



Comm: Azienda Territoriale per l'Edilizia
Residenziale della Provincia di Belluno
A.T.E.R.

**Caratterizzazione Sismica del Suolo
presso Castion (Bl)
lotto di via Berlendis**

*‘Progetto di completamento di un fabbricato residenziale esistente e
costruzione di un nuovo edificio per complessivi 8 alloggi E.R.P.’*

Relazione Tecnica

a cura di Dott. Geol. Jacopo Boaga
geofisico - Dottore di Ricerca

Indice

1. Le tecniche per la determinazione delle Vs30: il metodo FTAN	pg.3
2. Inquadramento sismico di Belluno	pg.5
3. Logistica di acquisizione	pg.7
4. Ubicazione delle indagini	pg 9
5. Elaborazione dei dati	pg 11
6. Periodo proprio del suolo	pg.14
7. Classificazione Sismica del Suolo	pg. 19
Bibliografia	pg. 21
ALLEGATO A	pg. 22

1. Le tecniche per la determinazione delle Vs30: Il metodo FTAN

Il parametro di classificazione sismica del suolo Vs30, introdotto dalla OPCM 3274 e mantenuto nelle Norme Tecniche per le Costruzioni secondo DM 14-01-2008, non prevede una generica stima delle Vs dei primi 30 metri di sottosuolo, ma impone la determinazione della media ponderata dei tempi di percorrenza degli *iesimi* strati fisici presenti nei primi 30 metri di sottosuolo, tramite la formula:

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} H_i/V_i}$$

dove H_i e V_i sono spessore e Vs dell'*iesimo* degli N strati presenti nei primi 30 metri di sottosuolo.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14-1-2008) raccomandano esplicitamente di eseguire direttamente le misure di Vs, ricorrendo ad altre tipologie di classificazione sismica del suolo solo se impossibilitati dalla misura geofisica diretta. In funzione del parametro Vs30, la normativa individua 5 classi di suolo:

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

La normativa individua inoltre 2 categorie di suoli speciali :

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Il parametro fisico del terreno V_s è di difficile definizione e richiede specifici metodi geofisici. La misura delle onde S del sottosuolo avviene per lo più con tecniche indirette da superficie che studiano la dispersione delle onde superficiali. Vi sono diverse metodologie di determinazione delle V_s , tra cui stendimenti sismici passivi e stendimenti sismici attivi. I primi studiano la dispersione delle onde superficiali sfruttando il solo rumore ambientale, senza indurre energizzazioni elastiche artificiali. I secondi invece producono artificialmente delle sollecitazioni elastiche nel terreno e ne misurano gli effetti, come la tecnica impiegata nel presente studio.

La tecniche passive sono afflitte dal problema ricadente nel mancato controllo delle fonti di rumore sismico. In presenza di fonti preferenziali di rumore, delle quali non è possibile verificare l'esistenza, le misure di velocità condotte lungo lo stendimento vengono falsate (spesso pesantemente sovrastimate) dalla potenziale errata geometria presunta del percorso dell'onda. In pratica si misura una velocità apparente e non si hanno parametri per ricondurla a velocità reale.

Per questo motivo è preferibile utilizzare stendimenti attivi, scegliendo opportunamente tra le tecniche possibili, e produrre artificialmente la propagazione di onde elastiche da studiare, per il totale controllo del fenomeno di propagazione studiato.

I metodi di studio della dispersione delle onde superficiali si dividono in metodi basati sullo studio della velocità di fase C [2] e della velocità di gruppo U [1]. Tra questi i più noti sono la tecnica MASW (basato su velocità di fase) e FTAN Frequency-Time-Analysis (basato velocità di gruppo).

$$U(\omega) = \frac{X}{[t_0 + \frac{d\phi_r(\omega)}{d(\omega)} - (\frac{d\phi_s(\omega)}{d\omega})]} \quad [1] \text{ Velocità di gruppo}$$

$$c(\omega) = \frac{X}{[t_0 + \frac{\phi_r(\omega) - \phi_s(\omega) \pm 2\pi N}{\omega}]} \quad [2] \text{ Velocità di fase}$$

dove t_0 è il ritardo del segnale analizzato rispetto al tempo d'origine, Φ_r e Φ_s i segnali di fase rispettivamente al ricevitore ed alla sorgente, alla frequenza radiale ω , ed N un numero intero da determinare empiricamente.

Senza entrare nelle specifiche fisiche che distinguono i diversi approcci, si può affermare che i metodi basati sulla velocità di fase soffrono una incertezza teorica inalienabile legata alla impossibile definizione se non empirica del parametro N , che viene assunto uguale ad un intero. I metodi che si basano sulla velocità di gruppo (e.g. **FTAN**), come si nota dalla [1] non sono funzione di tale parametro, e non soffrono quindi l'incertezza legata alla fisica impossibilità di corretta definizione di tale parametro.

Inoltre la tecnica FTAN prevede un trattamento dei risultati ottenuti, per ottenere un modello di sottosuolo, con controllo dell'errore da parte dell'operatore e permette una complessa inversione non lineare con controllo di errore (elaborante solitamente più di 3.000 soluzioni).

La Tecnica Frequency Time Analysis (FTAN) è una avanzata tecnica multifiltro per lo studio della dispersione dell'onda superficiale di Rayleigh, artificialmente indotta, che permette una realistica e dettagliata stima dell'andamento delle onde S in profondità. Elaborata per studi petroliferi profondi da oltre 50 anni, solo molto recentemente grazie allo sviluppo di un potente software di elaborazione e di sofisticati strumenti di acquisizione ha trovato applicazione per impieghi civili quali la definizione del parametro V_{s30} . Per questi motivi **FTAN** è nel mondo da oltre 50 anni utilizzato dalle più importanti compagnie di esplorazioni petrolifere e centri accademici (Boulder Colorado University, Université de Grenoble, Yale University, Università di Trieste, Università di Napoli, Università di Padova ecc.)

2. Inquadramento sismico di Belluno

Secondo l'Ordinanza 3519 del 28 aprile 2006, la pericolosità sismica della Regione Veneto, intesa come accelerazione massima orizzontale riferita a suolo rigido con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni è riportata in fig.1. La Regione Veneto, con Delibera del Consiglio Regionale n.67/03 ha recepito la classificazione sismica del territorio comunale stabilita con la ordinanza n. 3274/2003 e con successiva D.G.R. n. 71/2008 ha preso atto, tra l'altro, di quanto disposto dalla successiva ordinanza n.3519/2006.

La zonazione sismica regionale è riportata in fig.2. Il Comune di Belluno ricade nella zona di alta sismicità della Regione Veneto, essendo classificato in zona 2.

Si rammenta che per quanto concerne la descrizione dell'azione sismica, il Decreto 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture (GU n.29 del 04/02/2008) impone la definizione dell'azione sismica tramite una griglia definita a livello nazionale di valori atti a definire la risposta sismica locale per le diverse categorie di suolo (vedi cap. 8).

