# Allegato 1 - Indagini sismiche integrative Comune di San Bartolomeo al Mare (IM)

## Misure di microtremore

Al fine di una copertura dell'area di studio sono state condotte quattordici misure di rumore ambientale (di cui alcune in corrispondenza delle linee sismiche o in corrispondenza di sondaggi geognostici a scopo di taratura), poi elaborate con la tecnica Nakamura (Nakamura, 1989). Procedura e risultati sono presentati nei paragrafi successivi.

### Metodo Nakamura

Il metodo Nakamura (Nakamura, 1989) è una tra le tecniche più utilizzate per lo studio della risposta sismica di un sito. Tale metodo, ormai consolidato a livello scientifico (es. SESAME Working Group, 2004; De Ferrari et al., 2008; Castellaro & Mulargia, 2009) ed in via di diffusione in ambito professionale, consente di determinare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno (o frequenza di risonanza), $f_0$, a partire da registrazioni di microtremore. Quest'ultimo si assume sia principalmente costituito da onde sismiche superficiali, nella fattispecie onde di Rayleigh. Il contrasto d'impedenza sismica tra gli strati di terreno superficiali ed il substrato roccioso è la causa dell'amplificazione al sito.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il metodo Nakamura è quella per cui la componente verticale del moto sia esente da effetti di amplificazione. Verificata tale ipotesi, la funzione di amplificazione è determinabile come il rapporto tra le componenti spettrali orizzontali (H) e quella verticale (V) di una stessa registrazione in superficie. Tale funzione è propriamente indicata come curva H/V (per questo spesso si parla di tecnica HVSR – *Horizontal to Vertical Spectral Ratio technique*) ed esprime la variazione dell'amplificazione del terreno in funzione della frequenza.

La frequenza di risonanza corrisponde al primo picco di amplificazione individuabile sulla curva H/V (con ampiezza maggiore di 2 in base a quanto indicato nelle linee guida stilate nell'ambito del progetto internazionale SESAME (SESAME Working Group, 2004)) e, nel caso di terreno a comportamento lineare, può essere messa in relazione allo spessore, $h$, e alla velocità media di propagazione delle onde di taglio, $V_S$, dei materiali sovrastanti il *bedrock* sismico (es. Kramer, 1996):

$$f_0 = \frac{V_S}{4h} \tag{2}$$

Si specifica che, per definizione, la curva H/V non può considerarsi quale significativa del livello assoluto di amplificazione del sito.

Nei paragrafi successivi sono descritte le procedure di acquisizione ed elaborazione del microtremore nonché l'analisi dei risultati.

## Elaborazione del microtremore

Come osservato precedentemente, il metodo Nakamura (Nakamura, 1989) consiste nel calcolo dei rapporti degli spettri di Fourier relativi alle componenti orizzontali e verticale del segnale registrato (rapporti H/V). Per ogni sito di misura saranno quindi calcolati due rapporti spettrali (poi mediati in fase di elaborazione): uno relativo alla componente Nord-Sud (NS) rispetto a quella verticale (Z) ed uno relativo alla componente Est-Ovest (EW) sempre rispetto alla verticale (Z).
Ai fini della determinazione dei rapporti H/V è stato impiegato il *software* di elaborazione Geopsy V. 2.6.3 (http://www.geopsy.org/). Ciascun segnale registrato è stato suddiviso in finestre temporali della durata di 30s ciascuna. Successivamente è stata effettuata un'analisi spettrale (calcolo dello spettro di Fourier) per ciascuna finestra e, al fine di eliminare eventuali *spike* (es. variazioni improvvise del segnale dovute a rumore antropico) e facilitare così l'interpretazione dei rapporti H/V, gli spettri di Fourier sono stati "lisciati" applicando una opportuna funzione di *smoothing* (funzione Konno & Ohmachi con coefficiente di *smoothing* uguale a 20).
Infine, la funzione di amplificazione è stata determinata come la media dei rapporti H/V degli spettri di Fourier relativi a ciascuna finestra di segnale. Le curve H/V così calcolate risultano quindi delle misure statistiche effettuate su diverse porzioni di segnale di ampiezza costante.

## Acquisizione del microtremore

L'acquisizione del rumore ambientale ha previsto l'installazione di una stazione sismica (velocimetro) per ogni sito di misura. La strumentazione adottata è elencata di seguito e mostrata nelle figure successive:

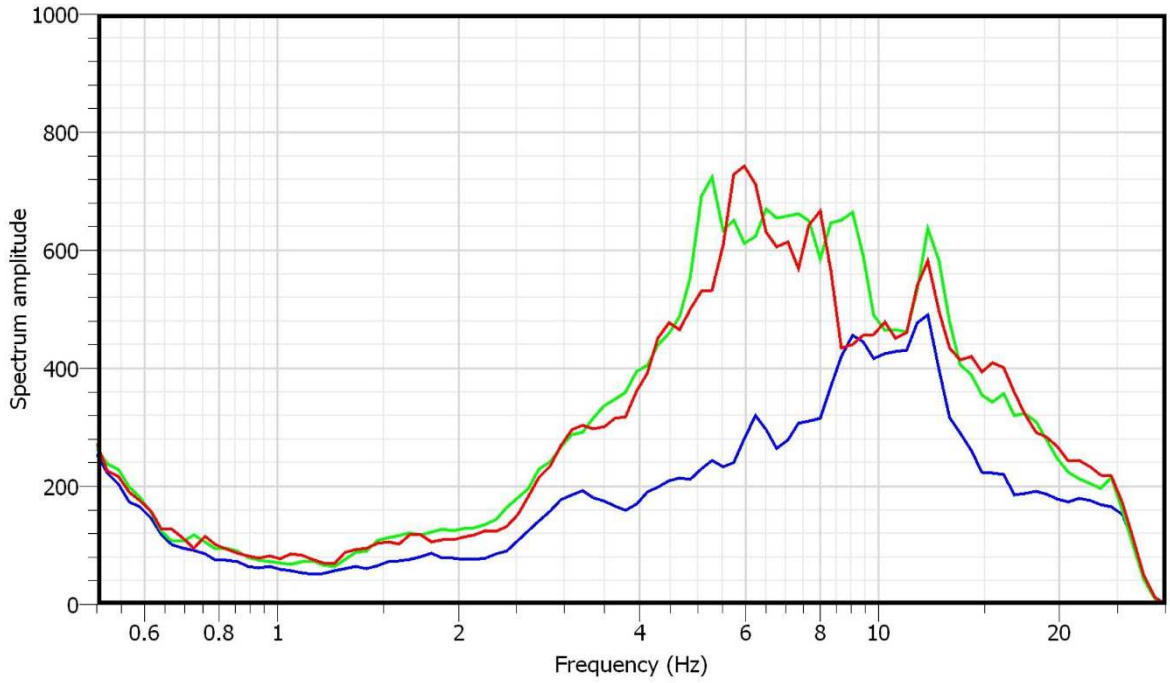
- **Sismometro triassiale (velocimetro):** Lennartz 5s (larghezza di banda: 0.01s – 5s).

- **Acquisitore:** Lennartz MarsLite (risoluzione strumentale: 24bit; dinamica strumentale: > 140db; frequenza di campionamento impostata a 62.5Hz).

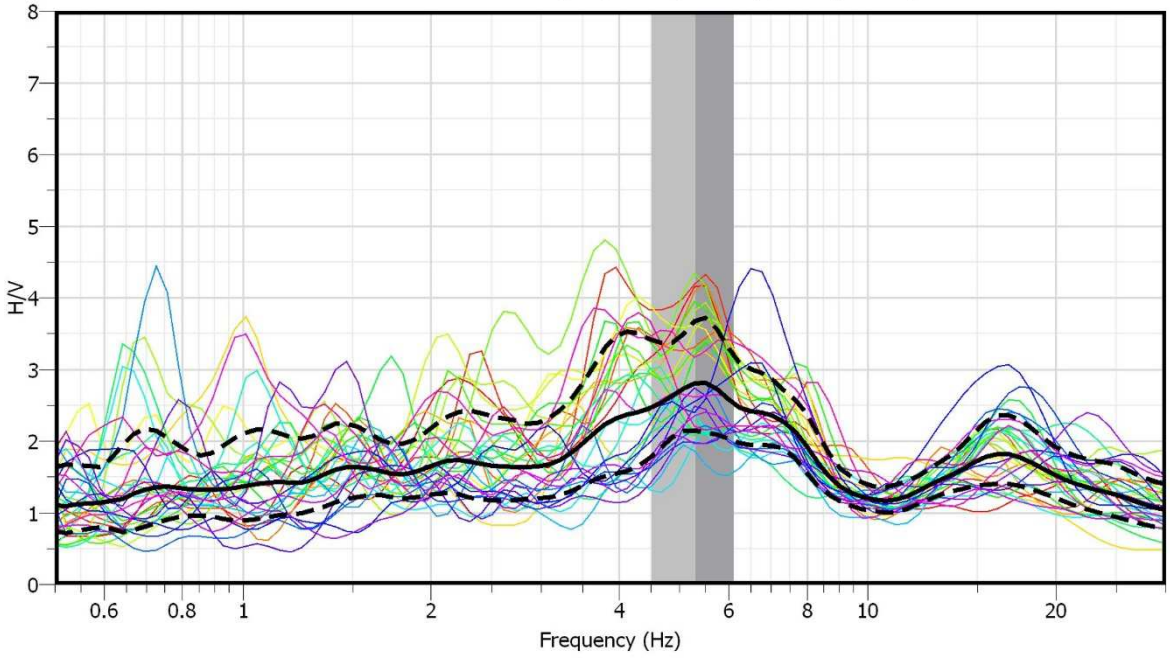
Le figure riportate di seguito mostrano gli spettri di Fourier calcolati per i 14 siti d'indagine per ciascuna componente del segnale acquisito (la curva blu è relativa alla componente V mentre le curve rossa e verde alle due orizzontali) e le relative curve H/V (determinate come la media delle curve H/V per le due componenti NS e EW). La linea continua rappresenta la curva media mentre quelle tratteggiate delimitano la banda d'incertezza.
Molte curve evidenziano fenomeni amplificativi di natura stratigrafica (più o meno evidenti) mentre alcune risultano di interpretazione incerta.

| Comune | Misura | $F_0$ (Hz) | Ampiezza | Qualità (Albarello Castellaro, 2011) |
|---|---|---|---|---|
| San Bartolomeo al Mare | SBM01 | 5,3 | 2,8 | A1 |
| | SBM02 | 18,7 | 3 | B1 |
| | SBM03 | 3,5 | 3 | A1 |
| | SBM04 | 8,7 | 3,7 | A1 |
| | SBM05 | 1,6 | 2,7 | A1 |
| | SBM06 | 1,4 | 2,3 | A1 |
| | SBM07 | 7,6 | 3,4 | A1 |
| | SBM08 | 14,5 | 2,6 | B1 |
| | SBM09 | 3,2 | 3,6 | C |
| | SBM10 | 7,1 | 1,9 | B1 |
| | SBM11 | 11,1 | 3,7 | A1 |
| | SBM12 | no amp | < 2 | B2 |
| | SBM13 | 13,8 | 2,7 | C |
| | SBM14 | 7,3 | 4,4 | A1 |

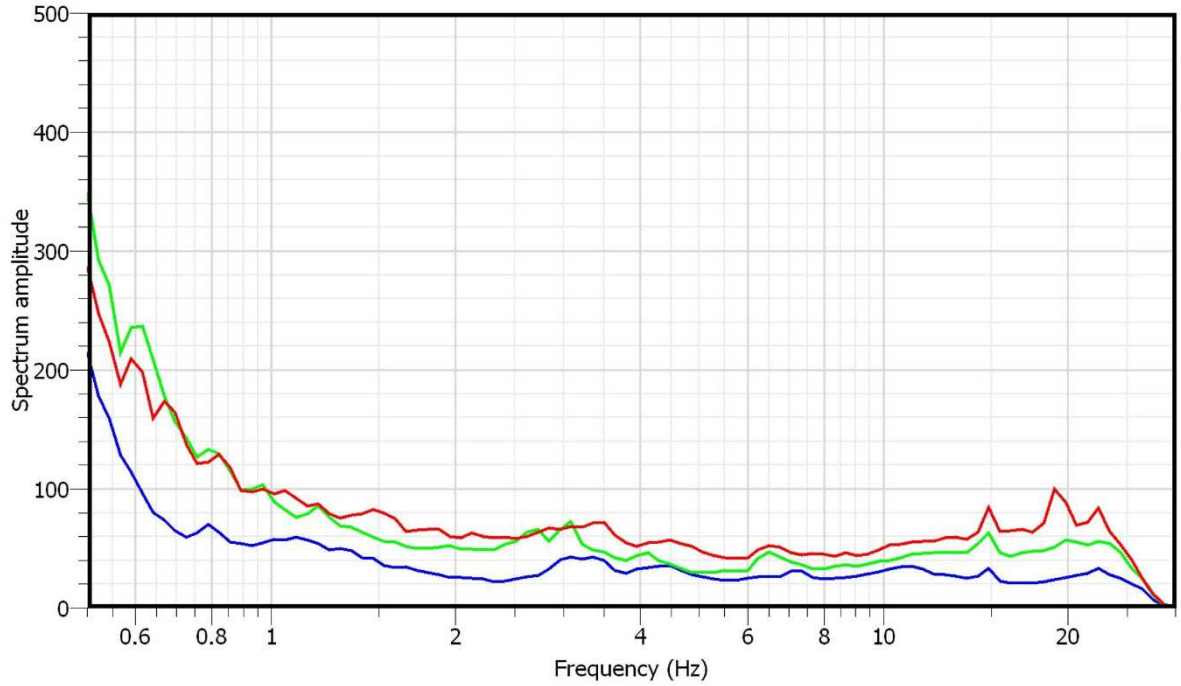
Nella tabella sopra si riportano i valori di frequenza fondamentale (F0), ampiezza del picco ottenuti per ciascun punto misura. Per ciascuna misura si è anche calcolato un indice di qualità così come definito dal Albarello e Castellaro (2011).



