



**REGIONE SICILIANA**  
Assessorato Regionale Infrastrutture e Mobilità  
Dipartimento Regionale Infrastrutture-Mobilità-Trasporti  
SERVIZIO 8



**STUDIO GEOLOGICO PER IL PROGETTO DEFINITIVO INERENTI I  
LAVORI PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO DI  
MARETTIMO A SUD DEL CENTRO ABITATO**  
ai sensi dell'art. 5 della L.R. n. 21/1998.

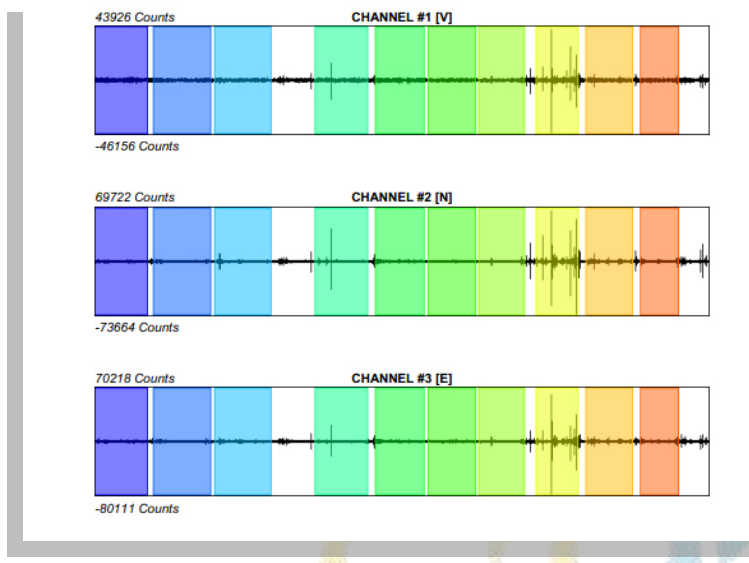

**A.2**

**INDAGINI GEOFISICHE**

**Indagine sismica Down Hole**  
**Tromografie Geoelettriche**  
**Indagine sismica HVSR**  
**Indagine sismica REMI-MASW**



**IL R.U.P**

<b>MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E TRASPORTI</b> PROVVEDITORATO INTERREGIONALE ALLE OPERE PUBBLICHE UFFICIO 3°: Tecnico e Opere Marittime per la Sicilia Piazza Giuseppe Verdi n. 16 Palermo			
<b>Commissione Regionale dei Lavori Pubblici</b> <b>PROGETTO DEI LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO A SUD DEL</b> <b>CENTRO ABITATO, AI SENSI DELL'ART. 5 DELLA L.R.21/1998</b> Indagini geognostiche a supporto della progettazione			
<b>Comune di Favignana (TP) – Isola di Marettimo</b>			
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>			
Ditta esecutrice:  Pietro Montanelli Trivellazioni	D.L. attività geologiche  Dott. Geol. C. Caradonna	Dirigente Serv. 8  Arch. C. Ricciardo	RUP  Ing. S. Ponte
<b>RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE</b> <b>SISMICA HVSR</b>			<b>R1</b>
			
Rif. Lav.: 001/2021	Date indagini: 28/01/2021 29/01/2021	Data emissione: 30/01/2021	Il Tecnico: <b>Cr. Geol. Dario Miraglia</b> 

## **SOMMARIO**

1. Premessa.....	3
2. Indagine sismica HVSR.....	4
2.1 Strumentazione e metodologia .....	5
2.2 Interpretazione delle misure eseguite .....	7

ALLEGATO A: Ubicazione dei sondaggi HVSR

ALLEGATO B: Rapporti di prova

## 1. PREMESSE

Il Dott. Geol. Piero Montanelli n.q. di responsabile delle attività geologiche, ha conferito al sottoscritto l'incarico per lo studio geologico relativo al progetto di cui al frontespizio di questo elaborato.

Scopo dello studio è stato quello di eseguire n. 6 sondaggio sismici passivi HVSR al fine della definizione dell'azione sismica di progetto in ottemperanza alle "Norme tecniche per le costruzioni", D.M. Ministero Infrastrutture e Trasporti del 17/01/2018, capitolo 3 Azioni sulle Costruzioni, punto 3.2.2.



## 2. INDAGINE SISMICA HVSR

Lo scopo dell'indagine geofisica con la tecnica HVSR è la caratterizzazione sismica del sottosuolo e, in particolare, l'individuazione delle discontinuità sismiche nonché la profondità della formazione rocciosa compatta (bedrock geofisico).

Con tale metodo viene stimata la velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ) come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 17 gennaio 2018. L'indagine geofisica proposta si avvale della metodologia basata sulla tecnica di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V.

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

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la velocità media delle onde di taglio  $V_s$  calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{seq}$  e la relativa categoria del suolo di fondazione come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018;

- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

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

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

Possiamo scrivere questo come: segnale registrazione al sito x = sorgente \* effetti di percorso \* funzione trasferimento strumento.

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

## 2.1 STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale modello "Geobox". Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici ortogonali tra loro ad alta definizione con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. I dati vengono memorizzati in una scheda di memoria interna da 512 Mb,

evitando così la presenza di qualsiasi cavo che possa introdurre rumore meccanico ed elettronico.

I dati sono stati convertiti in file ASCII mediante il software “Geoexplorer”, fornito a supporto dello strumento utilizzato, quindi elaborati per ottenere spettri di velocità in funzione della frequenza. Per evitare di introdurre basse frequenze spurie i dati sono stati corretti per offset e trend ma non filtrati così come raccomandato dalla norma DIN 4150-3. In fase operativa si sono seguite le seguenti operazioni:

- il rumore sismico è stato registrato nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo dell'ordine delle decine di minuti;
- la registrazione è stata suddivisa in intervalli della durata di qualche decina di secondi ciascuno;
- per ogni segmento viene eseguita un'analisi spettrale del segmento nelle sue tre componenti;
- per ciascun segmento si calcolano i rapporti spettrali fra le componenti del moto sui piani orizzontale e verticale;
- vengono calcolati i rapporti spettrali medi su tutti i segmenti.

