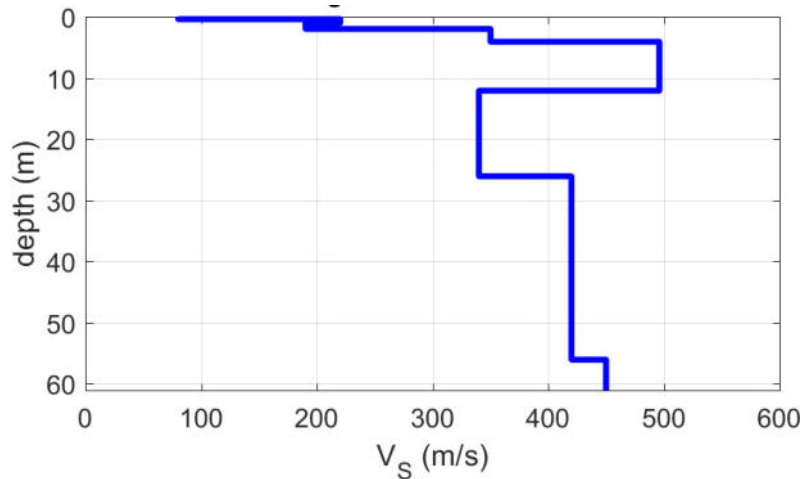


Fig. 13 – Profilo delle velocità delle onde di tipo S nei primi 30 m di profondità.

Il modello del terreno ricavato dall'inversione congiunta dell'indagine sismica MASW2 multicomponente ricostruisce una profondità del bedrock sismico superiore ai 30 m.

Le velocità delle onde S variano da 180 a 580 m/s (Fig. 14).

I valori di V_s nei primi 1.5 m di profondità sono inferiori a 180 m/s. A profondità maggiori si osserva un graduale aumento delle V_s con valori delle velocità pari a 380 m/s fino a circa 3.5 m. Oltre questo intervallo, il profilo delle V_s mostra una diminuzione con i valori di velocità che raggiungono circa 270 m/s (Fig. 14). Oltre questo intervallo, il profilo delle V_s mostra un andamento regolare con i valori di velocità che raggiungono i 580 m/s, mentre fino a circa 26 m le velocità si attestano su valori superiori a 330 m/s.

La velocità media di propagazione delle onde S nei primi 30 m, tenendo conto degli spessori degli strati è pari a: $V_{s,eq} = 330 \text{ m/s}$ (Fig. 14). Tale dato permette di classificare il terreno di fondazione come tipo C.

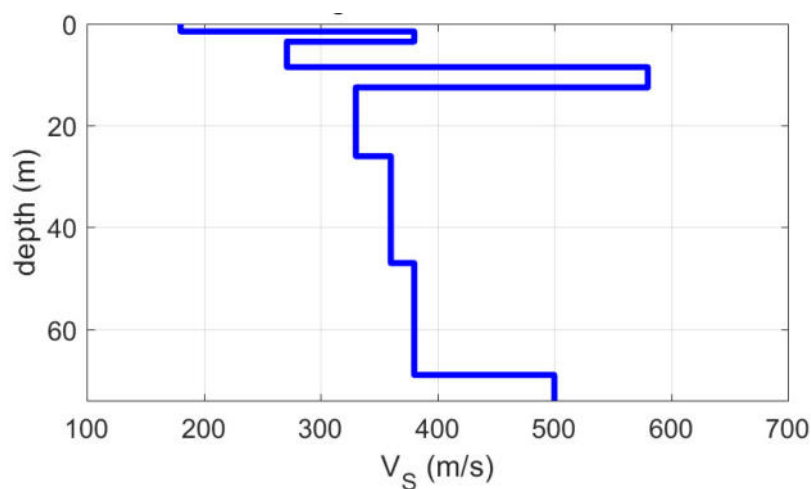


Fig. 14 – Profilo delle velocità delle onde di tipo S nei primi 30 m di profondità.

4.4 INDAGINE HOLISURFACE

Le tracce relative delle componenti ZV e HF dell'indagine Holisurface sono state sommate per migliorare il rapporto segnale/rumore (S/N) e i sismogrammi derivanti da queste acquisizioni sono state successivamente elaborate ed interpretate utilizzando il software HOLISURFACE. Ottenuti, gli spetti di velocità di gruppo delle componenti Z, R e T e la curva RPM, si è proceduto all'inversione congiunta di questi oggetti e della curva HVSR secondo i criteri dell'ottimo partiano e utilizzando l'approccio FVS (Full Velocity Spectrum, Dal Moro, 2019). Tale approccio non prevede il picking/interpretazione delle curve modali ma ricostruisce un modello di velocità che tende ad avvicinarsi all'insieme dei dati sperimentali acquisiti in campagna.

4.4.1 Indagine HS1

I risultati dell'inversione dell'indagine HS1 sono riportati in Fig. 15, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh. La figura 16 mostra invece i risultati dell'inversione congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale e radiale delle onde di Rayleigh e quello delle onde di Love, la curva HVSR il relativo modello con il minor scarto tra dati sismici acquisiti e la modellazione.

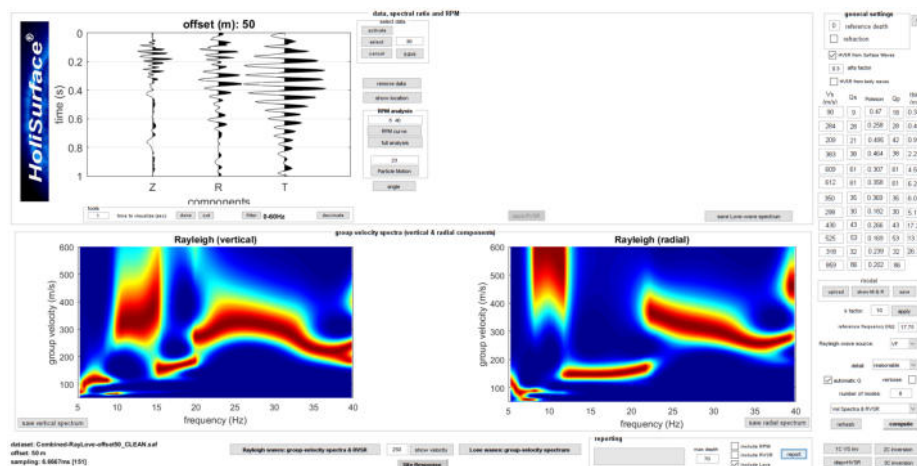
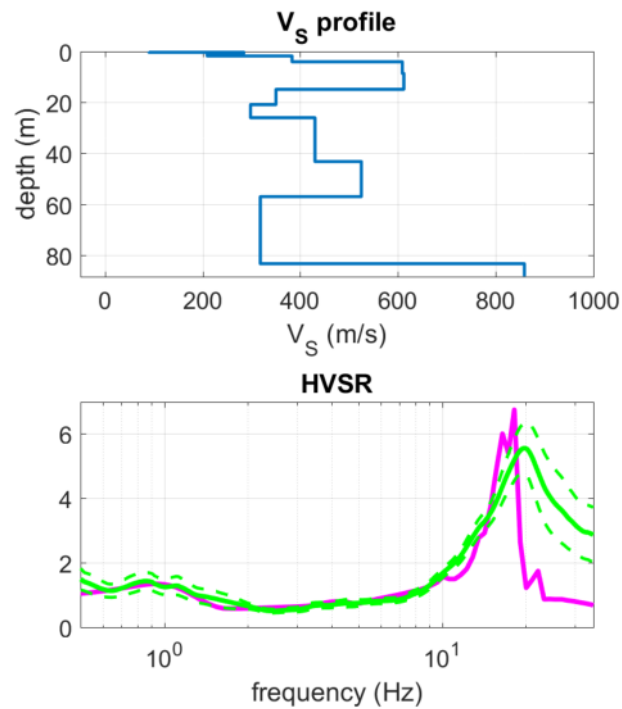
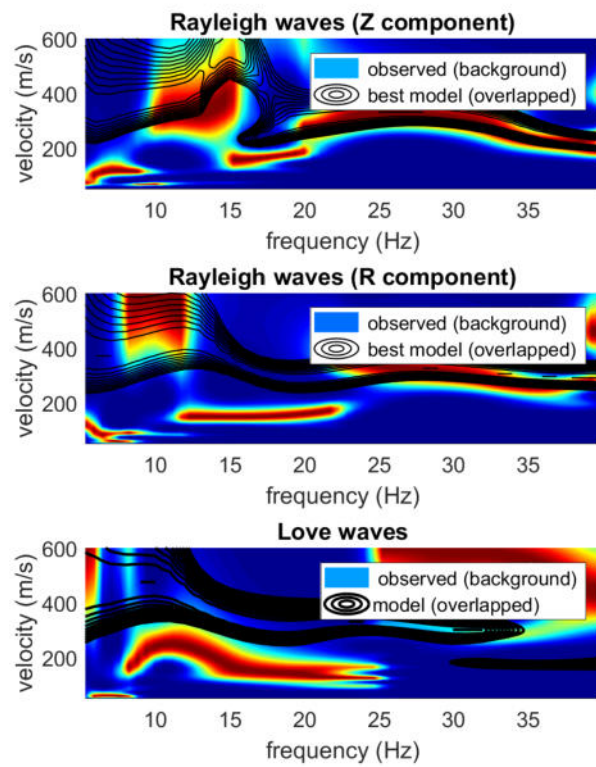


Fig. 15 – Sismogramma e spettri di velocità di gruppo relativi alla componente Z, R (onde di Rayleigh) e T (onde di Love).



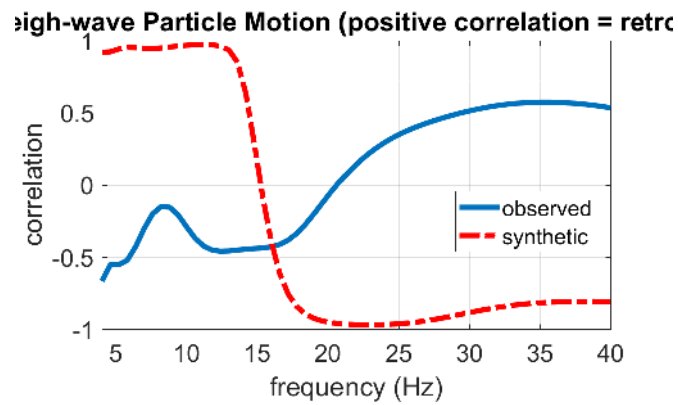
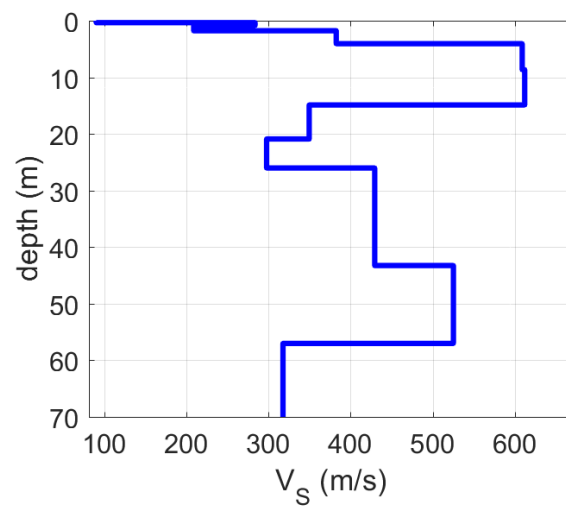


Fig. 16 – Risultati dell'inversione congiunta degli spettri delle componenti Z, R e T e delle curve RPM e HVSR derivanti dall'indagine HSI (modello riportato nella successiva immagine). La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l'apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtremori (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019). Gli spettri di velocità di gruppo sono trattati secondo l'approccio FVS (Full Velocity Spectrum), quindi senza interpretazione/picking di curve modali. Si noti il buon accordo su tutti i tre "oggetti" (observables) considerati.



model (Vs30 & VsE @ surface: 388 388)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	90	0.3400	0.3400
2	284	0.4900	0.8300
3	209	0.9400	1.7700
4	383	2.2900	4.0600
5	609	4.5800	8.6400
6	612	6.2500	14.8900
7	350	6.0100	20.9000
8	298	5.1300	26.0300
9	430	17.2300	43.2600
10	525	13.7600	57.0200
11	318	26.3500	83.3700
12	859	0	0

Fig. 17 - Modello del sottosuolo identificato tramite analisi congiunta Z+T+ R + RPM + HVSR1.

4.4.2 Indagine HS2

I risultati dell'inversione dell'indagine HS2 sono riportati in Fig. 18, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di gruppo delle onde di Rayleigh e Love. La figura 19 mostra invece i risultati dell'inversione congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale e radiale delle onde di Rayleigh e quello delle onde di Love, la curva HVSR il relativo modello con il minor scarto tra dati sismici acquisiti e la modellazione.

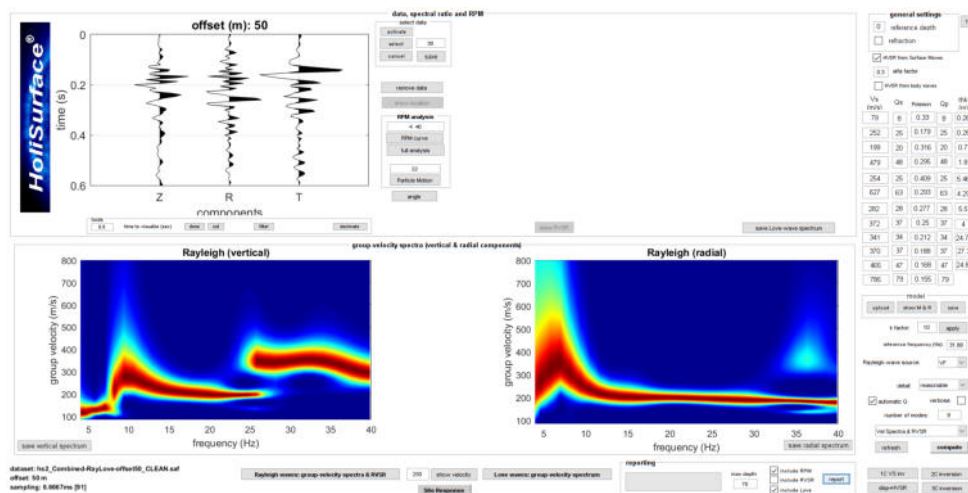
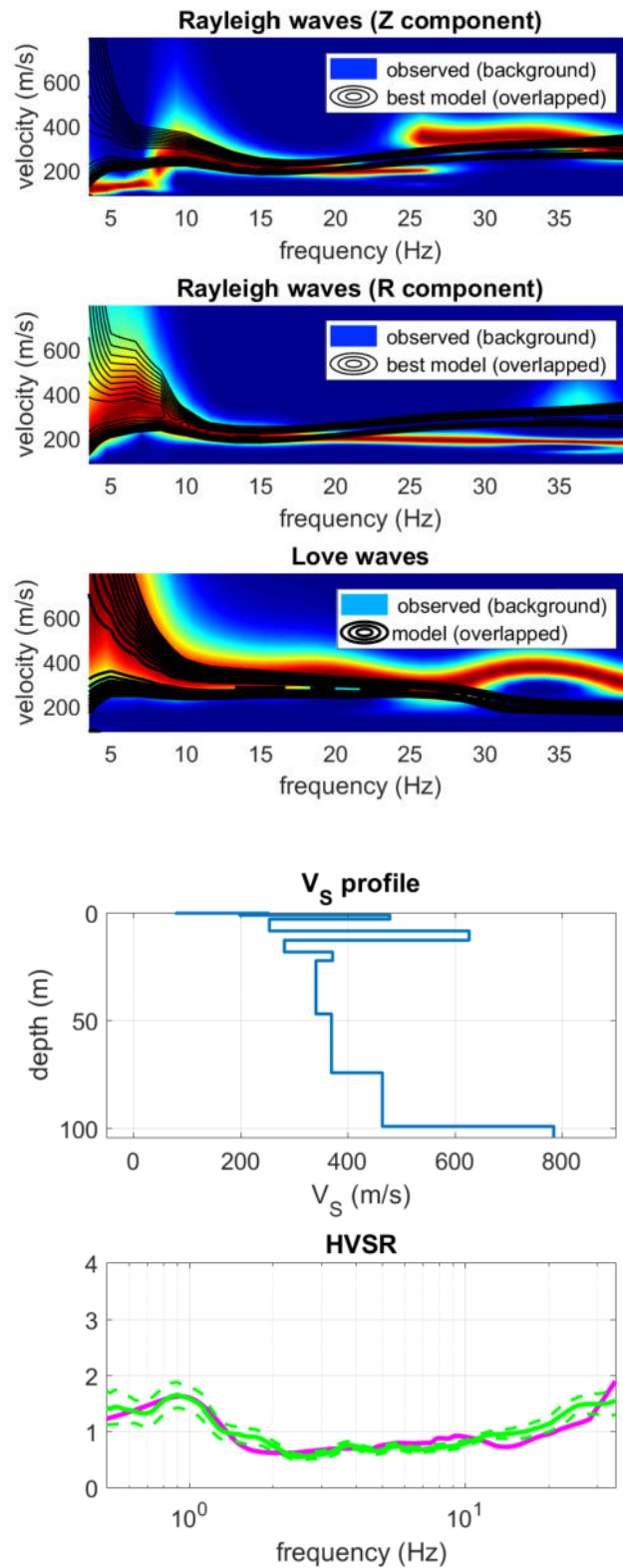


Fig. 18 – Sismogramma e spettri di velocità di gruppo relativi alla componente Z, R (onde di Rayleigh) e T (onde di Love).