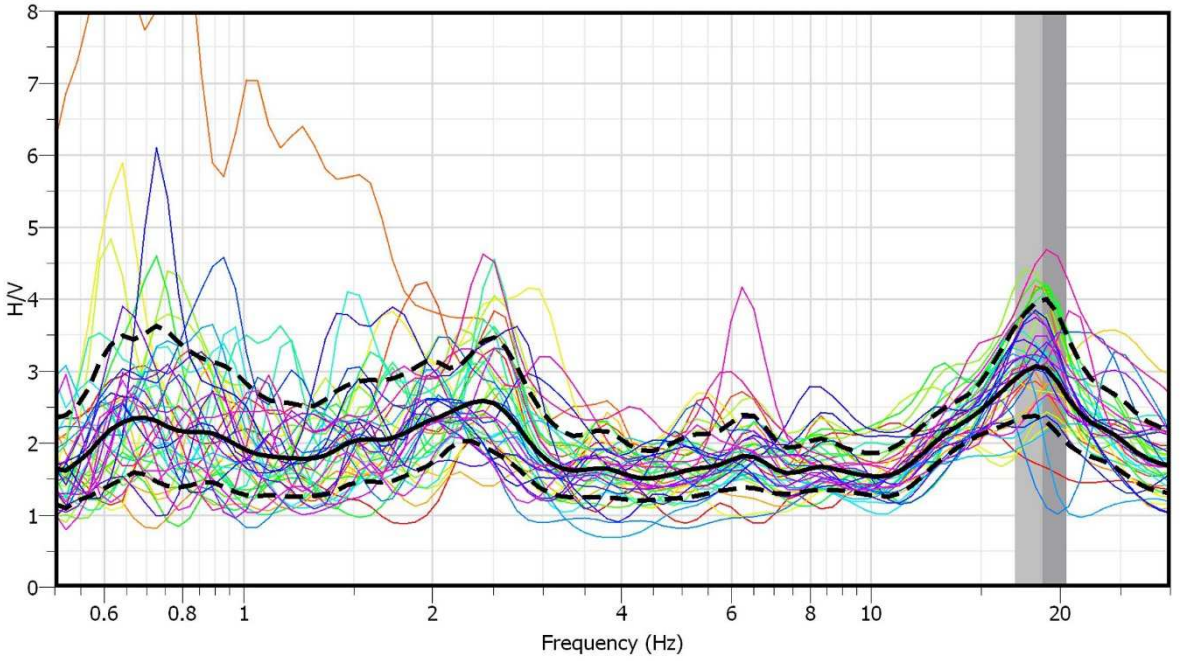

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM01: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



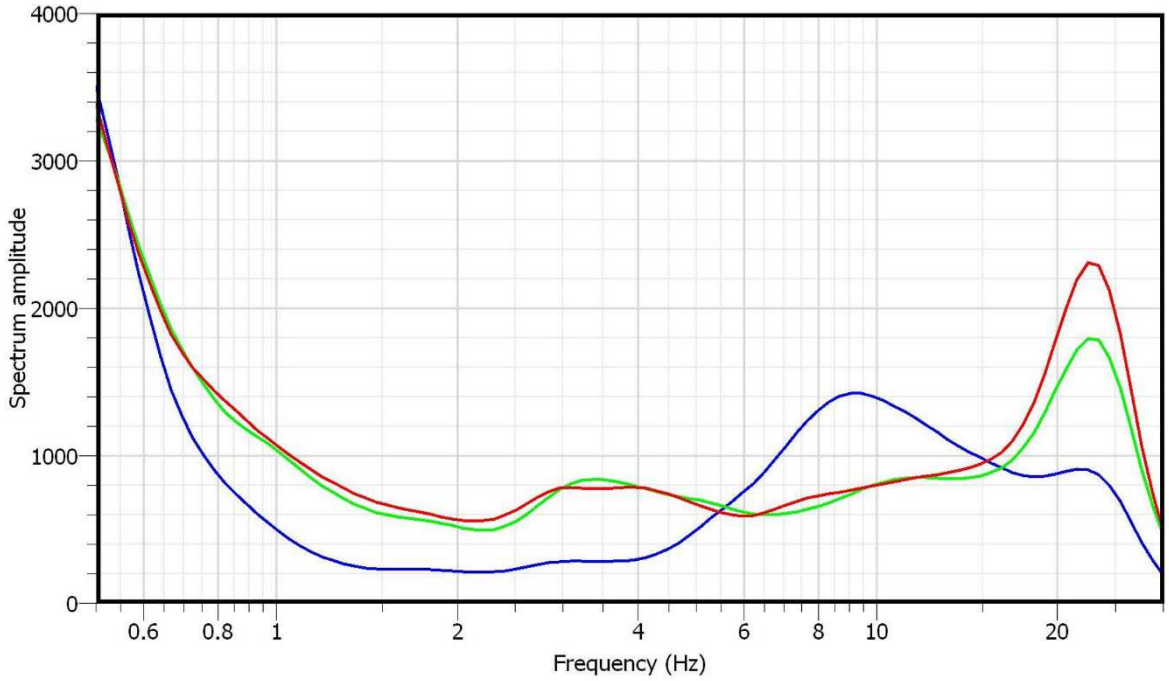

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM01: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



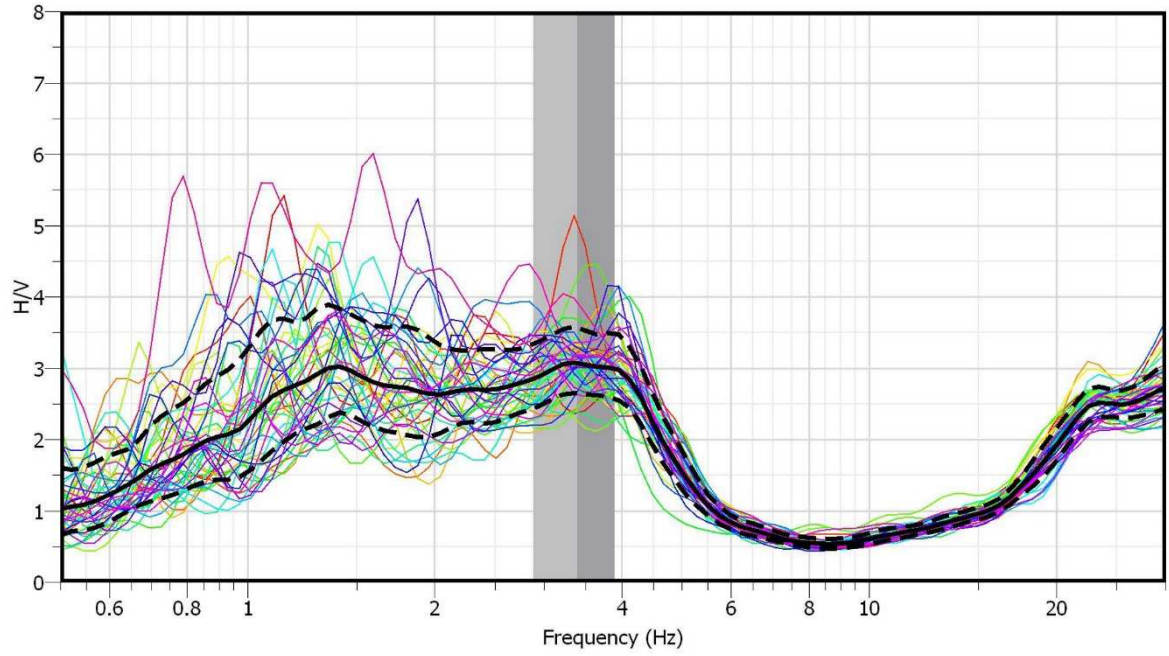

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM02: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



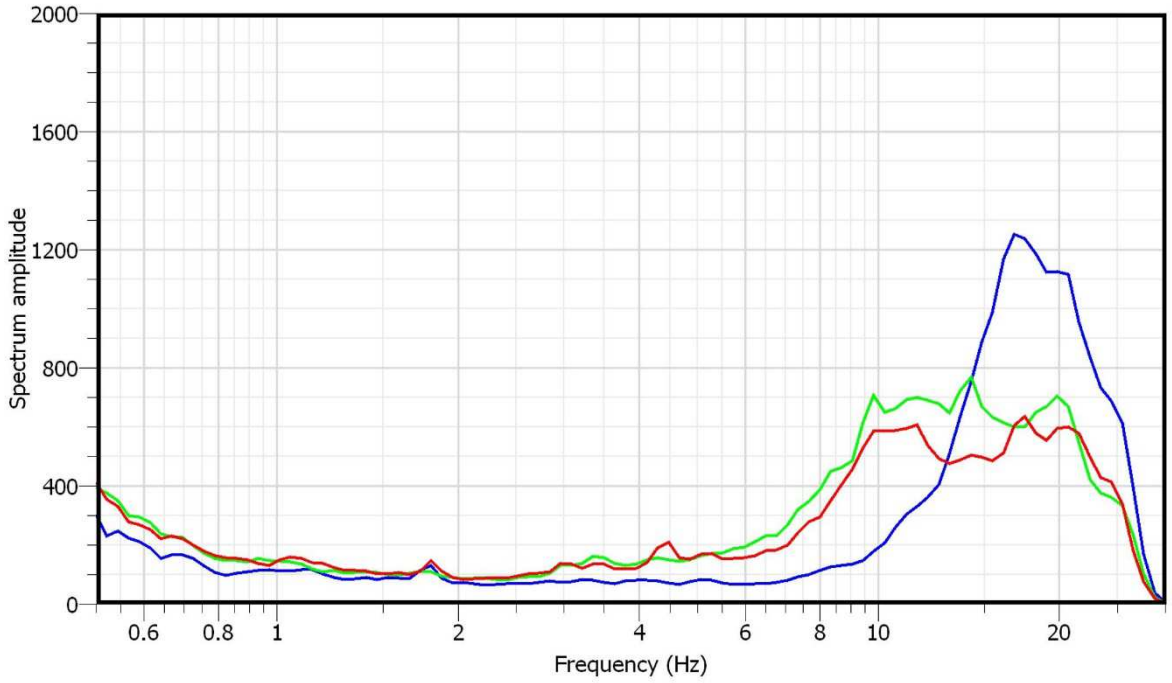

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM02: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



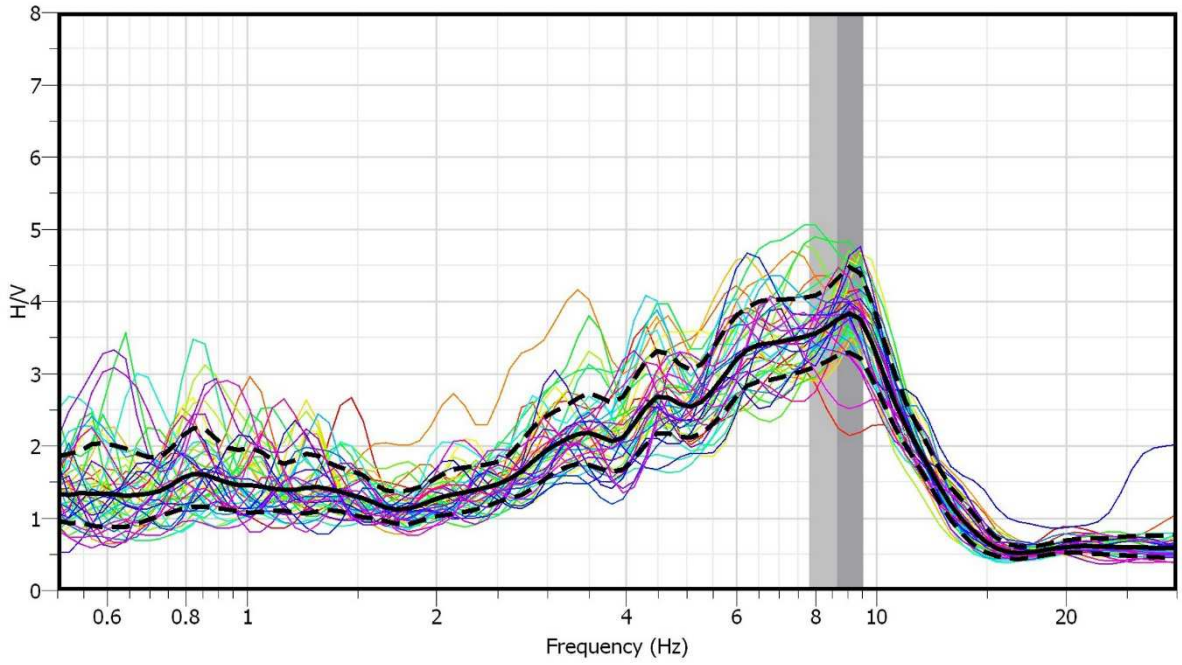

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM03: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



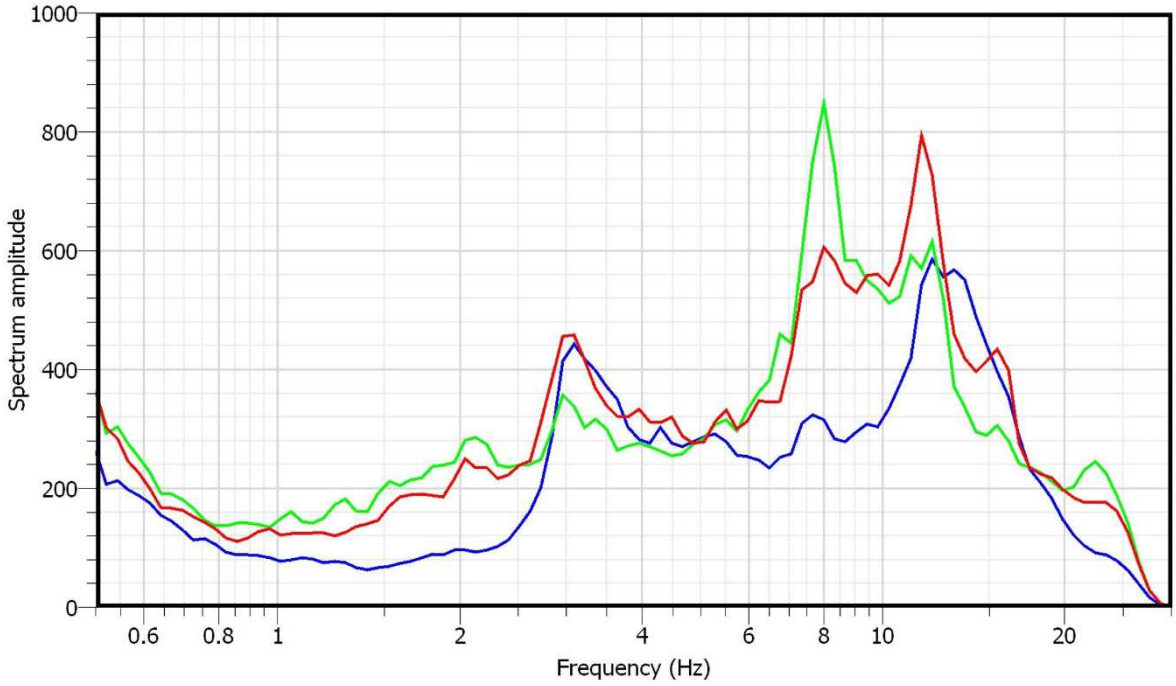

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM03: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



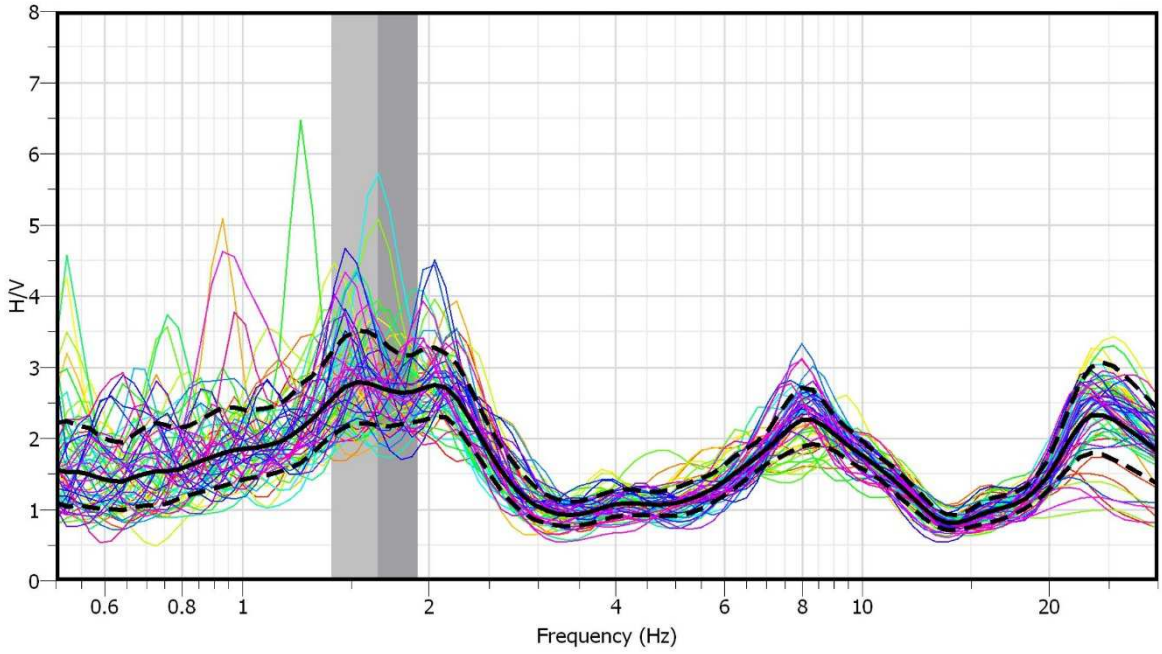

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM04: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