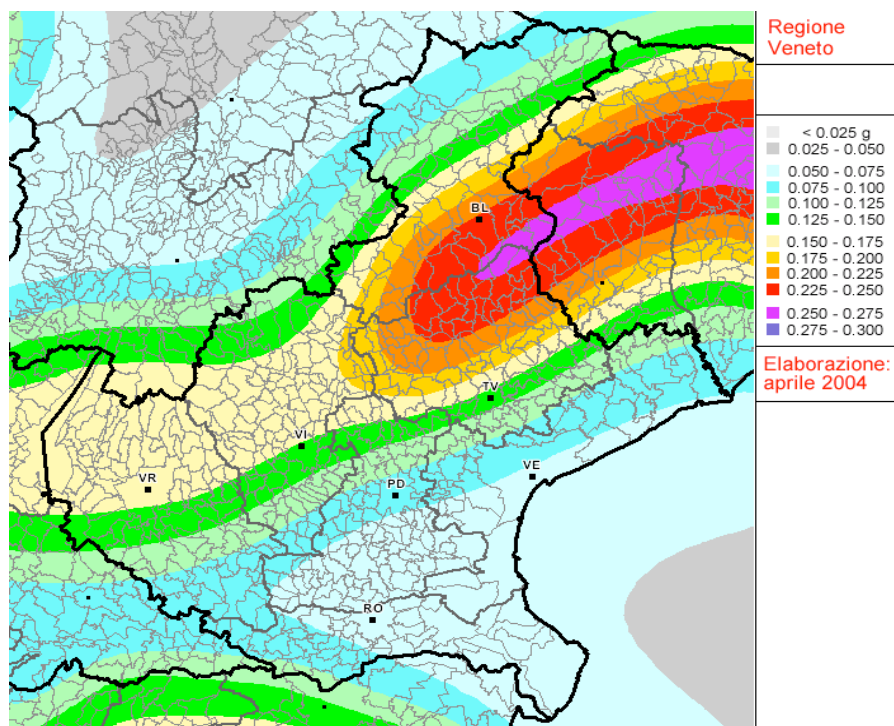


Fig.1 Pericolosità sismica del Veneto secondo Ordinanza 3519 del 28 aprile 2006

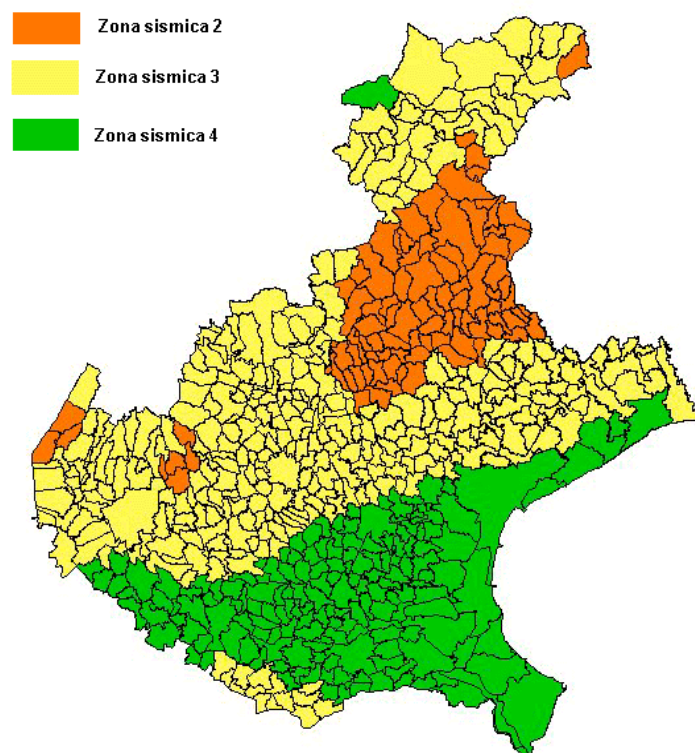


Fig.2 Classificazione sismica della Regione Veneto

3. Logistica di acquisizione

La tecnica **FTAN** offre una soluzione logistica di acquisizione di gran lunga facilitata, basandosi su acquisizione del segnale, ad una distanza di 70-100 m, con 2 strumentazioni molto sensibili (0.1-256 Hz, A/D 24bit), anziché plurimi geofoni a limitato range di frequenza, semplificando quindi operazioni di campagna e costi di acquisizione.

L'acquisizione di campagna prevede l'energizzazione al suolo previo fucile sismico Cal. 8 (Fig.3 strumento di lavoro regolarmente detenibile - Ministero dell'Interno- verbale 559/C 10656-e-91 del marzo 1994) e l'acquisizione contemporanea di 2 sismografi ad alta risoluzione posti a 60-100 metri di distanza.



Fig.3 Fucile sismico Cal.8

Gli strumenti di acquisizione sono dei sismografi tricomponenti con range di frequenza 0.1-256 Hz e dinamica di digitalizzazione a 24 bit (fig4).



Fig.4 Sismografo portatile

Le specifiche tecniche degli strumenti sono riportate in Tab.1. Le energizzazioni eseguite presso l'area di studio hanno previsto una frequenza di campionamento di 128 Hz per un tempo di acquisizione complessivo di 26 minuti per stazione. Il posizionamento degli strumenti è avvenuto tramite piedi di infissione, regolati con bolla micrometrica e verifica di ricezione radio satellitare costantemente monitorata.

Numero di canali 6+1 analogici	GPS 12 channels with time-marker (precisione 1 μ s), può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
Amplificatori tutti canali con input differenziali	Livella sferica di elevata precisione, sensibilità 5' d'arco (0.083°)
Rumore < 0.5 mV r.m.s. @128 Hz sampling	Connessioni porta USB, tipo B
Impedenza dell'input 10 ⁶ Ohm	Registrazione dati memoria interna 1Gb
Range di frequenze DC – 360 Hz	Dimensione e peso 10 x 14 x 7.7 cm; 1.1kg - contenitore di alluminio
Frequenza di campionamento 16384 Hz per canale	Accoppiamento col terreno su punte e cuscinetto reologico
Frequenze di sovra-campionamento 32x, 64x, 128x	Condizioni operative temperatura - 10 / +70°C umidità 0-90% senza condensa
Conversione A/D equivalente a 24 bit	Impermeabilità indice di protezione IP = 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
Massimo input analogico 51.2 mV (781 nV/digit)	Sensori 3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione, 3 accelerometri elettrodinamici ortogonali, autobloccaggio a riposo;
Display grafico grafico, 128 x 64 pixel, retroilluminato, tastiera 4 tasti a membrana	Orologio interno, permanente con datario e allarme

Tab1 Dati tecnici strumenti di acquisizione

Presso il sito indagato sono stati eseguiti n.1 stendimento sismico di complessivi 65 metri lineari e n. 3 acquisizioni di rumore sismico ambientale a stazione singola.

4. Ubicazione Indagini

La fig. 5 mostra l'ubicazione delle indagini; 'Std' indica lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo. HV1, HV2 e HV3 indicano i 3 punti di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzati alla definizione del periodo proprio del suolo.

