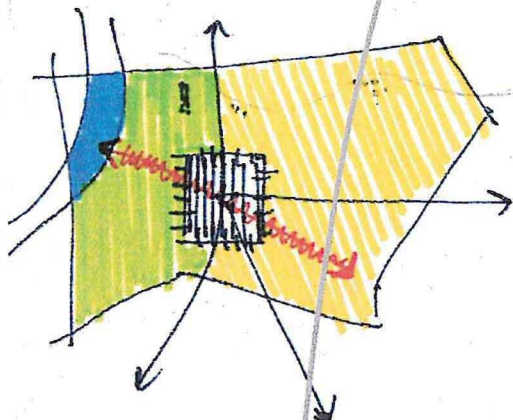


PGT Piano di Governo del Territorio

ProgettoSuzzara2009



Città di Suzzara



Città di Suzzara

Settore Territorio e Ambiente

Gruppo di Lavoro

prof.ssa Maria Cristina Treu
arch. Carlo Peraboni
arch. Giulia Tettamanzi
arch. Chiara Lanzoni
arch. Erika Ghitti

arch. Vittorio Valpondi
arch. Mario Berni
arch. Isabella Comin
arch. Martina Mazzali
dott.ssa Sara Guernieri

dott. Fulvio Baraldi
dott. Nicola Balboni
dott. Stefano Garimberti
dott. Guido Boselli

ALLEGATO B

Documentazione geologica
e geologico tecnica

DOCUMENTO DI PIANO

Aggiornamento: dicembre 2009

Indagine caratteristiche sismiche

Allegato

B



COMUNE DI SUZZARA (MN)

INDAGINE SULLE CARATTERISTICHE SISMICHE DEL TERRITORIO COMUNALE A SUPPORTO DEL NUOVO P.G.T.

INDICE

0. PREMESSA	pag. 3
1. AREA DI BRUSATASSO	pag. 5
2. AREA DI SUZZARA	pag. 9
3. AREA DI RIVA	pag. 13
4. AREA DI TABELLANO	pag. 17
5. AREA DI SAILETTO	pag. 21
6. SCHEMA RIASSUNTIVO	pag. 25
7. SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE	pag. 27

0. PREMESSA

Su incarico del Comune di Suzzara (Determinazione n° 417/TERR del 10.12.2009) è stata eseguita un'indagine sulle caratteristiche sismiche del territorio comunale, a supporto del nuovo P.G.T.

Al fine di verificare, seppur puntualmente, le caratteristiche geofisiche inerenti il sottosuolo del territorio in esame, è stata eseguita in cinque aree un'indagine sismica con il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), utilizzando la strumentazione "Tromino - Micromed"; le aree interessate sono:

- Brusatasso
- Suzzara
- Riva
- Tabellano
- Sailleto

Le principali caratteristiche tecniche del "Tromino" sono le seguenti:

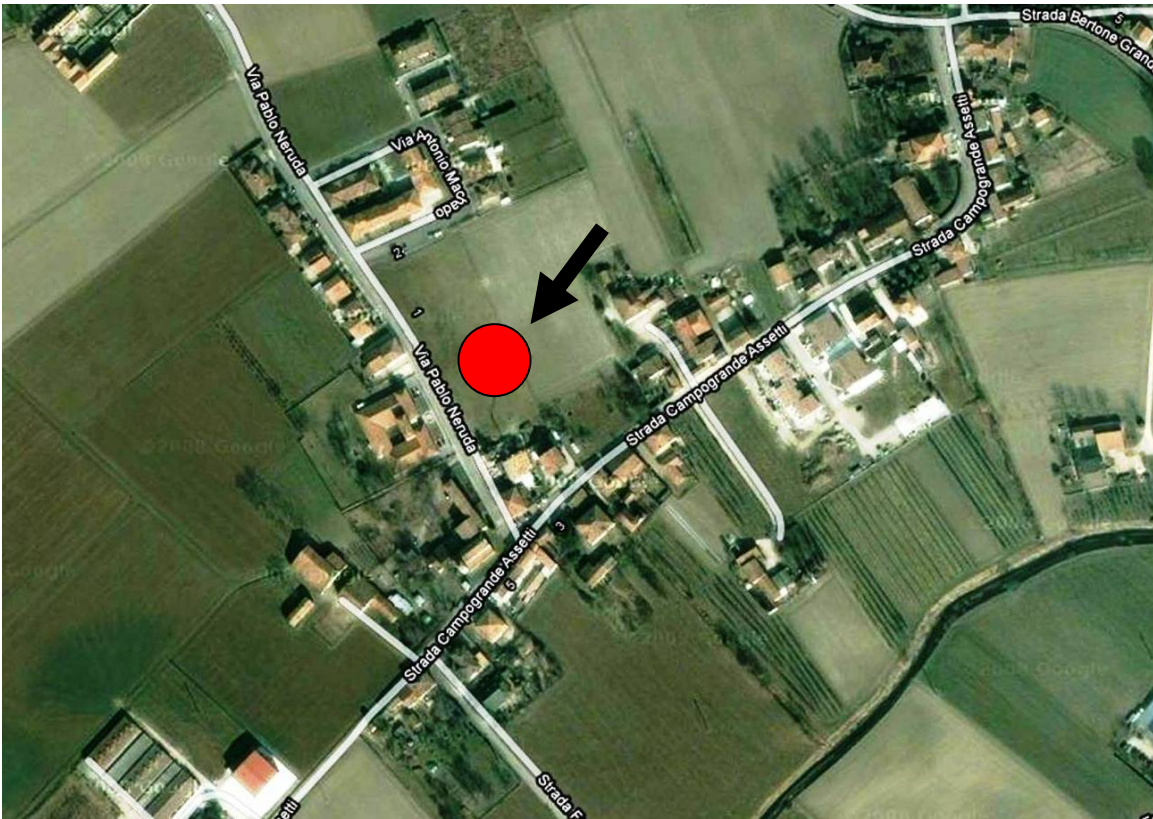


alimentazione	2 batterie alcaline x 1,5 VDC AA
voltaggio interno	+ 3,3 V, + 3,6 V per la sezione analogica
numero di canali	3 + 1 analogici
amplificatori	tutti canali con input differenziali
rumore	< 0,5 μ V r.m.s. @128 Hz sampling
impedenza dell'input	10 ⁶ Ohm
range di frequenze	DC – 360 Hz
frequenza di campionamento	32x, 64x, 128x
conversione A/D	equivalente a 24 bit
massimo input analogico	51,2 mV (781 nV/digit)
display grafico	128 x 64 pixel
tastiera	4 tasti a membrana
orologio	interno, permanente con datario e allarme
GPS	12 channels con time-marker (precisione 1 μ s)
livella	a bolla d'aria, sensibilità 0,083°
registrazione dati	memoria interna fino a 2 Gb
condizioni operative	temperatura: da – 10 a + 70°C; umidità: 0-90%
sensori	3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione, autobloccaggio quando non in acquisizione

I risultati delle indagini sono descritti nelle pagine seguenti.

1. AREA DI BRUSATASSO

La posizione di indagine è rappresentata nelle seguenti immagini:



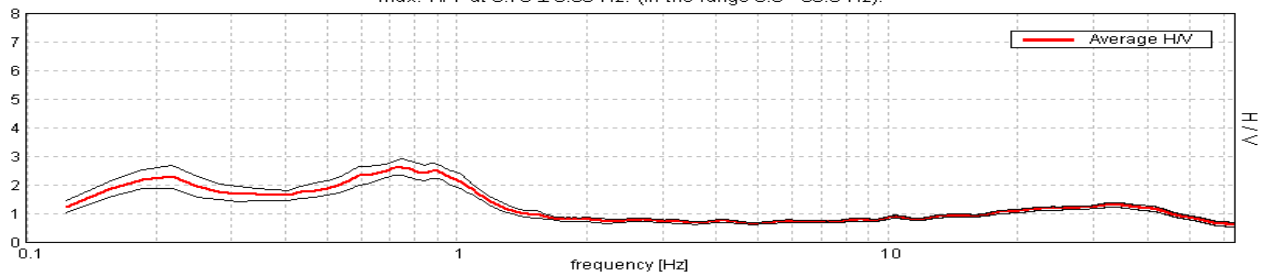
I risultati ottenuti sono riportati qui di seguito.