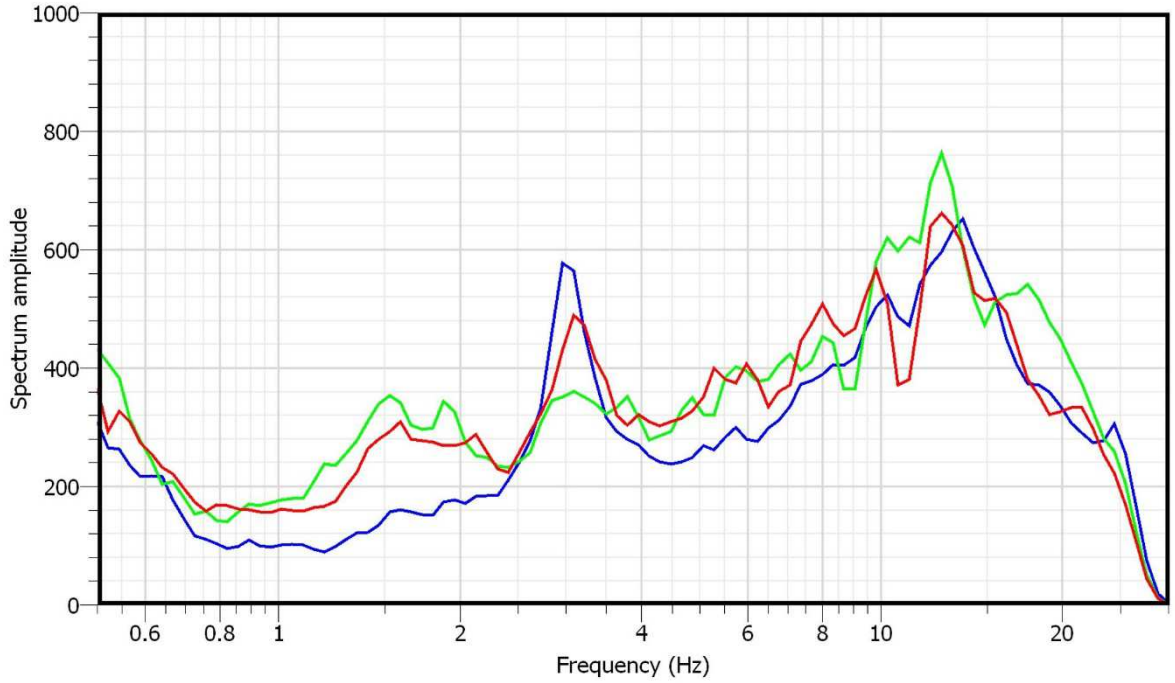

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM04: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



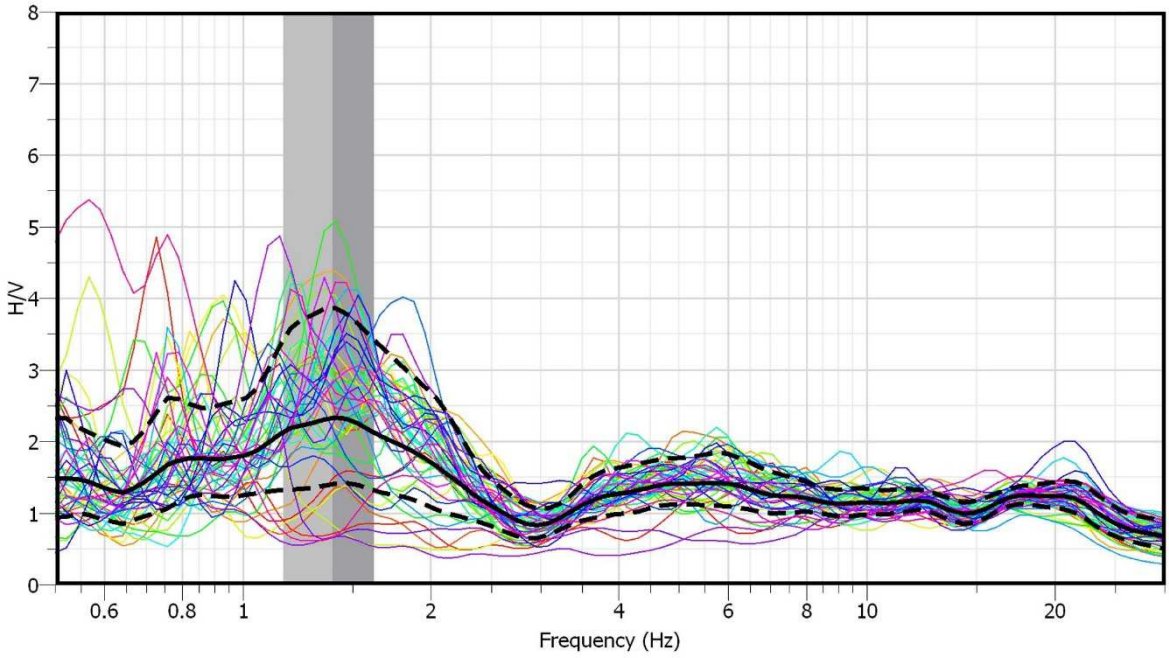

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM05: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



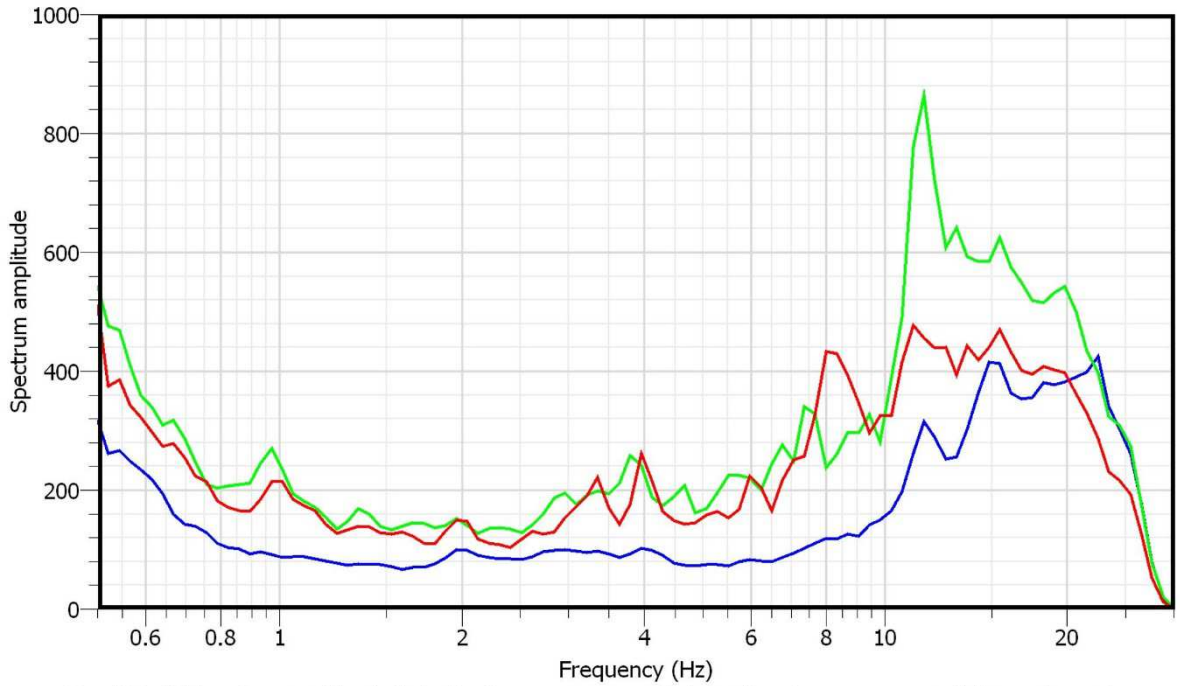

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM05: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



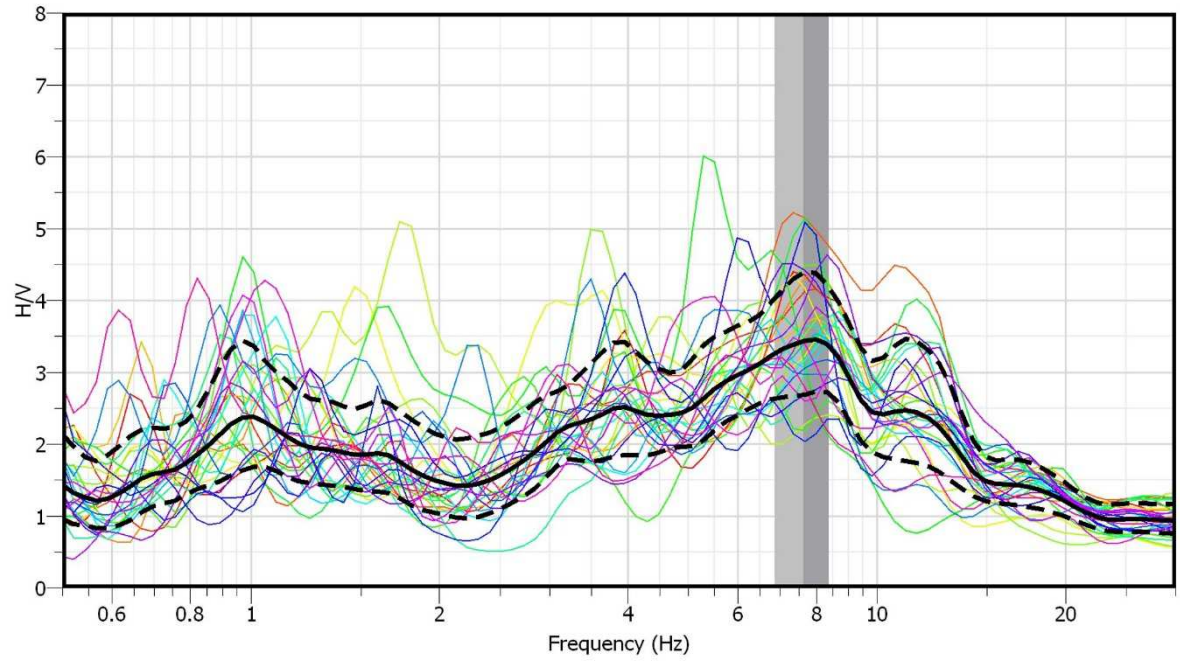

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM06: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



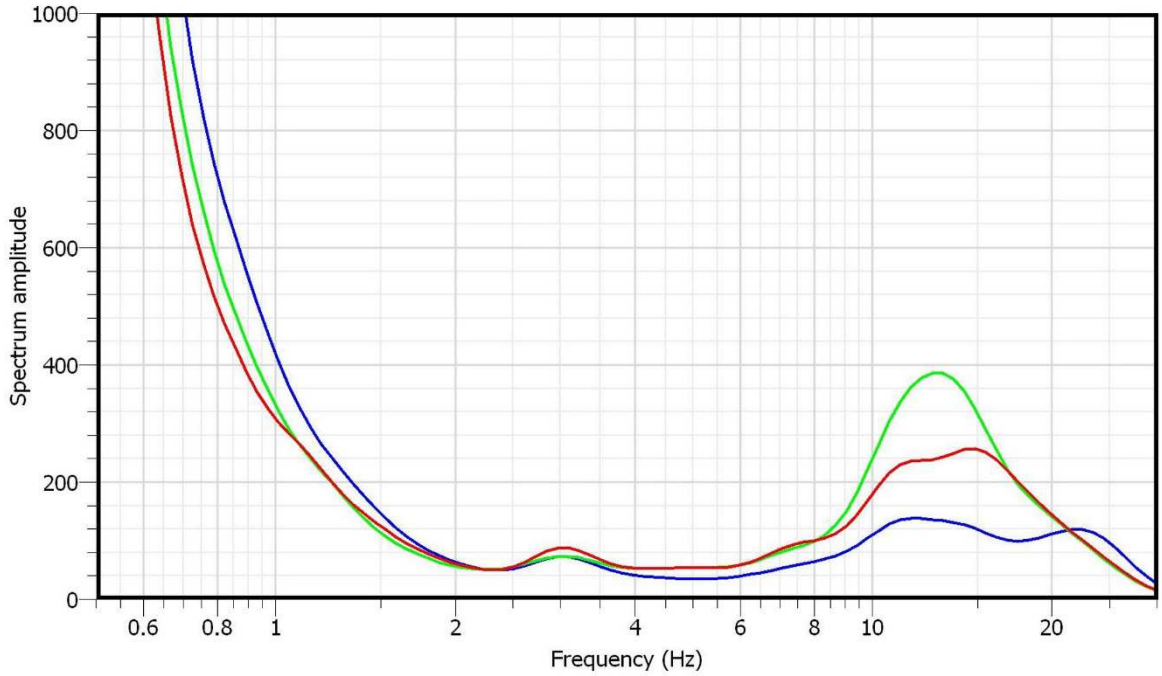

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM06: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



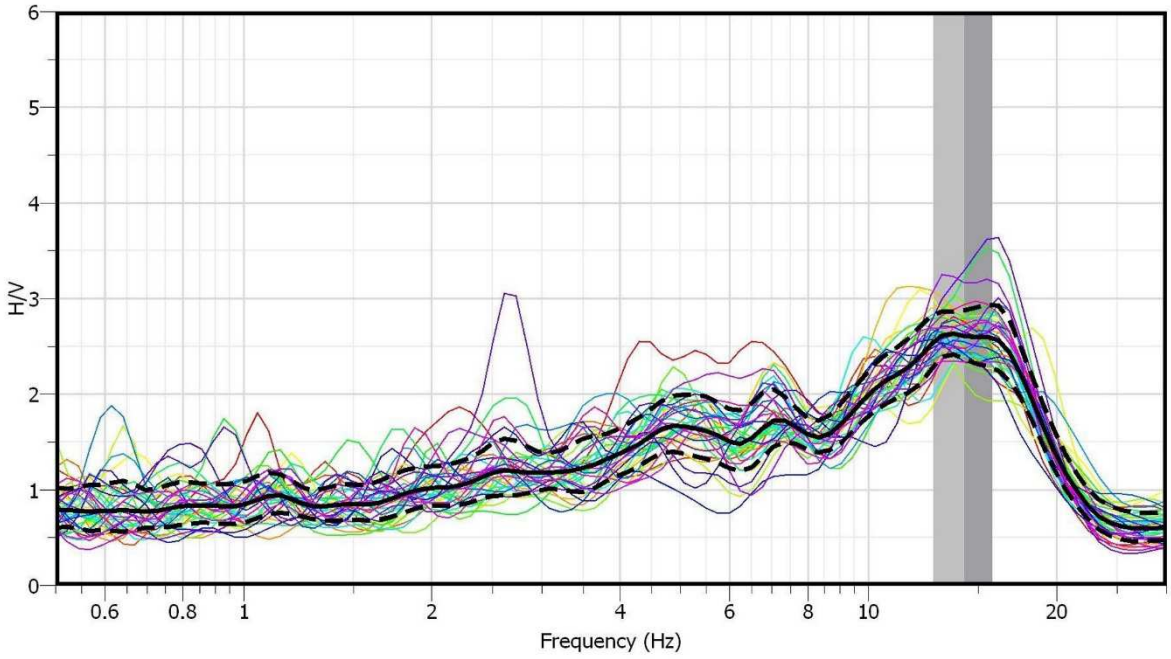

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM07: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