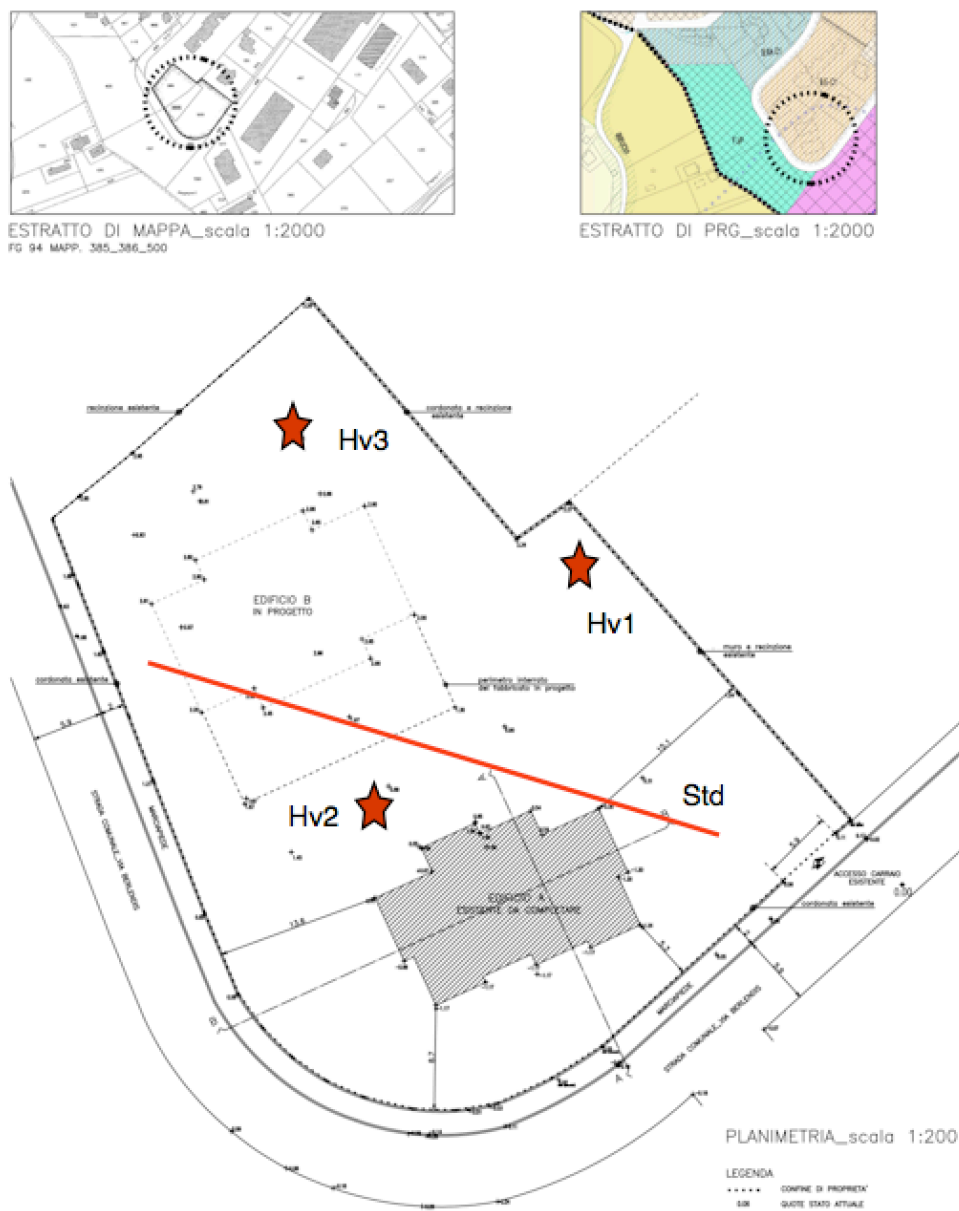


Fig.5 Ubicazione delle misure sismiche presso il sito di Castion. 'Std' indica lo stendimento sismico effettuato. Le stelle indicano le misure h/v1, h/v2 h/v3 stazioni di misura periodo proprio del suolo.



Indagini geofisiche eseguite presso Castion (BI)

5. Elaborazione dei dati

Per gli stendimenti sismici effettuati l'energizzazione artificiale ha prodotto il segnale visibile in fig.6, che ben identifica la dispersione delle onde superficiali tra 0.2 e 0.4 secondi dalla sollecitazione elastica effettuata.

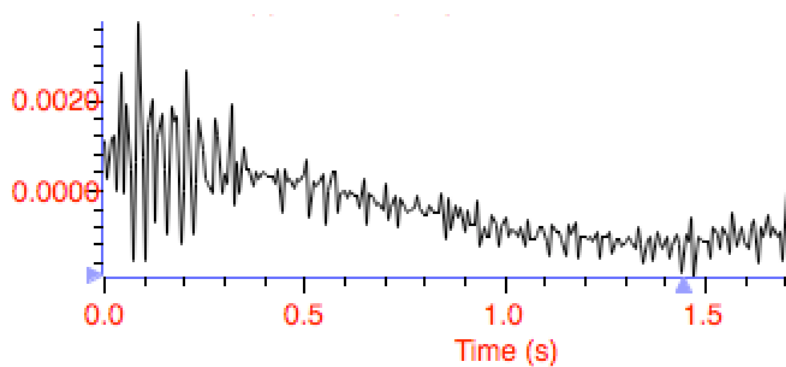


Fig.6 Segnale acquisito nello stendimento 1.

Dal segnale acquisito è ben individuabile l'energizzazione artificiale prodotta e l'individuazione del corpo d'onda di massima ampiezza attribuibile alle onde superficiali. Dopo primo pre-processing tramite applicazione di un filtro butterworth passa basso a 20Hz, il segnale acquisito è stato elaborato tramite la tecnica mutlifiltro FTAN (Frequency Time Analysis) per lo studio della dispersione delle onde di Rayleigh.

In fig. 7 è riportata la analisi FTAN per lo stendimento sismico 1. In figura sono riportati in alto il segnale originale (in nero), il segnale estratto considerato l'onda superficiale di Rayleigh (in rosso, sovrapposto all'originale), la FFT del segnale originale ed estratto. In centro è visibile ma la mappa FTAN con in ascissa il periodo (s) ed in ordinata la velocità di gruppo dell'onda di Rayleigh (U) con visibile la curva di dispersione estratta per ciascun segnale generato (verde scuro). In verde chiaro sulla mappa è mostrata la curva di dispersione della struttura di terreno visibile sul riquadro destro, come si vede in accordo con quella strumentalmente ottenuta.

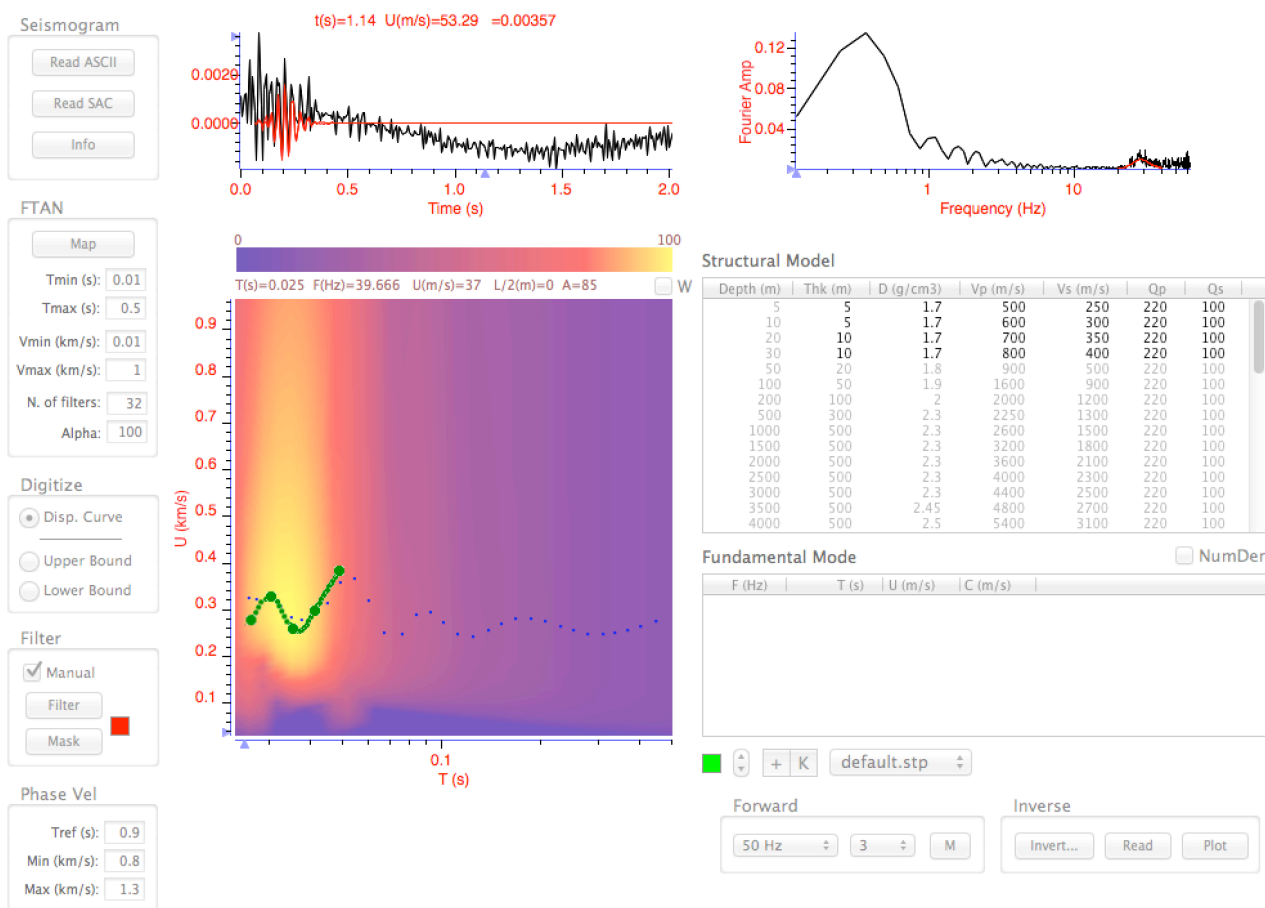


Fig. 7 Mappa FTAN per lo stendimento sismico 1 (vedi testo per dettagli)

Il segnale acquisito ha permesso una soddisfacente elaborazione del dato per la stima delle Vs sino a 30 metri di profondità. La struttura di sottosuolo è stata modellizzata per via diretta tramite il processo di best-fit tra la dispersione del segnale registrato e la dispersione della struttura considerata. Tale struttura di sottosuolo è stata successivamente invertita tramite inversione non lineare tipo 'Hedgehog' (procedura Monte Carlo). Definiti i parametri di investigazione dello spazio e delle velocità ammissibili sotto una prestabilita soglia di errore, il segnale dello stendimento sismico 1 ha fornito 7 soluzioni accettabili su 5139. Tra le soluzioni accettabili si è scelta come soluzione di struttura di sottosuolo quella che presentava minimo errore di scarto nel range considerato e che più si addiceva alle condizioni geo-litologiche della zona. In fig. 8 è visibile la soluzione di sottosuolo considerate.