Per considerare la misura ottenuta come una stima dell'ellitticità delle onde di Rayleigh è necessario che:

- i rapporti H/V ottenuti sperimentalmente siano “stabili” ovvero frutto di un campionamento statistico adeguato;
- gli effetti di sorgente siano stati effettivamente mediati ovvero non ci siano state sorgenti “dominanti”;
- la misura non contenga errori sistematici (per es. dovuti ad un cattivo accoppiamento dello strumento con il terreno).

Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio si utilizza un codice di calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (HVSR) basati sulla simulazione del campo di onde di superficie (Rayleigh e Love) in sistemi multistrato a strati piani e paralleli secondo la teoria descritta in AKI (1964) e Ben-Menahem e

Singh (1981). Il codice può elaborare modelli con qualsiasi numero di strati (limitati a 50 nella tabella d'input), in qualsiasi intervallo di frequenze e in un qualsiasi numero di modi (fondamentale e superiori).

Operativamente si costruisce un modello teorico HVSR avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita. Successivamente, tramite uno specifico algoritmo, si cercherà di adattare la curva teorica a quella sperimentale; in questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde  $V_s$ .

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

$$V_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}} \quad \text{dove}$$

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

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

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

## 2.2 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE

L'interpretazione consente sia di correlare il valore di picco dello spettro di risposta HVSR con la profondità del substrato roccioso compatto (bedrock geofisico) e di individuare una corrispondenza tra i valori di frequenza relativi alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si possono ricavare il valore di frequenza caratteristica del sito.



Sapendo che ad ogni picco in frequenza corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto d'impedenza si può estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo.

Segue la planimetria con le ubicazione dei sondaggi e le tavole che illustrano gli elaborati delle prospezioni HVSR:

**ALLEGATO A: UBICAZIONE SONDAGGIO HVSR**



**ALLEGATO B: Rapporti di prova**

### SONDAGGIO SISMICO HVSR 1

#### PLACE INFORMATION

Place ID: ISOLA MARETTIMO  
 Address: -  
 Latitude: 37°58'00.48"N  
 Longitude: 12°04'32.87"E  
 Coordinate system: WGS84

#### SIGNAL AND WINDOWING

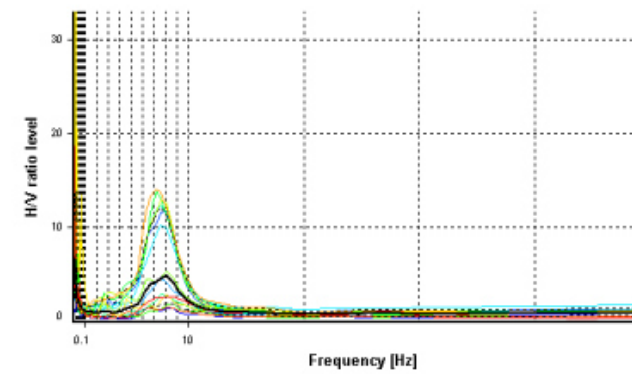
Sampling frequency: 300 Hz  
 Recording start time: 2021/01/28 12:02:34  
 Recording length: 20 min  
 Windows count: 14  
 Average windows length: 83.47  
 Signal coverage: 97.38%



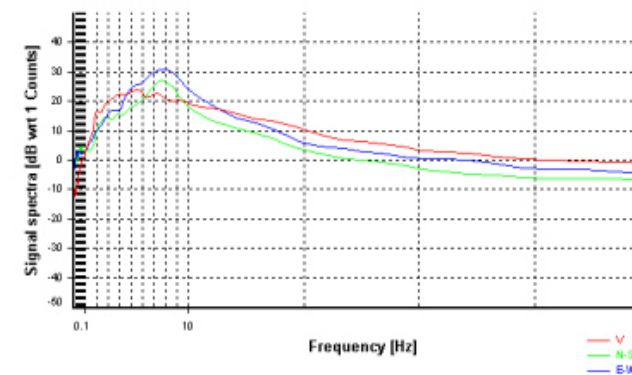
#### HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 2%)  
 Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 33)  
 Instrumental correction: Disabled

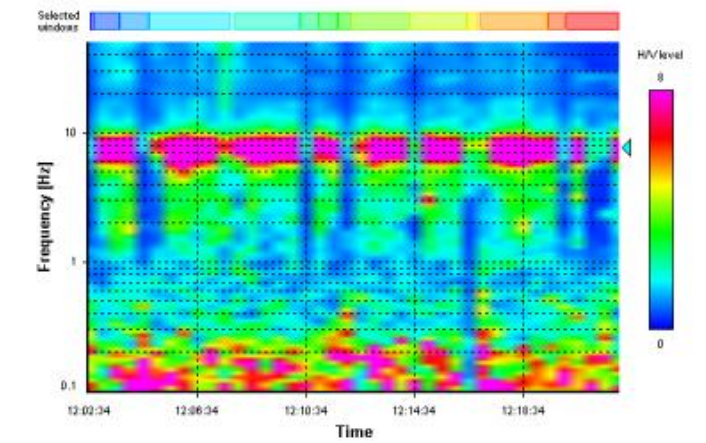
##### HVSR average



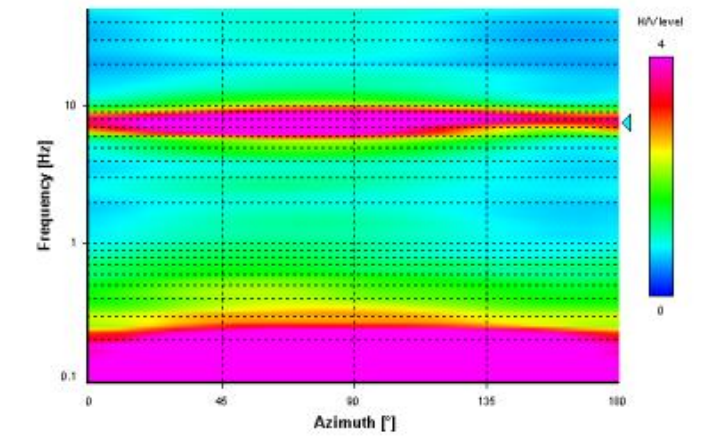
##### Signal spectra average



#### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)