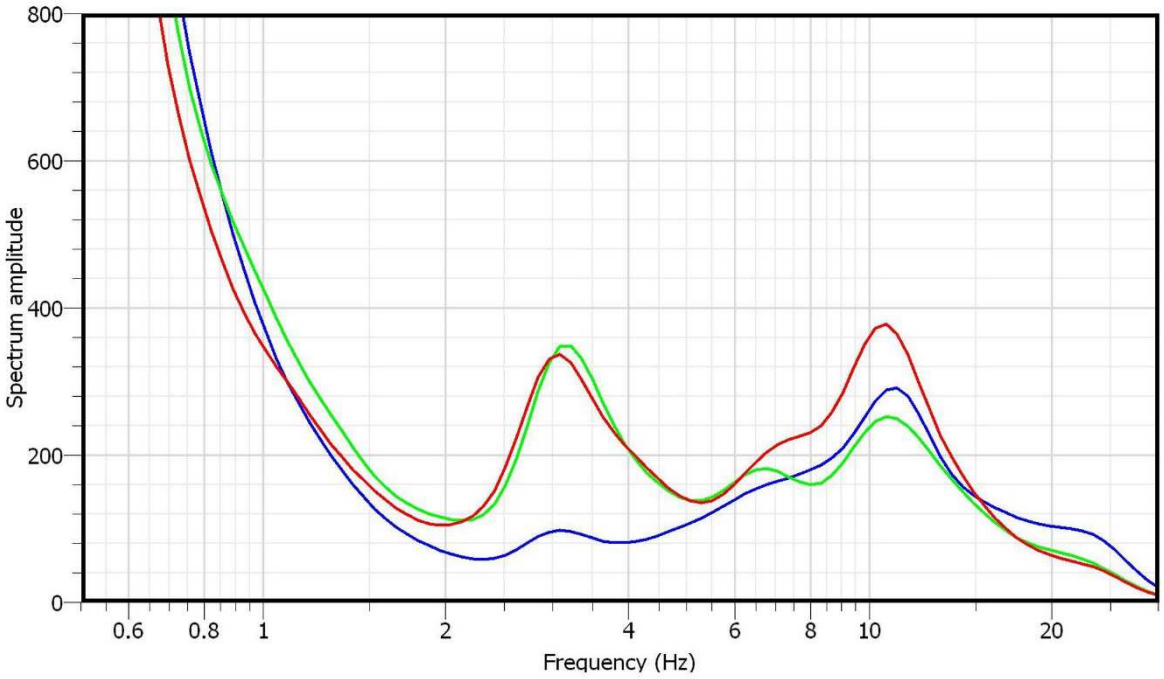

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM07: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



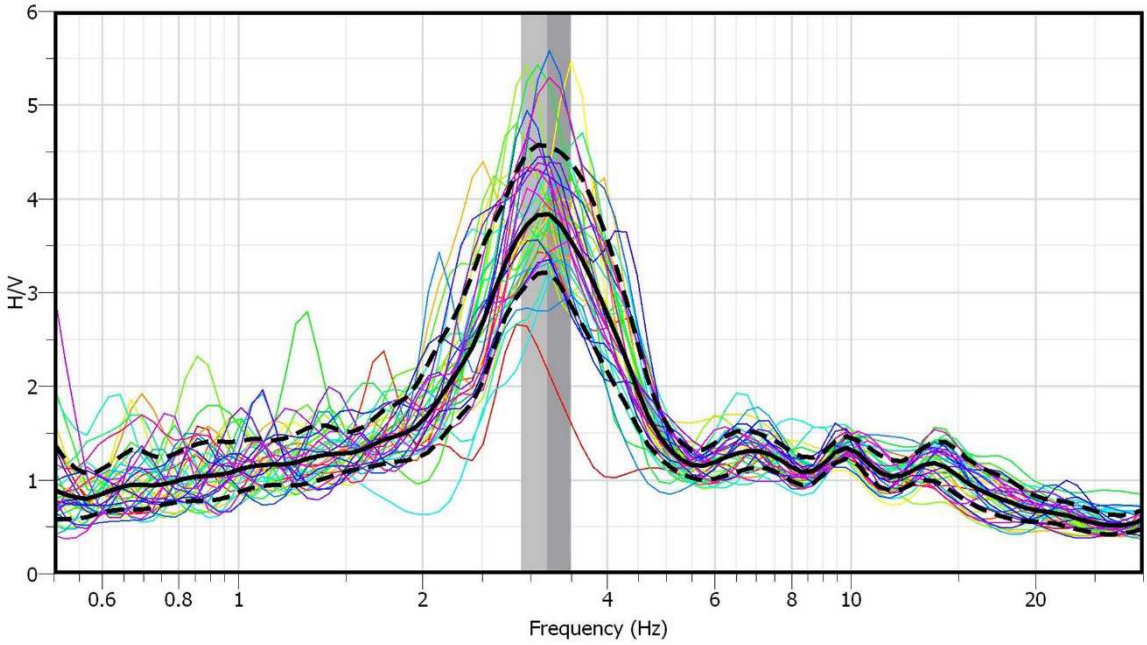

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM08: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



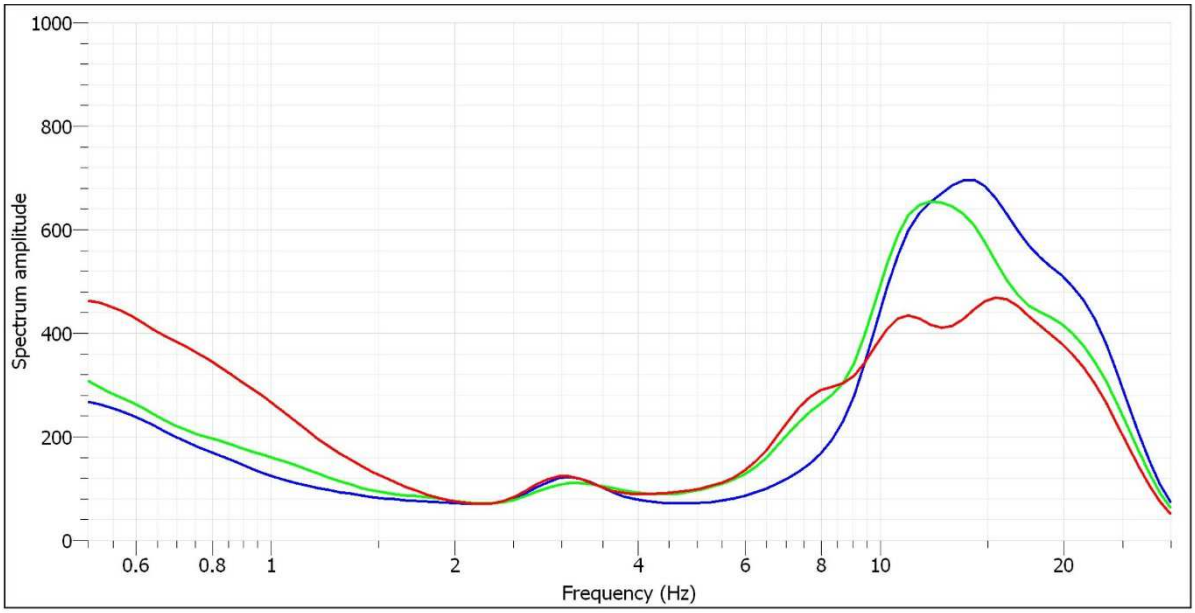

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM08: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



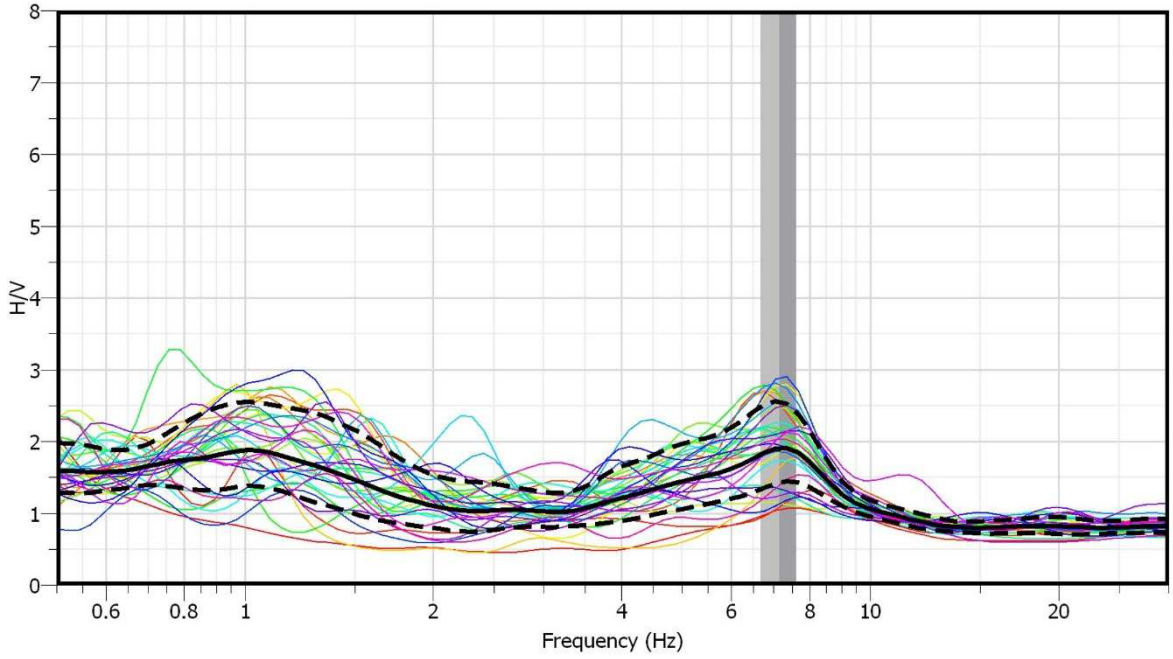

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM09: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



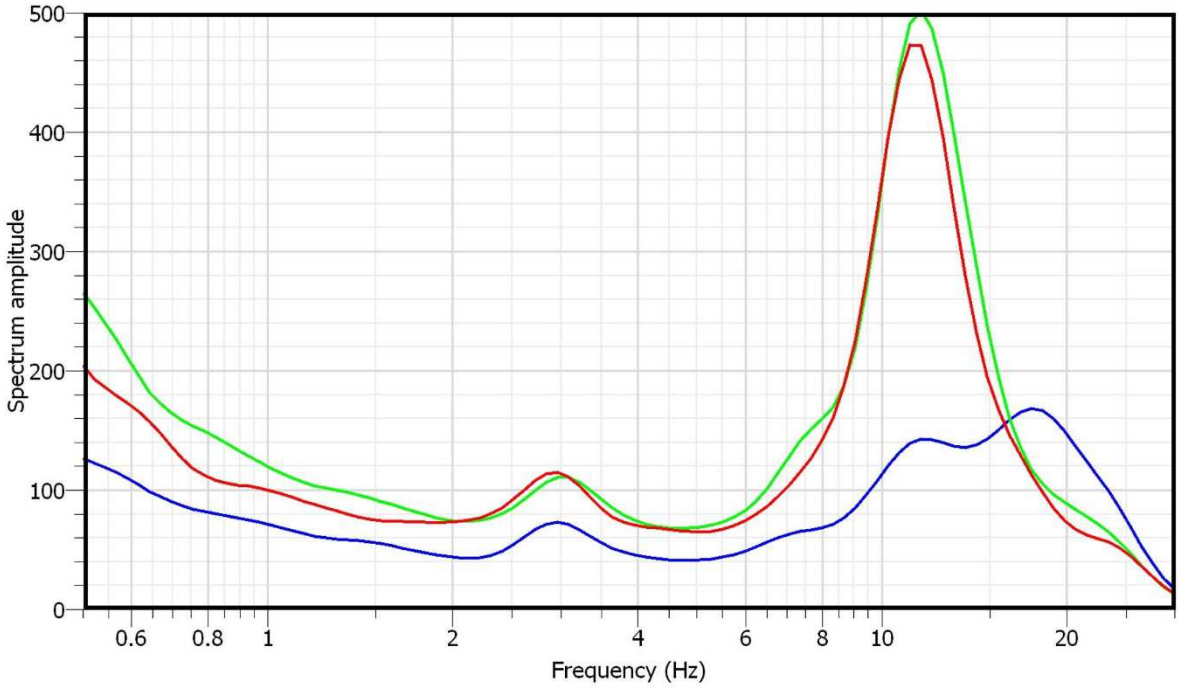

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM09: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



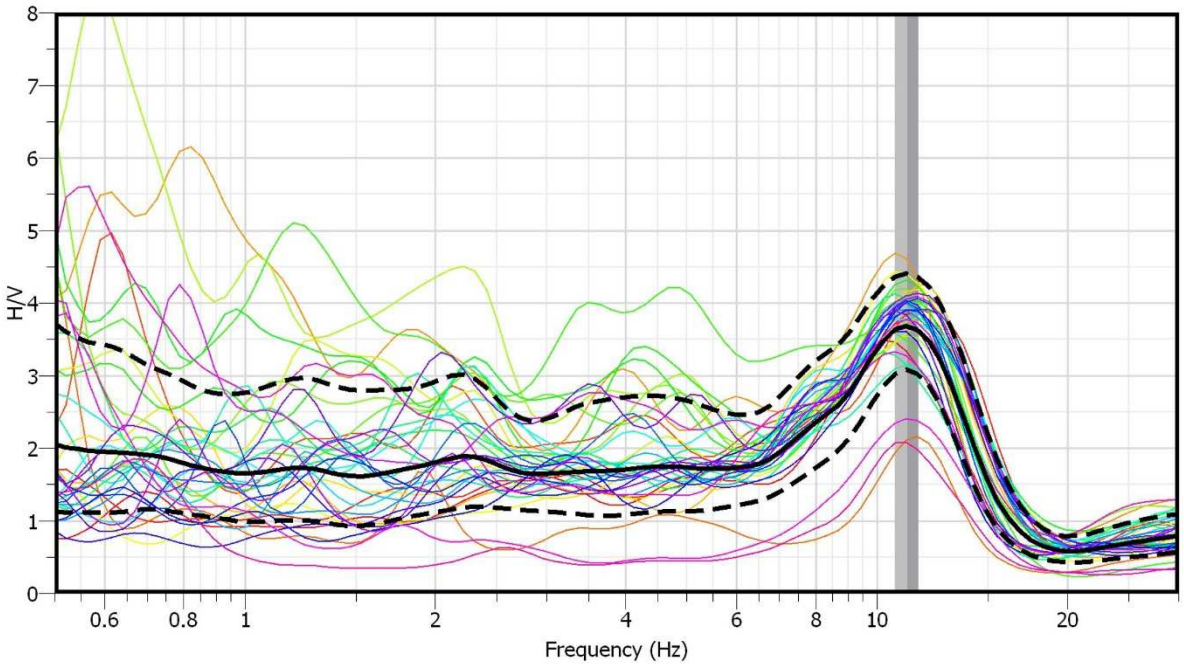

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM10: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