SUZZARA (MN), BRUSATASSO, VIA PABLO NERUDA

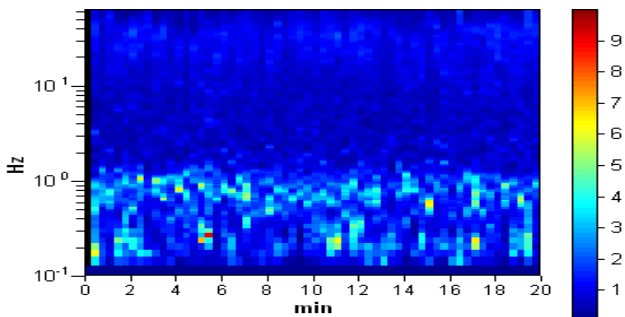
Start recording: 28/12/09 10:55:20 End recording: 28/12/09 11:15:21
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 GPS location: 010°46.9750 E, 44°58.9114 N
 UTC time (synchronized to the first recording sample): not available in this acquisition mode + 0 samples
 Satellite no.: 06
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 98% trace (manual window selection)
 Sampling frequency: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing window: Triangular window
 Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

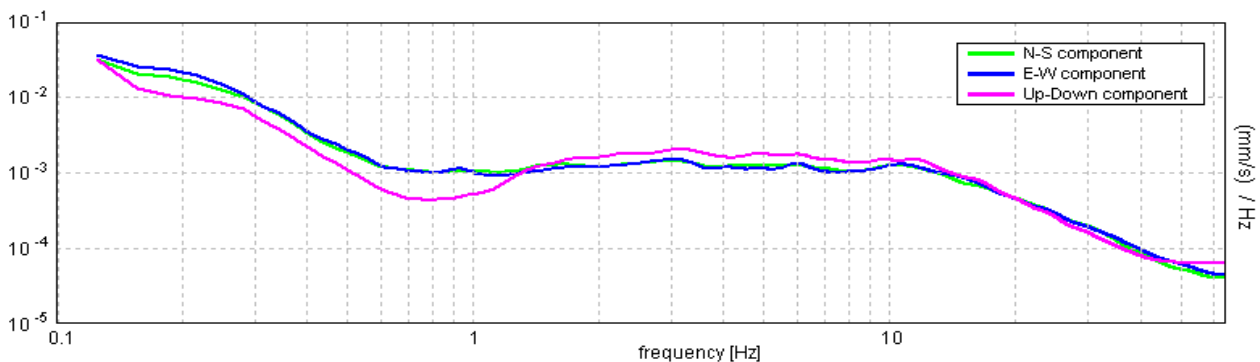
Max. H/V at 0.75 ± 0.06 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).



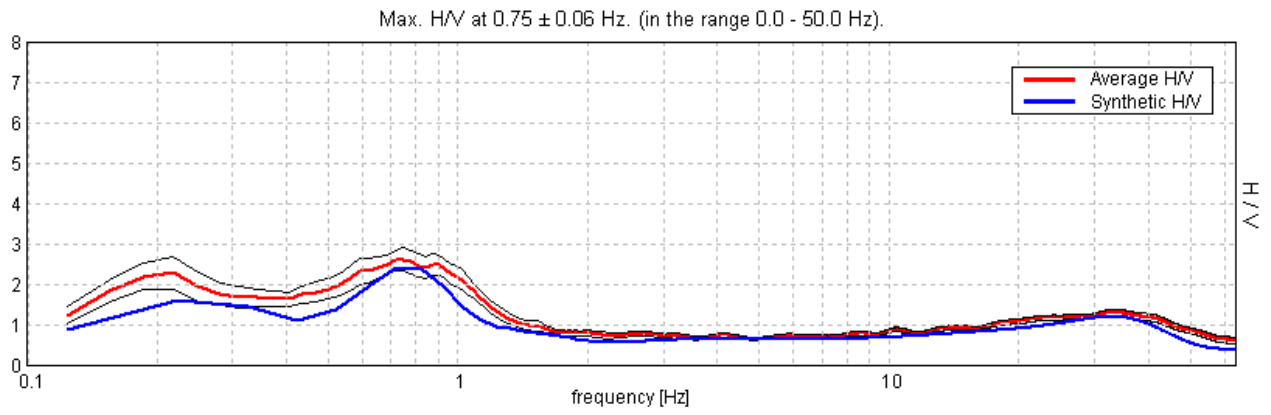
H/V TIME HISTORY



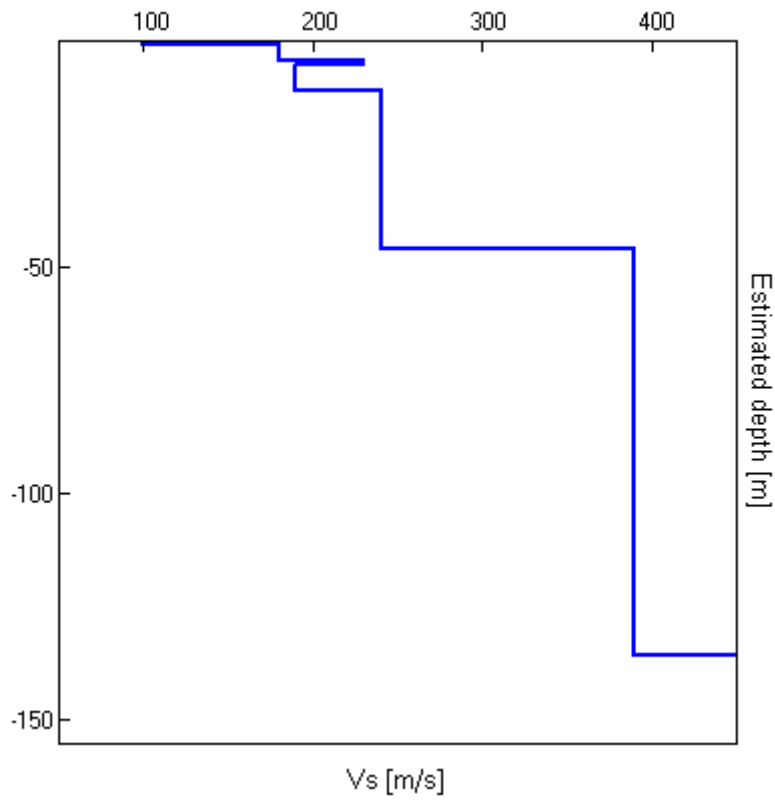
SINGLE COMPONENT SPECTRA



EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]
0.70	0.70	100
4.20	3.50	180
5.20	1.00	230
10.70	5.50	190
45.70	35.00	240
135.70	90.00	390
625.70	490.00	650
inf.	inf.	1050



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

Max. H/V at 0.75 ± 0.06 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).

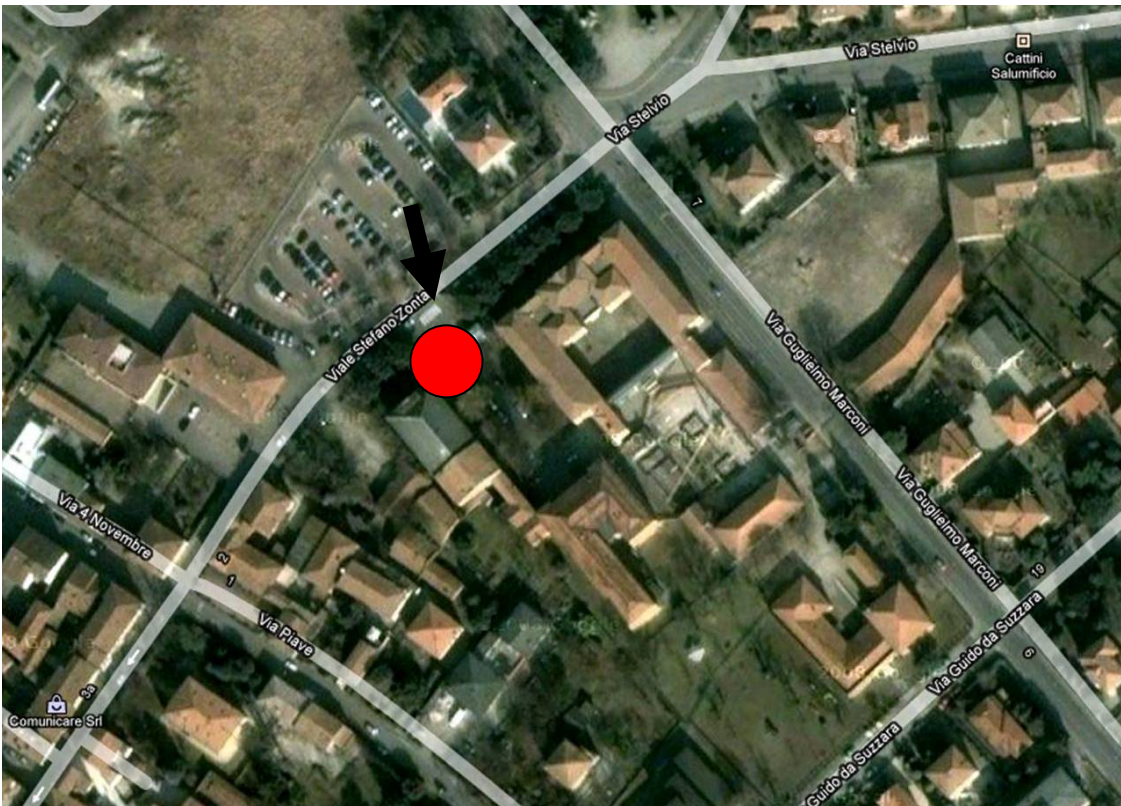
Criteria for a reliable HVSR curve			
[All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.75 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$885.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 37 times	OK	
Criteria for a clear HVSR 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.25 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.64 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0401 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.03007 < 0.1125$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1406 < 2.0$	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