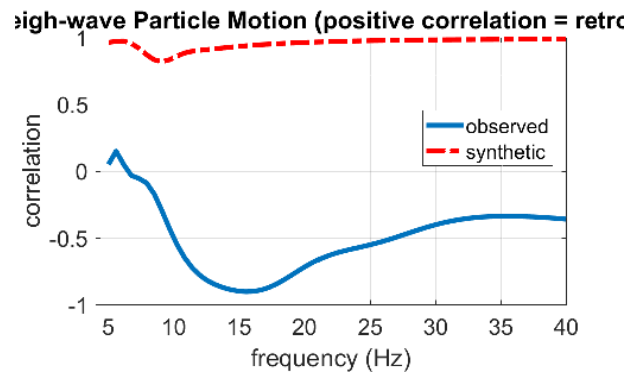
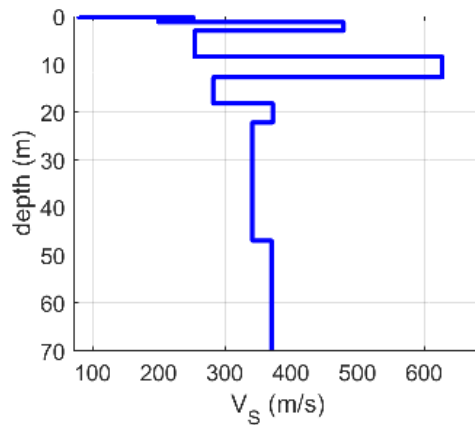


Fig. 19 – Risultati dell'inversione congiunta degli spettri delle componenti Z, R e T e delle curve RPM e HVSR derivanti dall'indagine HS2 (modello riportato nella successiva immagine). La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l'apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtremori (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019). Gli spettri di velocità di gruppo sono trattati secondo l'approccio FVS (Full Velocity Spectrum), quindi senza interpretazione/picking di curve modali. Si noti il buon accordo su tutti i tre "oggetti" (observables) considerati.



model (Vs30 & VsE @ surface: 322 322)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	79	0.2800	0.2800
2	252	0.2800	0.5600
3	199	0.7000	1.2600
4	479	1.8000	3.0600
5	254	5.4600	8.5200
6	627	4.2900	12.8100
7	282	5.5000	18.3100
8	372	4	22.3100
9	341	24.7100	47.0200
10	370	27.3000	74.3200
11	465	24.8700	99.1900
12	785	0	0

Fig. 20 - Modello del sottosuolo identificato tramite analisi congiunta Z+T+ R + RPM + HVSR2.

4.4.3 Indagine HS3

I risultati dell'inversione dell'indagine HS3 sono riportati in Fig. 21, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di gruppo delle onde di Rayleigh e Love. La figura 22 mostra invece i risultati dell'inversione congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale e radiale delle onde di Rayleigh e quello delle onde di Love, la curva HVSR il relativo modello con il minor scarto tra dati sismici acquisiti e la modellazione.

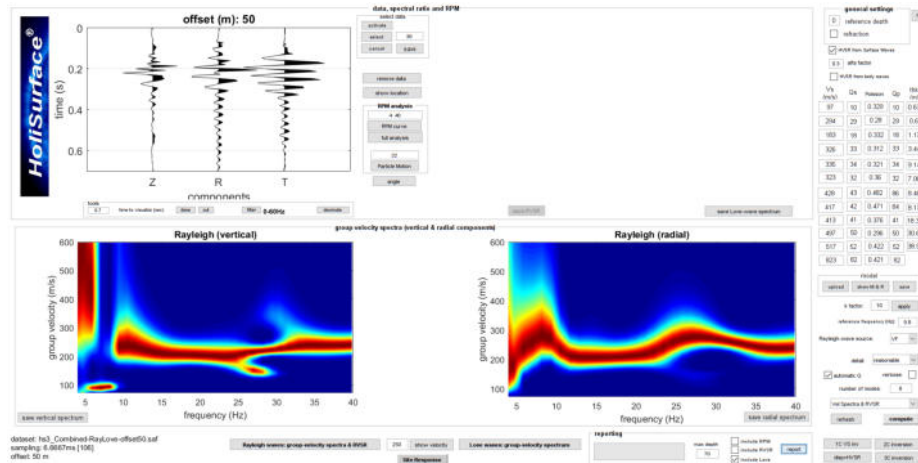
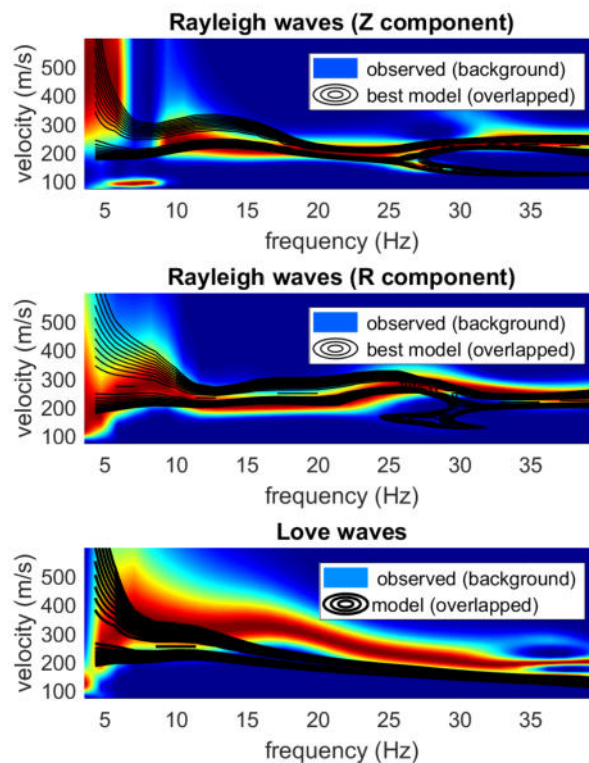


Fig. 21 – Sismogramma e spettri di velocità di gruppo relativi alla componente Z, R (onde di Rayleigh) e T (onde di Love).



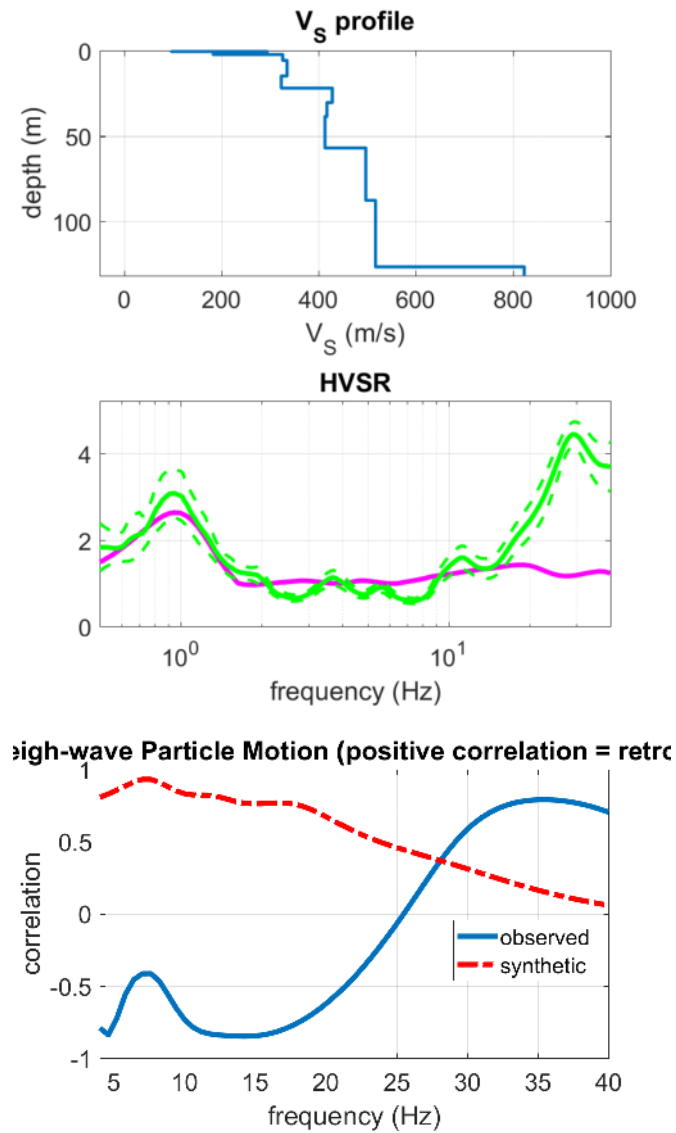
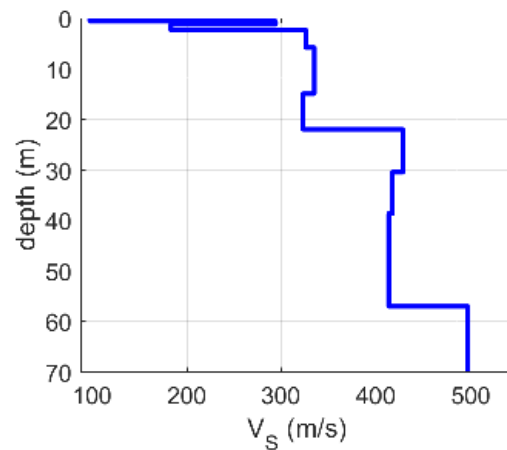


Fig. 22 – Risultati dell'inversione congiunta degli spettri delle componenti Z, R e T e delle curve RPM e HVSR derivanti dall'indagine HS3 (modello riportato nella successiva immagine). La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l'apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtremori (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019). Gli spettri di velocità di gruppo sono trattati secondo l'approccio FVS (Full Velocity Spectrum), quindi senza interpretazione/picking di curve modali. Si noti il buon accordo su tutti i tre "oggetti" (observables) considerati.

**model (Vs30 & VsE @ surface: 322 322)**

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	97	0.6300	0.6300
2	294	0.6000	1.2300
3	183	1.1700	2.4000
4	326	3.4400	5.8400
5	335	9.1400	14.9800
6	323	7.0600	22.0400
7	428	8.4800	30.5200
8	417	8.1700	38.6900
9	413	18.3900	57.0800
10	497	30.6600	87.7400
11	517	38.9600	126.70...
12	823	0	0

Fig. 23 - Modello del sottosuolo identificato tramite analisi congiunta Z+T+ R + RPM + HVSR3.

4.4.4 Indagine HS4

I risultati dell'inversione dell'indagine HS4 sono riportati in Fig. 24, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di gruppo delle onde di Rayleigh e Love. La figura 25 mostra invece i risultati dell'inversione congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale e radiale delle onde di Rayleigh e quello delle onde di Love, la curva HVSR il relativo modello con il minor scarto tra dati sismici acquisiti e la modellazione.

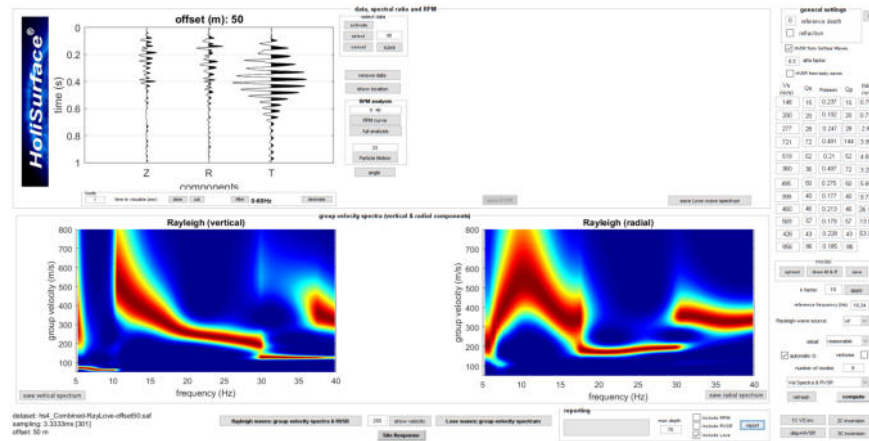
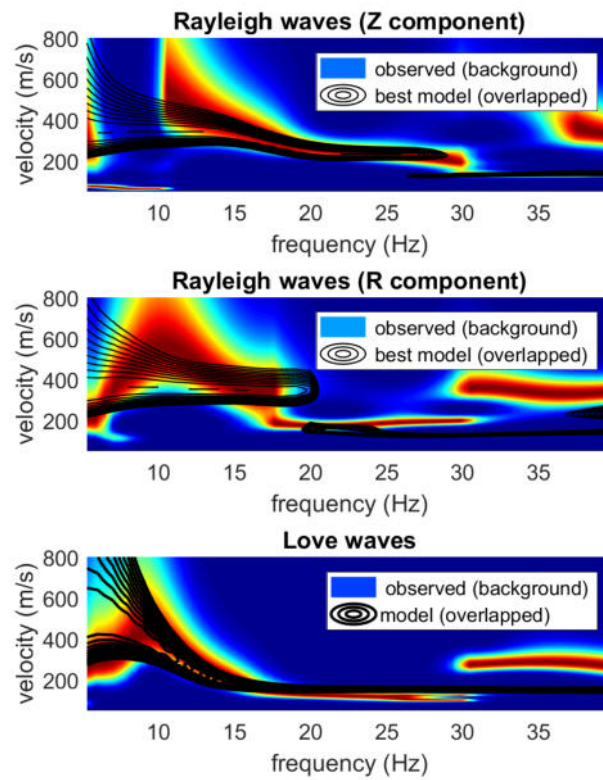


Fig. 24 – Sismogramma e spettri di velocità di gruppo relativi alla componente Z, R (onde di Rayleigh) e T (onde di Love).



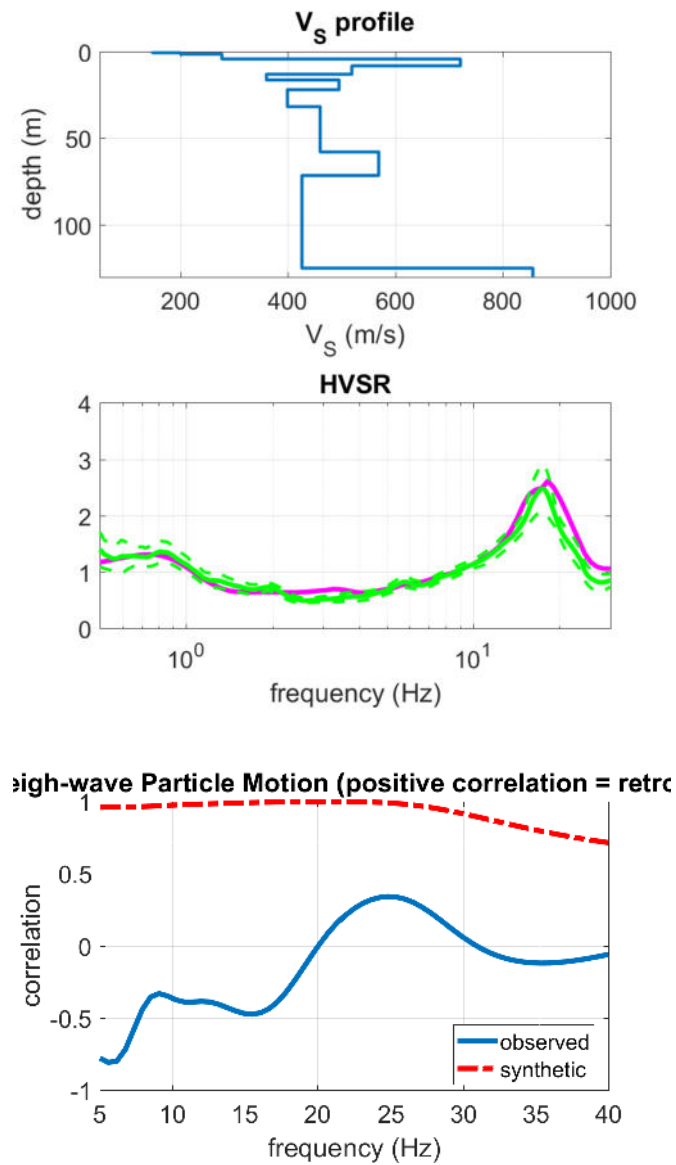
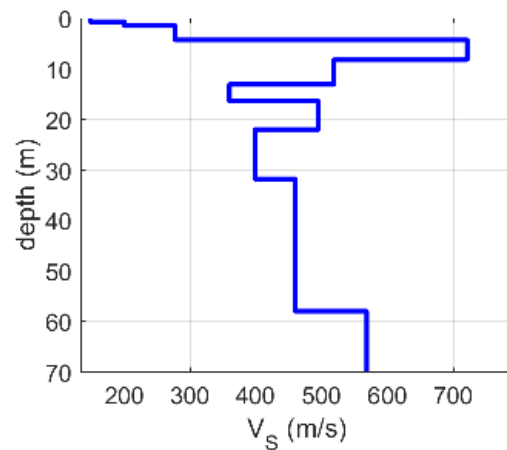


Fig. 25 – Risultati dell'inversione congiunta degli spettri delle componenti Z, R e T e delle curve RPM e HVSR derivanti dall'indagine HS4 (modello riportato nella successiva immagine). La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l'apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtremori (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019). Gli spettri di velocità di gruppo sono trattati secondo l'approccio FVS (Full Velocity Spectrum), quindi senza interpretazione/picking di curve modali. Si noti il buon accordo su tutti i tre "oggetti" (observables) considerati.



model (Vs30 & VsE @ surface: 404 404)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	148	0.7500	0.7500
2	200	0.7700	1.5200
3	277	2.8000	4.3200
4	721	3.9500	8.2700
5	519	4.8700	13.1400
6	360	3.2900	16.4300
7	495	5.6500	22.0800
8	399	9.7700	31.8500
9	460	26.1800	58.0300
10	569	13.5900	71.6200
11	426	53.5200	125.14...
12	856	0	0

Fig. 26 - Modello del sottosuolo identificato tramite analisi congiunta Z+T+ R + RPM + HVSR4.

4.4.5 Indagine HS5

I risultati dell'inversione dell'indagine HS5 sono riportati in Fig. 27, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di gruppo delle onde di Rayleigh e Love. La figura 28 mostra invece i risultati dell'inversione congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale e radiale delle onde di Rayleigh e quello delle onde di Love, la curva HVSR il relativo modello con il minor scarto tra dati sismici acquisiti e la modellazione.