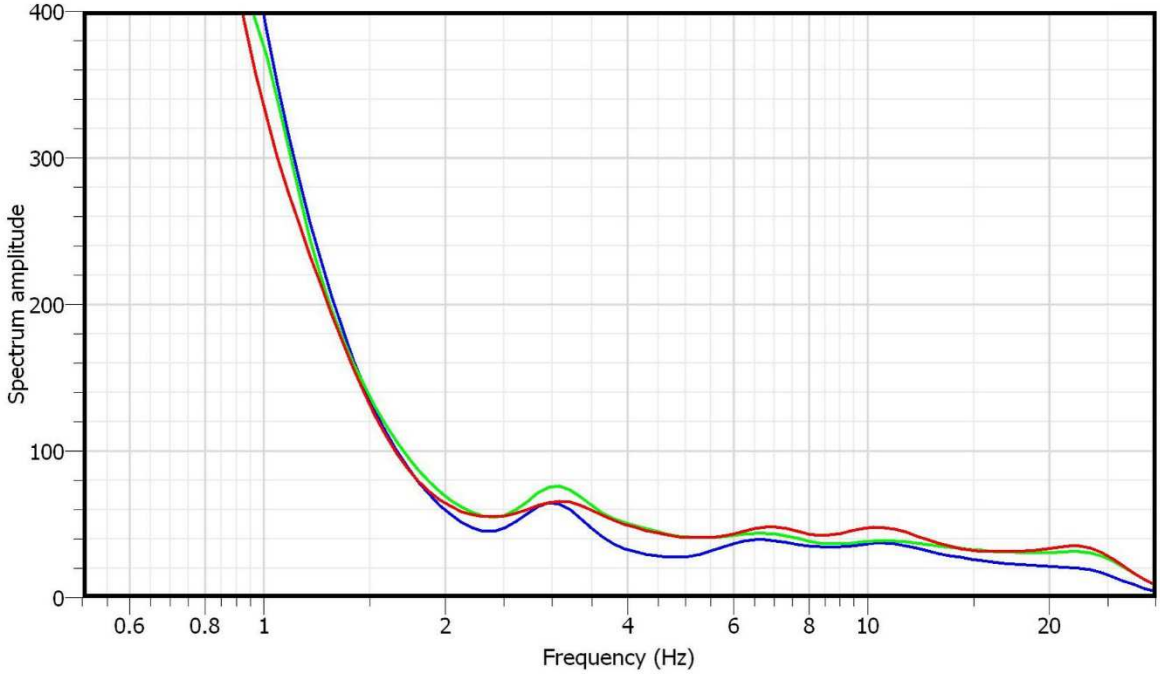

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM10: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



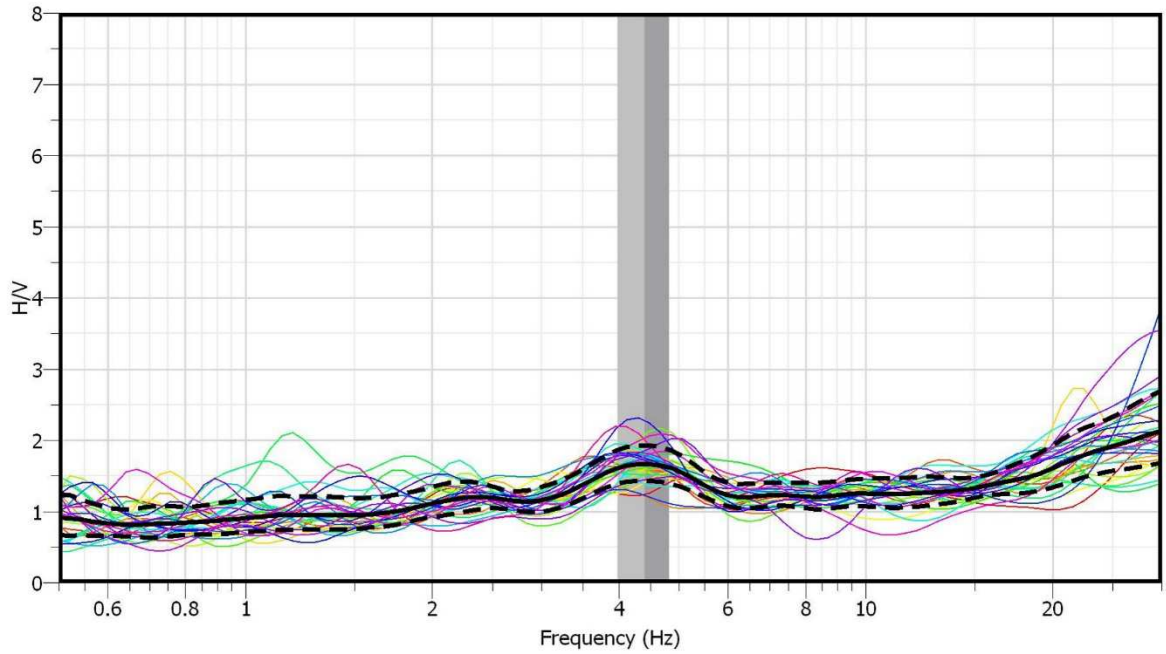

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM11: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



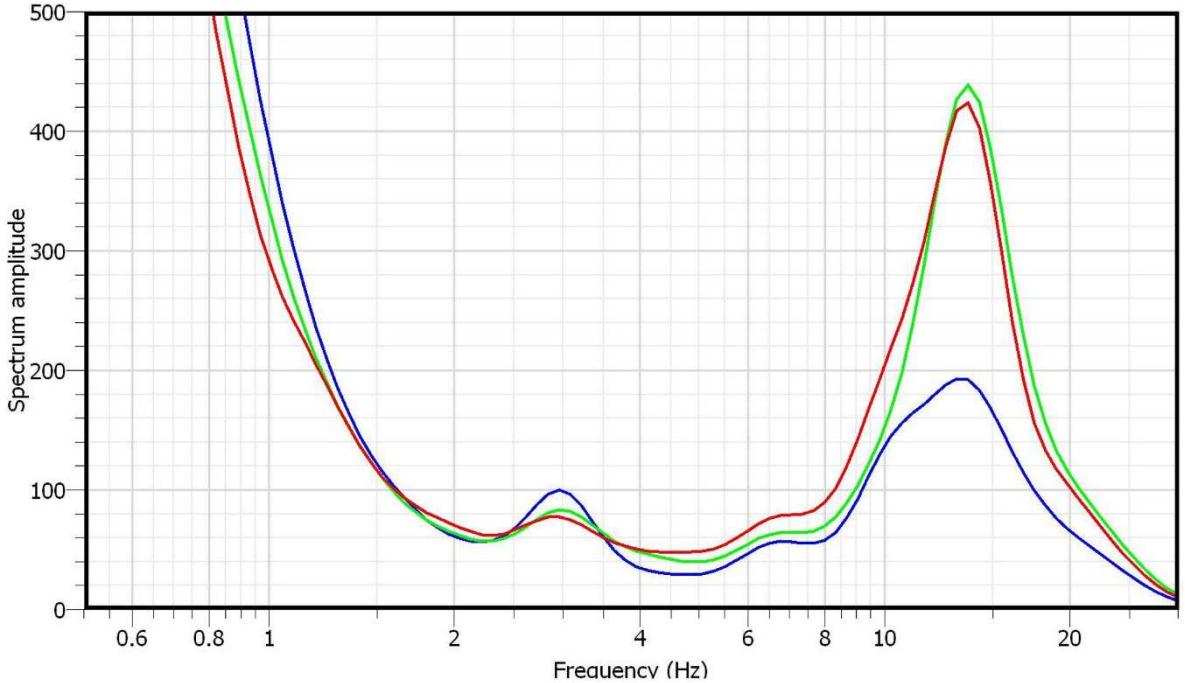

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM11: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



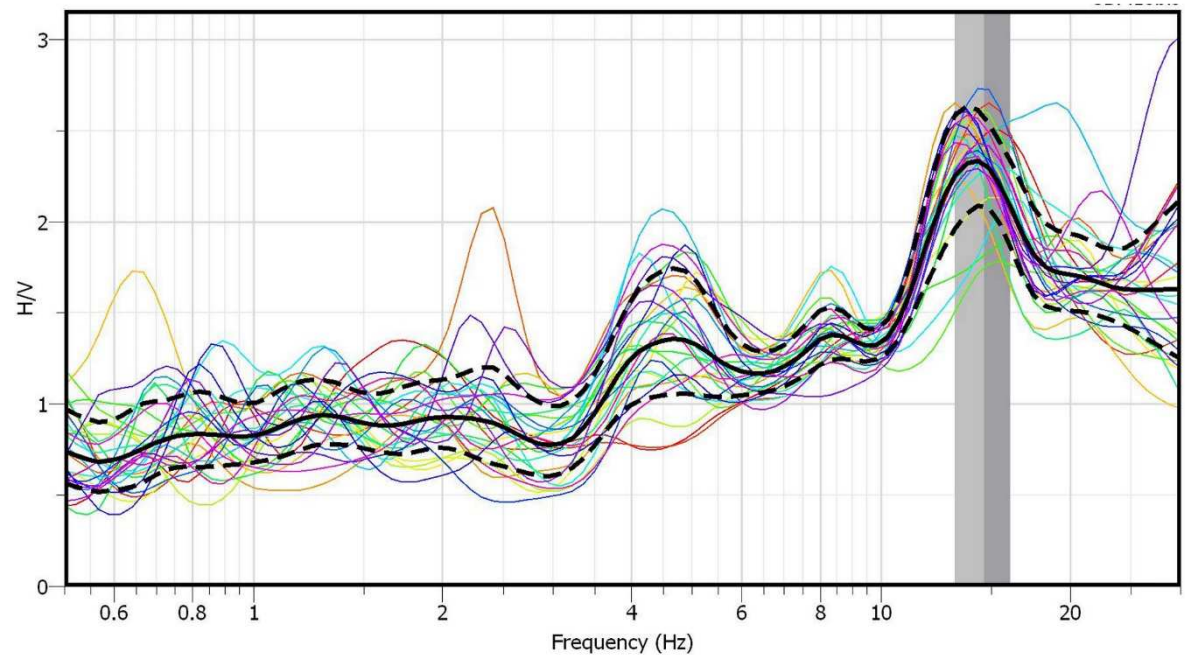

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM12: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)



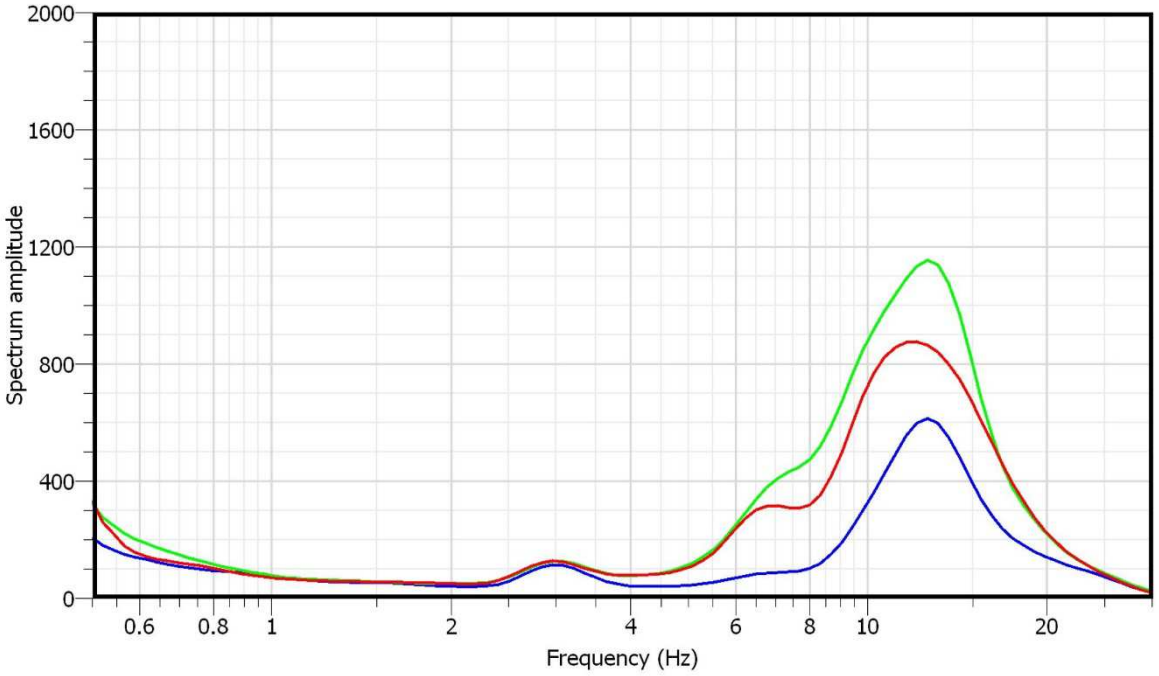

Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM12: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza



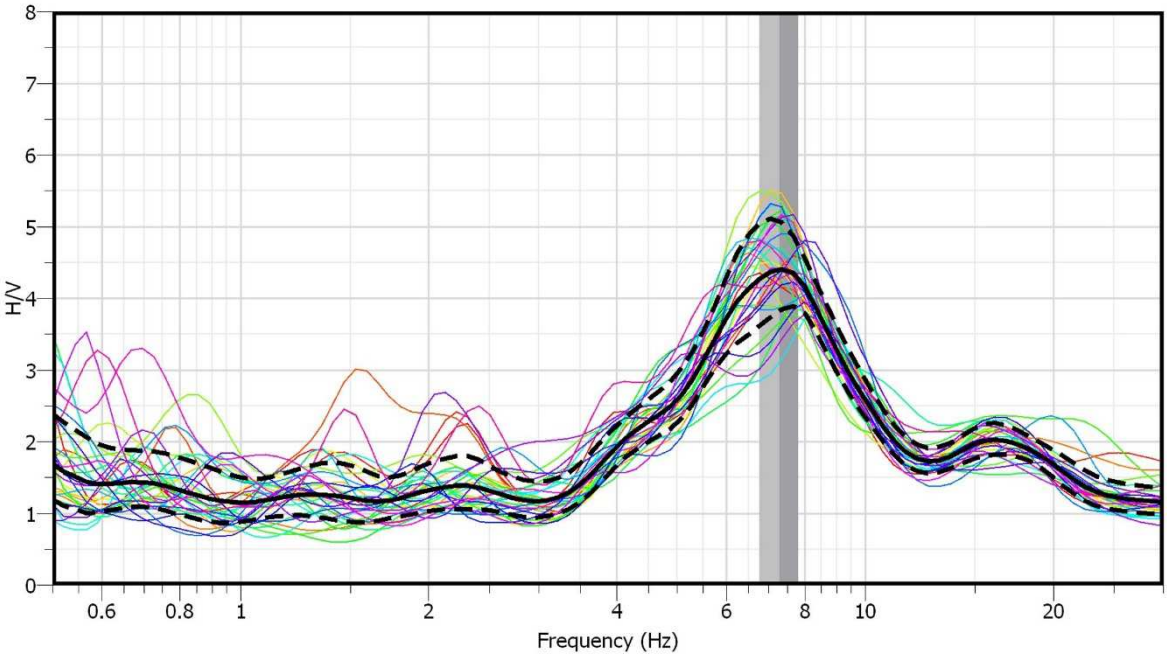

Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM13: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)




Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM13: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza




Spettri di Fourier medi relativi alle tre componenti del microtremore acquisito nel punto misura SBM14: verticale(blu), NS (verde), EW (rosso)




Curve H/V del microtremore acquisito nel punto misura SBM14: la curva media è la linea continua mentre le curve tratteggiate delimitano la banda di incertezza

Indagini sismiche a rifrazione in onde P – MASW

## Sismica a rifrazione

Al fine di una definizione dei parametri sismici dei terreni presenti nell'area di studio sono state condotte sei misure di sismica a rifrazione poi elaborate con la tecnica della tomografia sismica ovvero del metodo MASW. Procedura e risultati sono presentati nei paragrafi successivi.