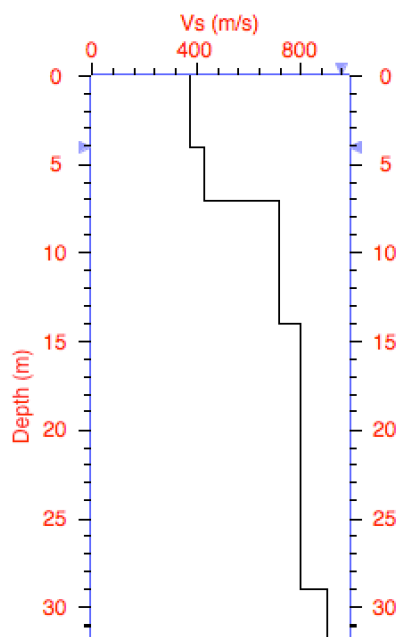


Fig.8 Struttura di sottosuolo proposta come soluzione accettabile dal processo di inversione per lo stendimento St1.

Nel contesto delle indagini effettuate le velocità sismiche rilevate sembrano coerenti con la presenza di materiale sciolto superficiale di media consistenza poggiante su substrato rigido. Le velocità sismiche S sono proprie di materiali a granulometria media sino ai 7 metri di profondità, poggianti su materiale roccioso.

6. Periodo Proprio di risonanza del suolo

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali.

E' stato utilizzato un tromografo digitale modello "Tromino" (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

La misura di rumore sismico è durata 28 minuti per punto di misura, con una frequenza di campionamento a 128 Hz. Il sito si è rilevato poco idoneo allo studio di microtremori ambientali, perchè affetto da rumori antropici di tipo veicolare. Le Figure dalla 9 alla 11 in successione mostrano gli spettri del rumore sismico ambientale sotto forma di rapporto spettrale H/V per le misure hv1, hv2 e h/v3 (vedi mappa in fig.5). Per ogni misura, oltre allo spettro H/V, sono mostrate le trasformate delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito. Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME (allegato A).

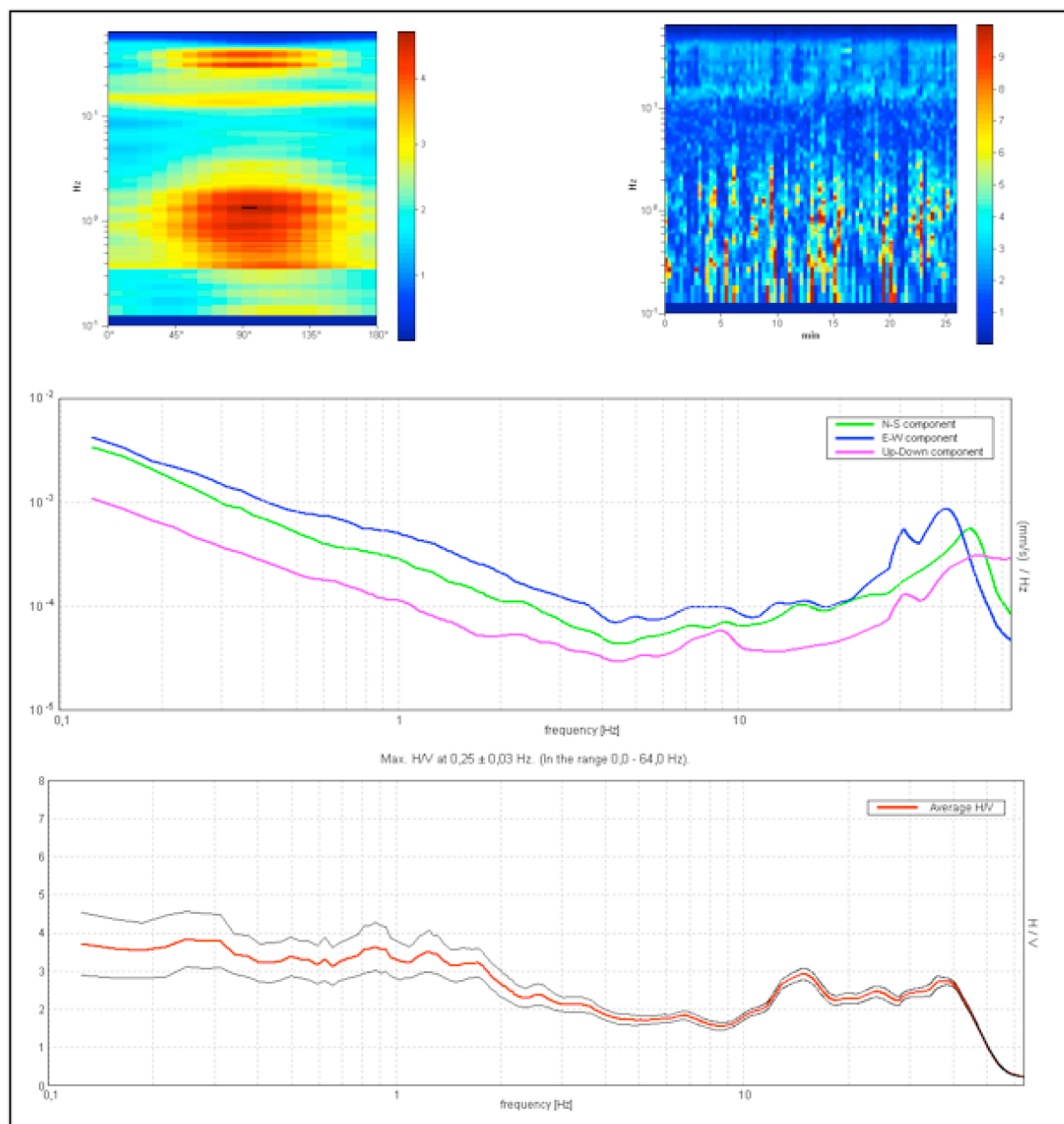


Fig.9 HV1. Dall'alto in senso orario: analisi direzionale del rumore, analisi temporale del rumore, spettri delle 3 componenti e rapporto H/V