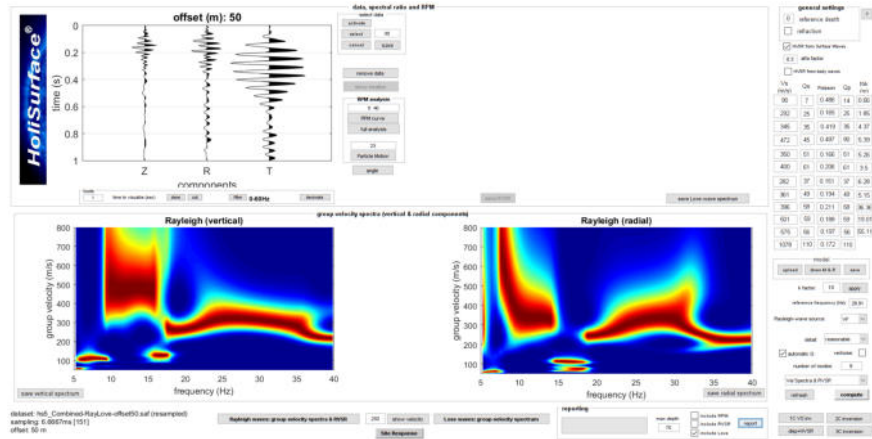
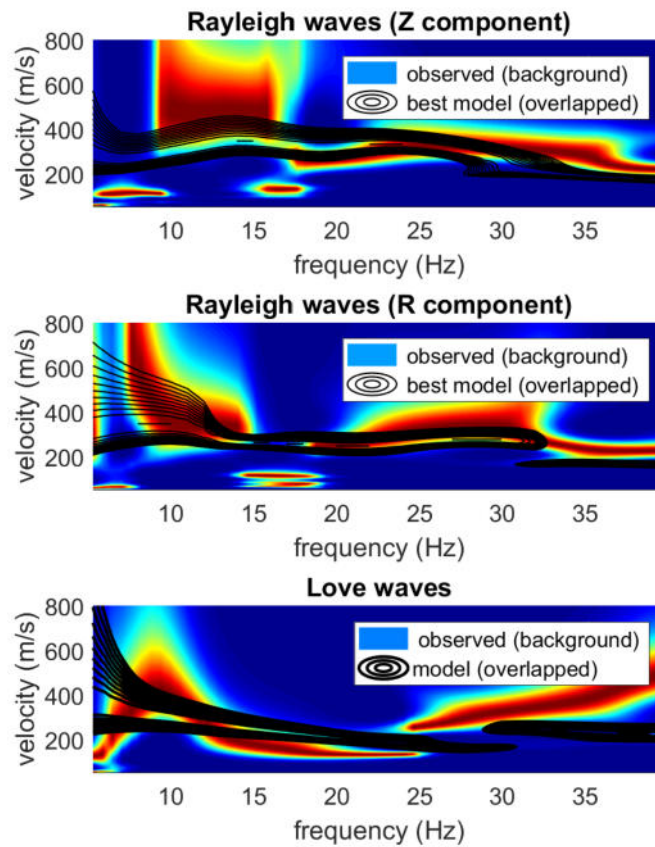


Fig. 27 – Sismogramma e spettri di velocità di gruppo relativi alla componente Z, R (onde di Rayleigh) e T (onde di Love).



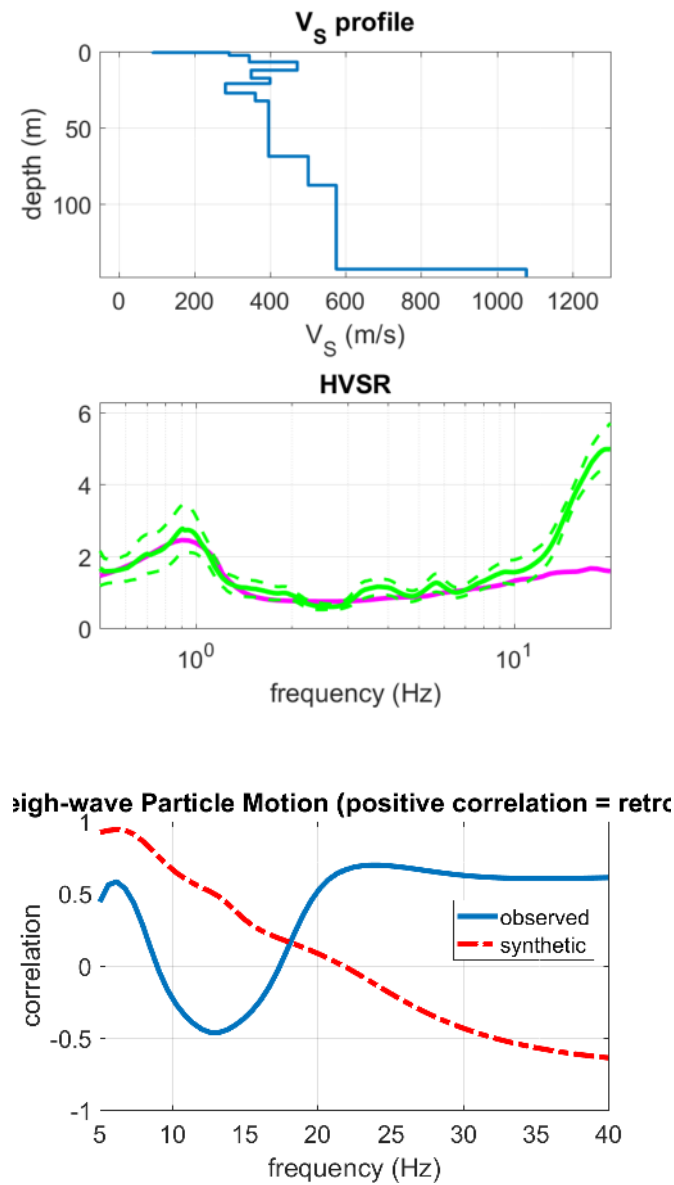
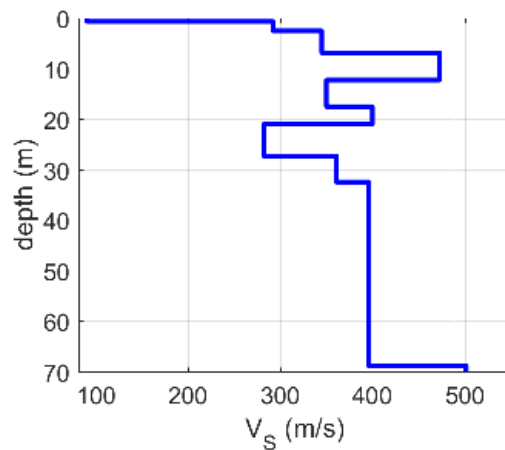


Fig. 28 – Risultati dell’inversione congiunta degli spettri delle componenti Z, R e T e delle curve RPM e HVSR derivanti dall’indagine HS5 (modello riportato nella successiva immagine). La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l’apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtrempi (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019). Gli spettri di velocità di gruppo sono trattati secondo l’approccio FVS (Full Velocity Spectrum), quindi senza interpretazione/picking di curve modali. Si noti il buon accordo su tutti i tre “oggetti” (observables) considerati.



model (Vs30 & VsE @ surface: 329 329)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	90	0.6600	0.6600
2	292	1.8500	2.5100
3	345	4.3700	6.8800
4	472	5.3900	12.2700
5	350	5.2600	17.5300
6	400	3.5000	21.0300
7	282	6.2800	27.3100
8	361	5.1500	32.4600
9	396	36.3600	68.8200
10	501	19.0100	87.8300
11	575	55.1100	142.94...
12	1078	0	0

Fig. 29 - Modello del sottosuolo identificato tramite analisi congiunta Z+T+ R + RPM + HVSR5.

4.4.6 Indagine HS6

I risultati dell'inversione dell'indagine HS6 sono riportati in Fig. 30, dove si osservano sia i sismogrammi ricavati dallo stacking verticale che gli spettri di velocità di gruppo delle onde di Rayleigh e Love. La figura 31 mostra invece i risultati dell'inversione congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale e radiale delle onde di Rayleigh e quello delle onde di Love, la curva HVSR il relativo modello con il minor scarto tra dati sismici acquisiti e la modellazione.

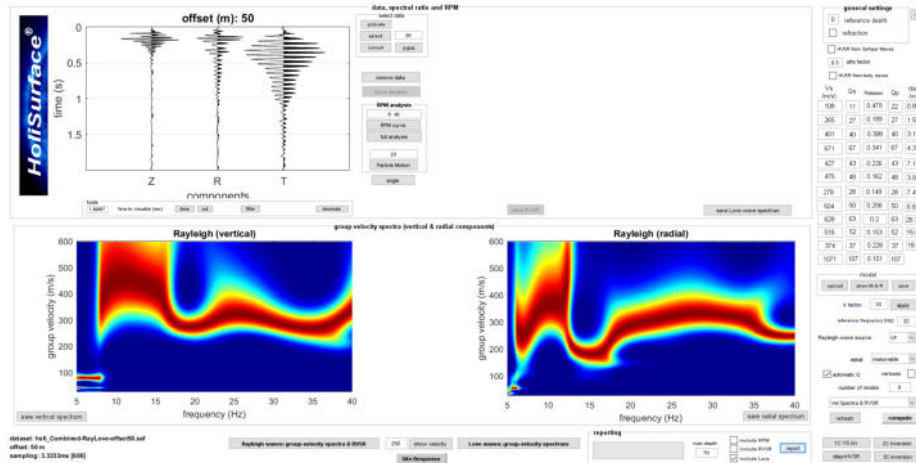
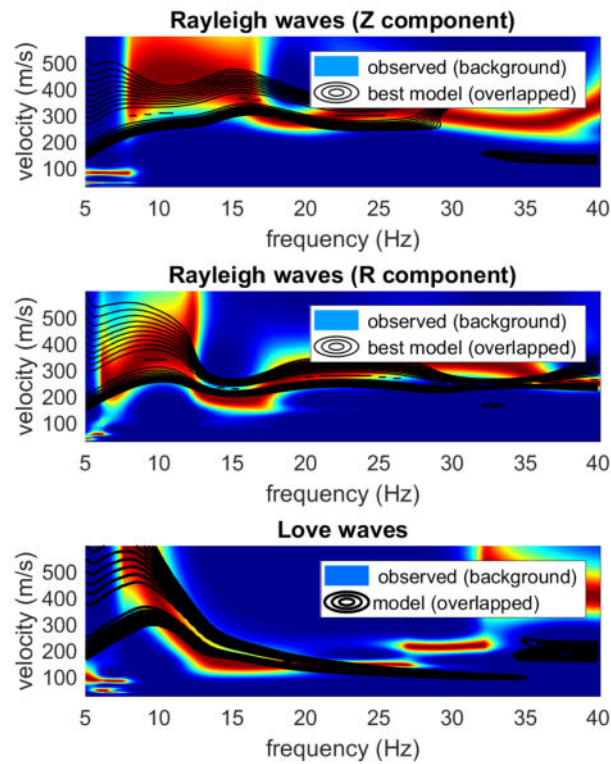


Fig. 30 – Sismogramma, spettri di velocità di gruppo relativi alla componente Z, R (onde di Rayleigh) e T (onde di Love) e curve di dispersione teoriche derivanti dal modello ricostruito dall'inversione degli spettri di velocità di fase delle tre componenti.



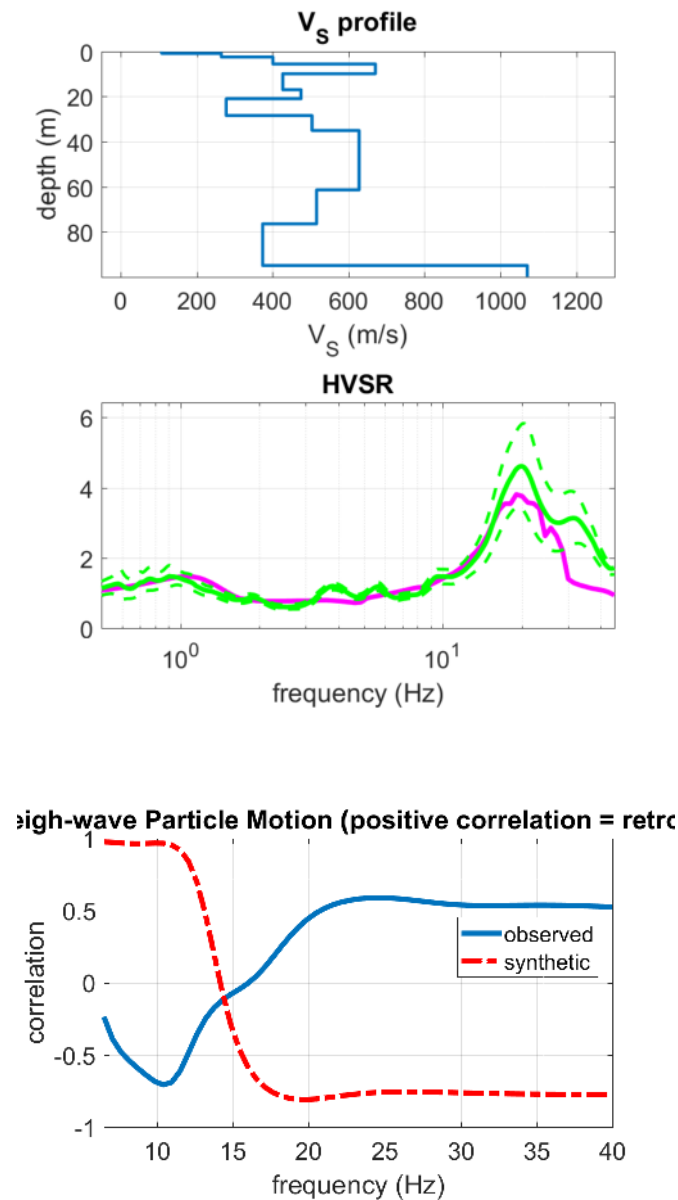
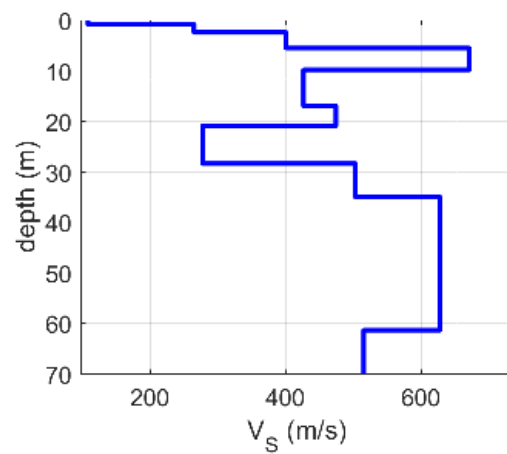


Fig. 31 – Risultati dell’inversione congiunta degli spettri delle componenti Z, R e T e delle curve RPM e HVSR derivanti dall’indagine HS6 (modello riportato nella successiva immagine). La curva HVSR è stata modellata in accordo ad Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l’apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtrempi (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019). Gli spettri di velocità di gruppo sono trattati secondo l’approccio FVS (Full Velocity Spectrum), quindi senza interpretazione/picking di curve modali. Si noti il buon accordo su tutti i tre “oggetti” (observables) considerati.



model (Vs30 & VsE @ surface: 361 361)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	108	0.8600	0.8600
2	265	1.5800	2.4400
3	401	3.1100	5.5500
4	671	4.3100	9.8600
5	427	7.1100	16.9700
6	475	3.9700	20.9400
7	278	7.4700	28.4100
8	504	6.6500	35.0600
9	628	26.3400	61.4000
10	516	15.0900	76.4900
11	374	18.5000	94.9900
12	1071	0	0

Fig. 32 - Modello del sottosuolo identificato tramite analisi congiunta Z+T+ R + RPM + HVSR6.

21/12/2021

Dott. Geologo
Salvatore LAURITA



Riferimenti bibliografici

Arai, H., Tokimatsu, K., 2005. S-Wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum. Bull. Seism. Soc. Am. 95, 1766–1778.

Dal Moro, G. (2012) - Onde di superficie in geofisica applicata. Acquisizione e analisi di dati secondo tecniche MASW e HVSr. D. Flaccovio, Palermo, pp. 191.

Dal Moro G., Keller L., Poggi V., 2015. A Comprehensive Seismic Characterization via Multi-Component Analysis of Active and Passive Data. First Break, 33, 45-53

Dal Moro, G. (2019) - Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica. D. Flaccovio, Palermo, pp. 280.

Dolce M., Albarello D., Castellaro S., Castenetto S., Colombi A., Compagnoni M., Di Filippo M., Di Nezza M., Eva C., Foti S., Martini G., Naso G., Pergalani F., Santucci De Magistri F., Scarascia Mugnozza G., Silvestri F. (2011) – Integrazioni agli Indirizzi e Criteri di Microzonazione Sismica. Ingegneria Sismica, Vol 2, giugno 2011.

Palmer, D. (1982) – An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. Geophysics, 46, 1508-1518.

Park, C.B. Xia J., Miller R.D. (1999) - Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64, 800-808.

6. ELABORATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE

SISMICA A RIFRAZIONE R1

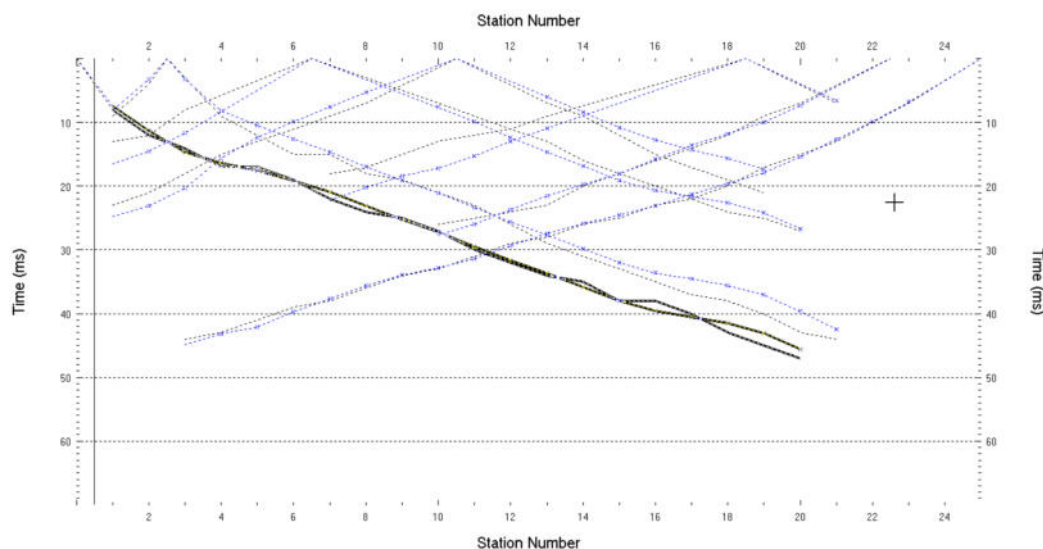


Fig. 33 – Dromocrone ricavate dall'individuazione nei sismogrammi dei primi arrivi delle onde P e relativa profondità del rifrattore superficiale.