2. AREA DI SUZZARA

La posizione di indagine è rappresentata nelle seguenti immagini:



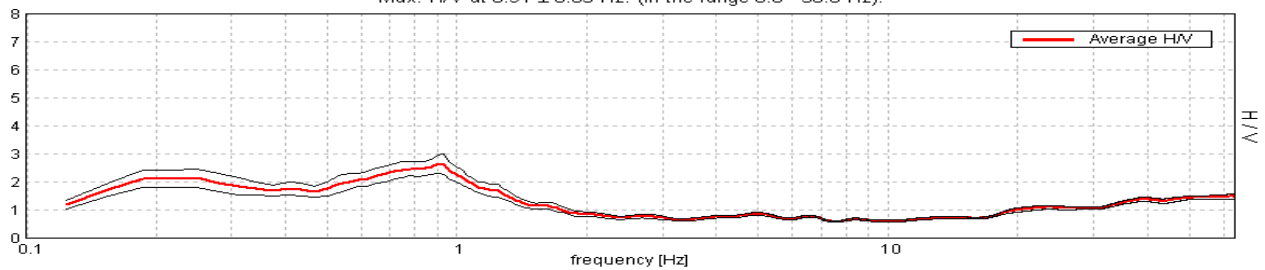
I risultati ottenuti sono riportati qui di seguito.

SUZZARA (MN), BIBLIOTECA COMUNALE, VIA STEFANO ZONTA

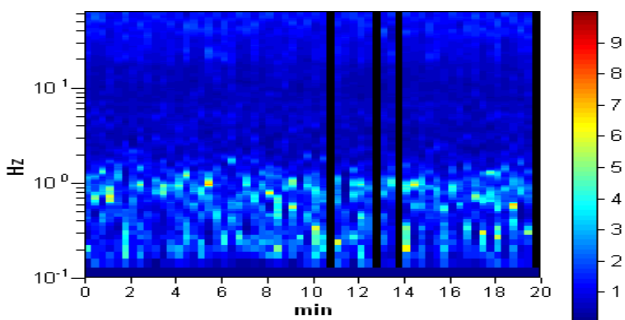
Start recording: 28/12/09 11:48:50 End recording: 28/12/09 12:08:51
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 GPS location: 010°44.8649 E, 44°59.5763 N
 UTC time (synchronized to the first recording sample): not available in this acquisition mode + 0 samples
 Satellite no.: 04
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 93% trace (manual window selection)
 Sampling frequency: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing window: Triangular window
 Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

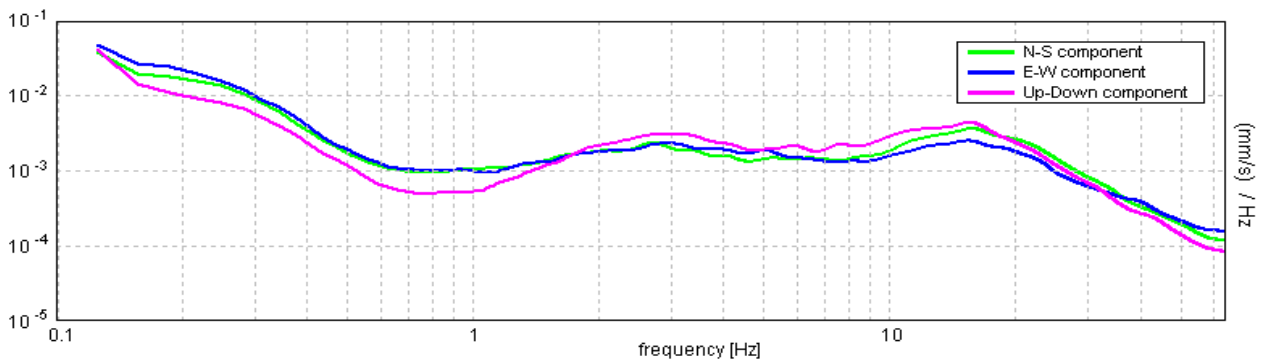
Max. H/V at 0.91 ± 0.03 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).



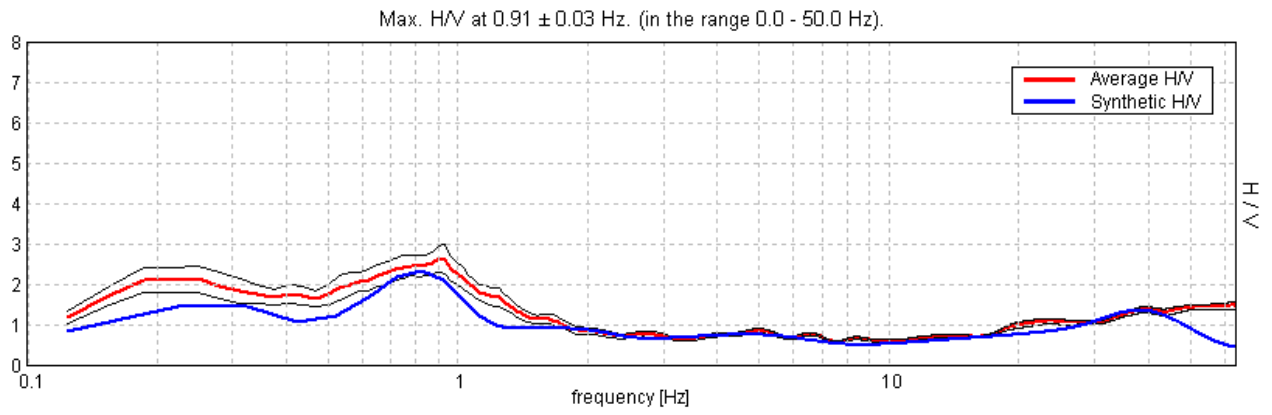
H/V TIME HISTORY



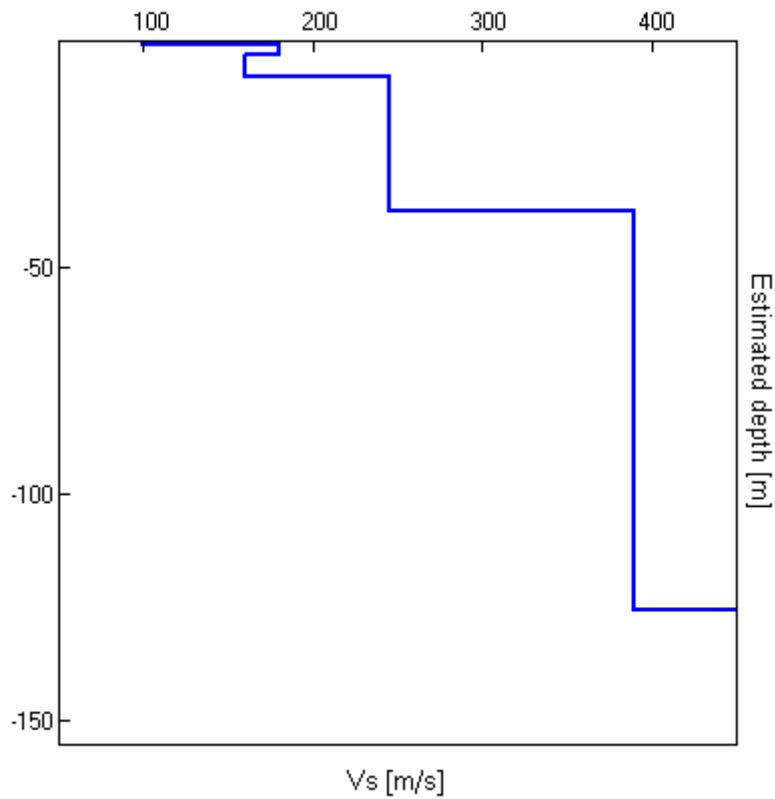
SINGLE COMPONENT SPECTRA



EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]
0.60	0.60	100
2.80	2.20	180
7.60	4.80	160
37.60	30.00	245
125.60	88.00	390
615.60	490.00	680
inf.	inf.	1080



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

Max. H/V at 0.91 ± 0.03 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).