Il metodo sismico a rifrazione, come tutte le metodologie di prospezione sismica di tipo attivo, si basa sulla generazione di onde sismiche (longitudinali e/o trasversali) poi rilevate da sensori (geofoni) disposti lungo un profilo (o linea sismica). Attraverso lo studio dei tempi di percorrenza, ovvero della velocità delle onde sismiche, è possibile risalire alla sismo-stratigrafia (definita come l'insieme delle caratteristiche geometriche e geofisiche dei sismo-strati) caratterizzante l'area d'indagine.
La tecnica a rifrazione si basa sul concetto di rifrazione delle onde sismiche, fenomeno che si verifica in presenza di mezzi con caratteristiche elastiche diverse (i contrasti di proprietà possono essere associabili a cause di natura stratigrafica, strutturale o idrogeologica). Quando un'onda sismica incontra l'interfaccia tra due mezzi con proprietà differenti, cioè, in presenza di un contrasto d'impedenza sismica[1], parte dell'energia si riflette nel mezzo in cui si propaga l'onda incidente ed una parte, invece, si rifrange in quello sottostante. In particolare, le onde che giungono alla superficie di separazione tra due mezzi con angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell), dette "onde di testa" (*head waves*), vengono rifratte propagandosi parallelamente all'interfaccia rifrangente (rifrattore) per poi tornare in superficie con lo stesso angolo d'incidenza.
La procedura per indagini a rifrazione consiste nelle seguenti fasi:

1) Acquisizione del segnale sismico generato da sorgente impulsiva mediante l'impiego di un acquisitore multi-canale
2) Individuazione dei tempi di arrivo (ai singoli geofoni) delle onde sismiche (nella fattispecie, onde P) attraverso l'analisi dei sismogrammi (procedura di *phase picking*)
3) Calcolo della velocità di propagazione delle onde elastiche (nella fattispecie, secondo la tecnica tomografica) e conseguente ricostruzione del modello sismo-stratigrafico 2D del sottosuolo.

La massima profondità d'indagine ($Z_{max}$) varia in funzione della rigidezza del suolo, della lunghezza della stesa e dell'energizzatore impiegato. Una stima approssimativa di $Z_{max}$ può essere ottenuta come:

$$Z_{max} = \frac{D}{m} \quad (1)$$

dove $D$ indica la lunghezza della linea sismica e $m$ varia tra 2 e 4.

[1] Impedenza sismica: prodotto della velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo per la densità del mezzo stesso.

Le fasi operative sopra elencate sono descritte nei paragrafi successivi.

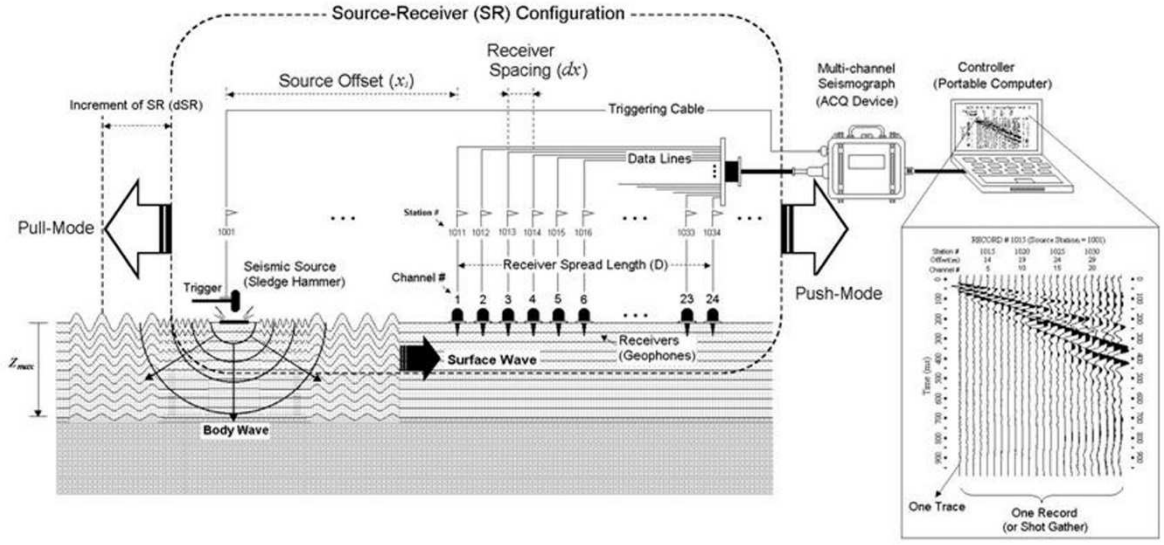



**Figura 1** Schema di acquisizione generico per indagine sismica a rifrazione (da http://www.masw.com/).

## Acquisizione del segnale sismico

Per l'acquisizione dei segnali sismici sono state installate linee di 24 ricevitori ciascuna con distanza inter-geofonica variabile in funzione delle condizioni locali, talvolta impervie. Uno schema di acquisizione generico è mostrato in Figura 1. Nel dettaglio, la strumentazione impiegata consiste in:

- un sistema di energizzazione costituito da una mazza del peso di 8kg battente verticalmente su una piastra circolare d'acciaio del diametro di 20cm posta sul piano campagna (p.c.)
- un sistema di ricezione costituito da 24 geofoni verticali Oyo Geospace SNG 11D/PC-21 con frequenza naturale pari a 4.5Hz ed un opportuno cavo di collegamento per la trasmissione del segnale all'apparato di acquisizione
- un sistema di acquisizione costituito da un acquisitore Geode (Geometrics Inc.), le cui caratteristiche tecniche sono specificate in Tabella 1, ed un Personal Computer, dotato di un opportuno *software* di acquisizione (Geometrics SeisModule Controller v. 9.09.0.0) per l'immagazzinamento del flusso di dati

Caratteristiche tecniche dell'apparato di acquisizione Geode (Geometrics Inc.).

| Caratteristiche tecniche GEODE | |
|---|---|
| **A/D Conversion** | 24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary over sampling |
| **Dynamic Range** | 144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2 ms, 24 dB |
| **Distortion** | 0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz |
| **Bandwidth** | 1.75 Hz to 20 kHz. Low corner frequency option available |
| **Common Mode Rejection** | > 100dB at <= 100 Hz, 36 dB |
| **Crosstalk** | -125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms |
| **Noise Floor** | 0.20 uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz |
| **Sample Interval** | 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms |
| **Stacking Trigger Accuracy** | 1/32 of sample interval |
| **Maximum Input Signal** | 2.8V PP at 0Db |
| **Input Impedance** | 20 kOhm, 0.02 uf |
| **Pre-trigger Data** | Up to 4,096 Samples |
| **Preamplifier Gains** | Software selectable between 24 and 36 dB. Can be jumpered to allow selection of 12 or 24 dB or jumpered to 0 |
| **Anti-alias Filters** | -3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB |
| **Acquisition and Display Filters** | Low Cut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth.<br>Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency.<br>High Cut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/ octave |
| **Maximum Record Length** | 16,384 samples per channel standard, 65,536 samples per channel optional |
| **Data Formats** | SEG-2 standard with SGOS. SEG-D and SEG-Y available2 |
| **System Software** | Single Geode Operating Software (SGOS): Includes full compliment of acquisition, display, plotting, filtering and storage features |
| **Power** | Requires 12V external battery. Uses 0.65W/channel during acquisition, sleep mode reduces power consumption by 70% while<br>in standby. |
| **Environmental** | Geode:-30 to 70degrees C. Waterproof and submersible. Withstands a 1 m drop onto concrete on 6 sides and 8 |
| **Operating System** | Windows 98/NT/XP/2000 |

I parametri di acquisizione per ciascuna stesa sono riassunti nelle tabelle di seguito.

Parametri di acquisizione per lo stendimento ST01.

| **Stendimento ST01** | |
|---|---|
| Lunghezza | 46.0m |
| N. geofoni | 24 |
| Distanza inter-geofonica | 2.0m |
| N. basi di energizzazione per ciascuna estremità | 2, a distanze di 2m e 12m dal primo/ultimo geofono |
| N. basi di energizzazione interne alla stesa | 3, di cui 2 poste a 11m dagli estremi ed una a centro stendimento |
| N. energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*) | 1 |
| Durata acquisizione | 1s |
| Intervallo di campionamento | 0.125ms |

Parametri di acquisizione per lo stendimento ST02.

| **Stendimento ST02** | |
|---|---|
| Lunghezza | 92m |
| N. geofoni | 24 |
| Distanza inter-geofonica | 4m |
| N. basi di energizzazione per ciascuna estremità | 3, a distanze di 4m, 15m e 22m dal primo/ultimo geofono |
| N. basi di energizzazione interne alla stesa | 3, di cui 2 poste a 22m dagli estremi ed una a centro stendimento |
| N. energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*) | 1 |
| Durata acquisizione | 2s |
| Intervallo di campionamento | 0.250ms |

Parametri di acquisizione per lo stendimento ST03.

| **Stendimento ST03** | |
|---|---|
| Lunghezza | 46m |
| N. geofoni | 24 |
| Distanza inter-geofonica | 2m |
| N. basi di energizzazione per ciascuna estremità | 3, a distanze di 2m, 5m e e 9m dal primo/ultimo geofono |
| N. basi di energizzazione interne alla stesa | 3, di cui 2 poste a 11m dagli estremi ed una a centro stendimento |
| N. energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*) | 1 |
| Durata acquisizione | 1s |
| Intervallo di campionamento | 0.250ms |

Parametri di acquisizione per lo stendimento ST04.

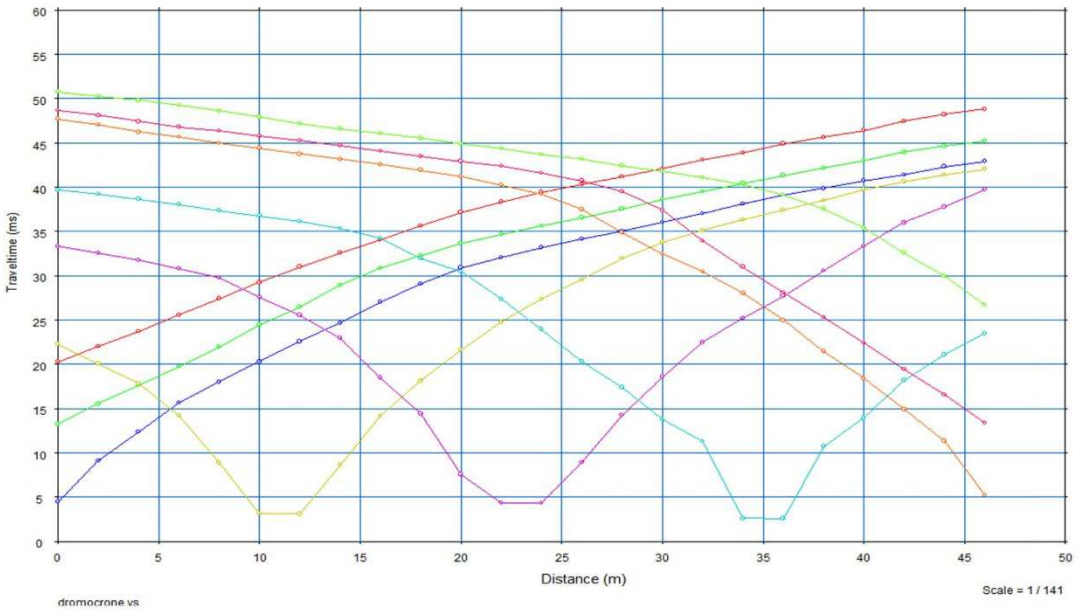
| **Stendimento ST04** | |
|---|---|
| Lunghezza | 46m |
| N. geofoni | 24 |
| Distanza inter-geofonica | 2m |
| N. basi di energizzazione per ciascuna estremità | 3, a distanze di 2m, 5m e 9m dal primo/ultimo geofono |
| N. basi di energizzazione interne alla stesa | 3, di cui 2 poste a 11m dagli estremi ed una a centro stendimento |
| N. energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*) | 1 |
| Durata acquisizione | 1s |
| Intervallo di campionamento | 0.250ms |

Parametri di acquisizione per lo stendimento ST05.

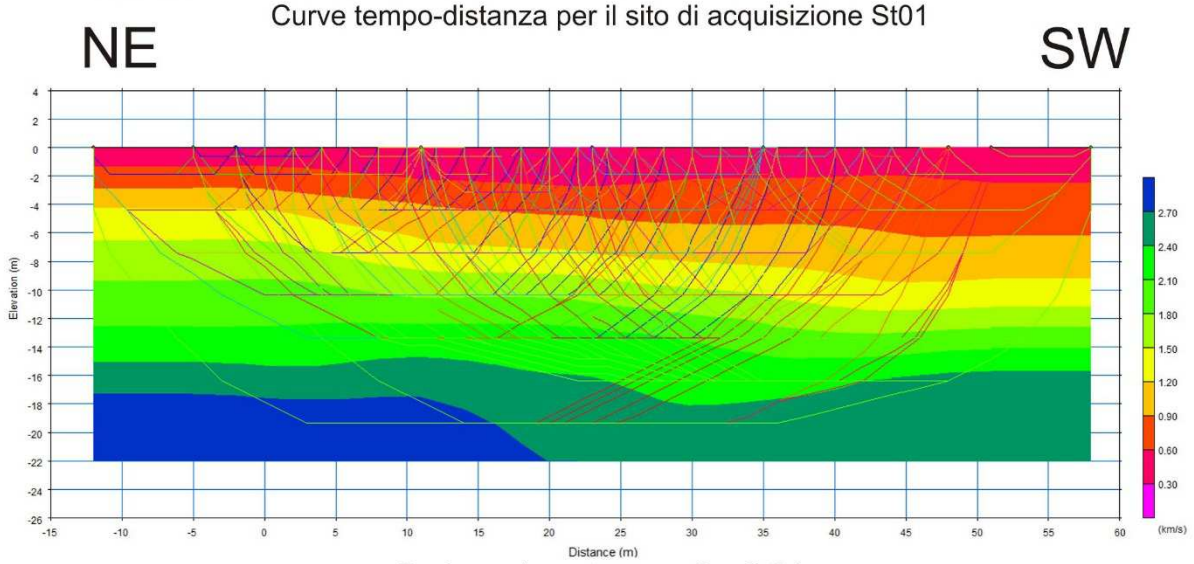
| **Stendimento ST05** | |
|---|---|
| Lunghezza | 34.5m |
| N. geofoni | 24 |
| Distanza inter-geofonica | 1.5m |
| N. basi di energizzazione per ciascuna estremità | 3, a distanze di 1.5m, 5m e 10m dal primo/ultimo geofono |
| N. basi di energizzazione interne alla stesa | 3, di cui 2 poste a 8.25m dagli estremi ed una a centro stendimento |
| N. energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*) | 1 |
| Durata acquisizione | 1s |
| Intervallo di campionamento | 0.250ms |

Parametri di acquisizione per lo stendimento ST06.