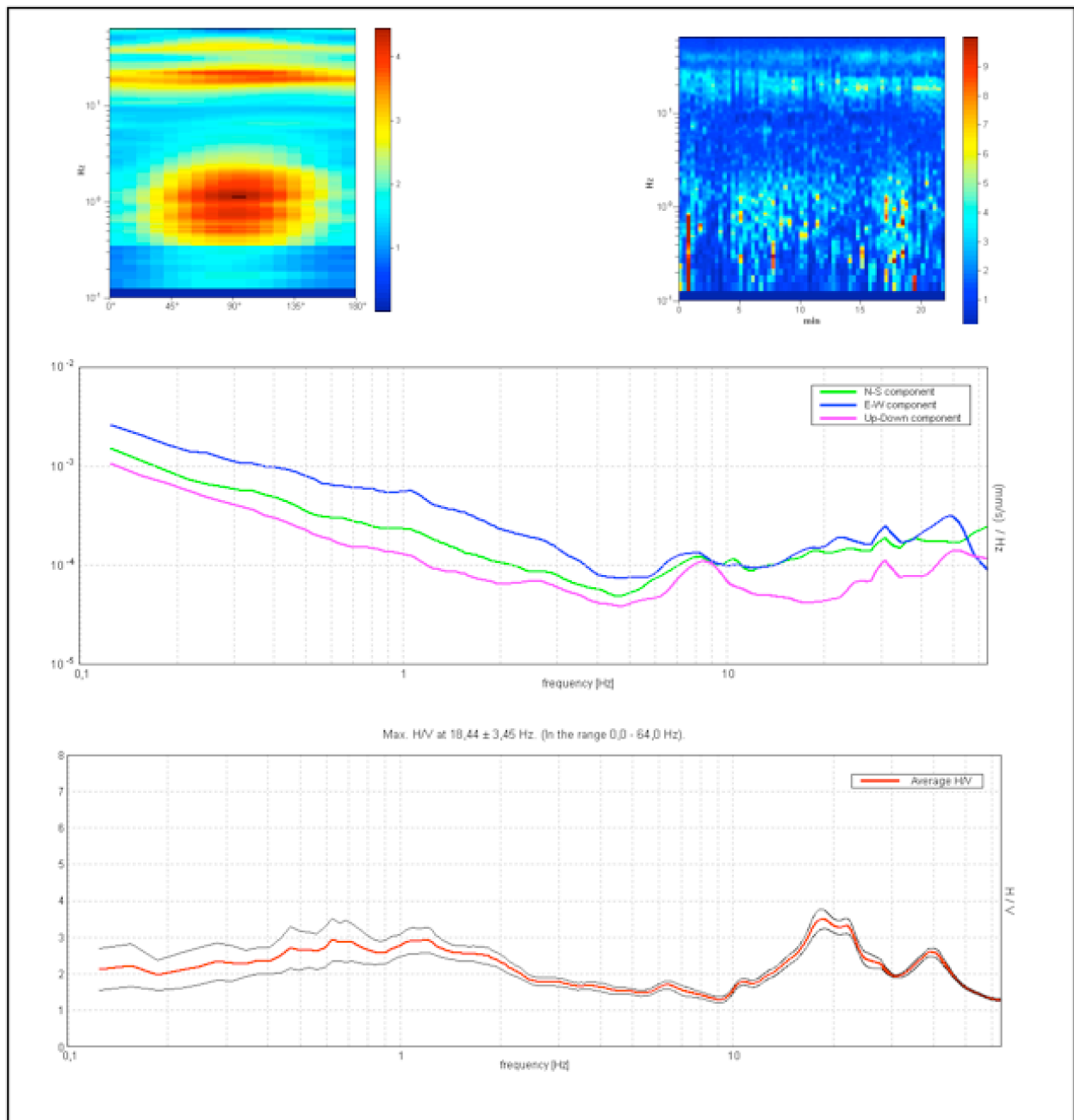


Fig.10 HV2. Dall'alto in senso orario: analisi temporale del rumore, analisi direzionale del rumore, spettri delle 3 componenti e rapporto H/V

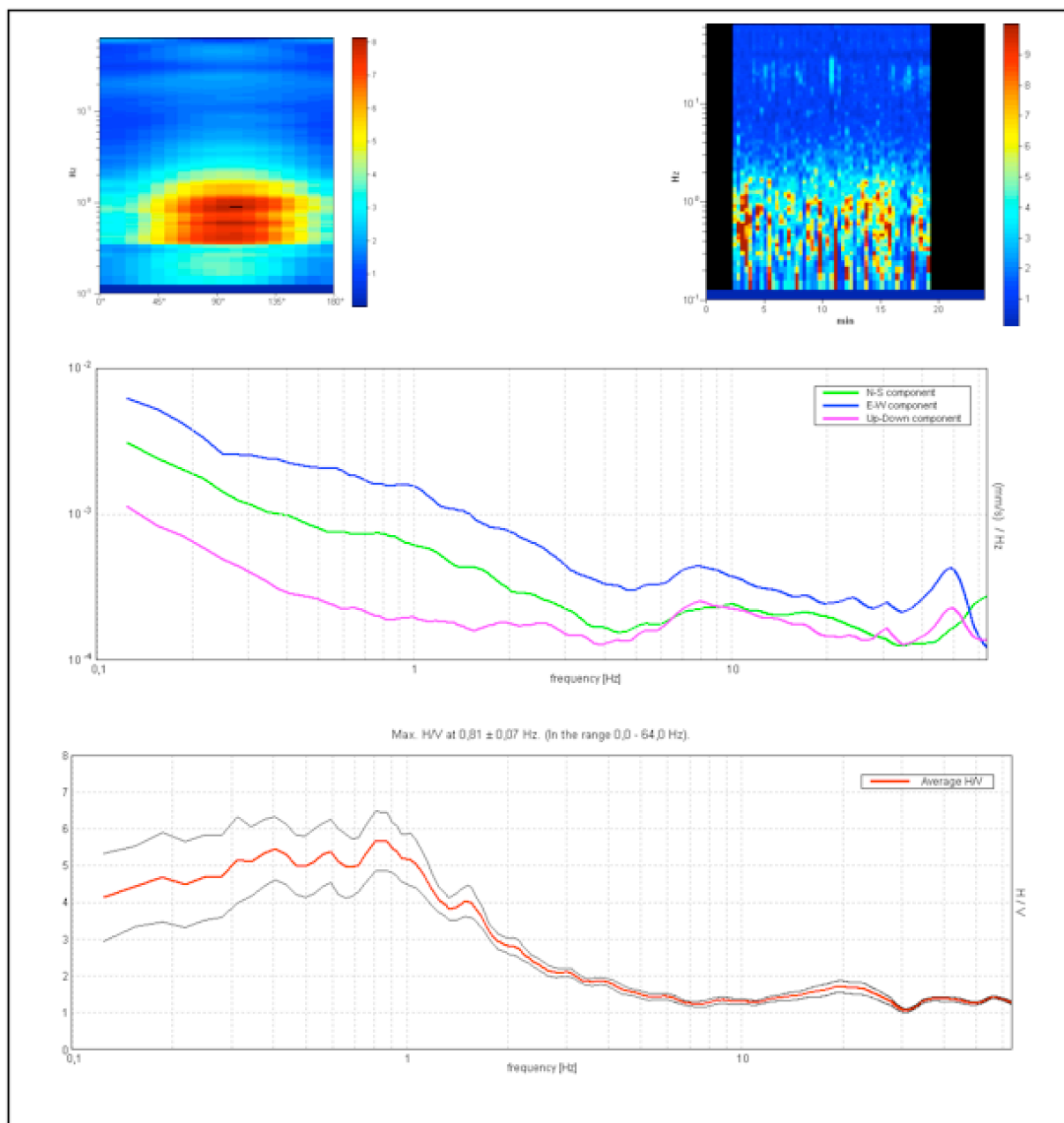


Fig.11 HV3. Dall'alto in senso orario: analisi temporale del rumore, analisi direzionale del rumore, spettri delle 3 componenti e rapporto H/V

Le misure effettuate sono concordi nel rivelare un evidente contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Fa eccezione la misura HV3 condizionata dalla forte direttività del rumore registrato e che non è utilizzabile. In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile dei picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo [1]:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s) \quad [1]$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la [2] con T periodo proprio del suolo:

$$T_s = 2\pi/\omega = 4H/V_s \quad [2]$$

Per il sito in esame, considerato la V_s media del sottosuolo a media profondità, si può stimare la profondità di un contrasto di impedenza acustica superficiale posto a circa 7 m dal p.c.

La misura del periodo proprio del suolo è stata inficiata dal forte vento presente sul sito di misura. Non tutte le misure sono risultate perciò utilizzabili. Ciò nonostante la ridondanza di dati ha permesso di definire la risonanza del sito. Sulla base di queste considerazioni si indica come frequenza propria di sito il valore di 18 Hz, ovvero di 0.055 s di periodo proprio, come confermato dai test di validazione (all.A)

7. Classificazione sismica del suolo

Secondo la misura sperimentale effettuata e la conseguente modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, il sito in indagine risulta caratterizzato da materiale sciolto poggiante su materiale roccioso. Per i primi 7 metri di profondità la V_s media è:

$V_s(7) =$	373 m/s
------------	----------------

Considerata la stima di incertezza del dato acquisito, nonché la velocità dello strato litoide sottostante, per la valutazione dell'azione sismica si propone la classificazione del suolo per l'area investigata come:

Categoria di sottosuolo = E
<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).</i>

Condizioni topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $I < 15^\circ$

Nel contesto delle indagini effettuate le velocità sismiche rilevate sembrano coerenti con una presenza di materiale sciolto a granulometria media sino a 7 m di profondità dal p.c. Le qualità meccaniche del sottosuolo migliorano gradualmente con la profondità. La riscontrata indicazione del rapporto spettrale di rumore conferma la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica superficiale.