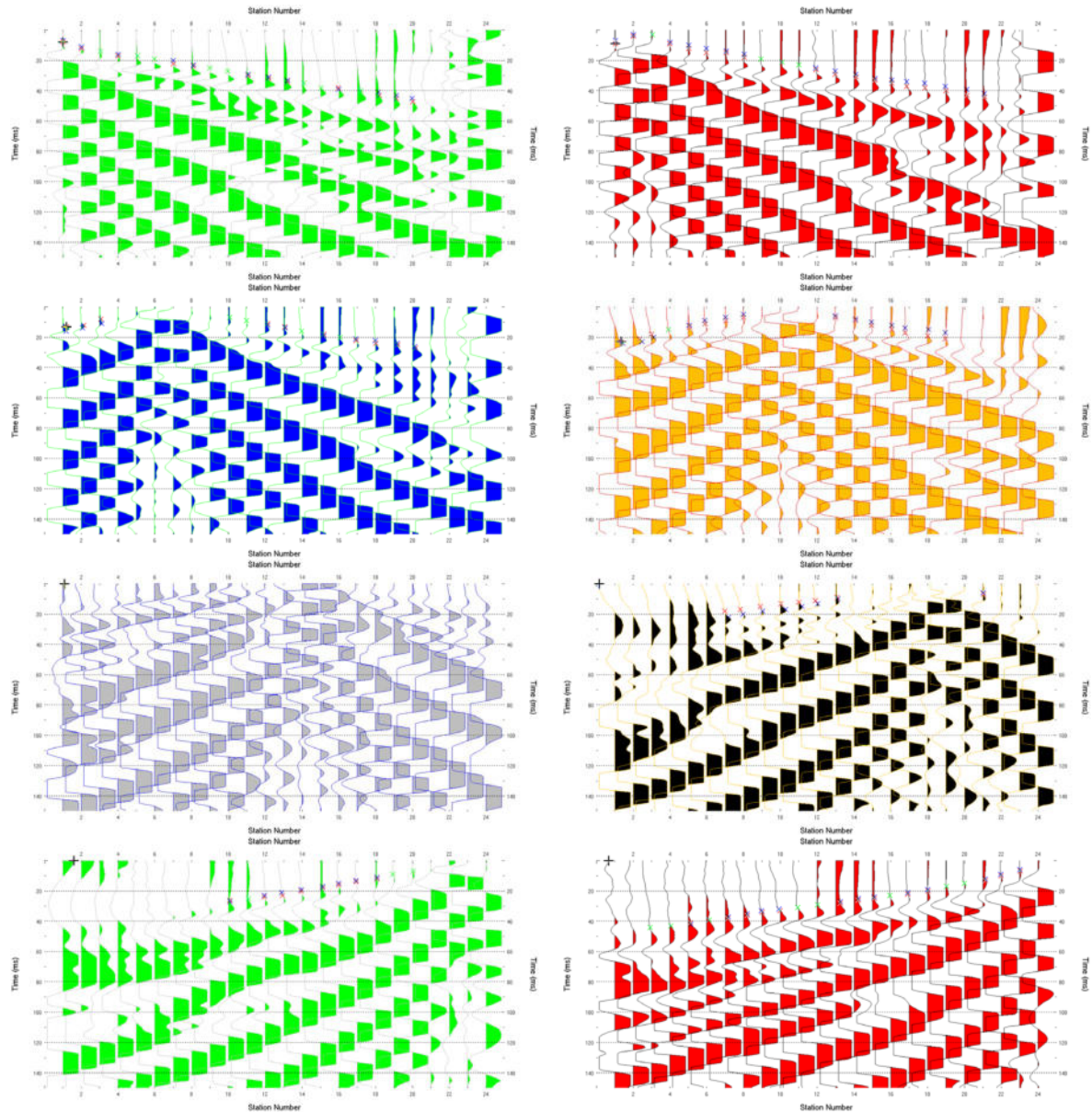


Fig. 34 – Sismogrammi relativi agli scoppi effettuati lungo lo stendimento della sismica a rifrazione R1 in onda P. I simboli rossi indicano i primi arrivi derivanti dal picking manuale mentre quelli blu rappresentano la modellizzazione dei primi arrivi delle onde P generati dal modello tomografico.

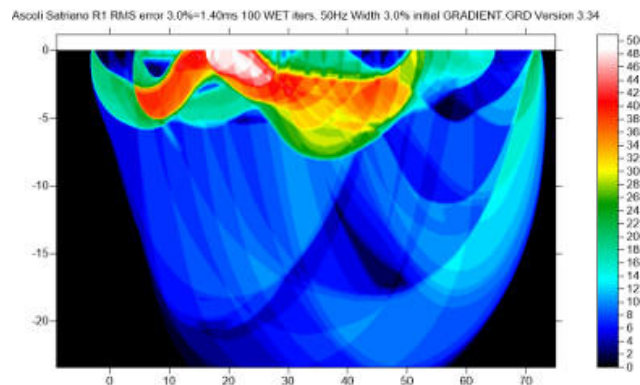


Fig. 35 - Sezione della “copertura” (numero di raggi che incidono su ciascuna cella del sottosuolo) delle onde sismiche di tipo P).

SISMICA A RIFRAZIONE R2

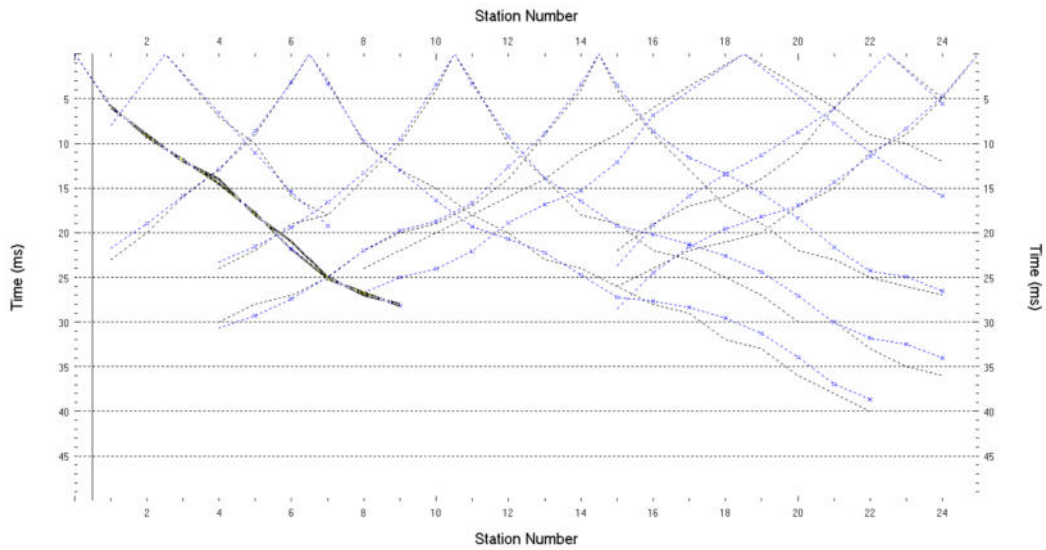
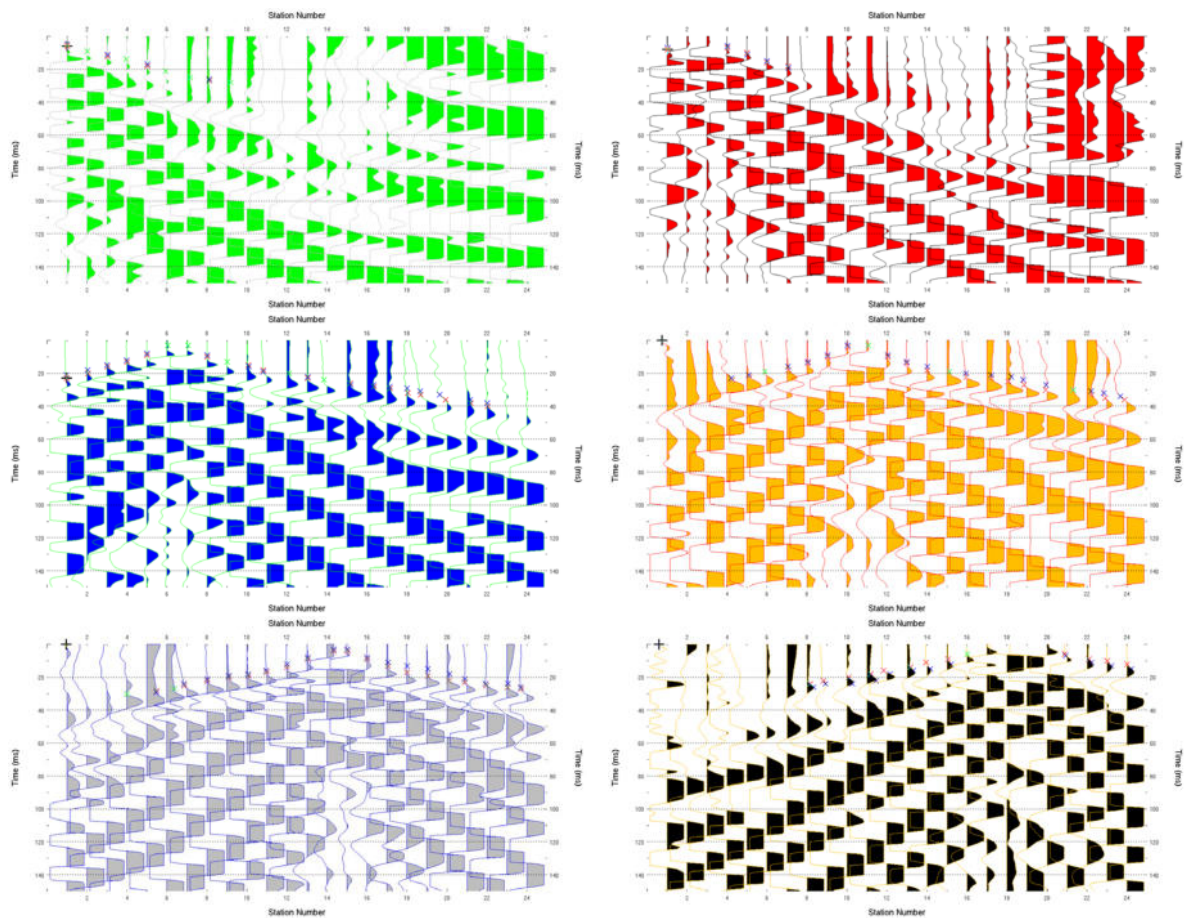


Fig. 36 – Dromocroni ricavate dall'individuazione nei sismogrammi dei primi arrivi delle onde P e relativa profondità del rifrattore superficiale.



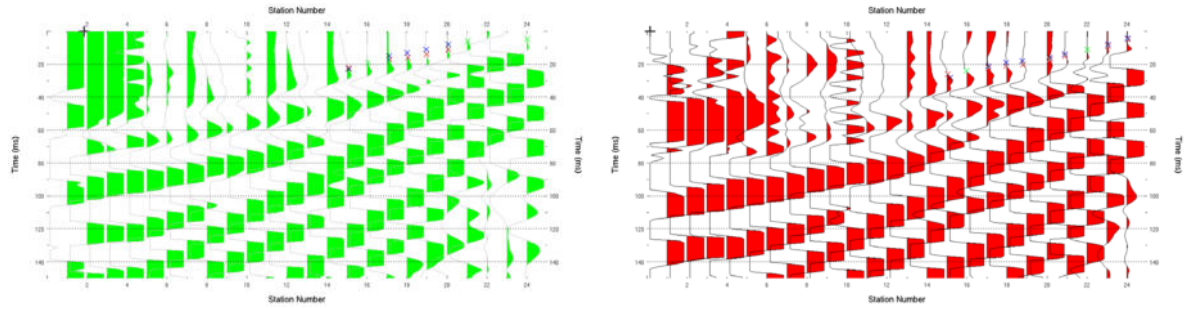


Fig. 37 – Sismogrammi relativi agli scoppi effettuati lungo lo stendimento della sismica a rifrazione R1 in onda P. I simboli rossi indicano i primi arrivi derivanti dal picking manuale mentre quelli blu rappresentano la modellizzazione dei primi arrivi delle onde P generati dal modello tomografico.

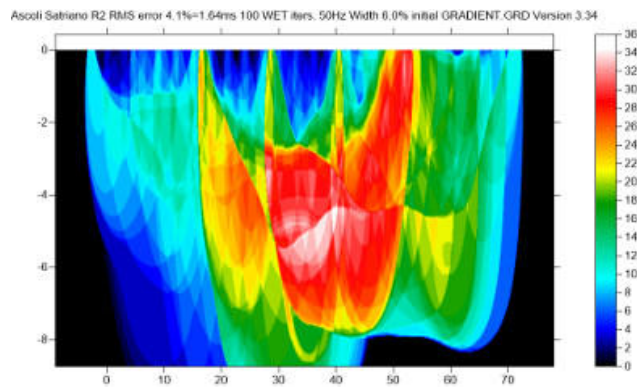
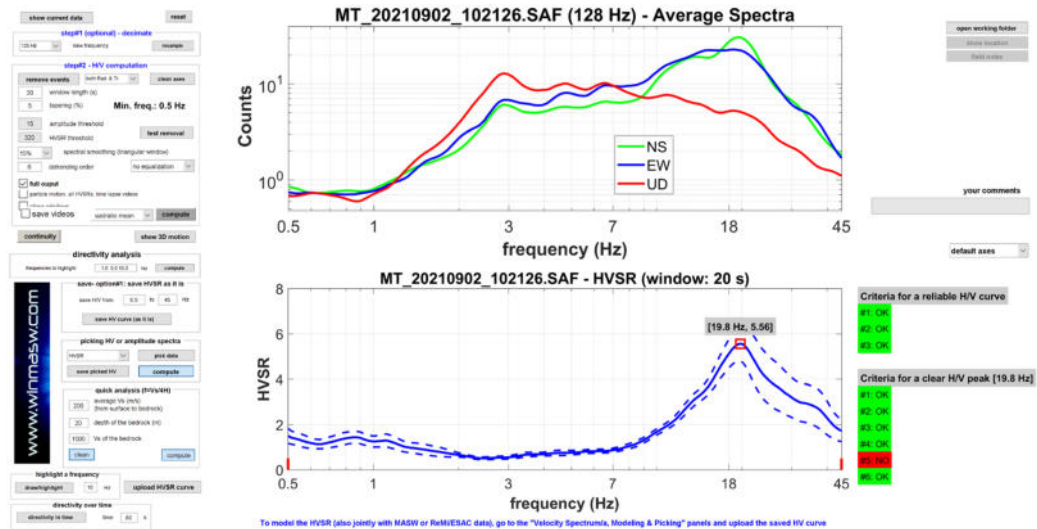
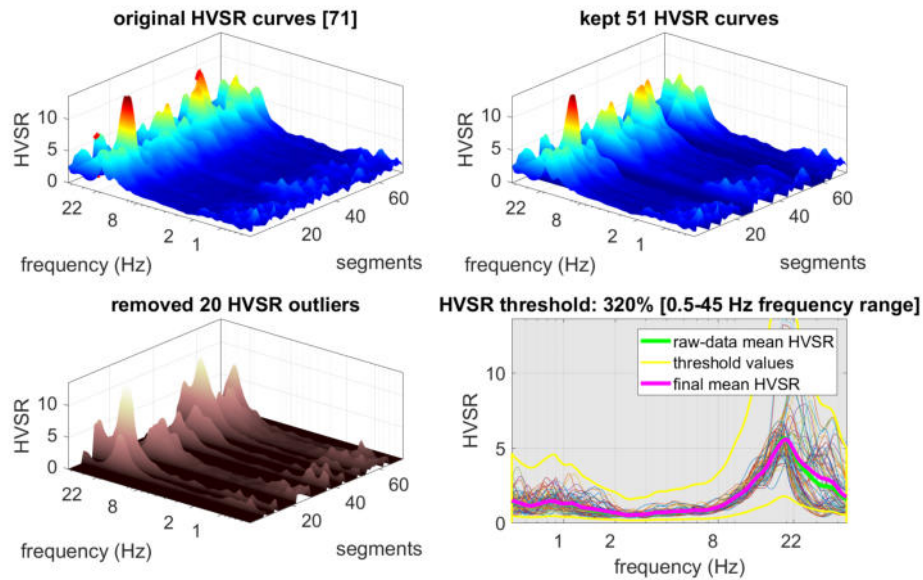
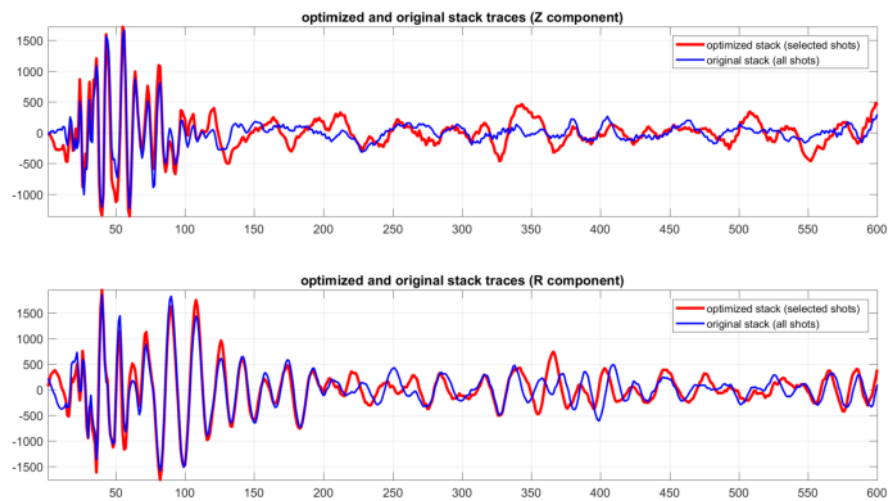


Fig. 38 - Sezione della “copertura” (numero di raggi che incidono su ciascuna cella del sottosuolo) delle onde sismiche di tipo P).