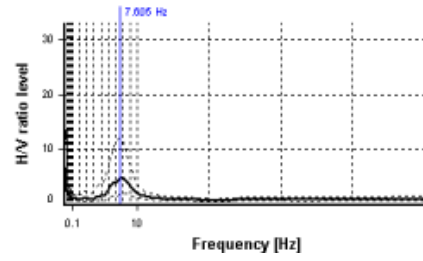


#### HVSR directional analysis

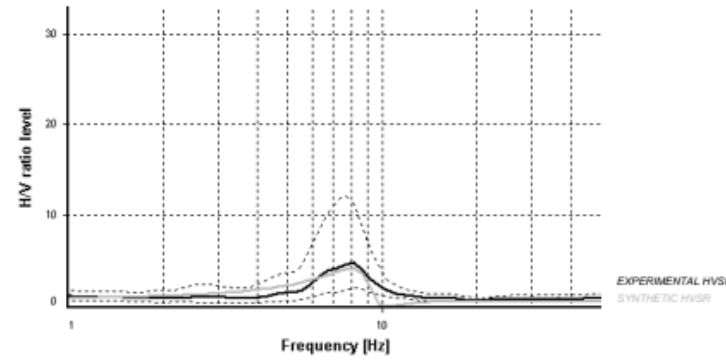


**SESAME CRITERIA**

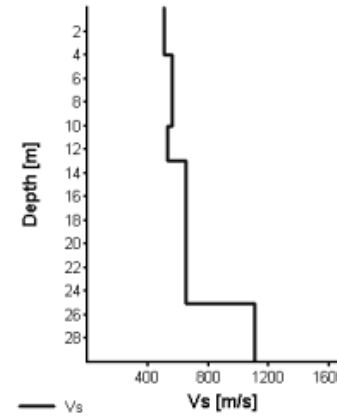
**Selected  $f_0$  frequency**  
 7.605 Hz  
 **$A_0$  amplitude = 4.609**  
**Average  $f_0 = 7.898 \pm 0.504$**



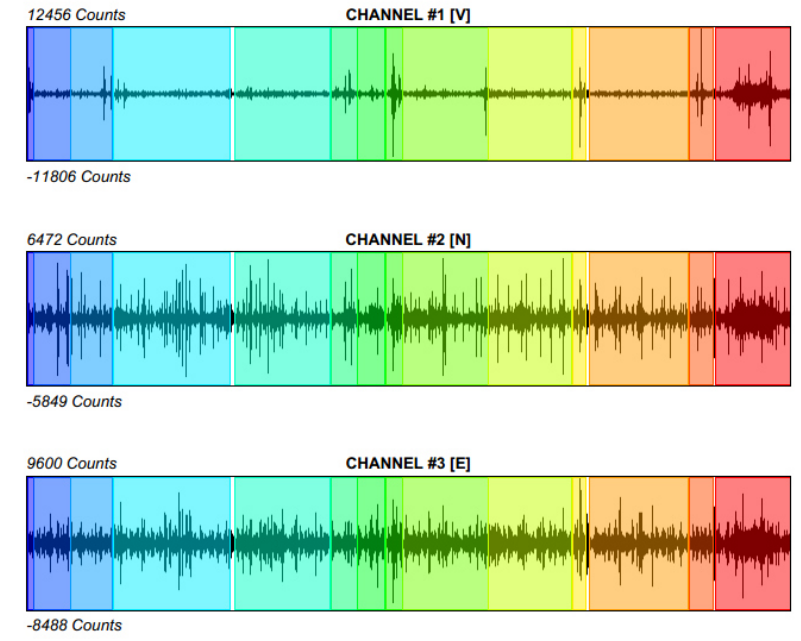
**Synthetic HVSR modelling**



H [m]	D [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
4	4	1455	500	2000
6	10	1650	555	2000
3	13	1600	530	2000
12	25	2200	650	2300
8	33	2300	1109	2300
-	> 33	2320	1480	2300



**V<sub>seq</sub> 30 = 632 m/s (Offset = 0 m)**



### SONDAGGIO SISMICO HVSR 2

#### PLACE INFORMATION

Place ID: ISOLA MARETTIMO  
 Address: -  
 Latitude: 37°57'50.46"N  
 Longitude: 12°04'31.65"E  
 Coordinate system: WGS84

#### SIGNAL AND WINDOWING

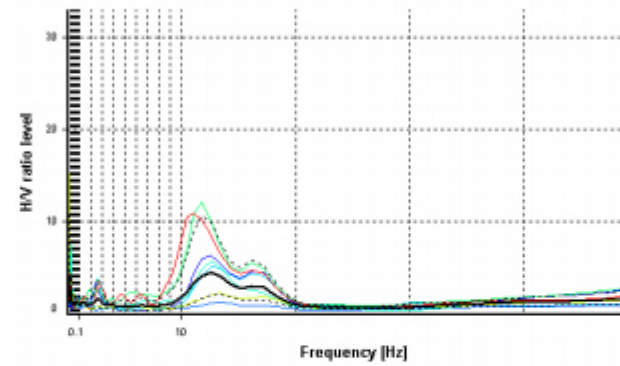
Sampling frequency: 300 Hz  
 Recording start time: 2021/01/28 16:53:40  
 Recording length: 10.93 min  
 Windows count: 7  
 Average windows length: 72.28  
 Signal coverage: 77.12%



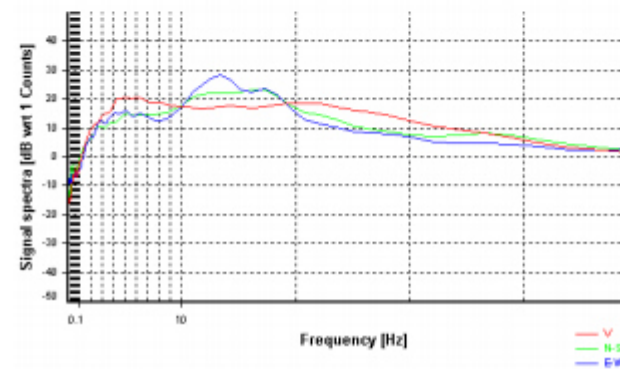
#### HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 2%)  
 Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 33)  
 Instrumental correction: Disabled