Considerata l'incertezza insita nella stima della velocità sismica e l'eterogeneità geologica del sito, si propone di considerare l'azione di amplificazione stratigrafica in termini cautelativi, considerando il sito come caratterizzato da un livello di materiale sciolto (< 20 m) poggiante su substrato roccioso.

In conclusione, considerati i risultati delle misure sperimentali effettuate e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si indica, per quanto concerne la classificazione sismica del suolo secondo DM 14-1-08, di adottare per il sito in esame un SUOLO TIPO E.

Venezia, 18 marzo 2013

Relazione Tecnica a cura di Dott. Geol. Jacopo Boaga, iscritto Ordine Regionale dei Geologi n. 721

Dott. Geol. Jacopo Boaga



Bibliografia metodo FTAN e Vs

- BOAGA J, VIGNOLI G and CASSIANI G Shear wave profiles from surface wave inversion: the impact of uncertainty on seismic site response analysis IOP PUBLISHING JOURNAL OF GEOPHYSICS AND ENGINEERING J. Geophys. Eng. 8 (2011) 1–13
- BOAGA J, RENZI S, VIGNOLI G, DEIANA R, and CASSIANI. The importance of a 2D approach in surface wave inversion: consequences on seismic site response analysis. In Atti XXIX Convegno Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Prato 26-28 ottobre 2010
- BOAGA J, Renzi S, Vignoli G, Deiana R, and Giorgio Cassiani. From surface wave inversion to seismic site response prediction: beyond the 1D approach. Soil Dynamic and Earthquake Engineering (2011)
- VIGNOLI G, Cassiani G, Rossi M, Deiana R, Boaga J and Fabbri(P (2010) Characterization of a small pre-alpine catchment using surface waves. In press for publication to Near Surface Geophysics special Issue: Surface Waves for Exploring at Different Scales May 2011
- BOAGA J., VACCARI F., PANZA G.F. (2010), Shear wave structural models of Venice Plain, Italy, from Time Cross-Correlation of seismic Noise, Engineering Geology 20010 N.116, in press DOI information: 10.1016/j.enggeo.2010.09.001
- BOAGA J. ILICETO V. (2007) *La valutazione del parametro Vs30 e del periodo proprio di vibrazione: il ruolo della Geofisica*. Ingegneri del Veneto, N.3 2007
- BOAGA J. ILICETO V. VACCARI F. and PANZA G.F (2007). "Shear-Waves Structural Model of Venice Plain (Italy), from Seismic Noise measurements" Proc. American Geophysical Union - General Meeting 12/2007 S.Francisco-USA
- BOAGA J. (2008) *Seismic Noise and controlled source surveys: tools for seismic hazard deterministic approach (Field measurements in Venice Plain, Italy)*. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Università di Padova
- BOAGA J., VACCARI F., PANZA G.F., (2008) 'Shear wave structural models of Venice Plain, Italy, from Time Cross-Correlation of seismic Noise', Engineering Geology, submitted
- BOAGA J. ILICETO V. (2008) 'Shear wave structural model from Time Cross-Correlation of seismic Noise' Geologia Tecnica e Ambientale N.1/08
- ILICETO V., BOAGA J. VACCARI F. (2006): 'Valutazione delle Vs30 in terreni lagunari mediante il metodo FTAN (Frequency Time Analysis)' Atti del Workshop di Geofisica: "La Geofisica in ambiente estremo", Rovereto (TN), 9-12-2006
- LEVSHIN A, PISARENKO V.F., POGREBINSKY G.A. (1972) On a frequency-time analysis of oscillations, Ann Geophys. t128, fasc2, pp 211-218
- LEVSHIN A. RATNIKOVA L.I. BERGER J. (1992) Peculiarities of surface wave propagation across Central Eurasia. Bull Seism. Soc. Am. 82 2464-2493
- NUNZIATA C. (2005) FTAN method for detailed shallow VS profiles, Geologia Tecnica e Ambientale, 3, 51-69
- NUNZIATA, C., COSTA, G., NATALE, M., PANZA, G. F., 1999a - FTAN and SASW methods to evaluate Vs of neapolitan pyroclastic soils. In Earthquake Geotechnical Engineering. 1: 15-19. Balkema.
- NUNZIATA, C., COSTA, G., NATALE, M., VUAN, A., PANZA, G. F., 1999b - Shear wave velocities and attenuation from Rayleigh waves. In Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials. 365-370. Balkema.
- NUNZIATA C., CHIMERA G., NATALE M., PANZA G.F., 2001 - Seismic characterization of shallow soils at Nocera Umbra, for seismic response analysis. Rivista Italiana di Geotecnica, XXXV (4): 31-38.
- PANZA G.F. 1976 Phase velocity determination of fundamental Love and Rayleigh waves. Pageoph. 114 753-764
- PANZA G.F. AND SUHADOLC P. 1987 Complete strong motion synthetics in Seismic strong motion synthetics Vol 4 pp 153-202 Ed. Bolt. B.A. Academic Press, Orlando
- PANZA G.F. SCHWAB F.A., KNOPOFF L. 1973 Multimode surface waves for selected focal mechanism - I Dip-Slip sources on a vertical fault plane. Geophys. J. R. Astr. Soc. 34 265-278
- PANZA G.F. VACCARI F. ROMANELLI F. 1996b The IUGS-UNESCO IGCP Project 414: Realistic modelling of Seismic Input for Megacities and Large Urban Area. Episodes. 22 26-32
- PANZA G.F., CAZZARO R., VACCARI F. (1997): Correlation between macroseismic intensities and seismic ground motion parameters. Annali di Geof., Vol. XL, N. 5, pp. 1371-1382.
- Chatelain, J.-L., B. Guillier, F. Cara, A.-M. Duval, K. Atakan, P.-Y. Bard and the WP02 SESAME team (2007). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings, Bull. Earthq. Engng., doi: 10.1007/s10518-007-9040-7.



ALLEGATO A

Test di Validazione

Misure di Periodo Proprio del Suolo

secondo indicazioni Progetto Europeo:

'Site Effects Assessment using Ambient Excitations'

CASTION, HVA

Start recording: 14/03/13 15:58:43

End recording: 14/03/13 16:24:43

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN; north south; east west; up down;
Y+ Y-; X+ X-; Z+ Z-

GPS data not available

Trace length: 0h26'00". Analysis performed on the entire trace.

Sampling frequency: 128 Hz

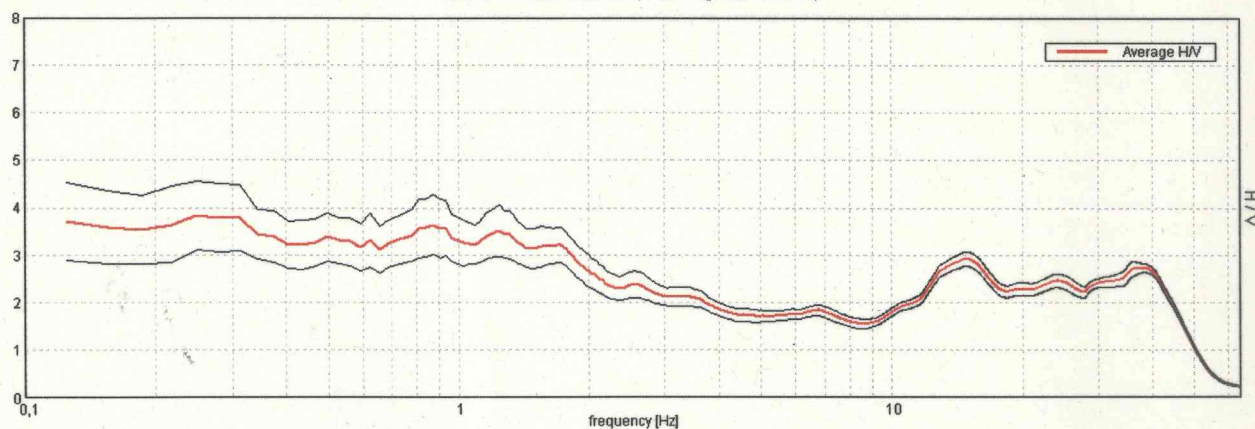
Window size: 20 s

Smoothing window: Triangular window

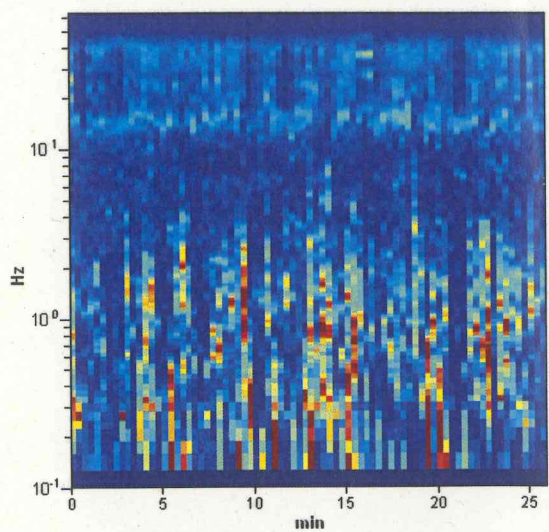
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