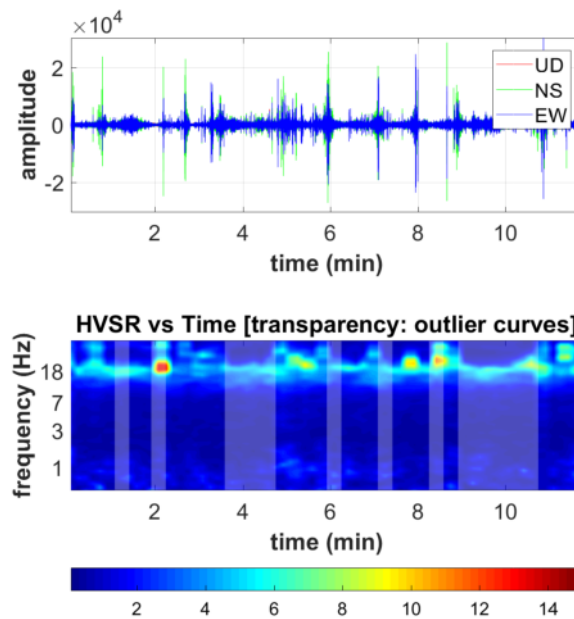
7. ELABORATI DELLA MISURA DI MICROTREMORI A STAZIONE SINGOLA

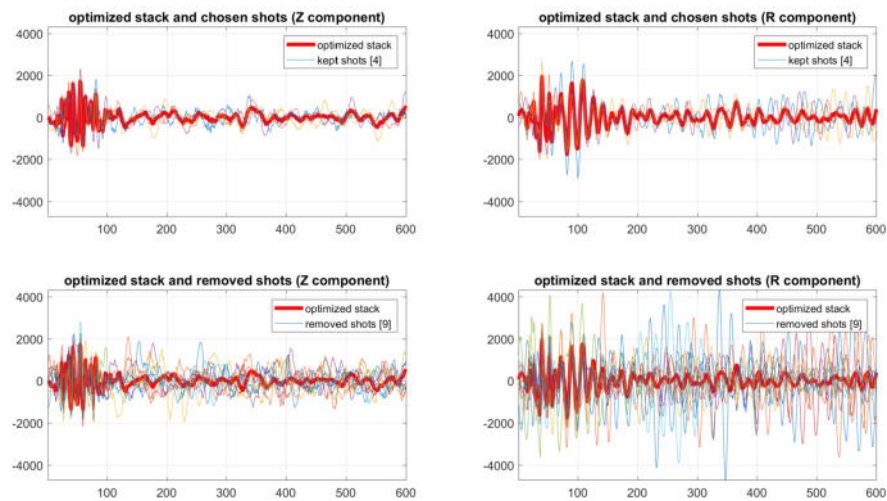
HVSR1



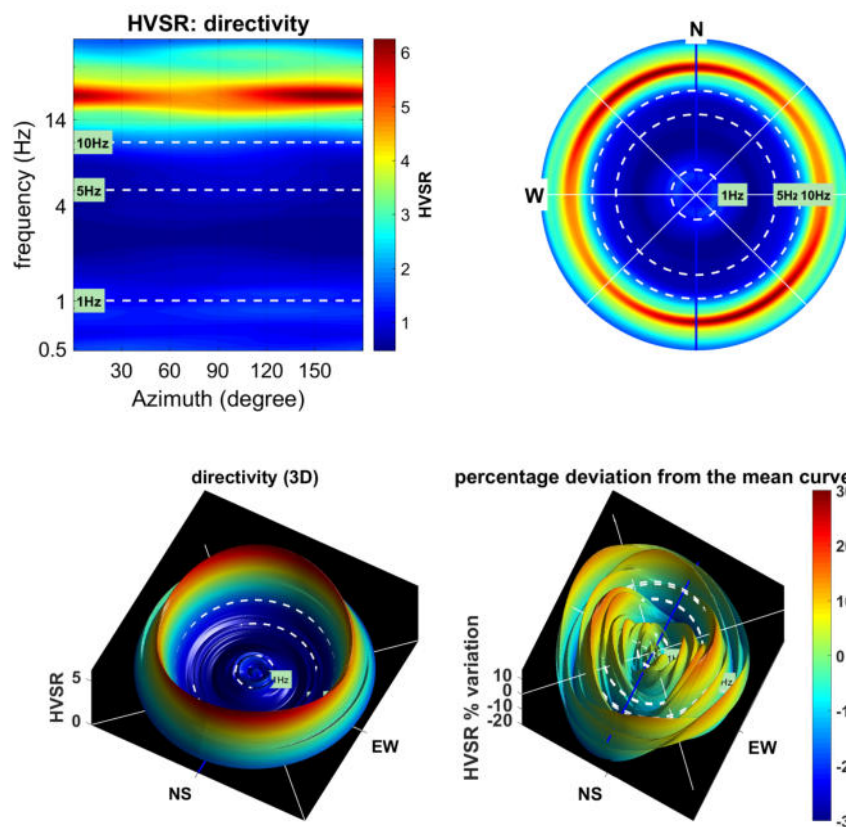


Continuity (Persistence) of the H/V Spectral Ratio

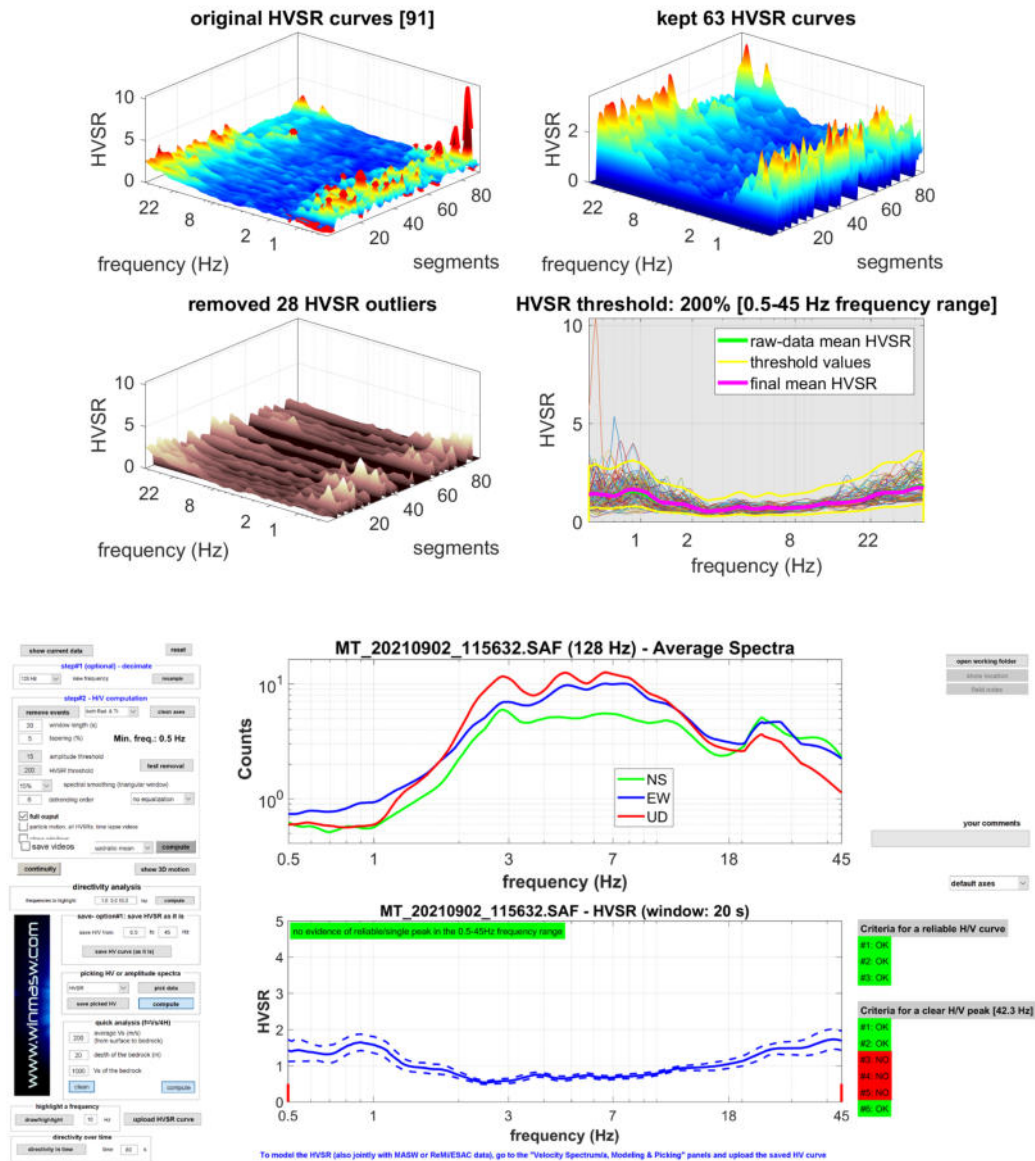


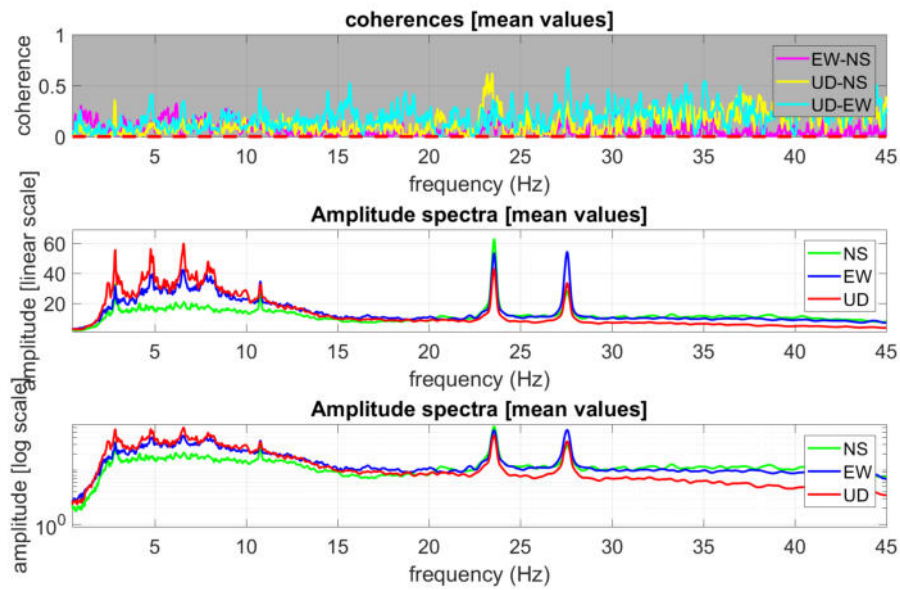


Directivity of the H/V Spectral Ratio

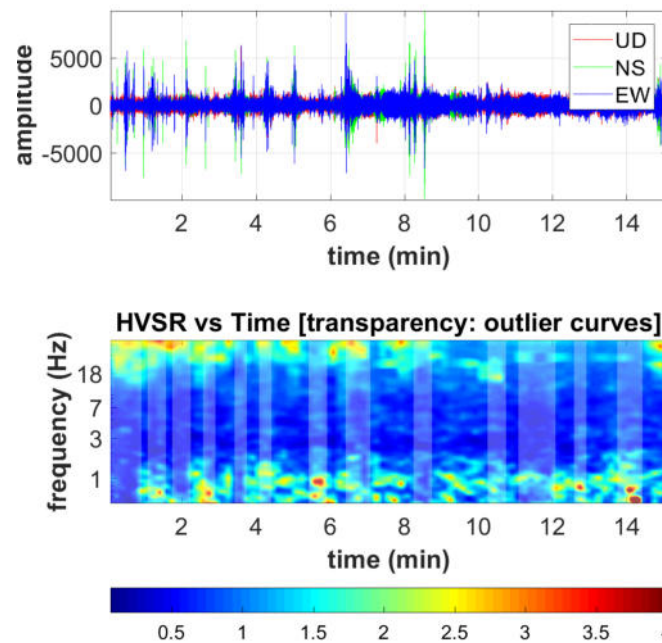


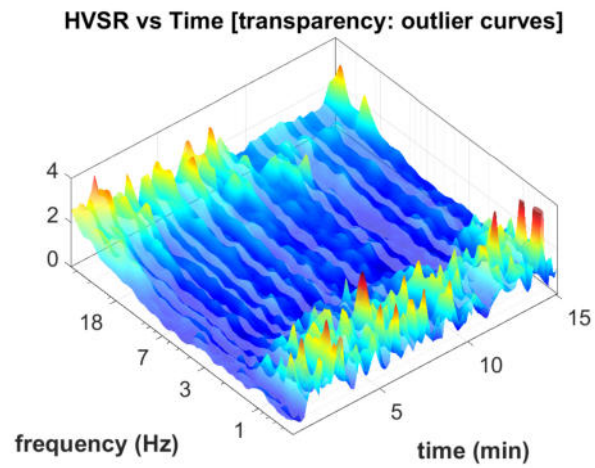
HVSR2



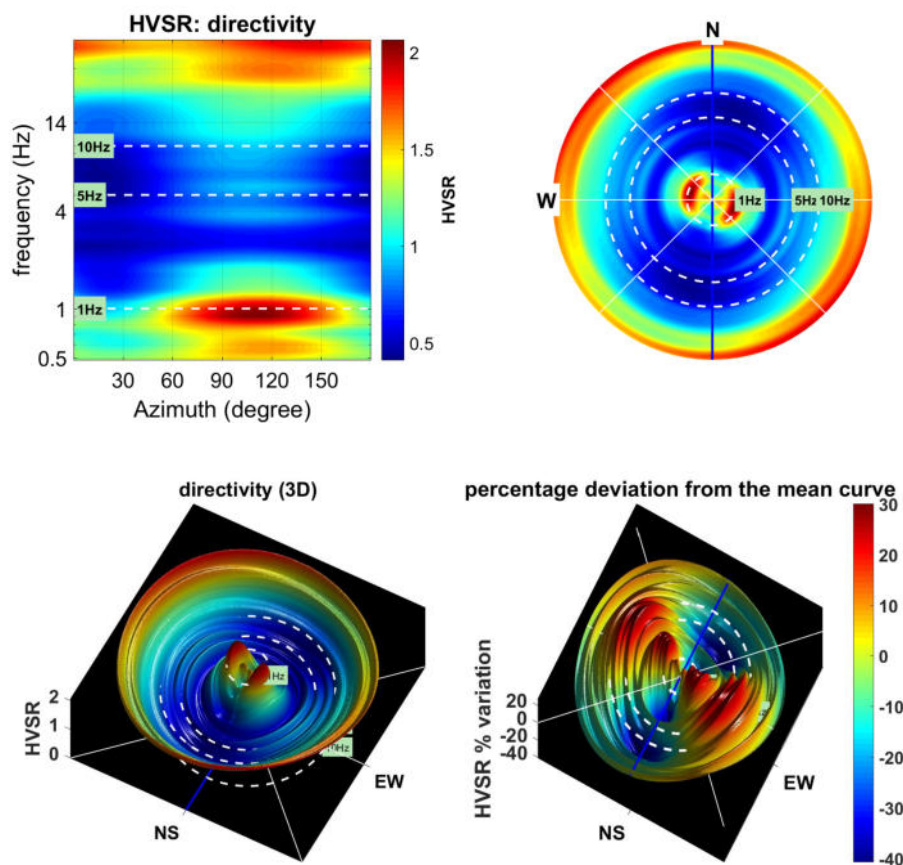


Continuity (Persistence) of the H/V Spectral Ratio

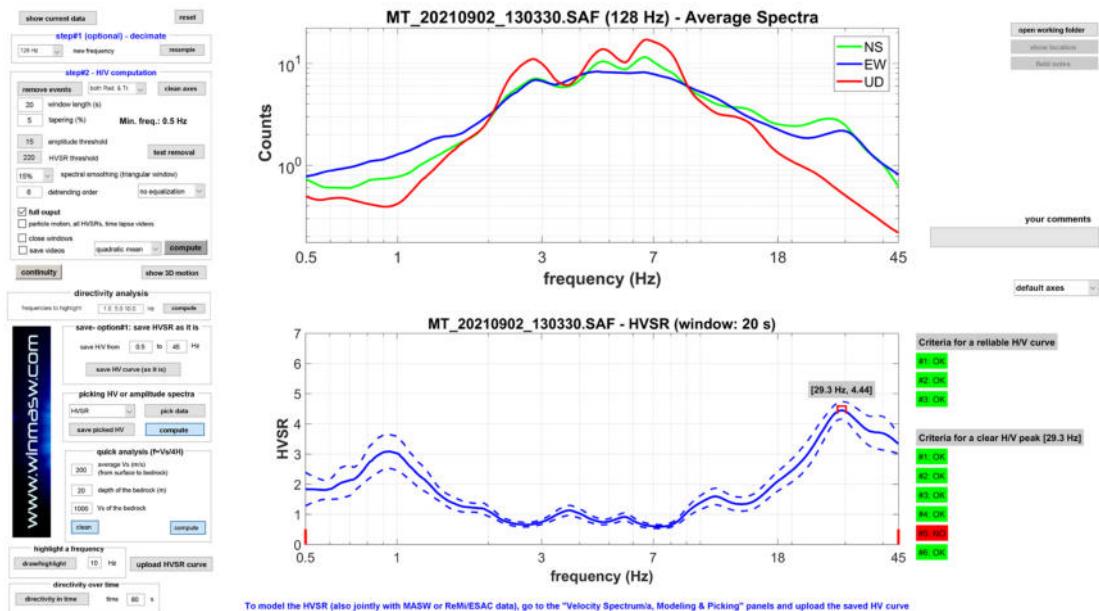
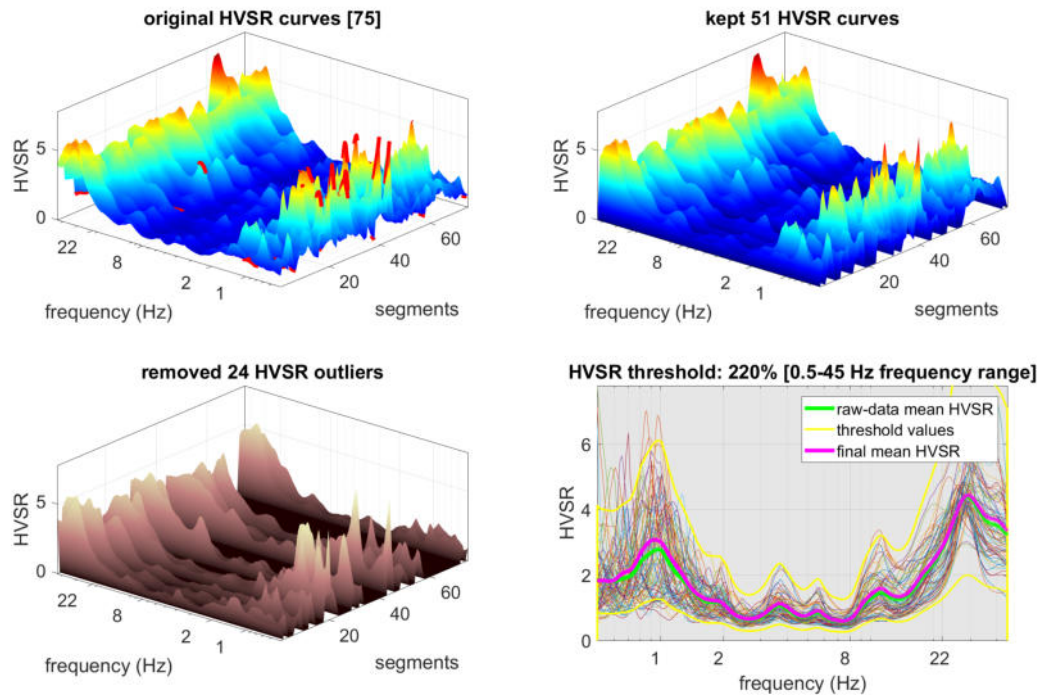