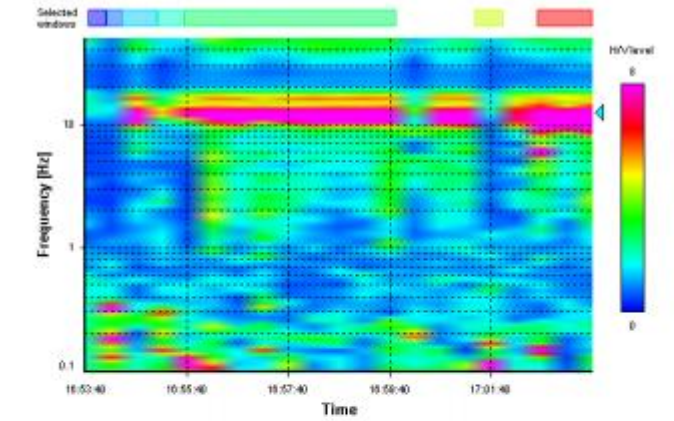
##### HVSR average



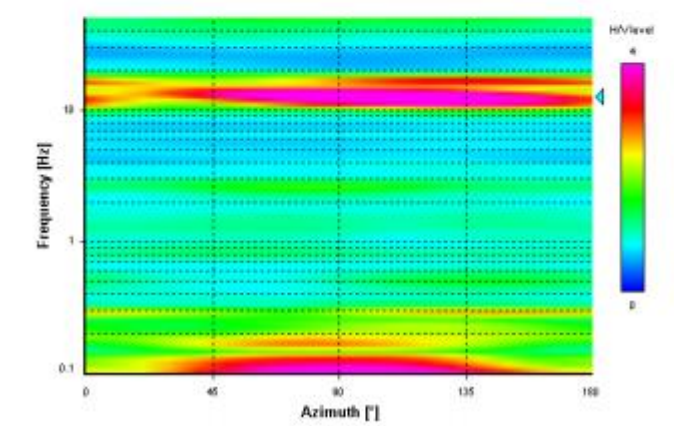
##### Signal spectra average

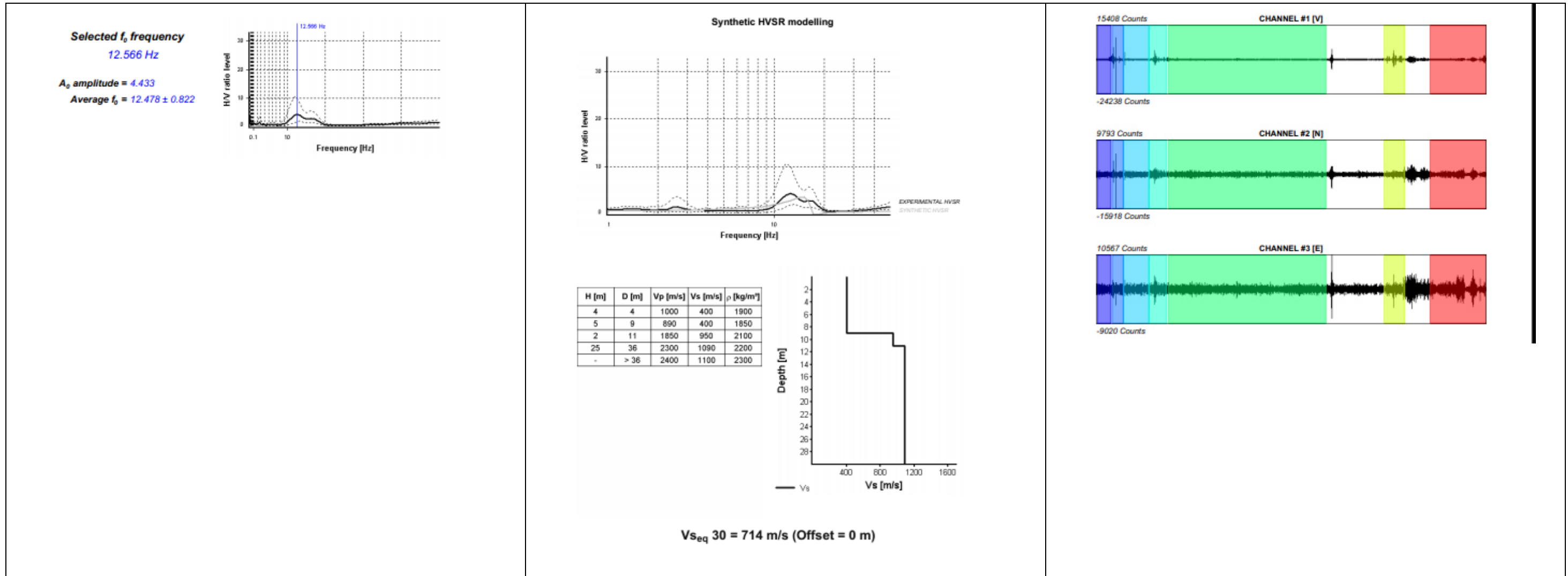


#### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



#### HVSR directional analysis





### SONDAGGIO SISMICO HVSR 3

#### PLACE INFORMATION

Place ID: ISOLA MARETTIMO  
 Address: -  
 Latitude: 37°57'53.14"N  
 Longitude: 12°04'28.95"E  
 Coordinate system: WGS84

#### SIGNAL AND WINDOWING

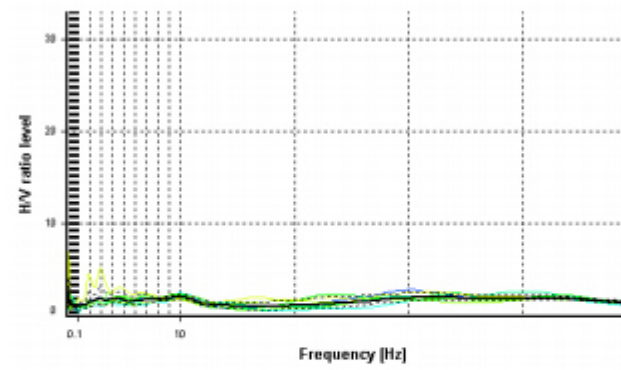
Sampling frequency: 300 Hz  
 Recording start time: 2021/01/29 10:14:57  
 Recording length: 15 min  
 Windows count: 7  
 Average windows length: 54.98  
 Signal coverage: 42.76%