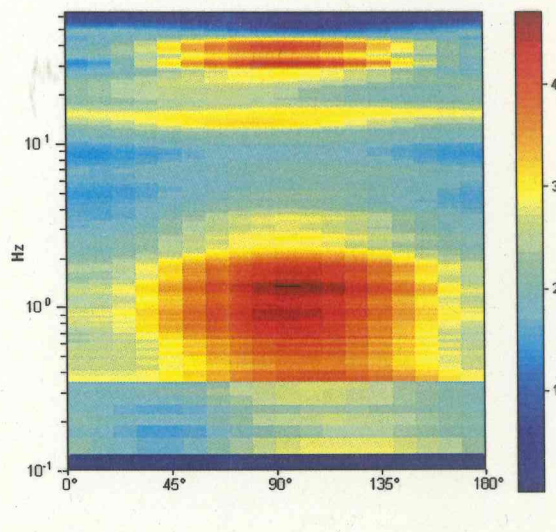
Max. H/V at $0,25 \pm 0,03$ Hz. (In the range 0,0 - 64,0 Hz).



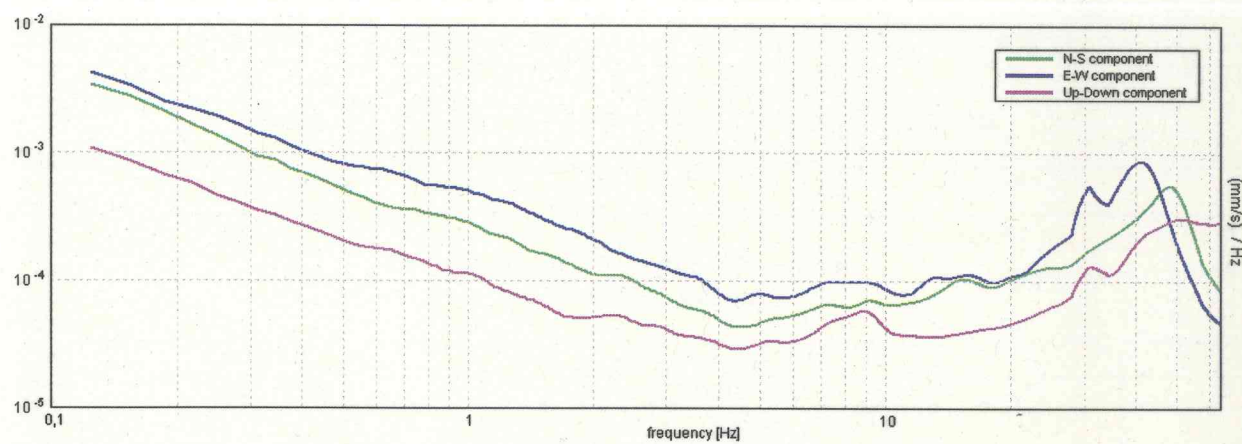
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 0.25 ± 0.03 Hz. (in the range 0,0 - 64,0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.25 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$390.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 13 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.0 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$355.89 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0 < 0.05$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.0 < 2.5$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

CASTION, HVB

Start recording: 14/03/13 16:36:55

End recording: 14/03/13 16:58:55

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN; north south; east west; up down;
Y+ Y-; X+ X-; Z+ Z-; TRG+ TRG-

GPS data not available

Trace length: 0h22'00".

Analysis performed on the entire trace.

Sampling frequency: 128 Hz

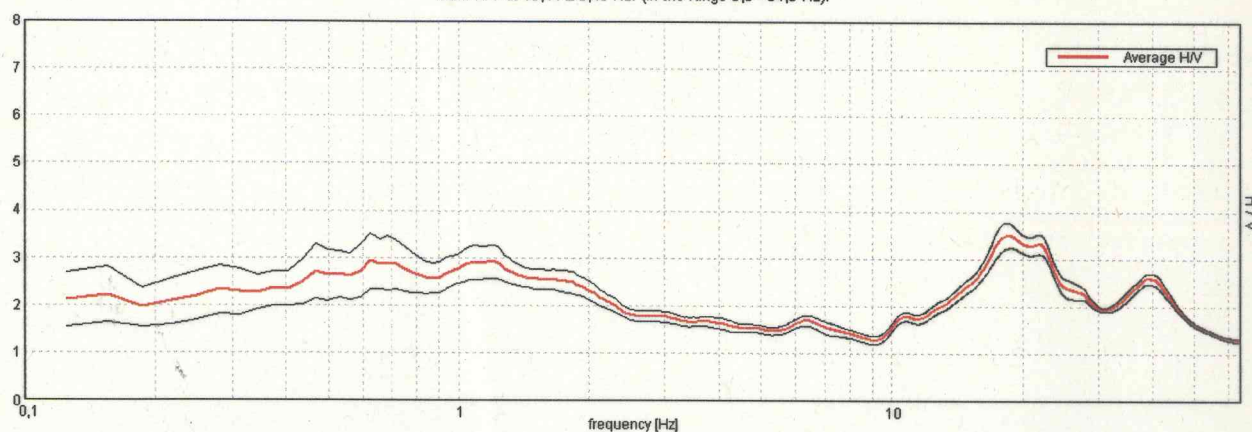
Window size: 20 s

Smoothing window: Triangular window

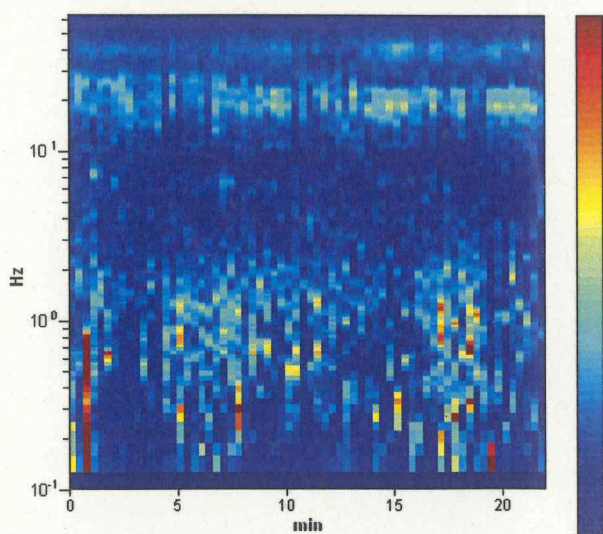
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

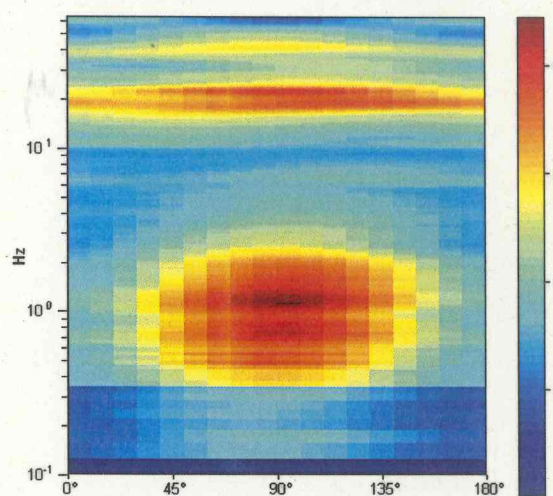
Max. H/V at $18,44 \pm 3,45$ Hz. (In the range 0,0 - 64,0 Hz).