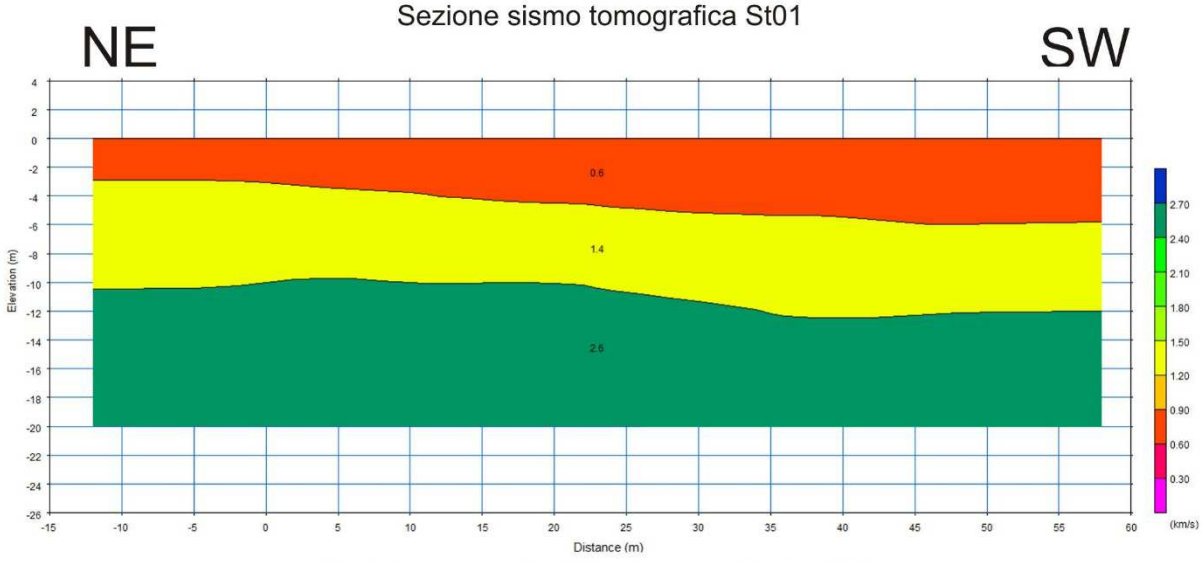
| **Stendimento ST06** | |
|---|---|
| Lunghezza | 46m |
| N. geofoni | 24 |
| Distanza inter-geofonica | 2m |
| N. basi di energizzazione per ciascuna estremità | 2, a distanze di 2m e 10m dal primo/ultimo geofono |
| N. basi di energizzazione interne alla stesa | 3, di cui 2 poste a 11m dagli estremi ed una a centro stendimento |
| N. energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*) | 1 |
| Durata acquisizione | 1s |
| Intervallo di campionamento | 0.250ms |