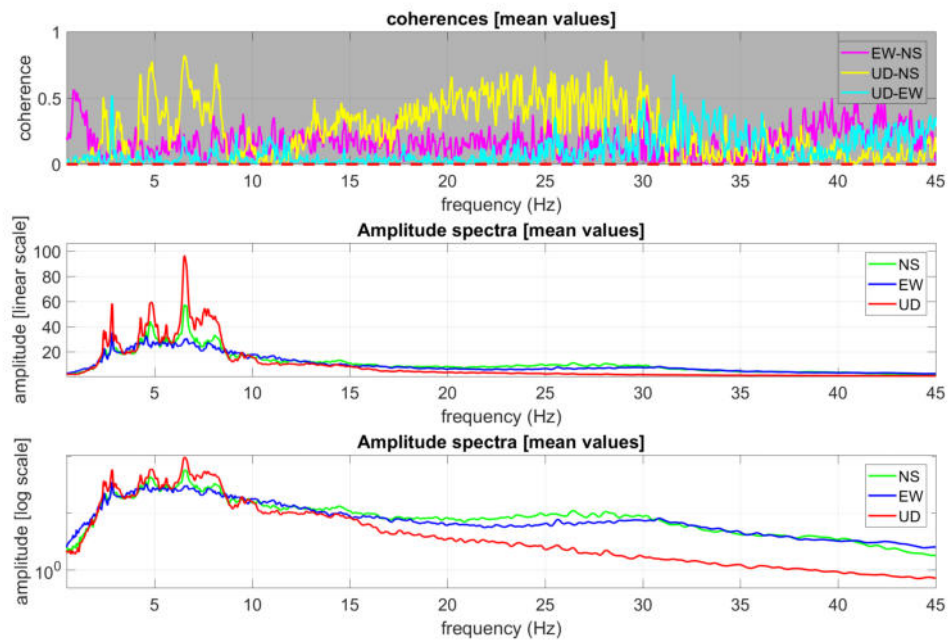


Directivity of the H/V Spectral Ratio

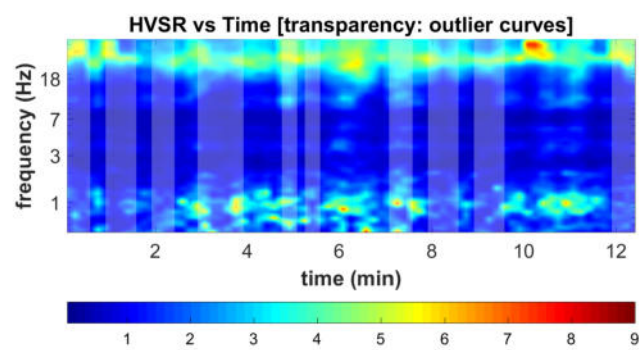
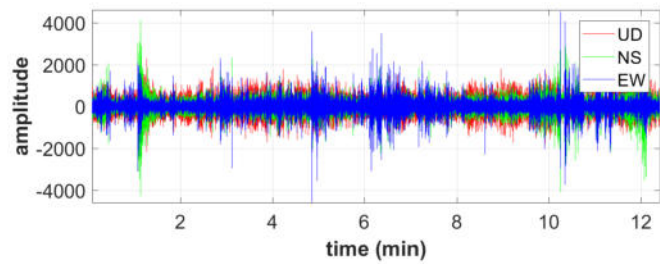


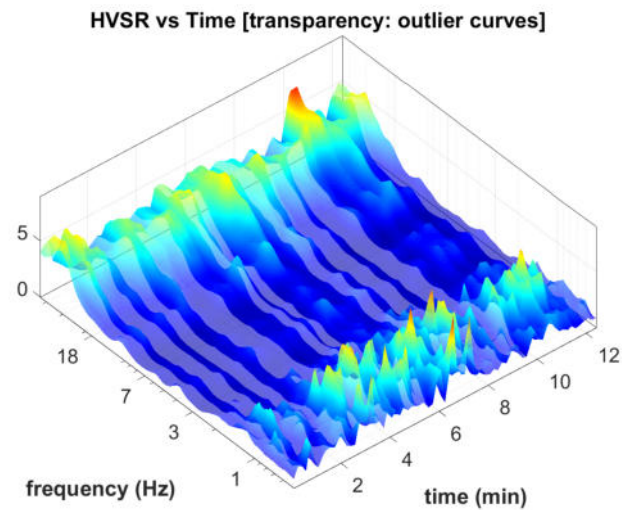
HVSR3



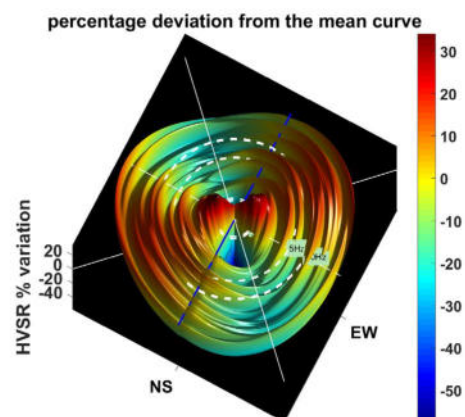
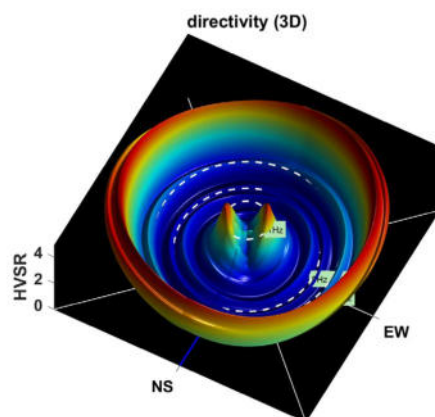
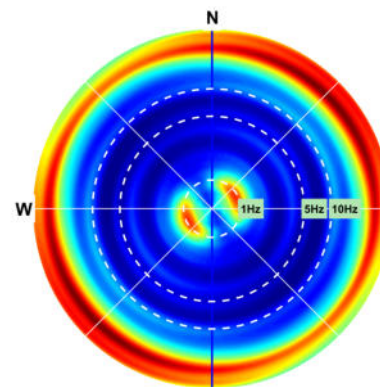
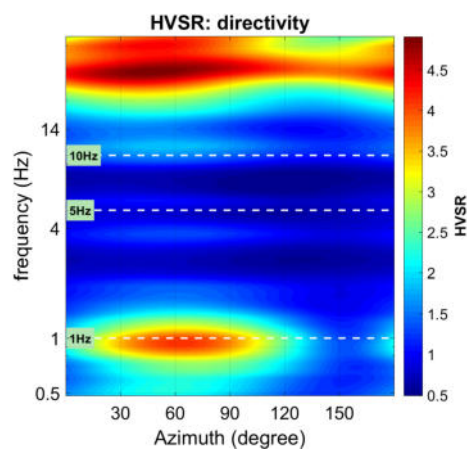


Continuity (Persistence) of the H/V Spectral Ratio

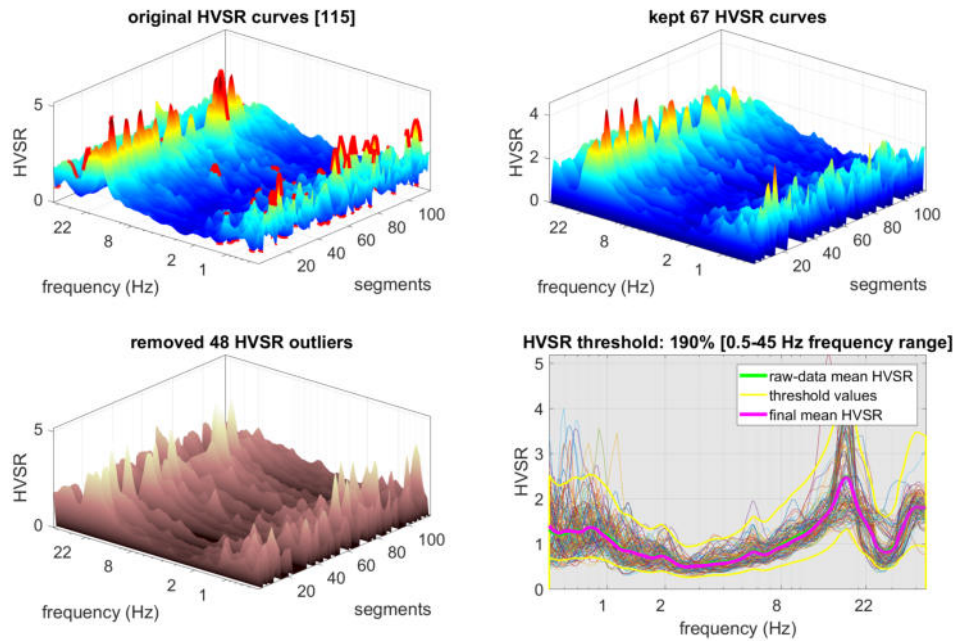




Directivity of the H/V Spectral Ratio



HVSR4



show current data

step1 (optional) - decimate

128 Hz

new frequency

sample

step2 - HV computation

remove events (both flat & T)

clean axes

20 window length (s)

5 tapering (%)

15 amplitude threshold

100 HVSR threshold

10% spectral smoothing (triangular window)

5 detrending order

no equalization

full export

show window, all HVSRs, time lapse videos

close windows

save videos

quadratic mean

compute

continuity

show 3D medium

directivity analysis

frequencies to highlight

compute

save - optional: save HVSR as it is

save HV from 0.5 to 45 Hz

save HV curve (as .txt)

picking HV or amplitude spectra

HVSR

pick data

save picked HV

compute

quick analysis (P-Vu/4H)

average (Vs (m/s))

200 (from surface to bedrock)

20 depth of the bedrock (m)

1000 Vs of the bedrock

clean

compute

highlight a frequency

show/hide/highlight

10 Hz

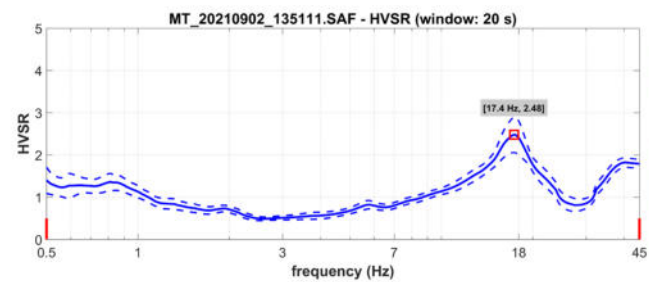
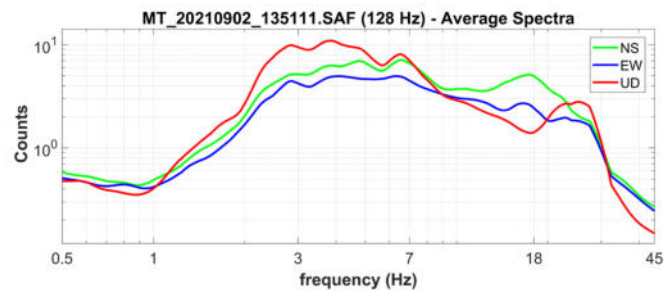
upload HVSR curve

directivity over time

directivity in time

time

60 s



open working folder

show location

show videos

your comments

default axes

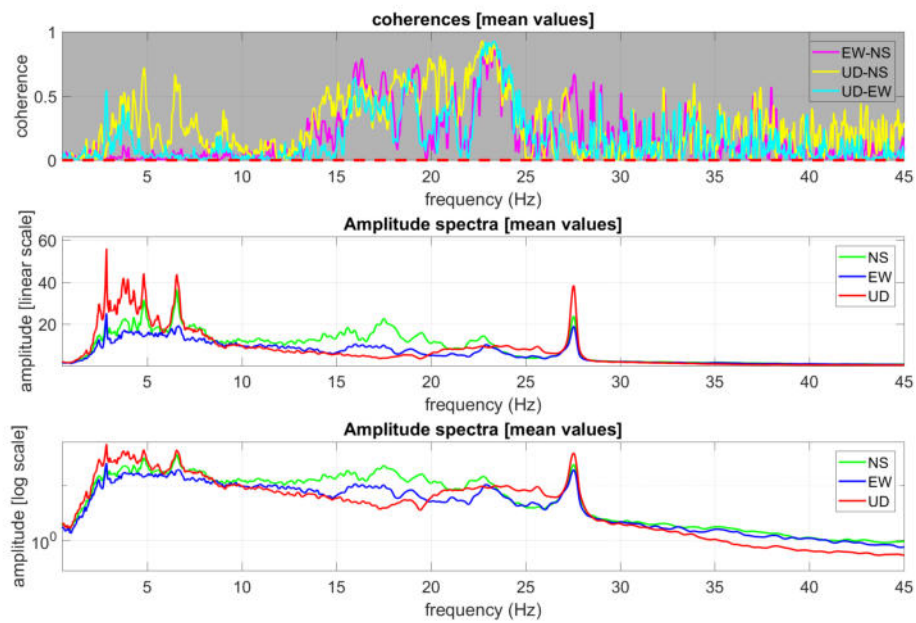
Criteria for a reliable HV curve

NS	OK
EW	OK
UD	OK

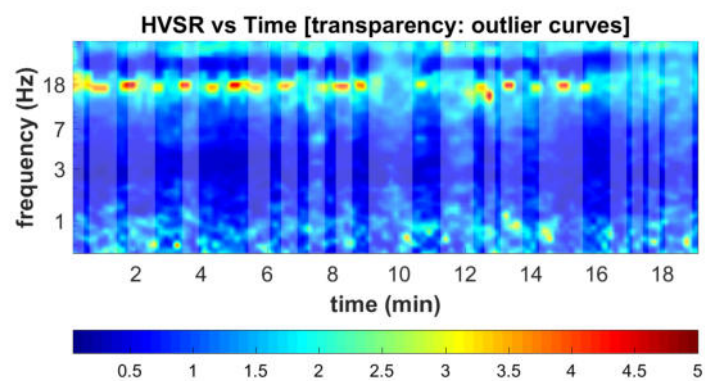
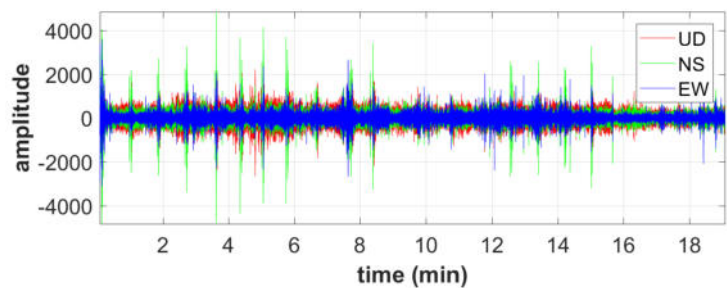
Criteria for a clear HV peak [17.4 Hz]

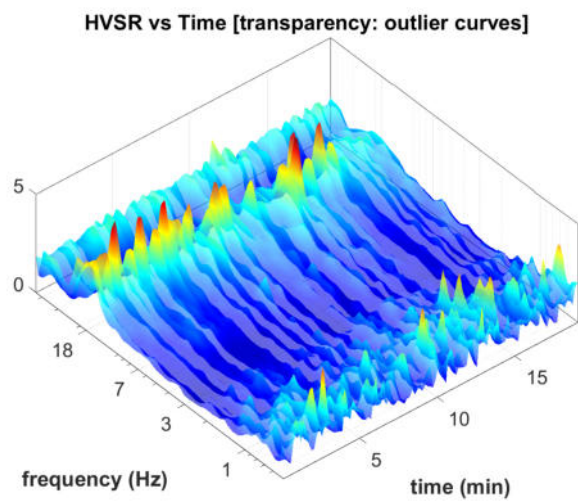
NS	OK
EW	OK
UD	OK

To model the HVSR (also jointly with MASW or ReMIESAC data), go to the "Velocity Spectrum/x, Modeling & Picking" panels and upload the saved HV curve

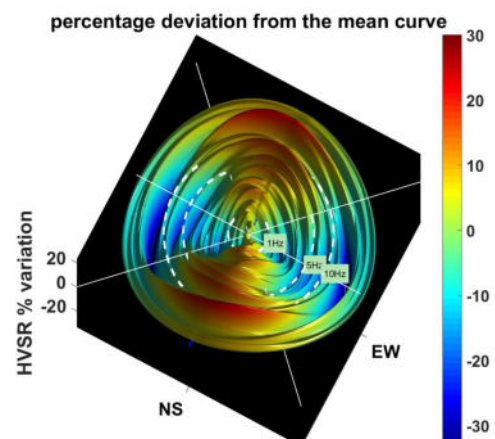
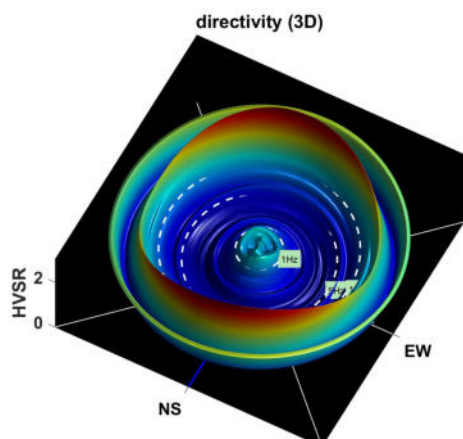
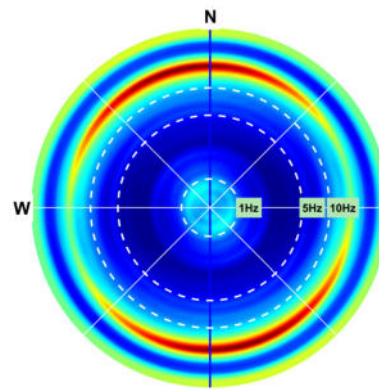
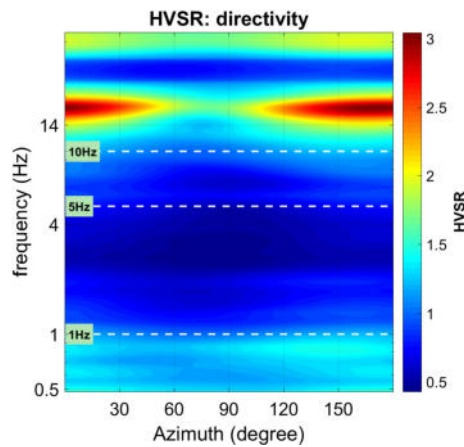