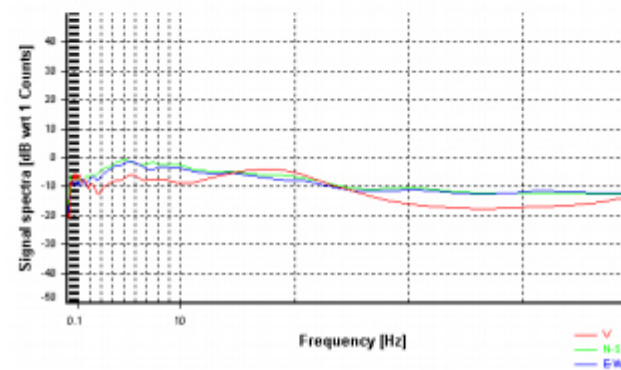
#### HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 2%)  
 Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 33)  
 Instrumental correction: Disabled

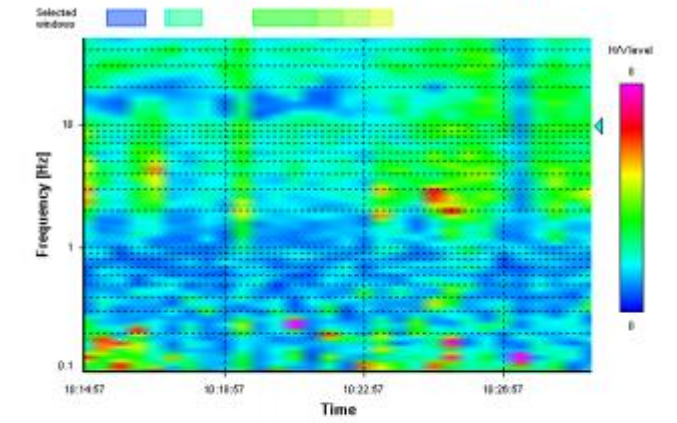
##### HVSR average



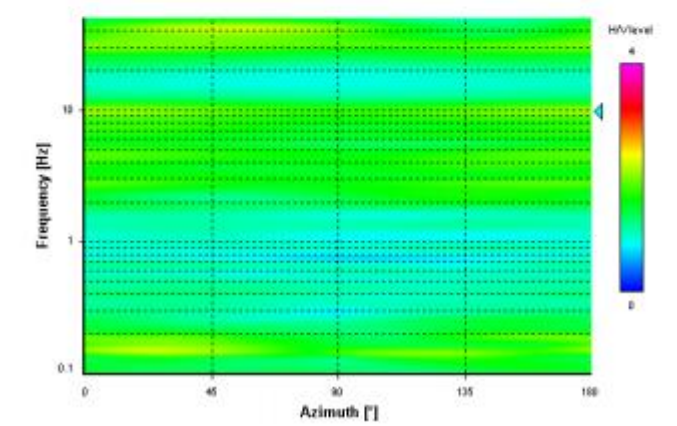
##### Signal spectra average



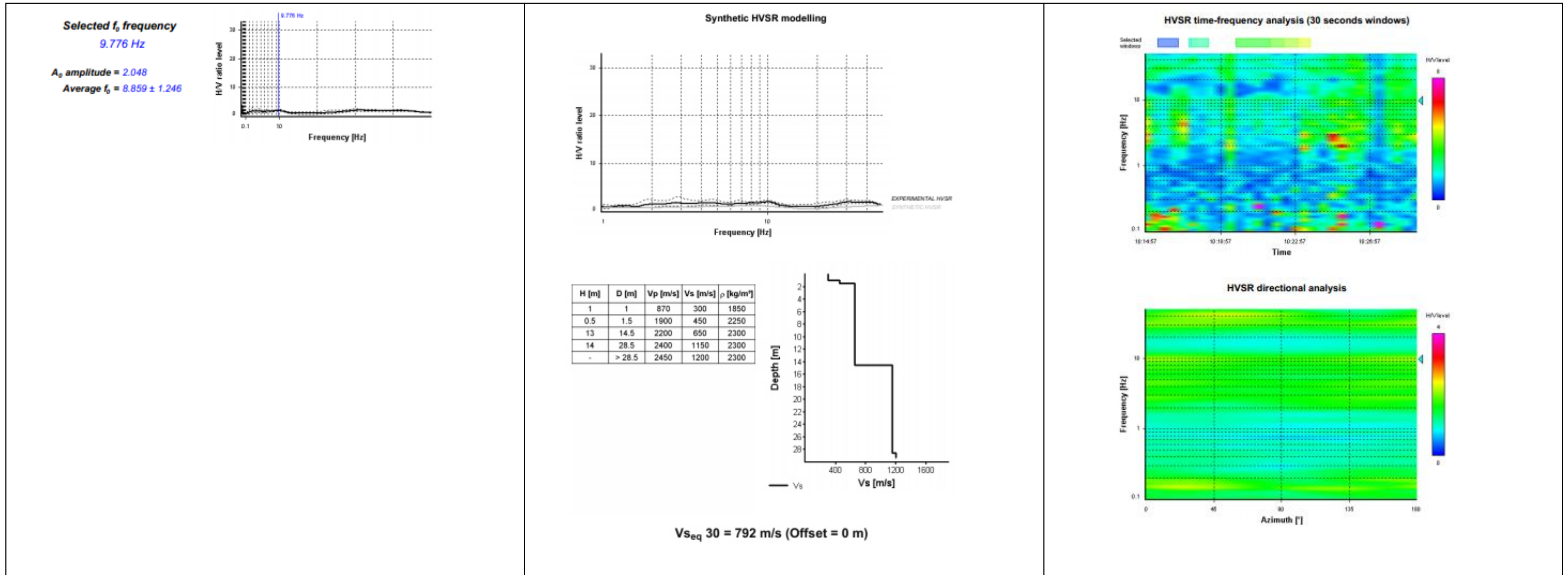
#### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



#### HVSR directional analysis







### SONDAGGIO SISMICO HVSR 4

#### PLACE INFORMATION

Place ID: ISOLA MARETTIMO  
 Address: -  
 Latitude: 37°57'54.32"N  
 Longitude: 12°04'28.33"E  
 Coordinate system: WGS84

#### SIGNAL AND WINDOWING

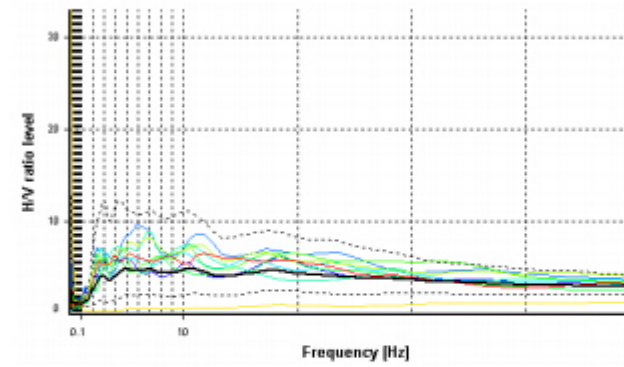
Sampling frequency: 300 Hz  
 Recording start time: 2021/01/29 10:36:02  
 Recording length: 7.5 min  
 Windows count: 9  
 Average windows length: 43.03  
 Signal coverage: 86.05%