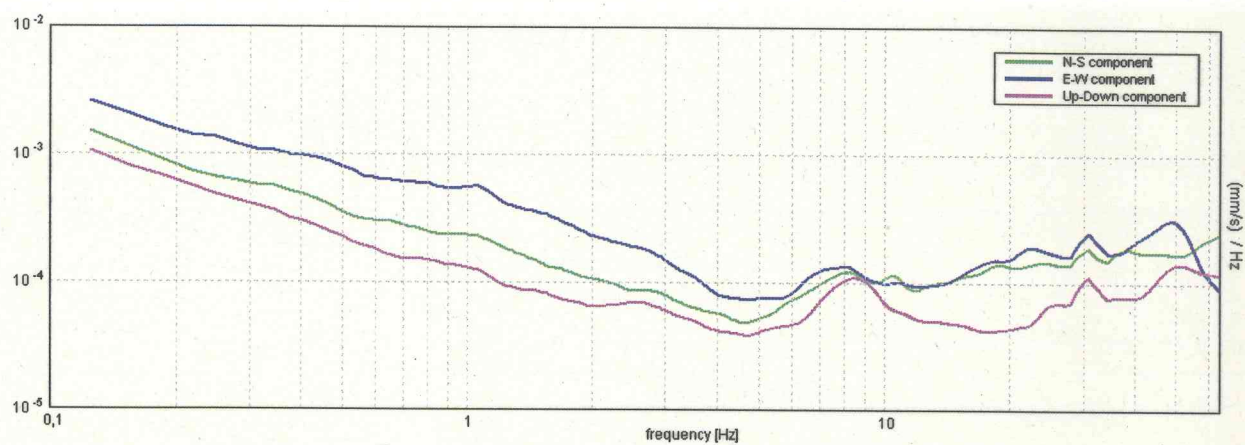
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at 18,44 ± 3,45 Hz. (in the range 0,0 - 64,0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	18.44 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	24337.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 886 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	11.688 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.0 Hz	OK	
$A_0 > 2$	127.08 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0 < 0.92188$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.0 < 1.58$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

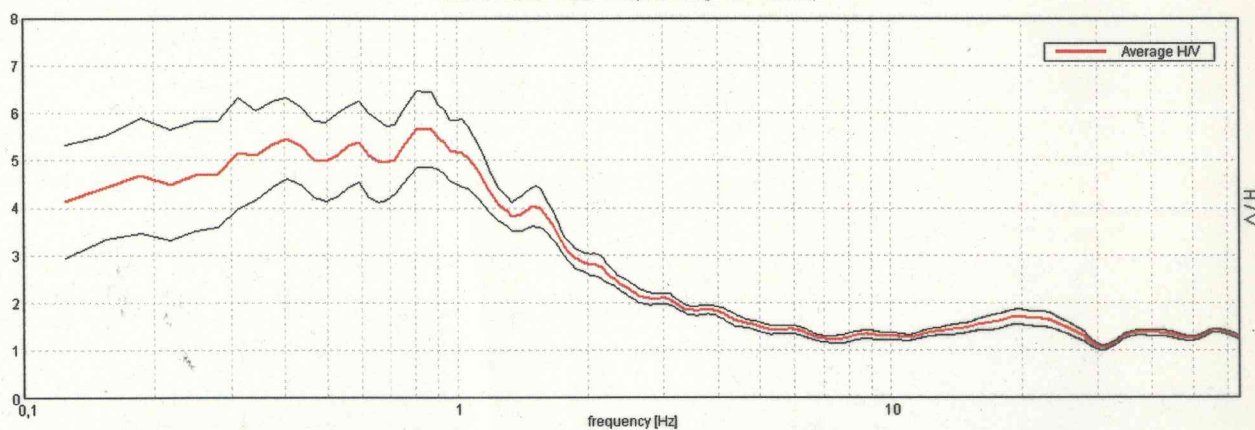
CASTION, HVC

Start recording: 14/03/13 16:39:03 End recording: 14/03/13 17:03:03
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN; north south; east west; up down;
Y+ Y-; X+ X-; Z+ Z-
GPS data not available

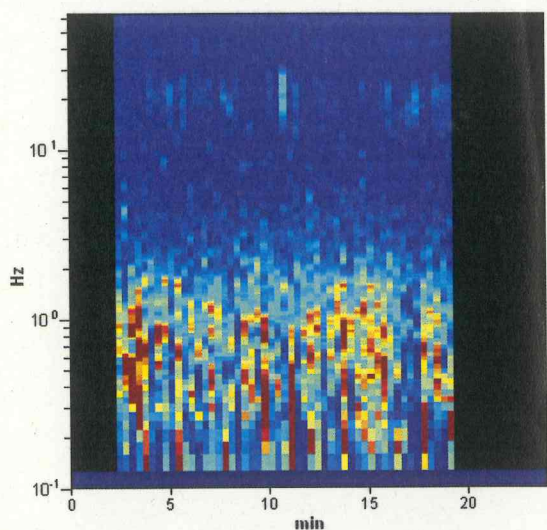
Trace length: 0h24'00". Analyzed 71% trace (manual window selection)
Sampling frequency: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing window: Triangular window
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

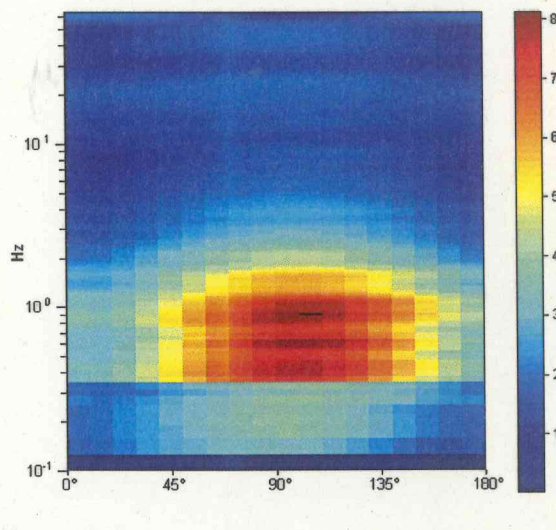
Max. H/V at $0,81 \pm 0,07$ Hz. (In the range 0,0 - 64,0 Hz).



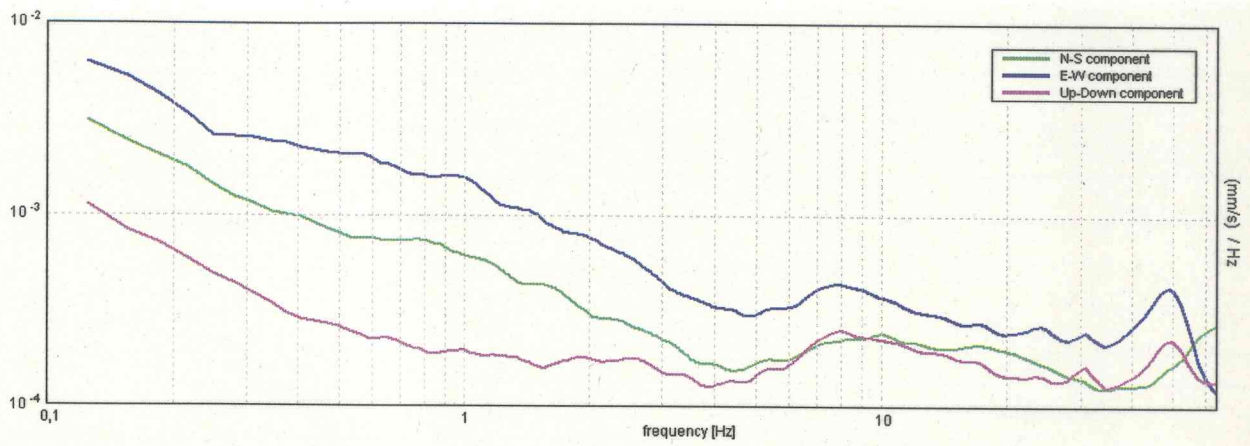
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.]

Max. H/V at $0,81 \pm 0,07$ Hz. (in the range 0,0 - 64,0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.81 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$828.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 40 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.0 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$5443.86 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0 < 0.12188$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.0 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20