Continuity (Persistence) of the H/V Spectral Ratio

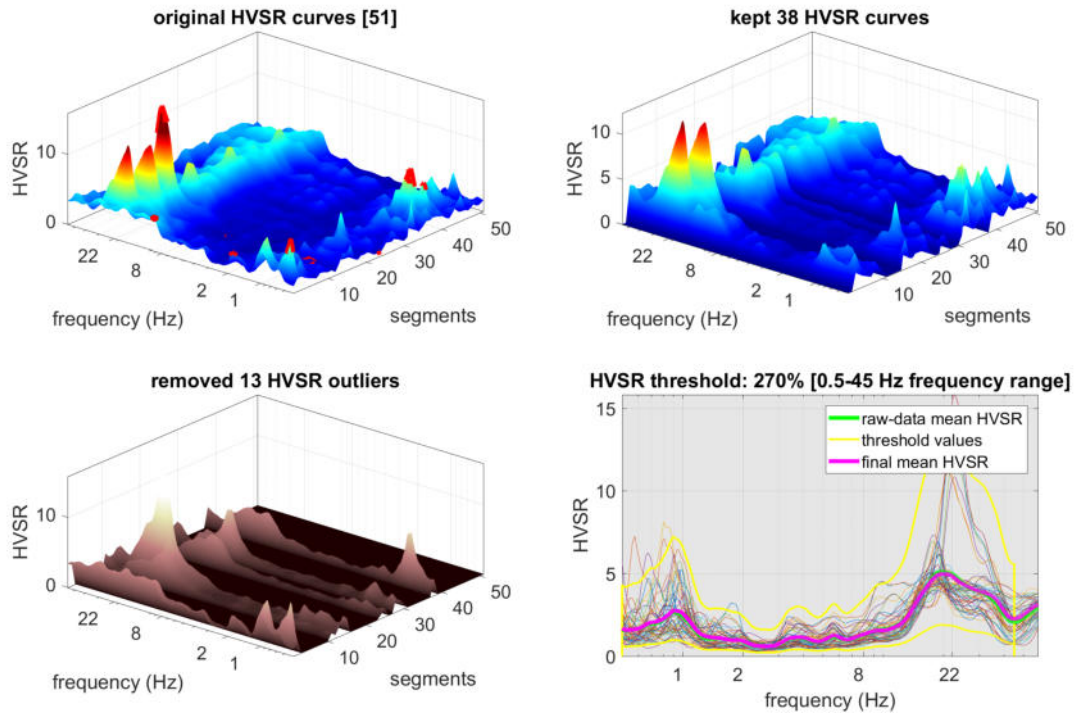




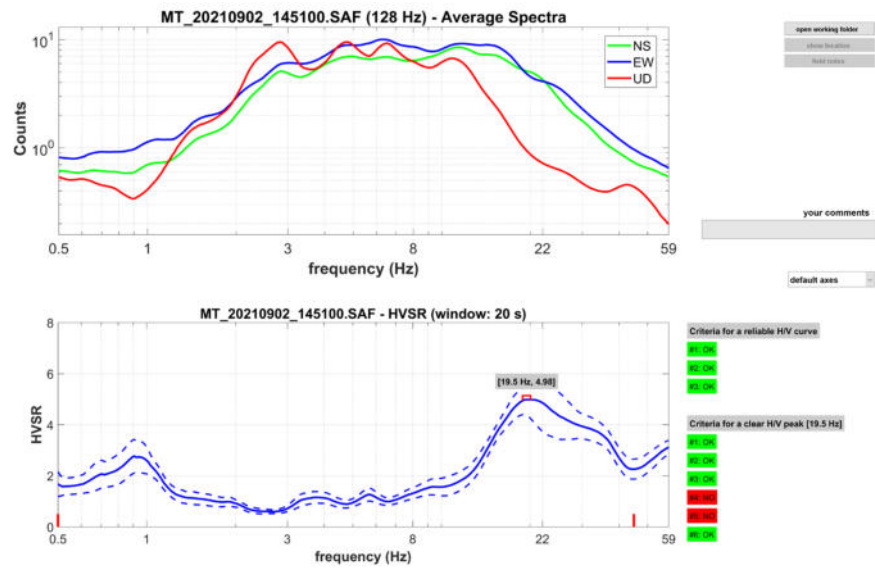
Directivity of the H/V Spectral Ratio



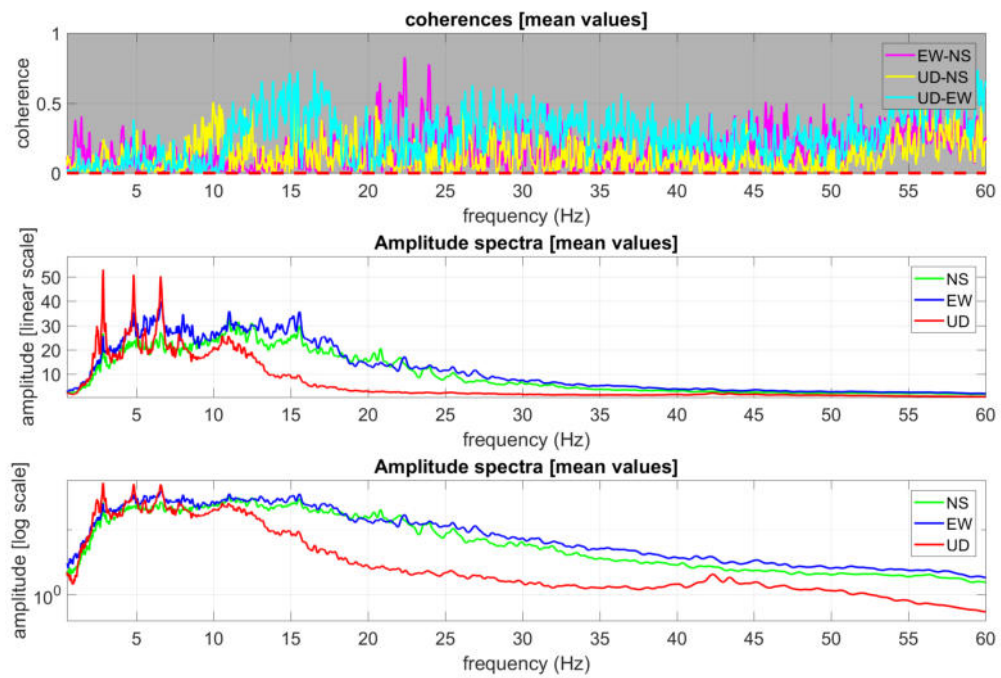
HVSR5



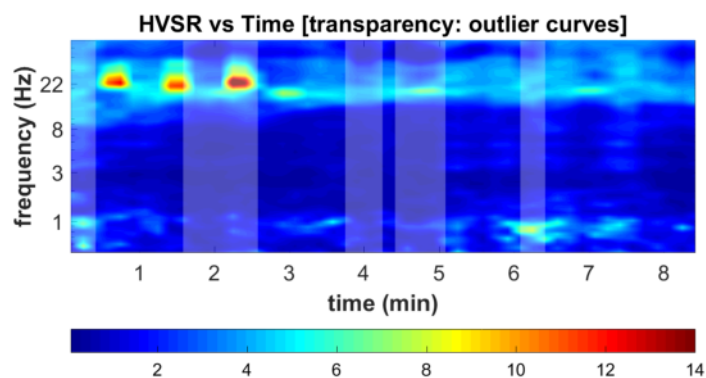
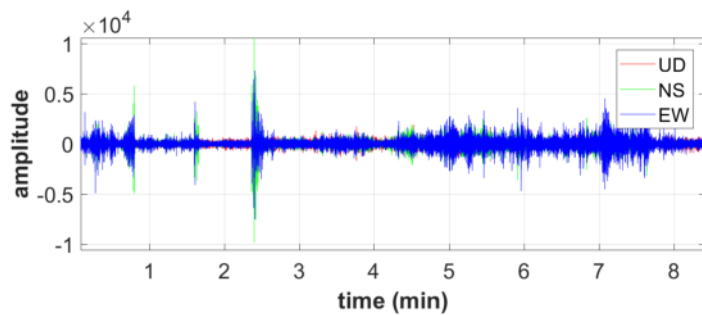
The screenshot shows the HVSR5 software interface with various analysis parameters and options. The interface includes sections for 'step1 (optional) - decimate', 'step2 - HV computation', 'directivity analysis', and 'quick analysis (H/V ratio)'. The 'step2 - HV computation' section includes parameters for 'remove events', 'window length', 'tapering', 'amplitude threshold', 'HVSR threshold', 'spectral smoothing', and 'directional order'. The 'directivity analysis' section includes parameters for 'frequency to highlight', 'save HVSR as it is', 'save HV curve as it is', and 'picking HV or amplitude spectra'. The 'quick analysis (H/V ratio)' section includes parameters for 'average V/V ratio', 'depth of the bedrock', and 'V/V of the bedrock'.



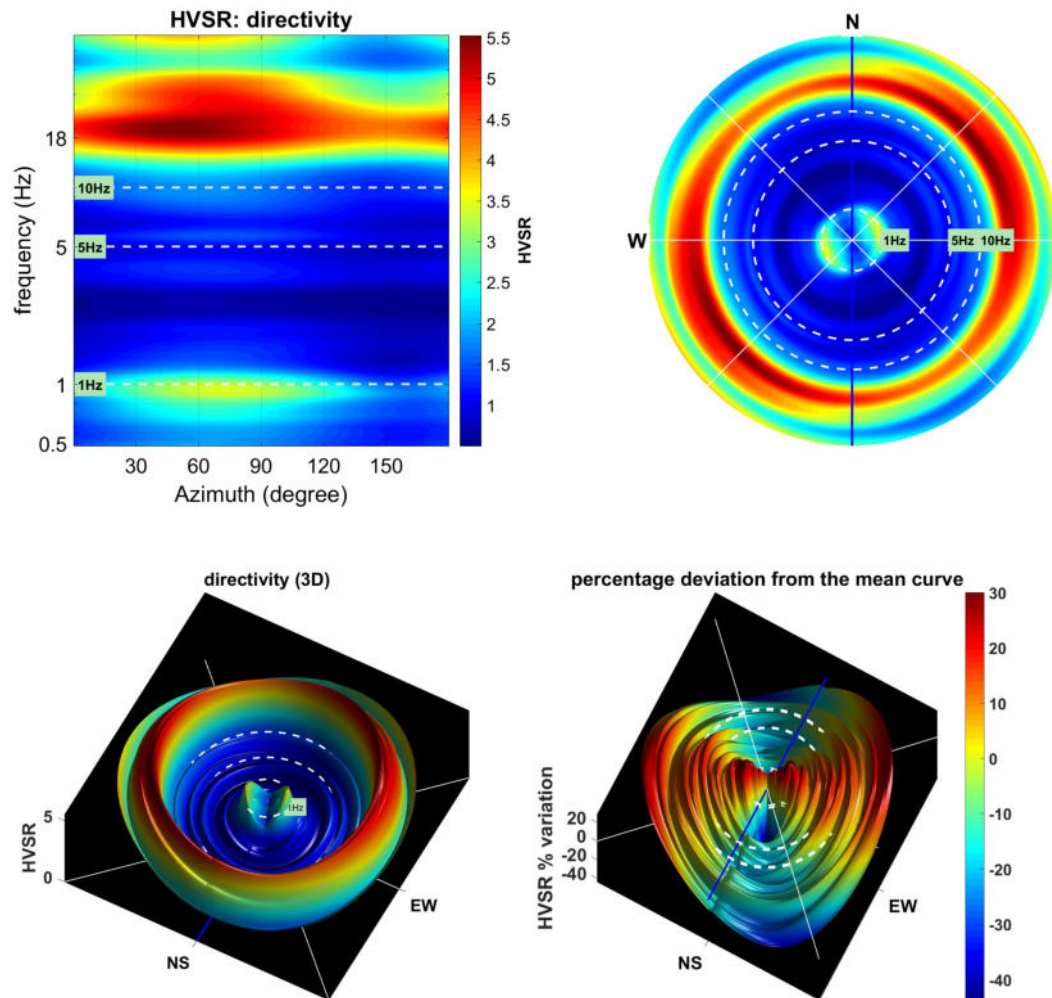
To model the HVSR (also jointly with MASW or ReMi/ESAC data), go to the "Velocity Spectrometry, Modeling & Picking" panels and upload the saved HV curve



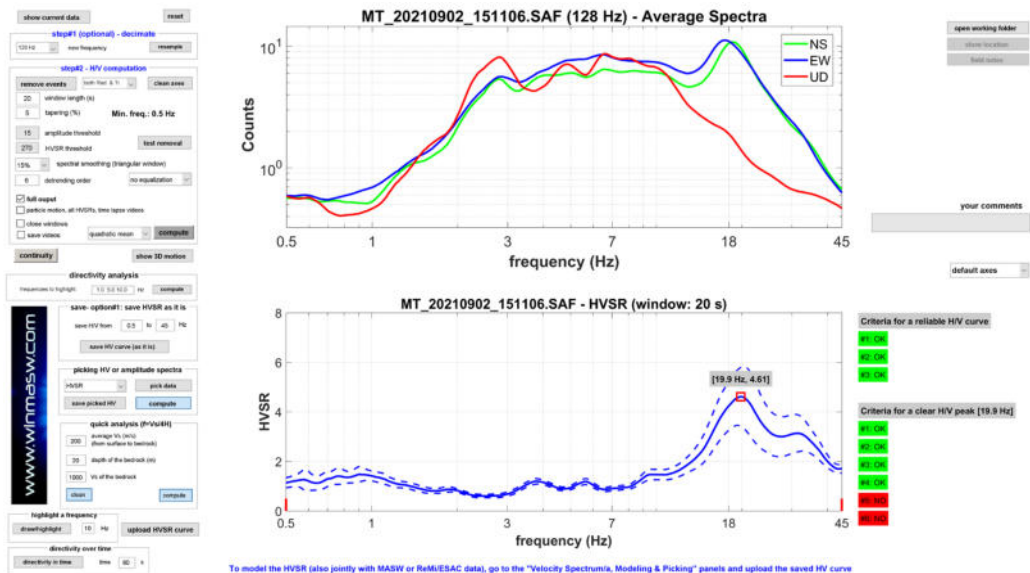
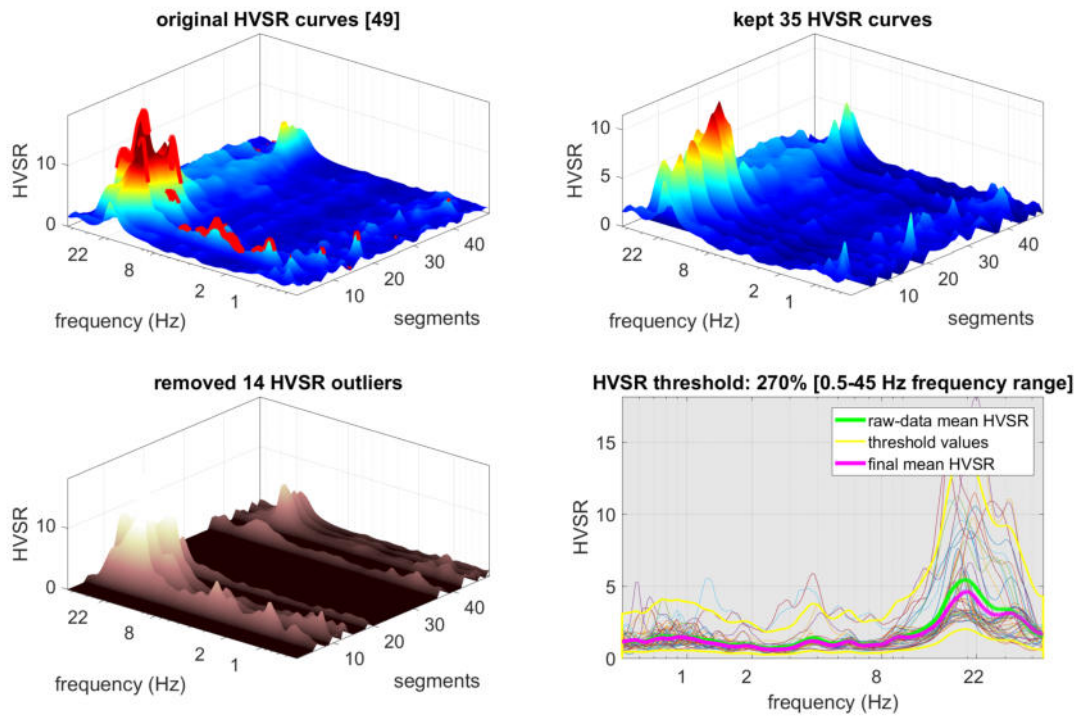
Continuity (Persistence) of the H/V Spectral Ratio