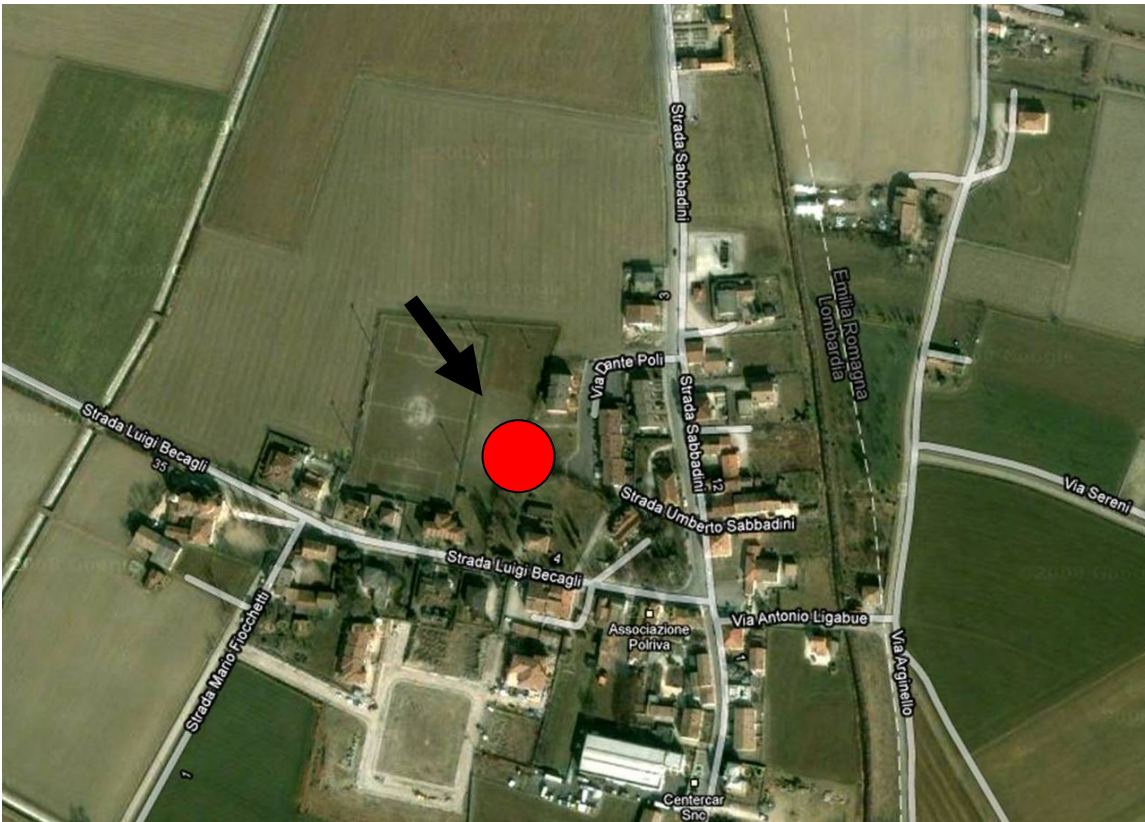
Criteria for a reliable HVSR curve			
[All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	0.91 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	1015.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 44 times	OK	
Criteria for a clear HVSR 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.406 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.64 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01855 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.01682 < 0.13594	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1667 < 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

3. AREA DI RIVA

La posizione di indagine è rappresentata nelle seguenti immagini:



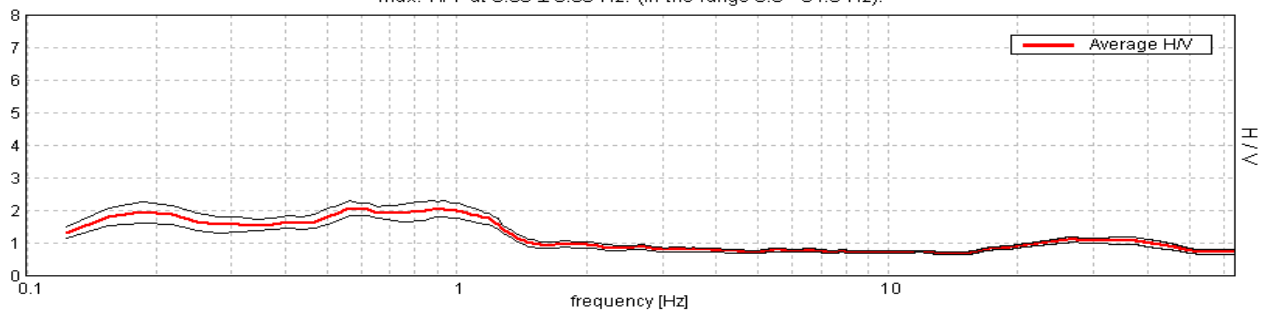
I risultati ottenuti sono riportati qui di seguito.

SUZZARA (MN), RIVA, CAMPO SPORTIVO

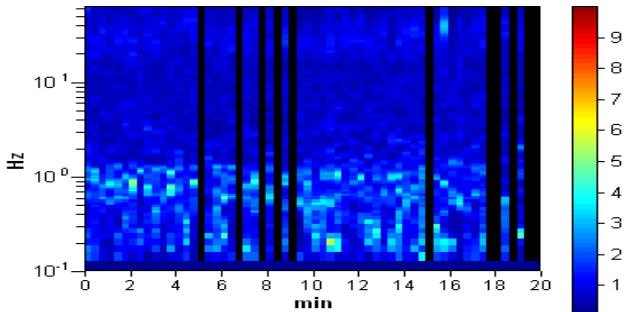
Start recording: 28/12/09 12:30:50 End recording: 28/12/09 12:50:51
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 GPS location: 010°42.5618 E, 44°58.7683 N
 UTC time (synchronized to the first recording sample): not available in this acquisition mode + 0 samples
 Satellite no.: 07
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 82% trace (manual window selection)
 Sampling frequency: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing window: Triangular window
 Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

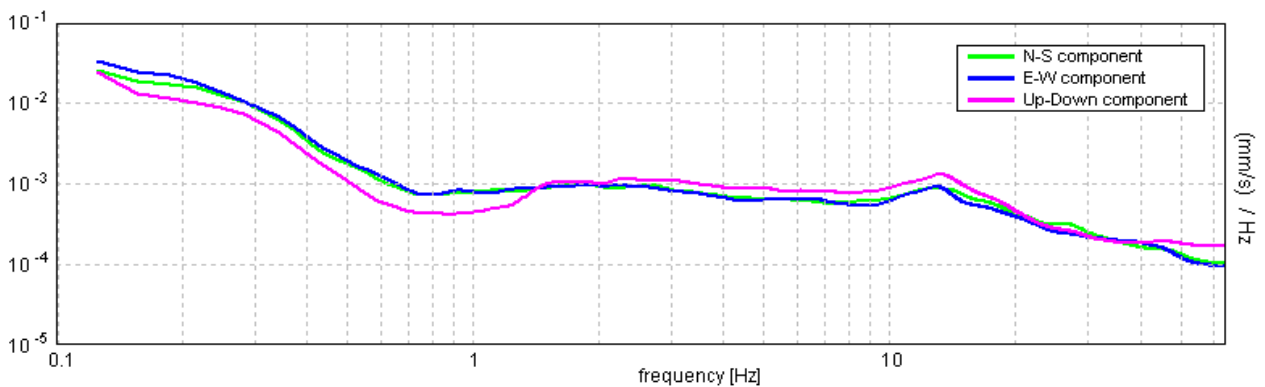
Max. H/V at 0.56 ± 0.08 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz).