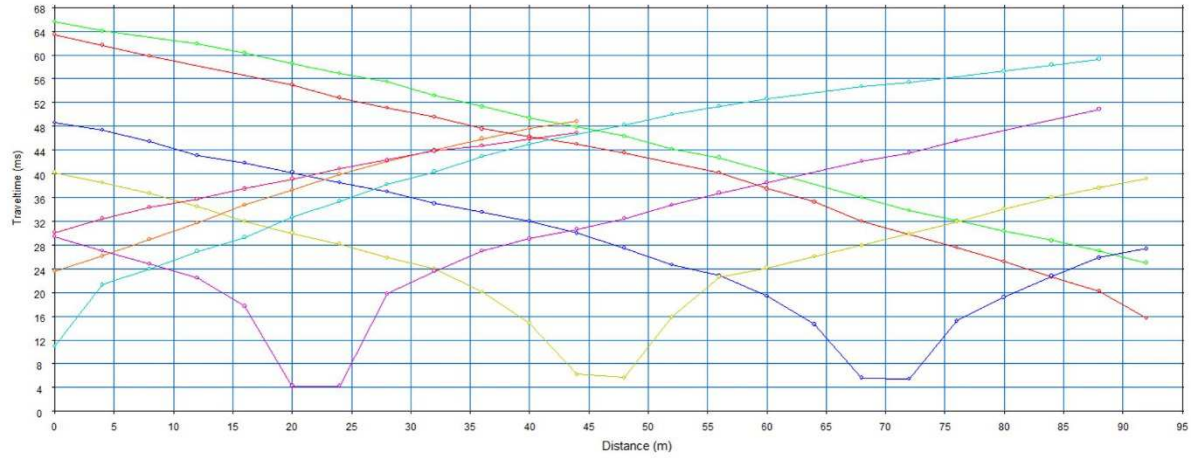

Curve tempo-distanza per il sito di acquisizione St01



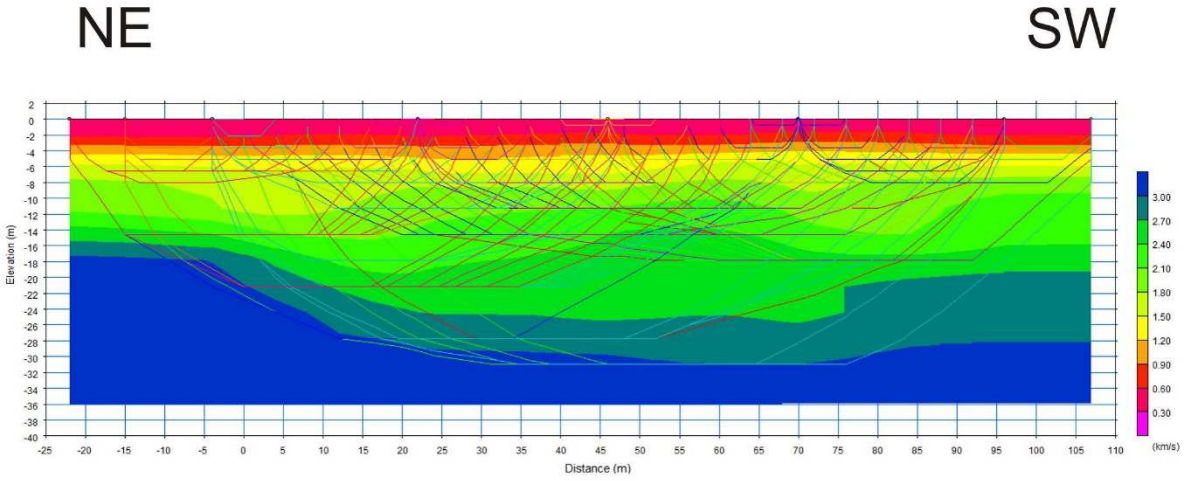

Sezione sismo tomografica St01



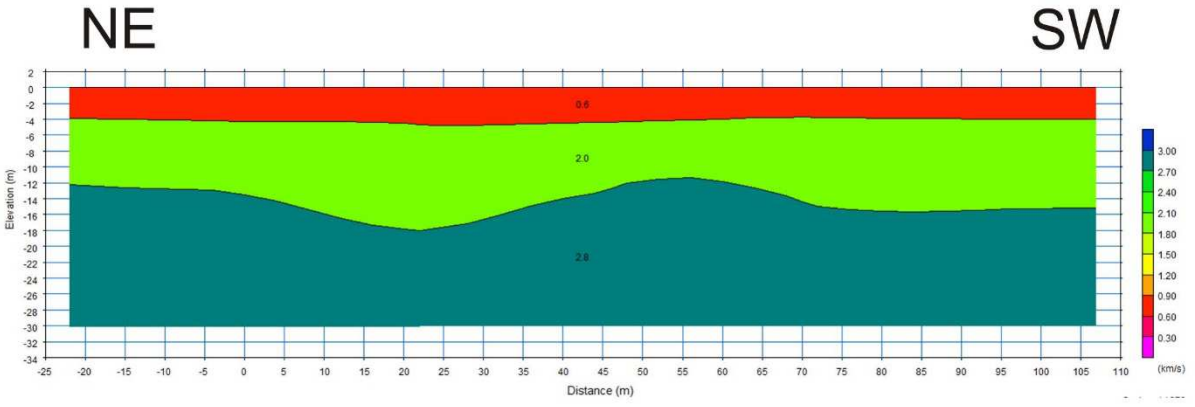

Modello sismo stratigrafico semplificato St01



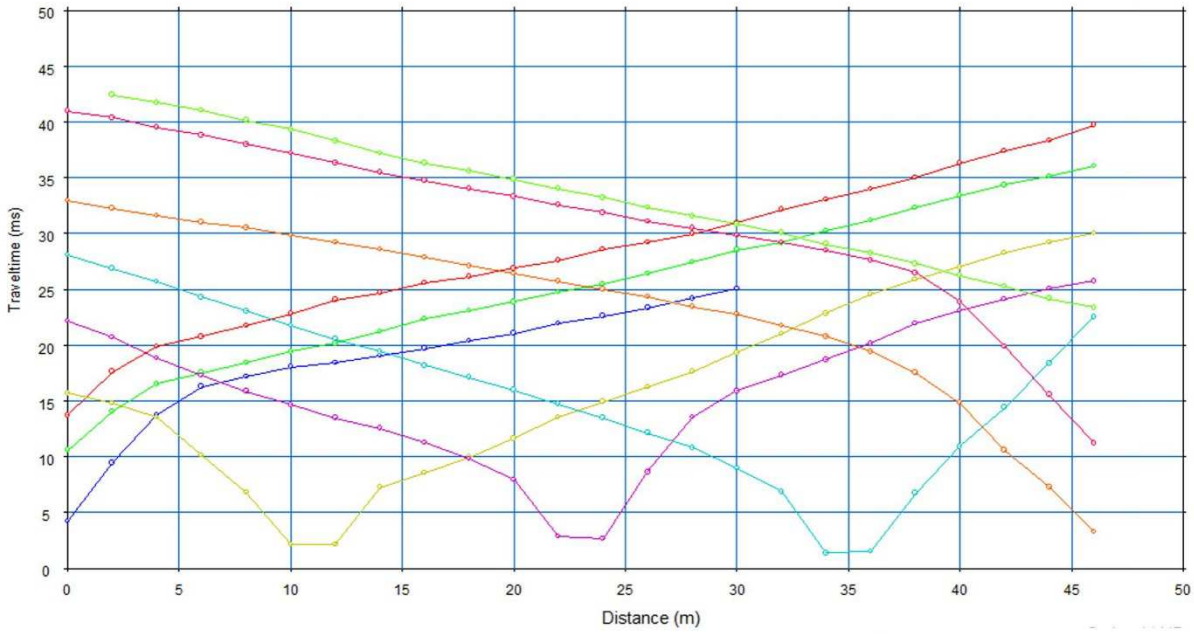

Curve tempo-distanza per il sito di acquisizione St02



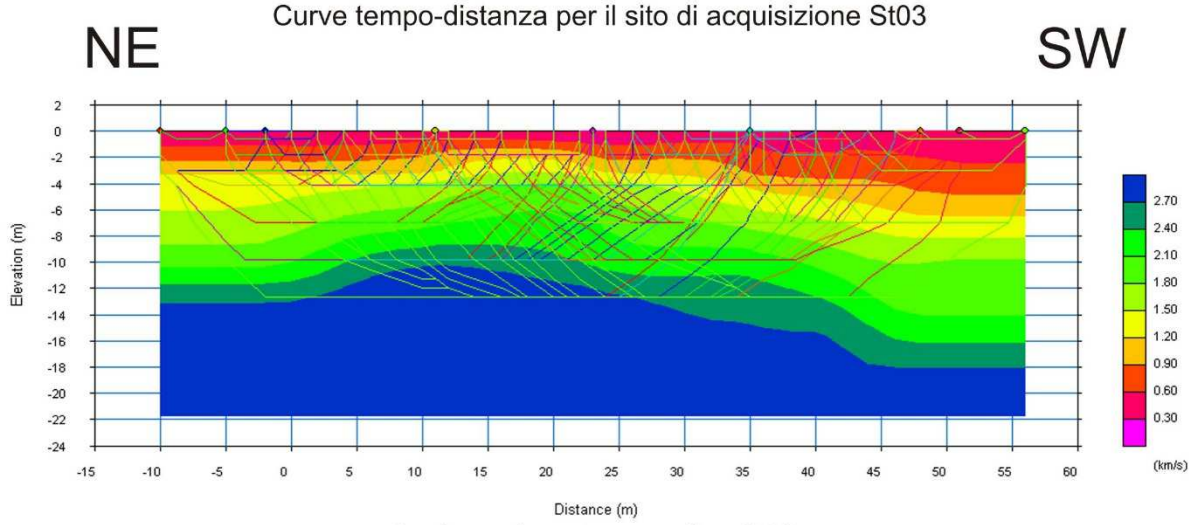

Sezione sismo tomografica St02



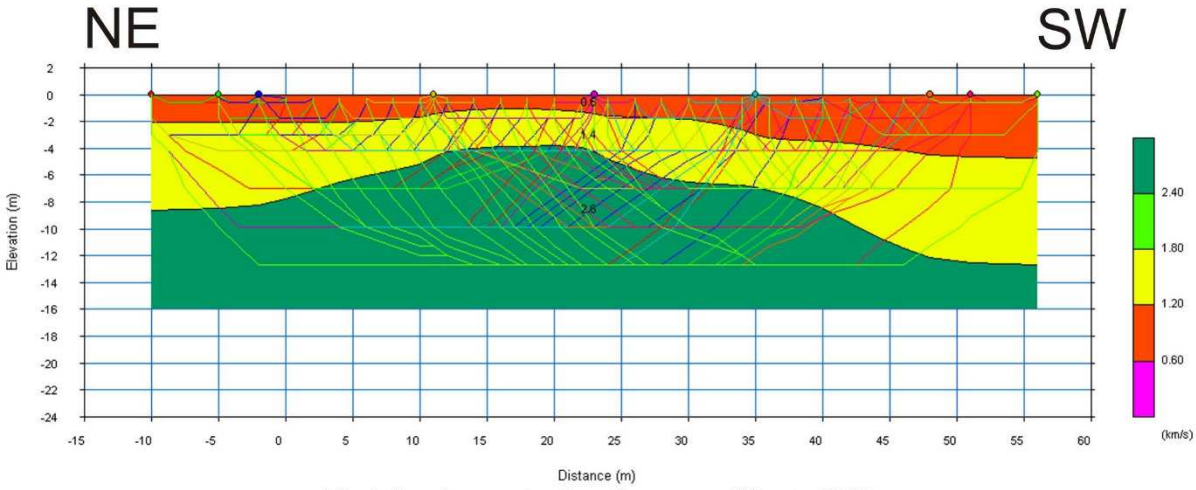

Modello sismo stratigrafico semplificato St02



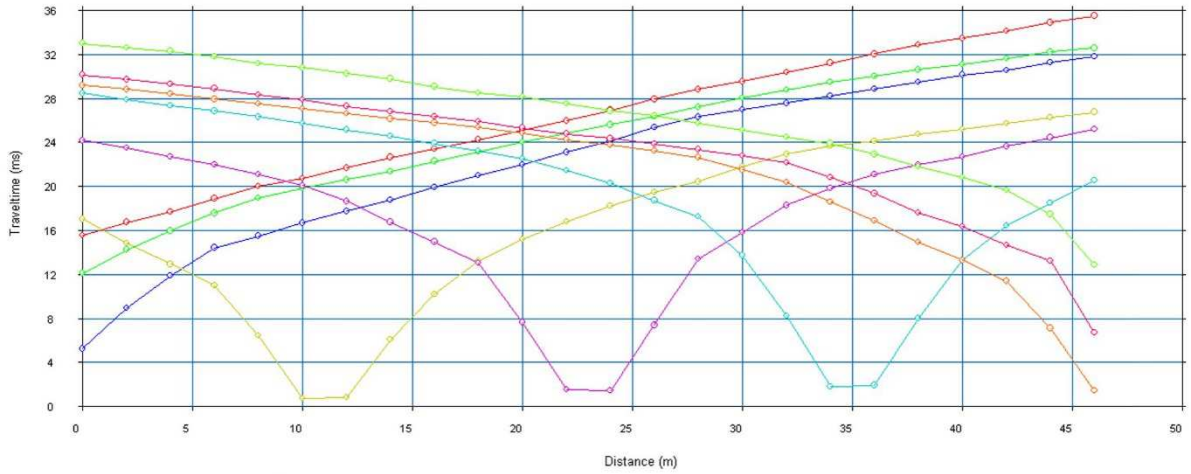

Curve tempo-distanza per il sito di acquisizione St03



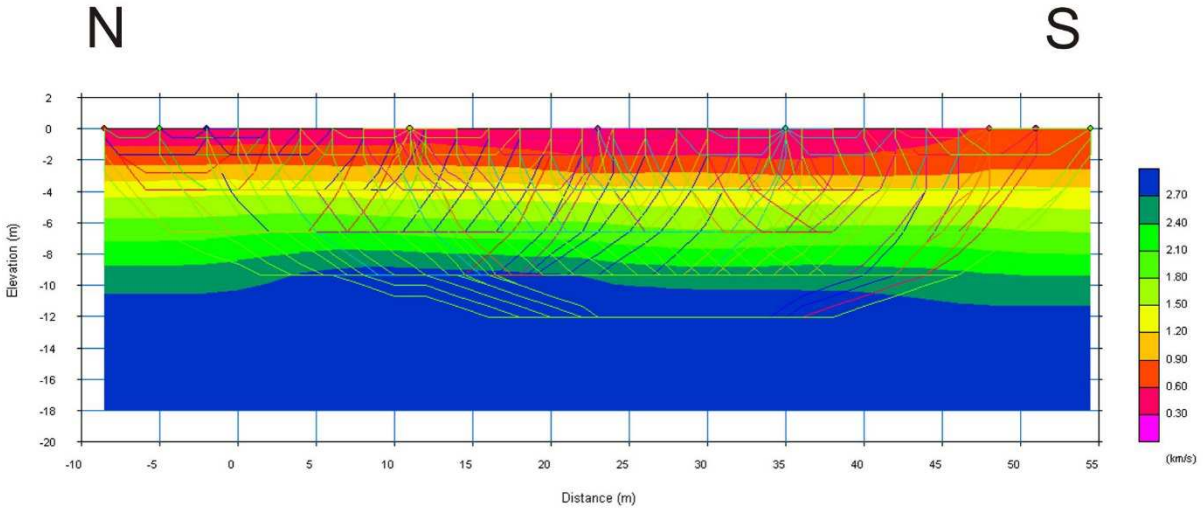

Sezione sismo tomografica St03



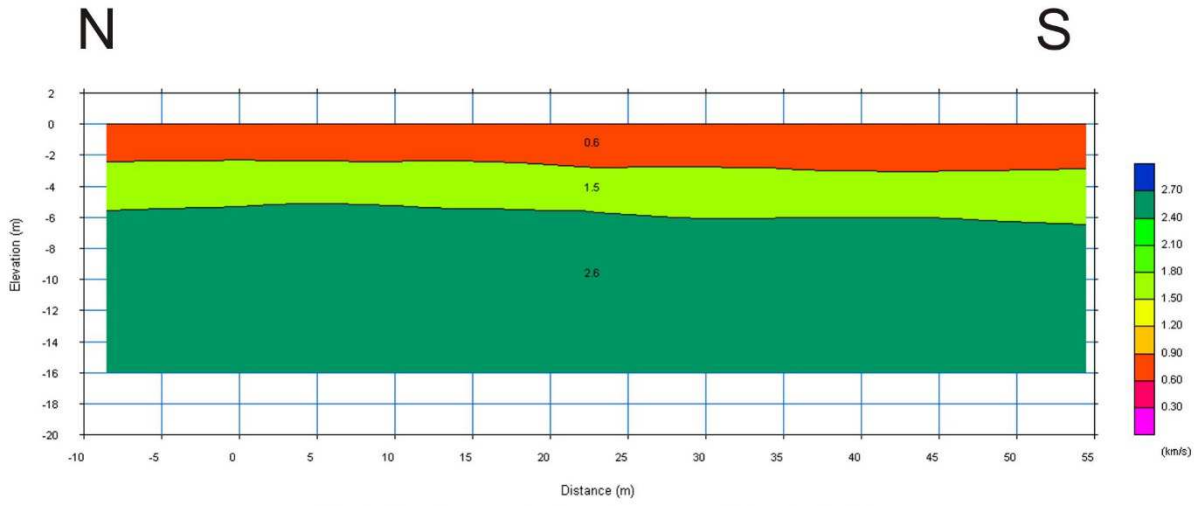

Modello sismo stratigrafico semplificato St03



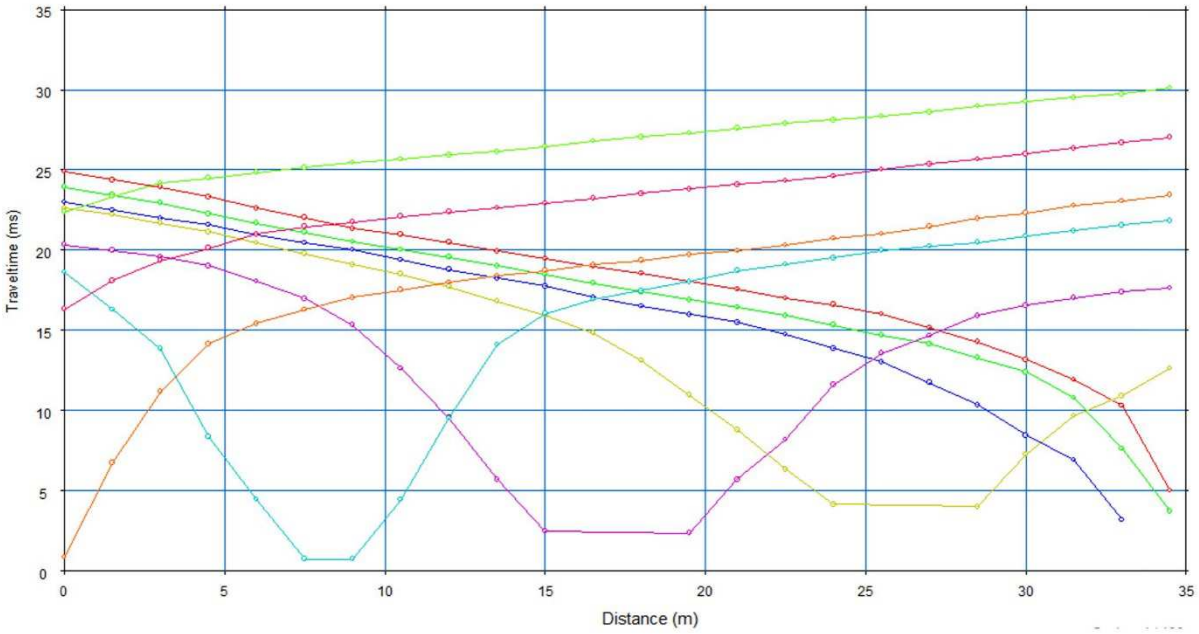

Curve tempo-distanza per il sito di acquisizione St04



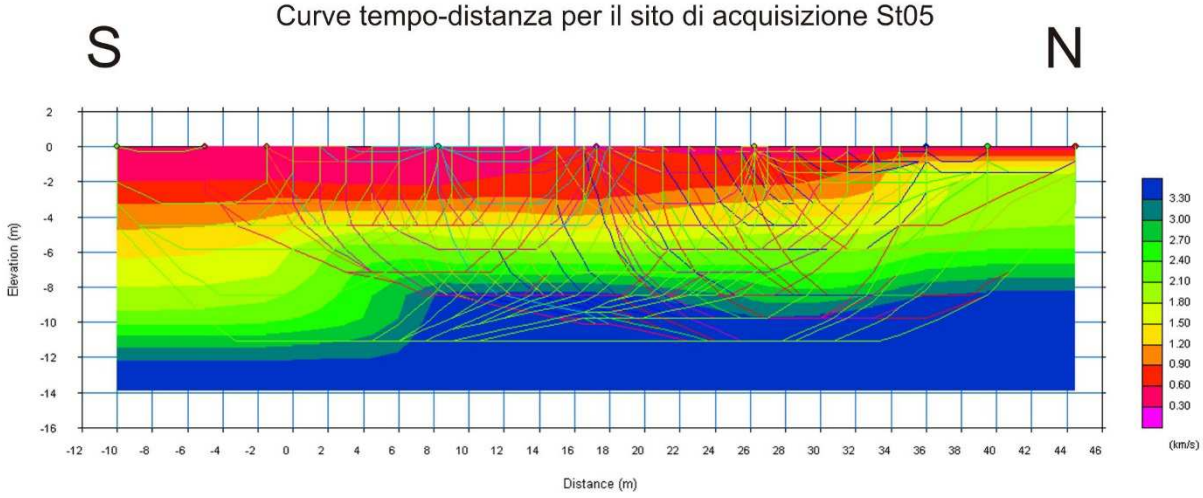

Sezione sismo tomografica St04



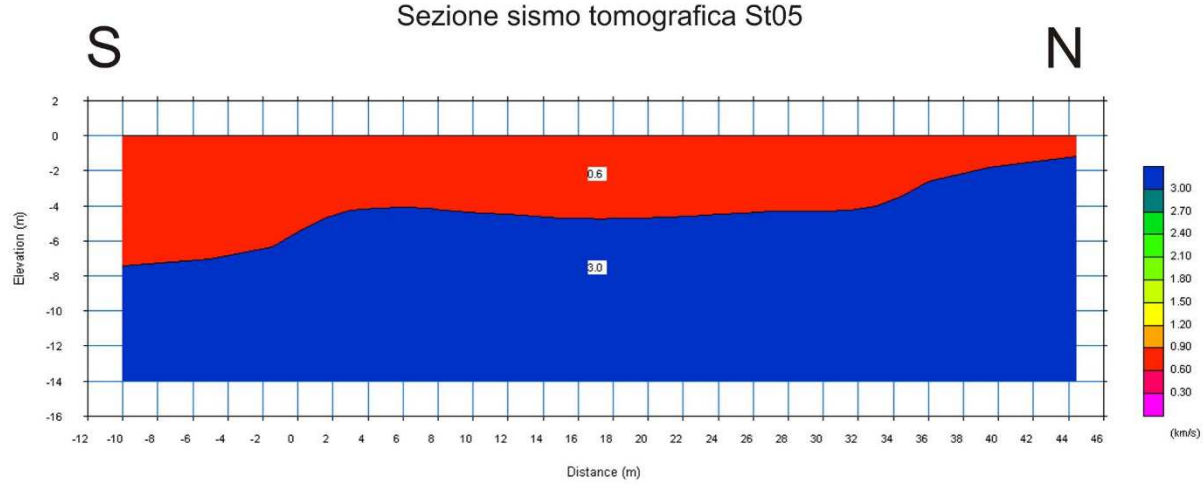

Modello sismo stratigrafico semplificato St04



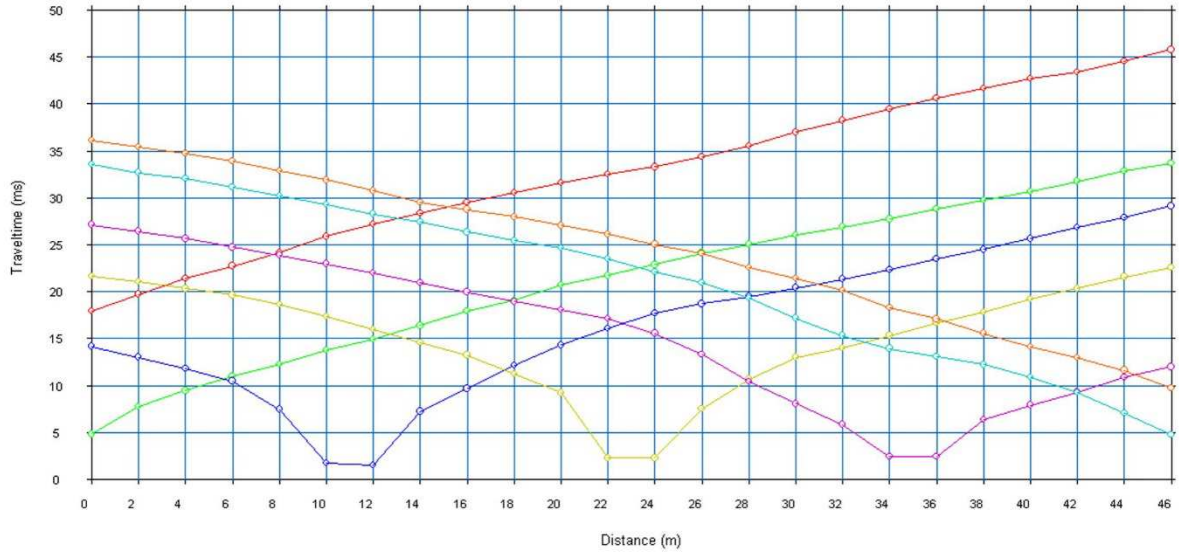

Curve tempo-distanza per il sito di acquisizione St05




Sezione sismo tomografica St05

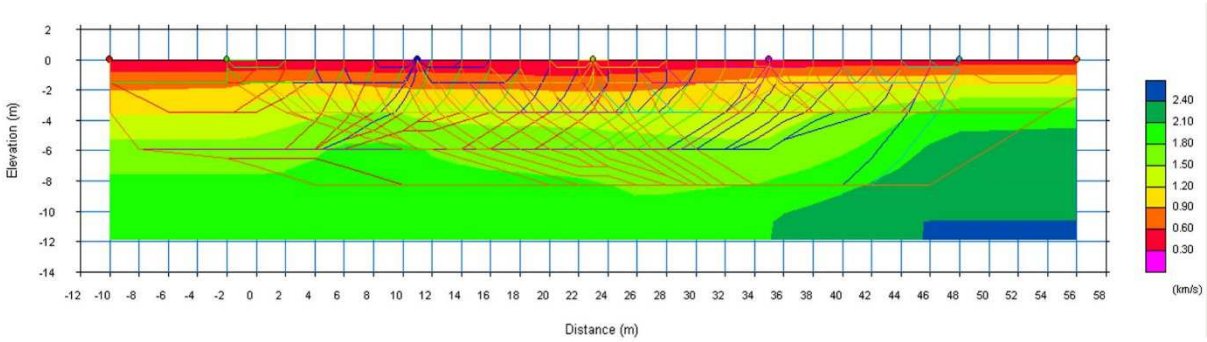



Modello sismo stratigrafico semplificato St05



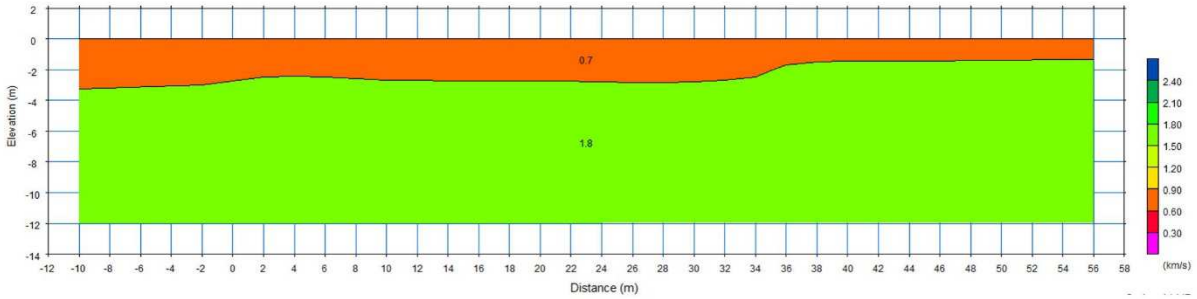

Curve tempo-distanza per il sito di acquisizione St06

N S




Sezione sismo tomografica St06

N S




Modello sismo stratigrafico semplificato St06