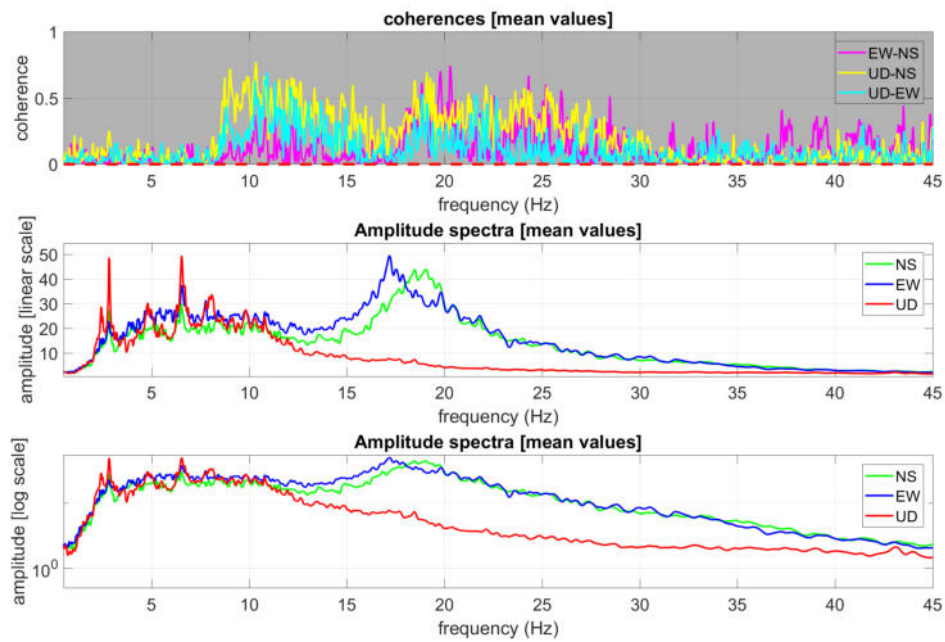
Directivity of the H/V Spectral Ratio



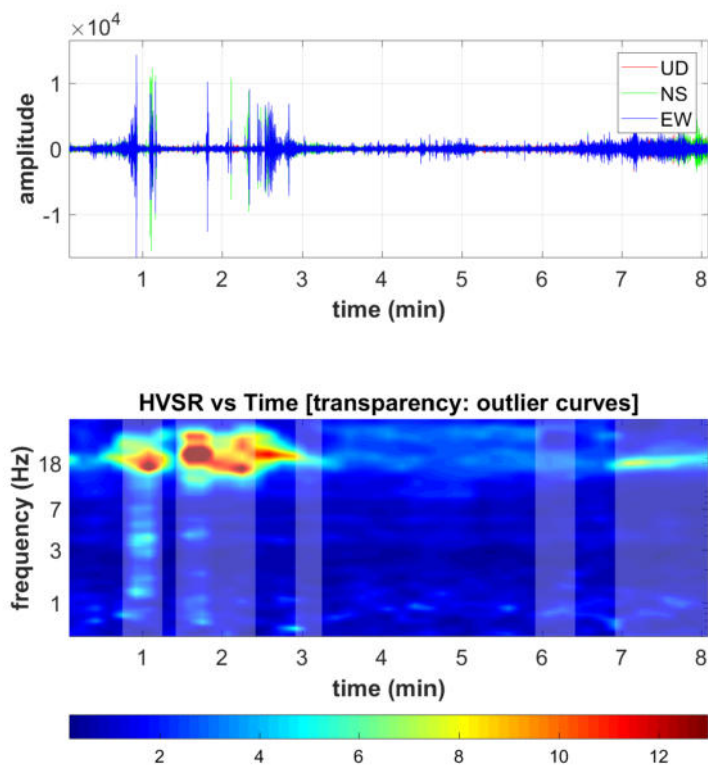
HVSR6

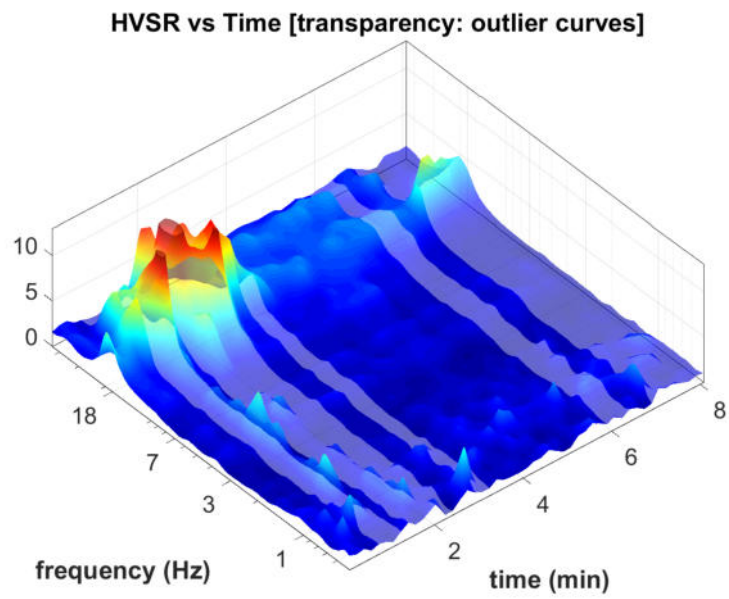


To model the HVSR (also jointly with MASW or ReMi/ESAC data), go to the "Velocity Spectromia, Modeling & Picking" panels and upload the saved HV curve

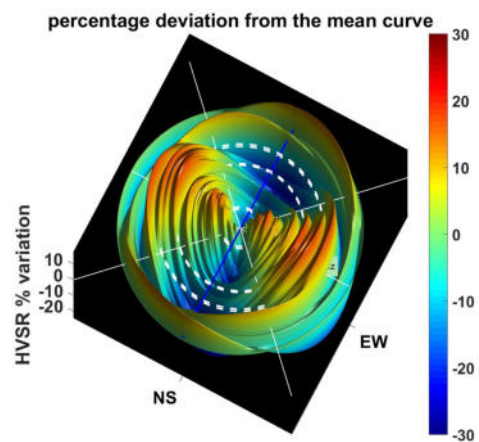
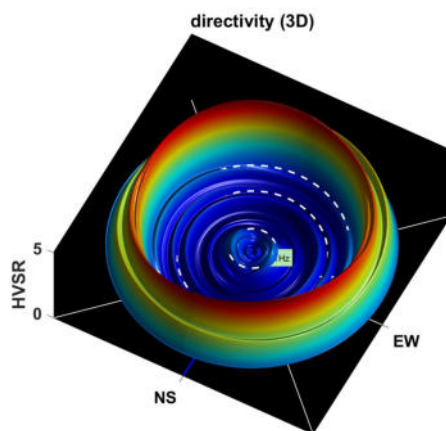
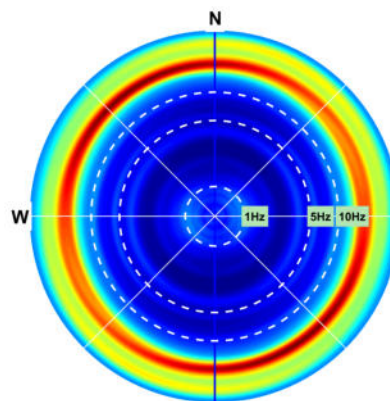
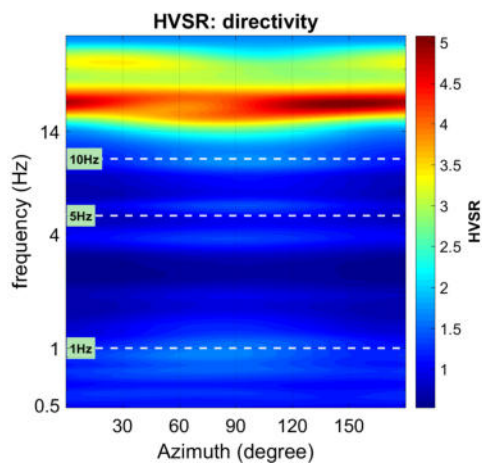


Continuity (Persistence) of the H/V Spectral Ratio



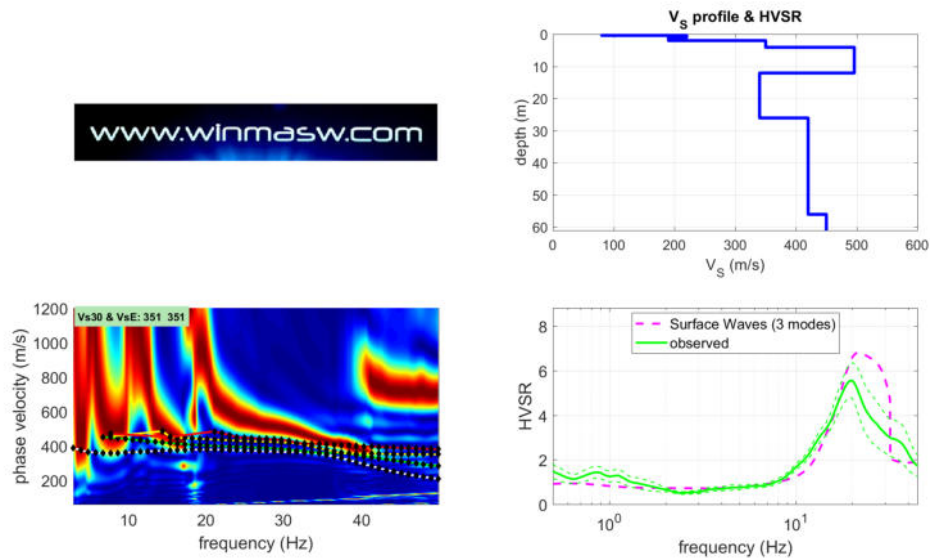


Directivity of the H/V Spectral Ratio



- 8. ELABORATI DELL'INDAGINE MASW

MASW1



Subsurface Model

V_s (m/s): 80 220 190 350 496 340 420 450

Thickness (m): 0.4, 0.6, 1.0, 2.1, 8.0, 14.0, 30.0

Density (gr/cm³) (approximate values): 1.70 1.82 2.32 2.27 2.04 2.46 1.99 2.02

Shear modulus (MPa) (approximate values): 11 88 84 278 502 285 351 408

Analyzing Phase velocities

Analysis: Rayleigh Waves

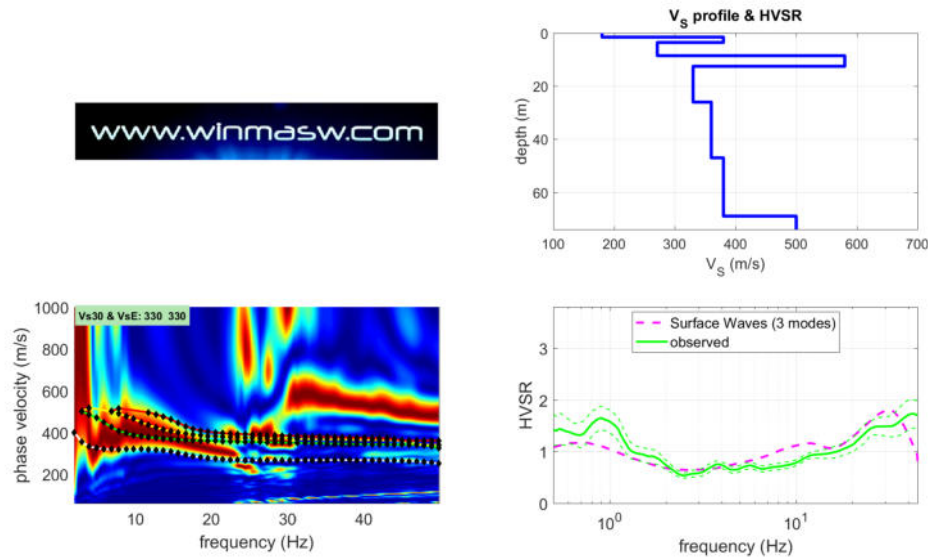
Approximate values for V_p and Poisson

V_p (m/s): 226 384 3014 2443 948 5387 766 858

Poisson: 0.43 0.26 0.50 0.49 0.31 0.50 0.29 0.31

V_{s30} and V_{sE} (m/s): 351 351

MASW2



Subsurface Model

V_s (m/s): 180 380 271 580 330 360 380 500

Thickness (m): 1.5, 2.0, 5.0, 4.0, 13.5, 21.0, 22.0

Density (gr/cm³) (approximate values): 1.86 1.94 1.95 2.13 1.94 2.05 1.97 2.00

Shear modulus (MPa) (approximate values): 60 280 143 717 212 265 285 501

Analyzing Phase velocities

Analysis: Rayleigh Waves

Approximate values for V_p and Poisson

V_p (m/s): 444 622 658 1377 636 967 721 810

Poisson: 0.40 0.20 0.40 0.39 0.32 0.42 0.31 0.19

V_{s30} and V_{sE} (m/s): 330 330

- 9. ELABORATI DELLE INDAGINI HOLISURFACE

HS1

Subsurface model

Shear-wave velocities (m/s): 90 284 209 383 609 612 350 298 430 525 318 859

Thicknesses (m): 0.3 0.5 0.9 2.3 4.6 6.3 6.0 5.1 17.2 13.8 26.4

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 13 156 81 295 794 802 244 173 378

579 199 1649

Vs30 and VsE @ surface (m/s): 388, 388

model (Vs30 & VsE @ surface: 388 388)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	90	0.3400	0.3400
2	284	0.4900	0.8300
3	209	0.9400	1.7700
4	383	2.2900	4.0600
5	609	4.5800	8.6400
6	612	6.2500	14.8900
7	350	6.0100	20.9000
8	298	5.1300	26.0300
9	430	17.2300	43.2600
10	525	13.7600	57.0200
11	318	26.3500	83.3700
12	859	0	0

HS2

Subsurface model

Shear-wave velocities (m/s): 79 252 199 479 254 627 282 372 341 370 465 785

Thicknesses (m): 0.3 0.3 0.7 1.8 5.5 4.3 5.5 4.0 24.7 27.3 24.9

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 10 121 73 476 123 845 154 278

231 274 447 1362

Vs30 and VsE @ surface (m/s): 322, 322

model (Vs30 & VsE @ surface: 322 322)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	79	0.2800	0.2800
2	252	0.2800	0.5600
3	199	0.7000	1.2600
4	479	1.8000	3.0600
5	254	5.4600	8.5200
6	627	4.2900	12.8100
7	282	5.5000	18.3100
8	372	4	22.3100
9	341	24.7100	47.0200
10	370	27.3000	74.3200
11	465	24.8700	99.1900
12	785	0	0

HS3

Subsurface model

Shear-wave velocities (m/s): 97 294 183 326 335 323 428 417 413 497 517 823

Thicknesses (m): 0.6 0.6 1.2 3.4 9.1 7.1 8.5 8.2 18.4 30.7 39.0

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 15 168 61 209 222 205 375 354
347 515 560 1506

Vs30 and VsE @ surface (m/s): 322, 322

model (Vs30 & VsE @ surface: 322 322)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	97	0.6300	0.6300
2	294	0.6000	1.2300
3	183	1.1700	2.4000
4	326	3.4400	5.8400
5	335	9.1400	14.9800
6	323	7.0600	22.0400
7	428	8.4800	30.5200
8	417	8.1700	38.6900
9	413	18.3900	57.0800
10	497	30.6600	87.7400
11	517	38.9600	126.70...
12	823	0	0

HS4

Subsurface model

Shear-wave velocities (m/s): 148 200 277 721 519 360 495 399 460 569 426 856

Thicknesses (m): 0.8 0.8 2.8 4.0 4.9 3.3 5.7 9.8 26.2 13.6 53.5

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 38 74 148 1137 565 259 511 322
437 687 371 1637

Vs30 and VsE @ surface (m/s): 404, 404

model (Vs30 & VsE @ surface: 404 404

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	148	0.7500	0.7500
2	200	0.7700	1.5200
3	277	2.8000	4.3200
4	721	3.9500	8.2700
5	519	4.8700	13.1400
6	360	3.2900	16.4300
7	495	5.6500	22.0800
8	399	9.7700	31.8500
9	460	26.1800	58.0300
10	569	13.5900	71.6200
11	426	53.5200	125.14...
12	856	0	0

HS5

Subsurface model

Shear-wave velocities (m/s): 90 292 345 472 350 400 282 361 396 501 575 1078

Thicknesses (m): 0.7 1.9 4.4 5.4 5.3 3.5 6.3 5.2 36.4 19.0 55.1

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 13 165 236 461 244 324 154 260
317 524 703 2669

Vs30 and VsE @ surface (m/s): 329, 329

model (Vs30 & VsE @ surface: 329 329)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	90	0.6600	0.6600
2	292	1.8500	2.5100
3	345	4.3700	6.8800
4	472	5.3900	12.2700
5	350	5.2600	17.5300
6	400	3.5000	21.0300
7	282	6.2800	27.3100
8	361	5.1500	32.4600
9	396	36.3600	68.8200
10	501	19.0100	87.8300
11	575	55.1100	142.94...
12	1078	0	0

HS6

Subsurface model

Shear-wave velocities (m/s): 108 265 401 671 427 475 278 504 628 516 374 1071

Thicknesses (m): 0.9 1.6 3.1 4.3 7.1 4.0 7.5 6.7 26.3 15.1 18.5

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 20 134 326 976 373 468 149 531

848 558 281 2632

Vs30 and VsE @ surface (m/s): 361, 361

model (Vs30 & VsE @ surface: 361 361)

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	108	0.8600	0.8600
2	265	1.5800	2.4400
3	401	3.1100	5.5500
4	671	4.3100	9.8600
5	427	7.1100	16.9700
6	475	3.9700	20.9400
7	278	7.4700	28.4100
8	504	6.6500	35.0600
9	628	26.3400	61.4000
10	516	15.0900	76.4900
11	374	18.5000	94.9900
12	1071	0	0

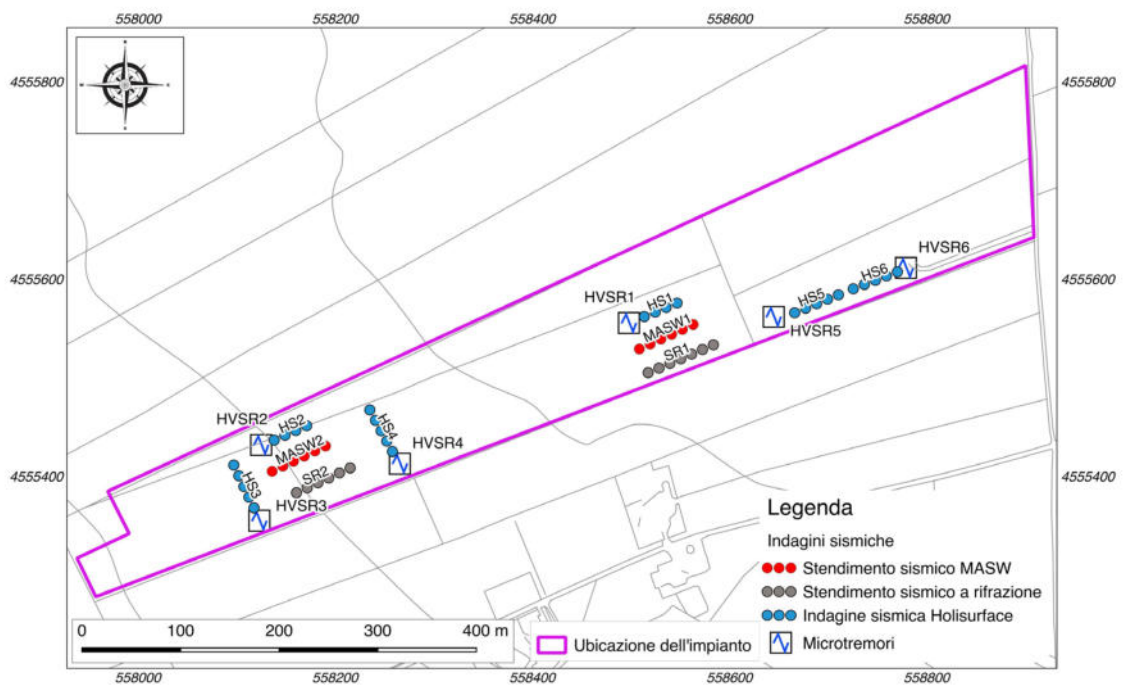


Fig. 1b