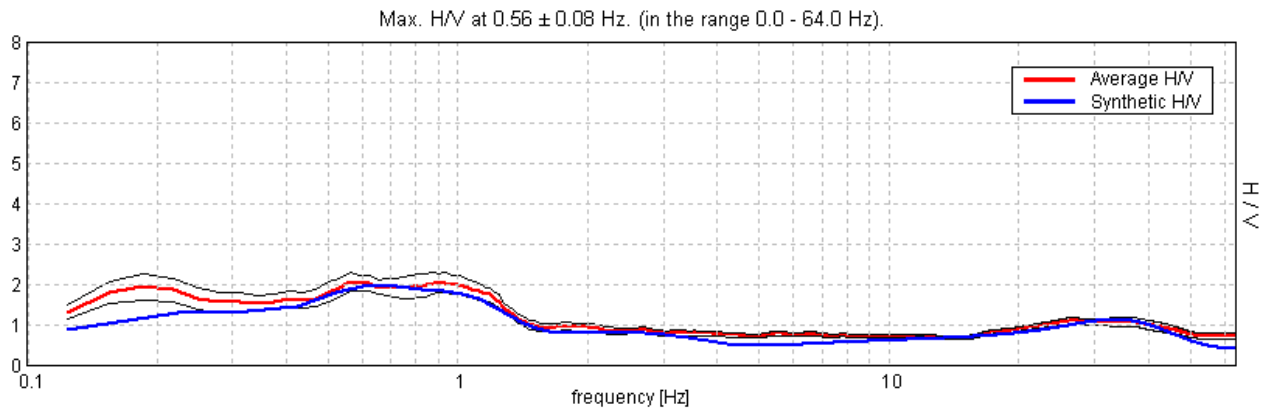
H/V TIME HISTORY



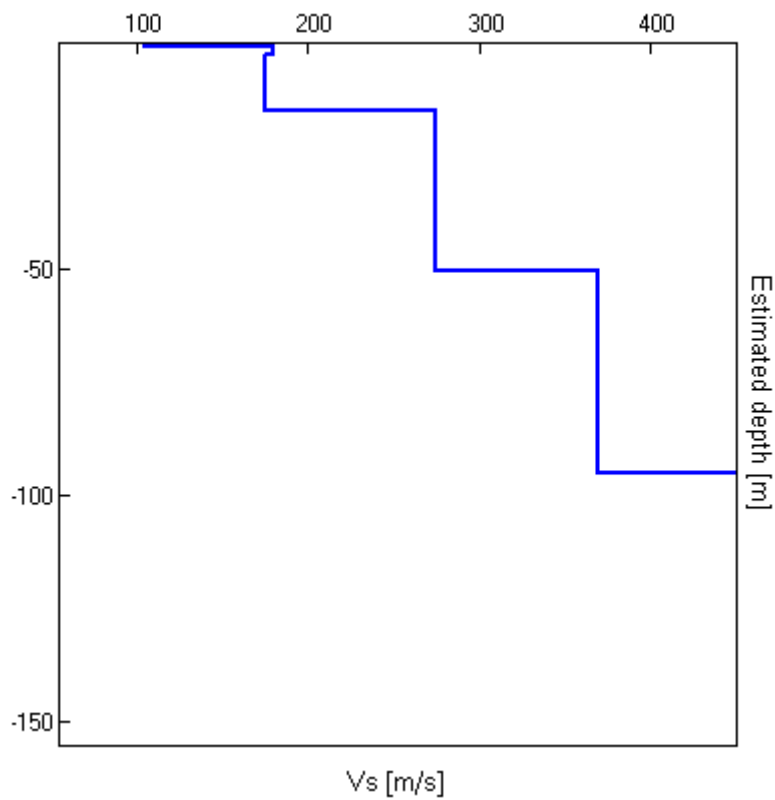
SINGLE COMPONENT SPECTRA



EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]
0.70	0.70	105
2.60	1.90	180
15.10	12.50	175
50.10	35.00	275
95.10	45.00	370
260.10	165.00	550
810.10	550.00	790
inf.	inf.	1050



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

Max. H/V at 0.56 ± 0.08 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable HVSR curve			
[All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	0.56 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	551.3 > 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 28 times	OK	
Criteria for a clear HVSR 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.469 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.07 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.06941 < 0.05		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.03904 < 0.08438	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1135 < 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

4. AREA DI TABELLANO

La posizione di indagine è rappresentata nelle seguenti immagini:



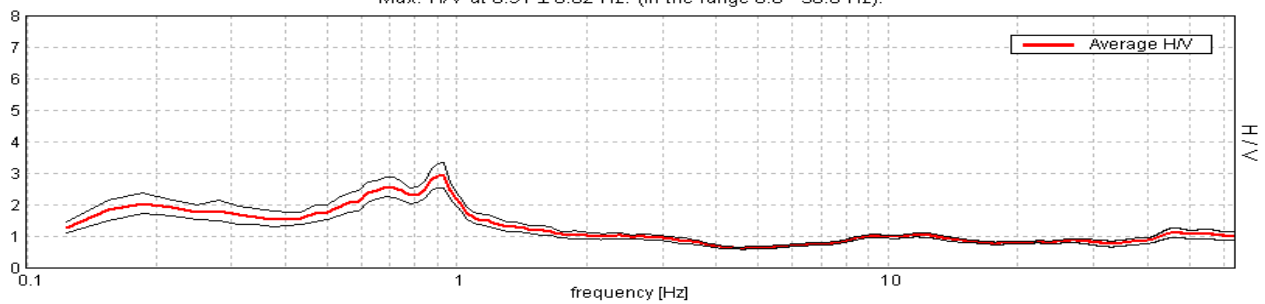
I risultati ottenuti sono riportati qui di seguito.

SUZZARA (MN), TABELLANO, VIA DALMAZIO CARETTA

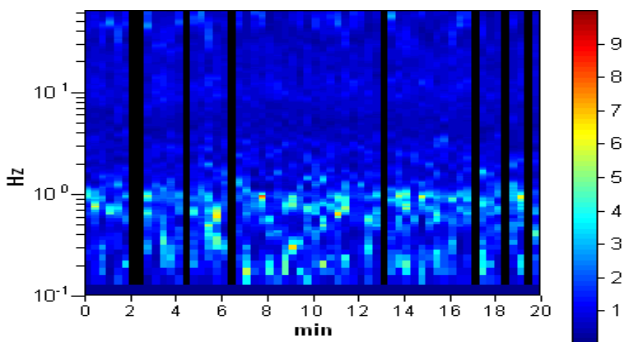
Start recording: 28/12/09 13:13:20 End recording: 28/12/09 13:33:21
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 GPS location: 010°42.9344 E, 45°01.6263 N
 UTC time (synchronized to the first recording sample): not available in this acquisition mode + 0 samples
 Satellite no.: 07
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 87% trace (manual window selection)
 Sampling frequency: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing window: Triangular window
 Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

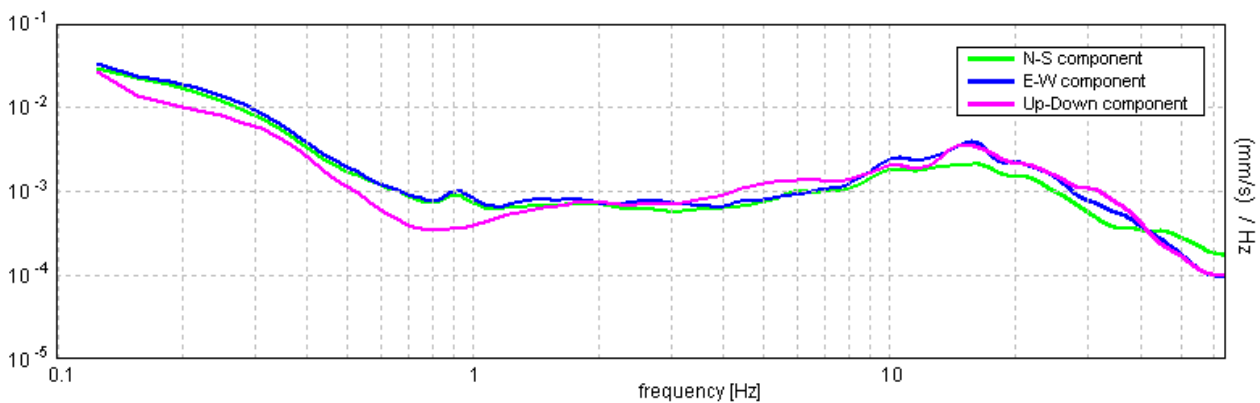
Max. H/V at 0.91 ± 0.02 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).



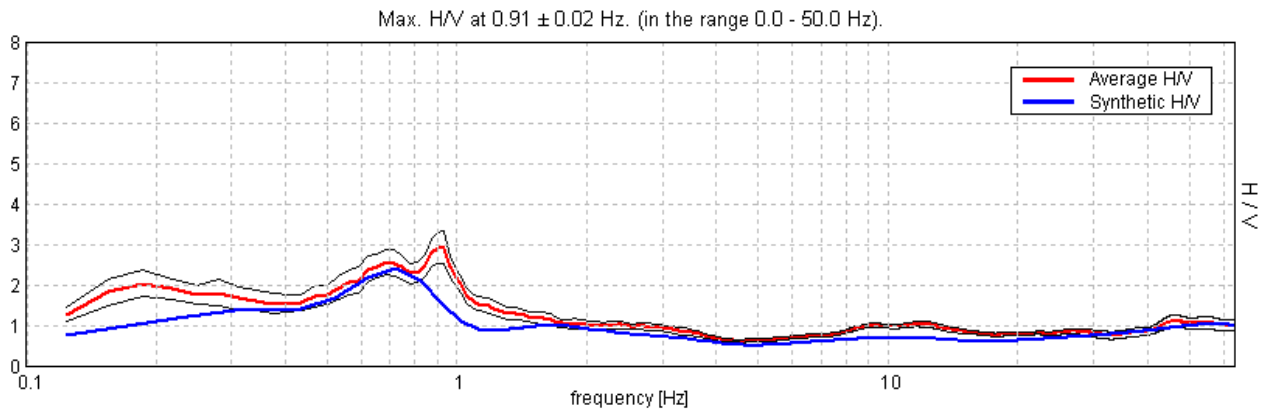
H/V TIME HISTORY



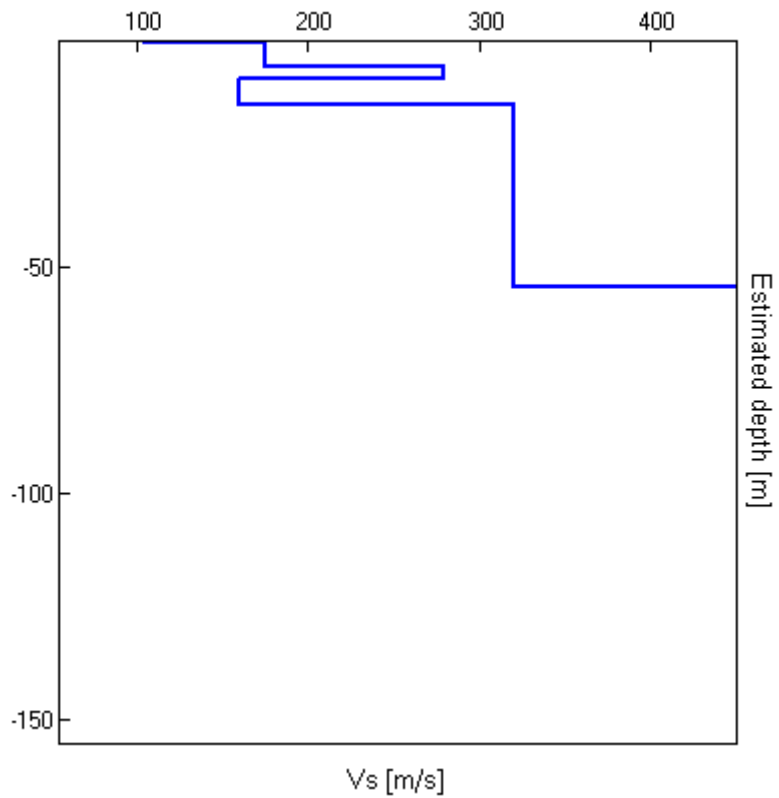
SINGLE COMPONENT SPECTRA



EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]
0.40	0.40	105
5.40	5.00	175
8.40	3.00	280
14.20	5.80	160
54.20	40.00	320
169.20	115.00	460
719.20	550.00	830
inf.	inf.	1150



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

Max. H/V at 0.91 ± 0.02 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).