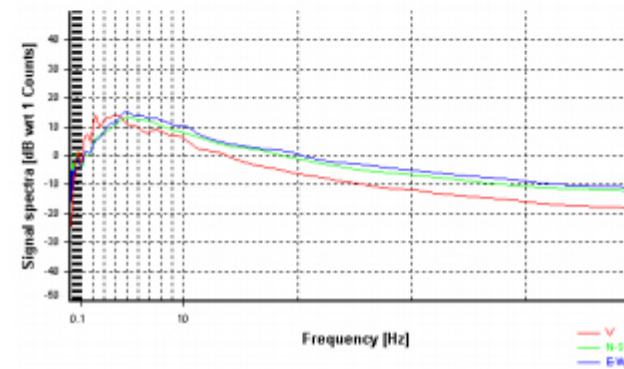
#### HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 2%)  
 Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 33)  
 Instrumental correction: Disabled

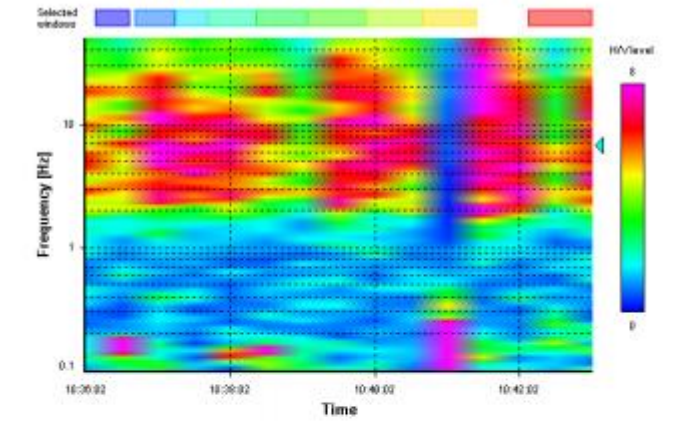
##### HVSR average



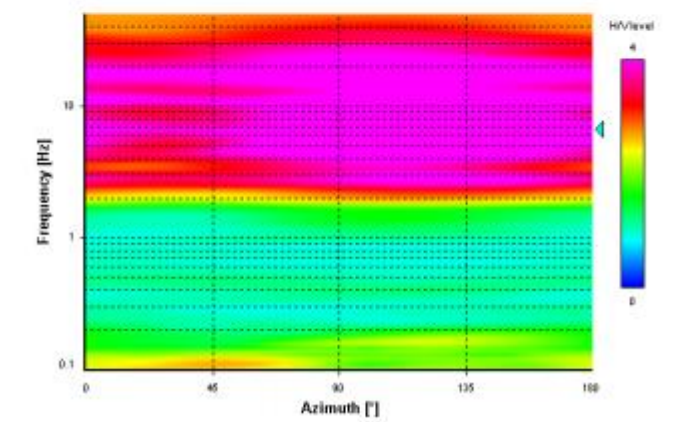
##### Signal spectra average

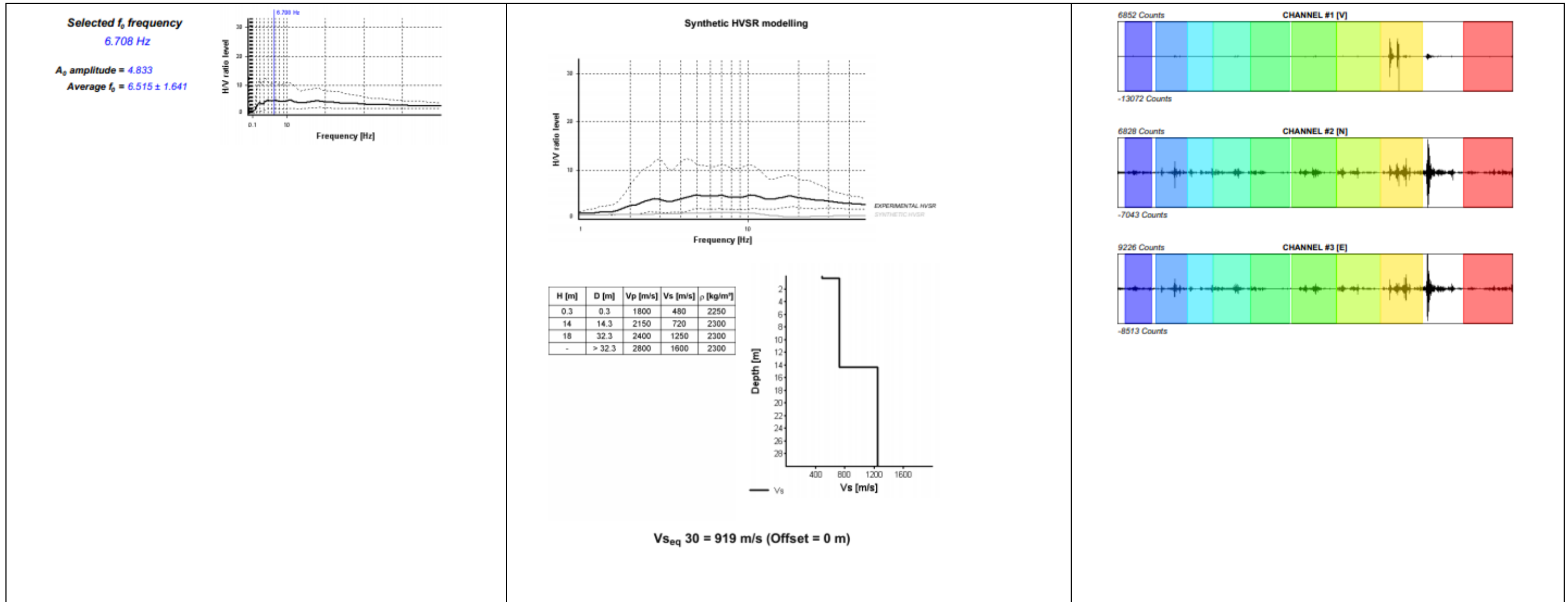


#### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



#### HVSR directional analysis





### SONDAGGIO SISMICO HVSR 5

#### PLACE INFORMATION

Place ID: ISOLA MARETTIMO  
 Address: -  
 Latitude: 37°57'58.22"N  
 Longitude: 12°04'26.97"E  
 Coordinate system: WGS84

#### SIGNAL AND WINDOWING

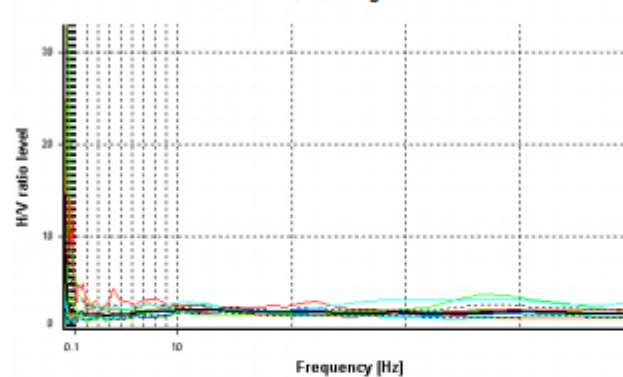
Sampling frequency: 300 Hz  
 Recording start time: 2021/01/29 10:49:08  
 Recording length: 7.5 min  
 Windows count: 8  
 Average windows length: 42.45  
 Signal coverage: 75.47%



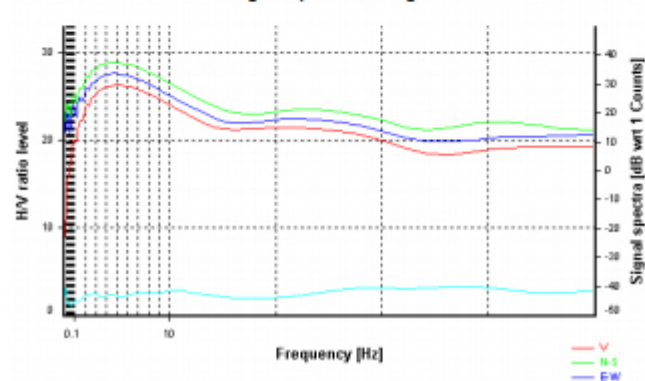
#### HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 2%)  
 Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 33)  
 Instrumental correction: Disabled