Criteria for a reliable HVSR curve			
[All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	0.91 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	942.5 > 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 44 times	OK	

Criteria for a clear HVSR 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.219 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.93 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01098 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.00995 < 0.13594	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1819 < 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 $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

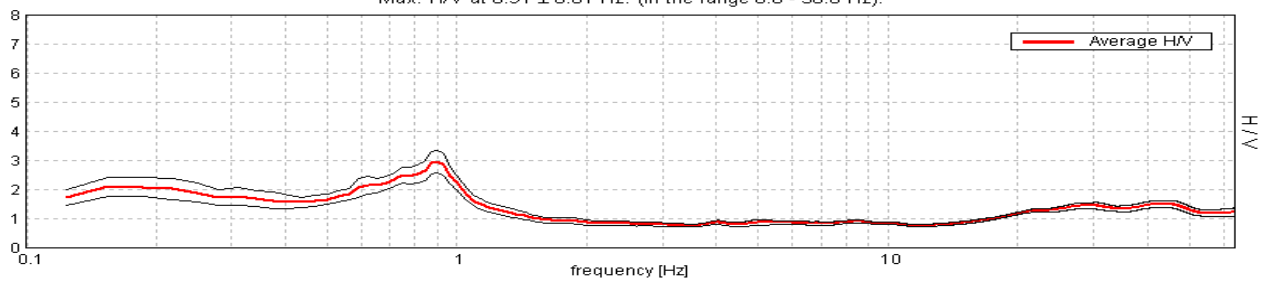
Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq.range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

SUZZARA (MN), SAILETTO, STRADA ZANETTA BIGNARDINA

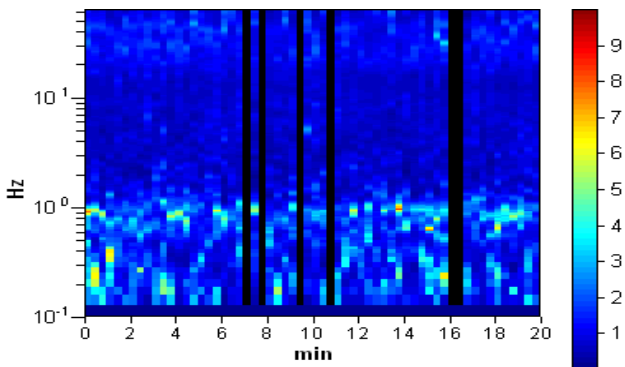
Start recording: 28/12/09 13:48:38 End recording: 28/12/09 14:08:39
 Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 GPS location: 010°44.2805 E, 45°01.8344 N (61.3 m)
 UTC time (synchronized to the first recording sample): not available in this acquisition mode + 0 samples
 Satellite no.: 06
 Trace length: 0h20'00". Analyzed 90% trace (manual window selection)
 Sampling frequency: 128 Hz
 Window size: 20 s
 Smoothing window: Triangular window
 Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

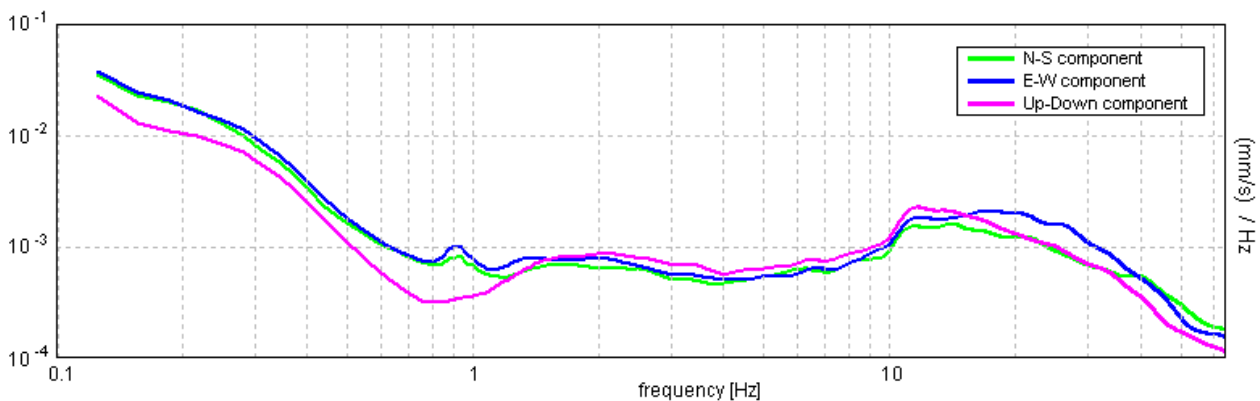
Max. H/V at 0.91 ± 0.01 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).



H/V TIME HISTORY

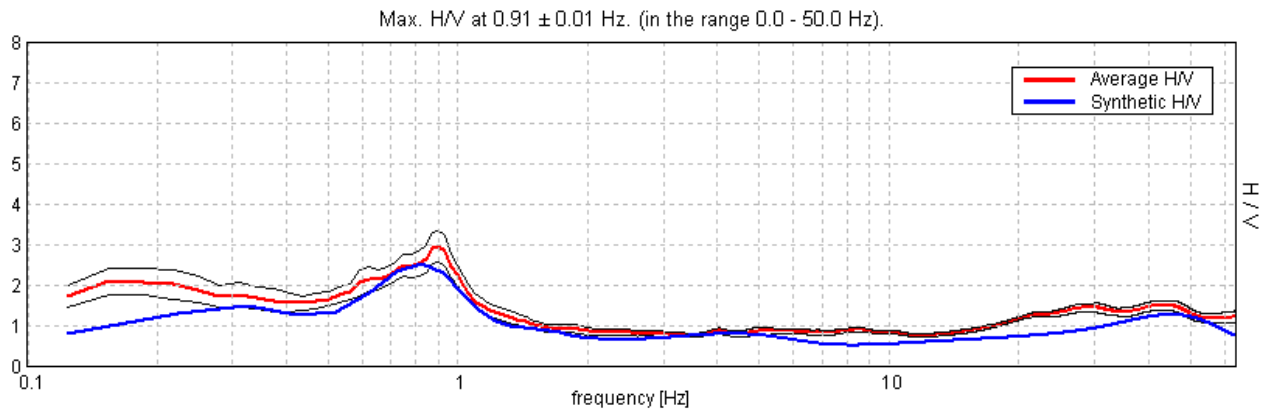


SINGLE COMPONENT SPECTRA

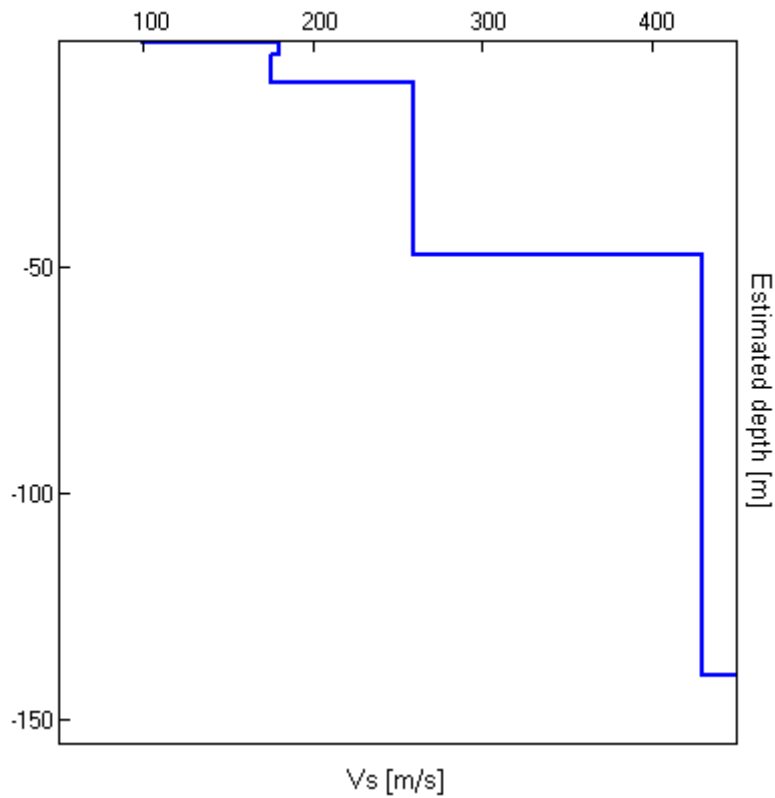


EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V

Dottor Geologo Fulvio Baraldi - Mantova



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]
0.50	0.50	100
3.00	2.50	180
9.00	6.00	175
47.00	38.00	260
140.00	93.00	430
610.00	470.00	720
inf.	inf.	1080



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

Max. H/V at 0.91 ± 0.01 Hz. (in the range 0.0 - 50.0 Hz).