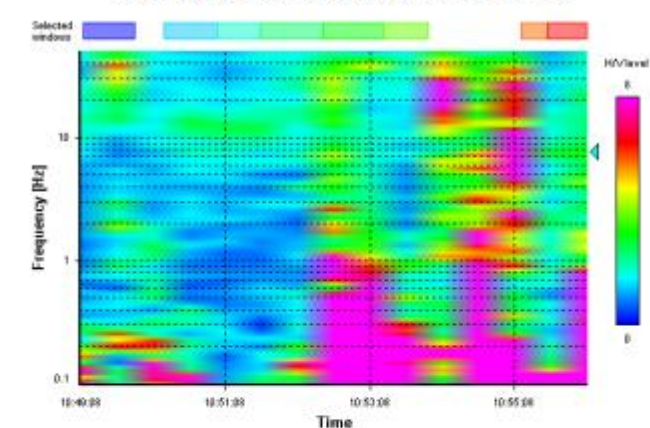
##### HVSR average



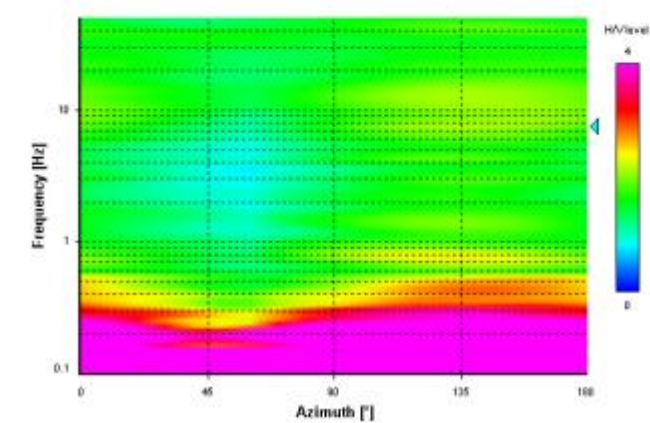
##### Signal spectra average

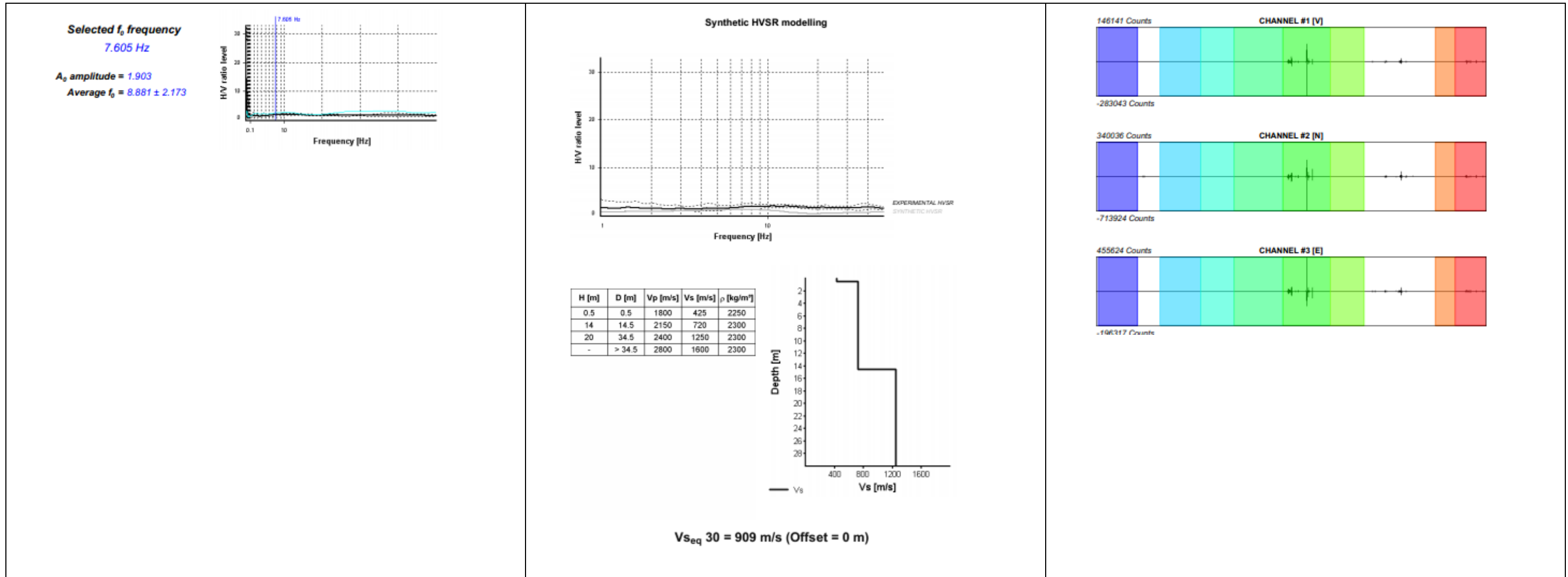


#### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



#### HVSR directional analysis





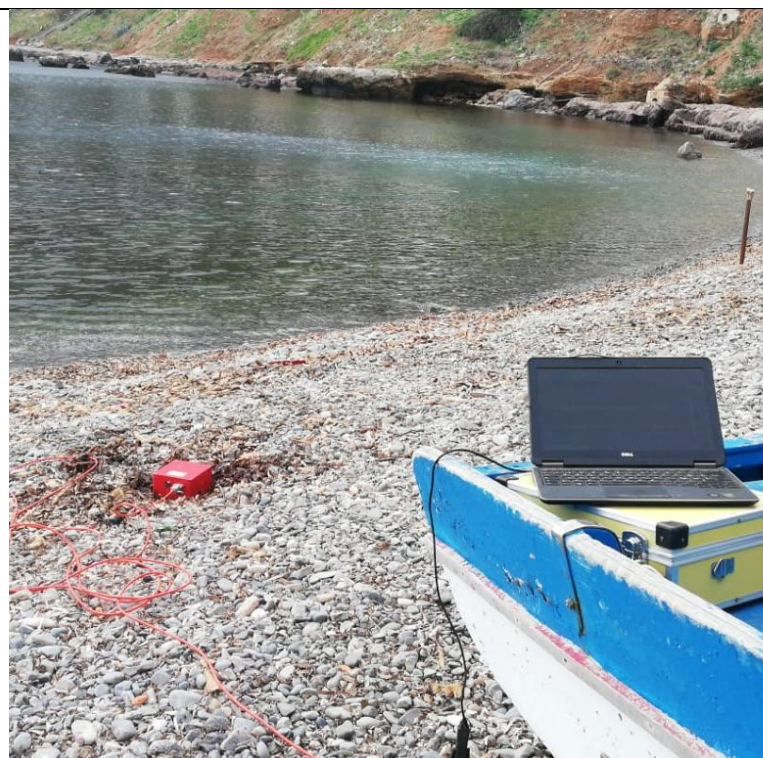
### SONDAGGIO SISMICO HVSR 6

#### PLACE INFORMATION

Place ID: ISOLA MARETTIMO  
 Address: -  
 Latitude: 37°58'01.19"N  
 Longitude: 12°04'27.53"E  
 Coordinate system: WGS84

#### SIGNAL AND WINDOWING

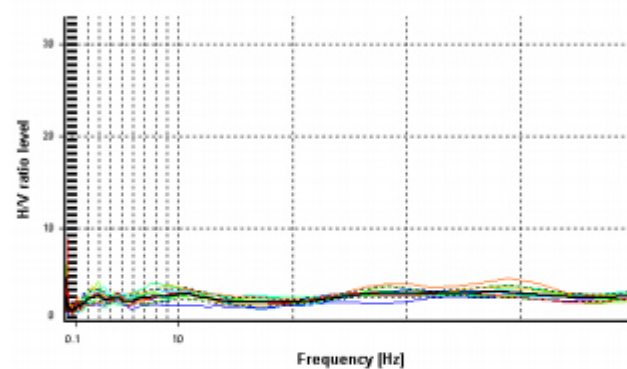
Sampling frequency: 300 Hz  
 Recording start time: 2021/01/29 11:47:44  
 Recording length: 15 min  
 Windows count: 10  
 Average windows length: 80.69  
 Signal coverage: 89.65%



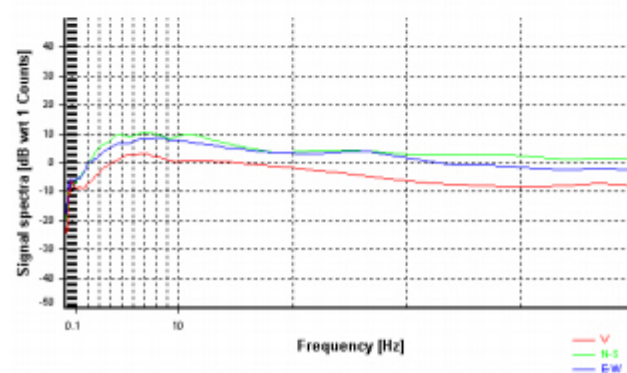
#### HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 2%)  
 Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 33)  
 Instrumental correction: Disabled

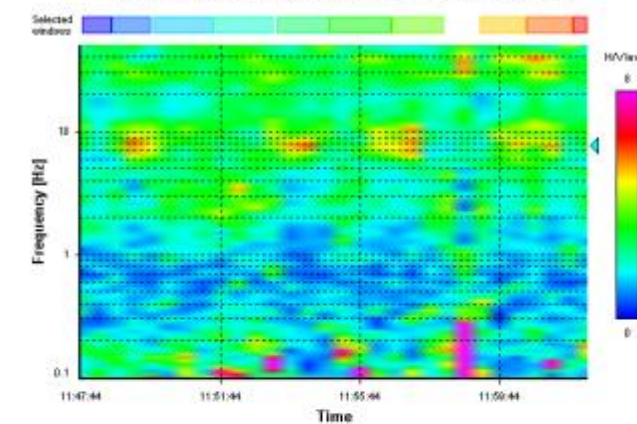
##### HVSR average



##### Signal spectra average



#### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



#### HVSR directional analysis