Criteria for a reliable HVSR curve			
[All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	0.91 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	978.8 > 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 44 times	OK	
Criteria for a clear HVSR 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.156 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.98 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00378 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.00342 < 0.13594	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1891 < 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

6. SCHEMA RIASSUNTIVO

Sulla base delle indagini realizzate si possono indicare i valori di V_{s30} (velocità delle onde di taglio) e di T (periodo fondamentale di vibrazione del terreno), calcolati con le seguenti relazioni:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} h_i / V_i}$$

dove:

h_i = spessore dello strato i -esimo considerato

V_i = velocità dello strato i -esimo considerato.

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^n h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)}$$

dove:

h_i = spessore dello strato i -esimo del modello

V_{s_i} = velocità dello strato i -esimo del modello.

Il periodo fondamentale può essere ricavato anche dalle prove con Tromino, con la relazione $T = 1/f$ dove f è la frequenza fondamentale di vibrazione .

La situazione rilevata è la seguente:

Area	V_{s30} (m/s)	T (s)	Categoria di suolo (D.M. 14 gennaio 2008)
Brusatasso	214	1,33	C
Suzzara	215	1,10	C
Riva	210	1,78	C
Tabellano	233	1,10	C
Sailletto	224	1,10	C

La categoria di suolo di cui al D.M. 14 gennaio 2008 viene individuata secondo lo schema riportato nella tabella seguente:

Categorie del suolo di fondazione

Classe	Descrizione
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da

	valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} , compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt} > 50$ o coesione non drenata > 250 kPa).
C	Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi fra 180 e 360 m/s ($15 < N_{spt} < 50$, $70 < cu < 250$ kPa).
D	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti caratterizzati da valori di $V_{s30} < 180$ m/s ($N_{spt} < 15$, $cu < 70$ kPa).
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali non litoidi (granulari o coesivi), con valori di V_{s30} simili a quelli delle classi C o D e spessore compreso fra 5 e 20 m, giacenti su un substrato più rigido con $V_{s30} > 800$ m/s.
S1	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($IP > 40$) e contenuto di acqua, caratterizzati da valori di $V_{s30} < 100$ m/s ($10 < cu < 20$ kPa).
S2	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria non rientrante nelle classi precedenti.

Considerando quindi i valori di V_{s30} (variabili da 214 a 233 m/s), ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" i siti esaminati ricadono tutti nella **Categoria del suolo di fondazione C**: "Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi fra 180 e 360 m/s ($15 < N_{spt} < 50$, $70 < cu < 250$ kPa)".

7. SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE

Per liquefazione di un terreno s'intende una diminuzione della sua resistenza al taglio e/o rigidità causata dall'aumento della pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino l'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno.

Se si esprime la resistenza al taglio attraverso la relazione di Coulomb:

$$\tau = c + (\sigma_{v0} - u) \tan \varphi$$

con:

c = coesione del terreno

σ_{v0} = pressione litostatica totale agente alla profondità d'indagine

u = pressione interstiziale dell'acqua

φ = angolo di resistenza al taglio del terreno,

risulta che la grandezza τ si può annullare solo nel caso in cui siano verificate le condizioni:

a) $c = 0$;

b) $(\sigma_{v0} - u) = 0$;

(il caso $\varphi = 0$ non ha importanza pratica, perché può verificarsi solo in terreni coesivi in condizioni non drenate, dove però la condizione $c = 0$ non può ovviamente verificarsi).

La condizione a) vieta che il fenomeno della liquefazione possa verificarsi in terreni coesivi o incoerenti ma con una significativa frazione argillosa o limosa plastica.

La condizione b) si verifica, quando la pressione interstiziale uguaglia la pressione totale esercitata ad una data profondità dalla colonna di terreno sovrastante e dagli eventuali sovraccarichi presenti in superficie ($\sigma_{v0} = u$).

In definitiva il fenomeno della liquefazione si può manifestare preferibilmente in depositi sciolti non coesivi posti sotto falda, in seguito ad eventi che producano un forte aumento della pressione interstiziale dell'acqua.

Si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti che presentano le seguenti caratteristiche:

- granulometricamente sono sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile generalmente dallo 0 al 25%;
- si trovano sotto falda;
- sono da poco a mediamente addensati;
- si trovano a profondità relativamente basse (di solito inferiori ai 15 metri).

Per la verifica alla liquefazione dei terreni indagati sono stati qui utilizzati i cosiddetti "metodi semplificati"; essi permettono di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso un coefficiente di sicurezza, dato dal rapporto fra la resistenza al taglio mobilitabile nello strato (R) e lo sforzo tagliante indotto dal sisma (T). Si avrà quindi:

$$F_s = \frac{R}{T}$$

La grandezza T dipende dai parametri del sisma di progetto (accelerazione sismica e magnitudo di progetto). La grandezza R è funzione delle caratteristiche meccaniche dello strato, principalmente del suo stato di addensamento, e può essere ricavata direttamente attraverso correlazioni con i risultati di prove penetrometriche dinamiche o statiche.

Poiché le correlazioni utilizzate si riferiscono a terremoti di magnitudo 7.5, per applicare le procedure semplificate di analisi della liquefazione a terremoti di magnitudo diversa si utilizza un fattore di scala della magnitudo, detto MSF, tale per cui il coefficiente di sicurezza diviene:

$$F_s = \frac{R}{T} \cdot MSF$$

con:

MSF = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma.

7.1 Calcolo dello sforzo di taglio indotto dal sisma (T).

La grandezza T viene ricavata attraverso la relazione:

$$T = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} r_d \frac{1}{MSF} ;$$

dove:

a_{\max}	accelerazione sismica massima
g	accelerazione di gravità = 980.7 cm/s ²
σ_{v0}	pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.
σ_{v0}'	pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.
r_d	coefficiente funzione della profondità dal p.c., valutabile secondo il seguente schema: $r_d = 1 - 0.00765z$ per $z \leq 9.15$ m $r_d = 1.174 - 0.0267z$ per $9.15 < z \leq 23$ m $r_d = 0.774 - 0.008z$ per $23 < z \leq 30$ m $r_d = 0.5$ per $z > 30$ m
MSF	coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma, ricavabile con la relazione $MSF = \left(\frac{M}{7.5}\right)^{-3.3}$ se $M \leq 7.5$ o con la formula $MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$ se $M > 7.5$

7.2 Calcolo della resistenza al taglio mobilitata (R) da indagine sismica. Metodo di Andrus e Stokoe (1997).

La resistenza alla liquefazione di un deposito sabbioso può essere valutata anche attraverso la stima delle velocità delle onde S, partendo dai risultati ottenuti attraverso indagini geofisiche in sito. La relazione è la seguente:

$$R = 0.03 \left(\frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + \frac{0.9}{V_{s1c} - V_{s1}} - \frac{0.9}{V_{s1}}$$

dove:

V_{s1} (m/s)	velocità delle onde S nello strato corretta = $V_s \left(\frac{1}{\sigma_{v0}'} \right)^{0.25}$ dove V_s è la velocità misurata e σ_{v0}' (kg/cmq) è la pressione verticale efficace a metà strato
V_{s1c} (m/s)	valore critico delle onde S nel deposito, ricavabile attraverso il seguente schema: V_{s1c} (m/s) = 220 se la percentuale di fine (FC) < 5% V_{s1c} (m/s) = 210 se FC = 20% V_{s1c} (m/s) = 200 se FC > 35% interpolando per valori intermedi di FC

Viene considerato **non** liquefacibile un deposito in cui sia $F_s > 1$.

Questa procedura è raccomandata dal National Center for Earthquake Research (NCEER).

7.3 Indice di liquefazione. Metodo di Iwasaki et Alii (1978, 1984)

Definisce un Indice di liquefazione (I_L), indicativo dell'estensione che il fenomeno della liquefazione può avere nel deposito considerato e permette di stimare il grado di severità globale dovuto alla liquefazione degli strati superficiali del deposito.

Una stima del rischio di liquefazione complessivo lungo una verticale di calcolo viene fornita dal parametro indice di liquefazione (I_L). Tale indice viene definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \sum_{i=1}^n F W (z) \Delta z$$

dove:

n = numero degli intervalli di calcolo di F_s lungo la verticale;

$F = 1 - F_s$ per $F_s \leq 1$

$F = 0$ per $F_s > 1$

Δz = spessore dell'intervallo di calcolo (z espresso in metri)

$W(z) = 10 - 0,5z$ con z = profondità di calcolo

In base al valore di I_L ottenuto è possibile fornire un'indicazione del rischio di liquefazione attraverso la seguente tabella:

valori di I_L	rischio di liquefazione
$I_L = 0$	molto basso
$0 < I_L \leq 5$	basso
$5 < I_L \leq 15$	alto
$15 < I_L$	molto alto

7.4 Analisi dei risultati

La verifica alla suscettività alla liquefazione è stata eseguita con il programma LIQUEF della software house ProgramGeo (indicato anche nella DGR 28.05.2008 n. 8/7374 “*Aggiornamento dei <Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12>, approvati con d.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566*”).

Assumendo:

accelerazione sismica di progetto (g): 0,075

magnitudo di riferimento: 5

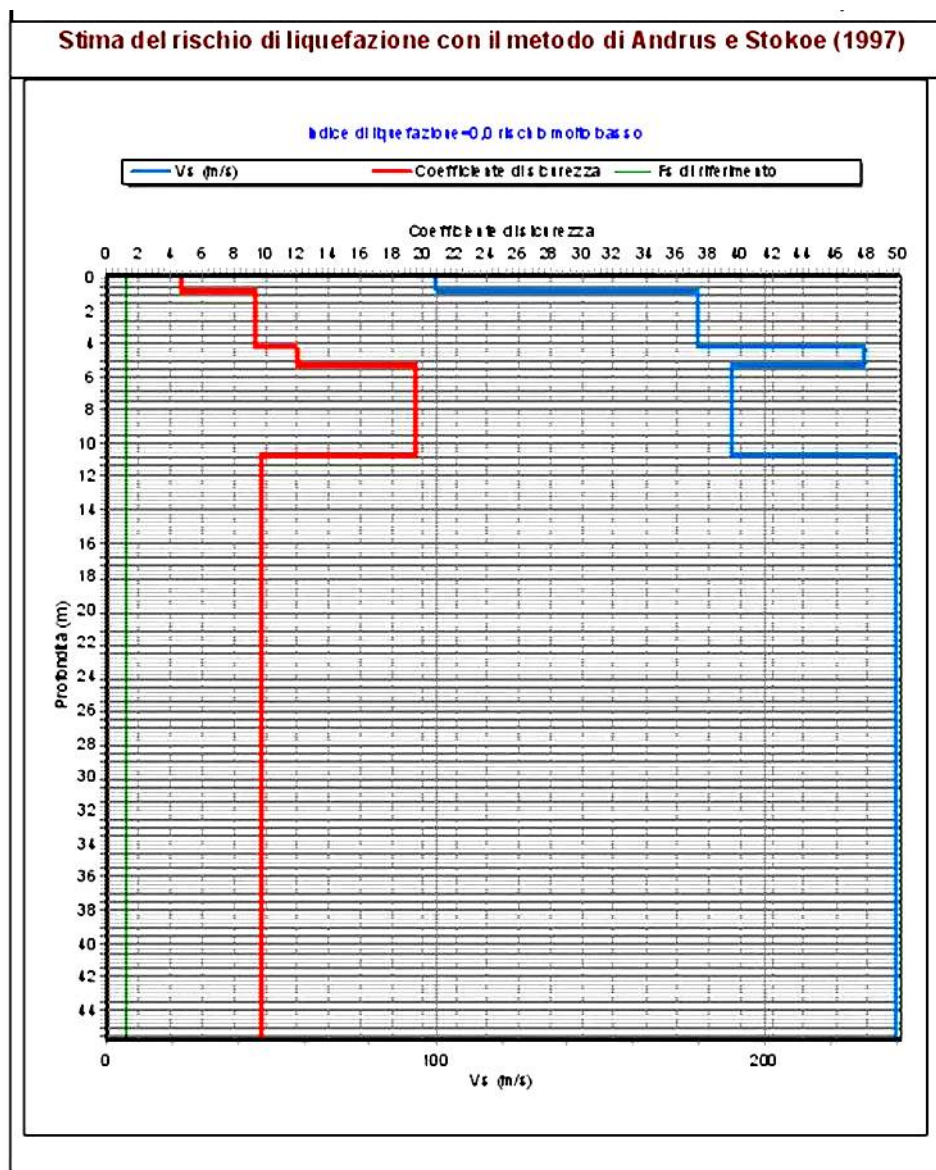
fattore di correzione MSF: 3,81

sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Brusatasso

profondità base (m)	Vs (m/s)	sforzo T (kg/cm ²)	resistenza R (kg/cm ²)	coefficiente di sicurezza Fs
0,7	100	0,049	0,059	4,6
4,2	180	0,048	0,118	9,4
5,2	230	0,05	0,157	12
10,7	190	0,061	0,314	19,5
50	240	0,049	0,124	9,7

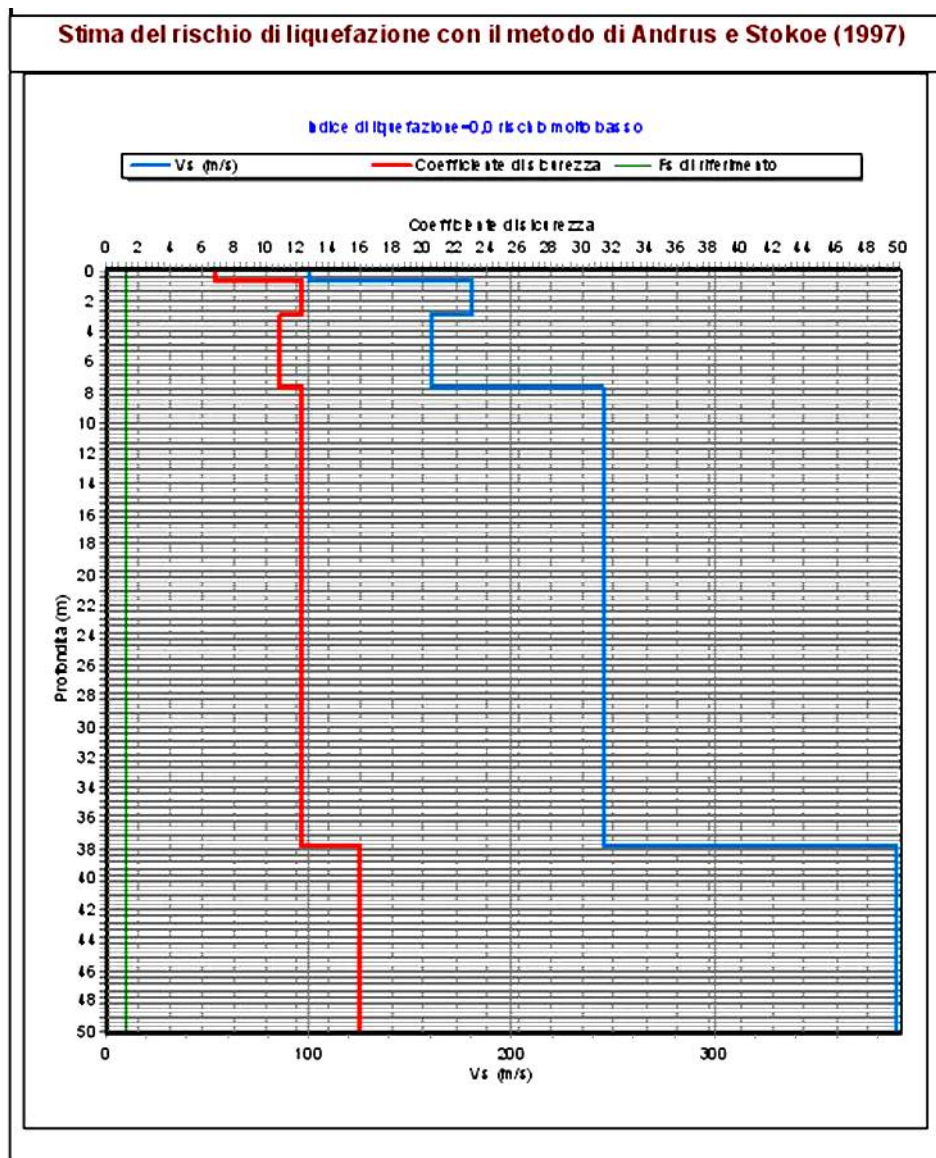
indice di liquefazione IL: 0,0 rischio molto basso



Suzzara

profondità base (m)	Vs (m/s)	sforzo T (kg/cm ²)	resistenza R (kg/cm ²)	coefficiente di sicurezza Fs
0,6	100	0,049	0,087	6,8
2,8	180	0,048	0,155	12,3
7,6	160	0,062	0,179	10,9
37,6	245	0,052	0,167	12,2
50	390	0,048	0,203	16

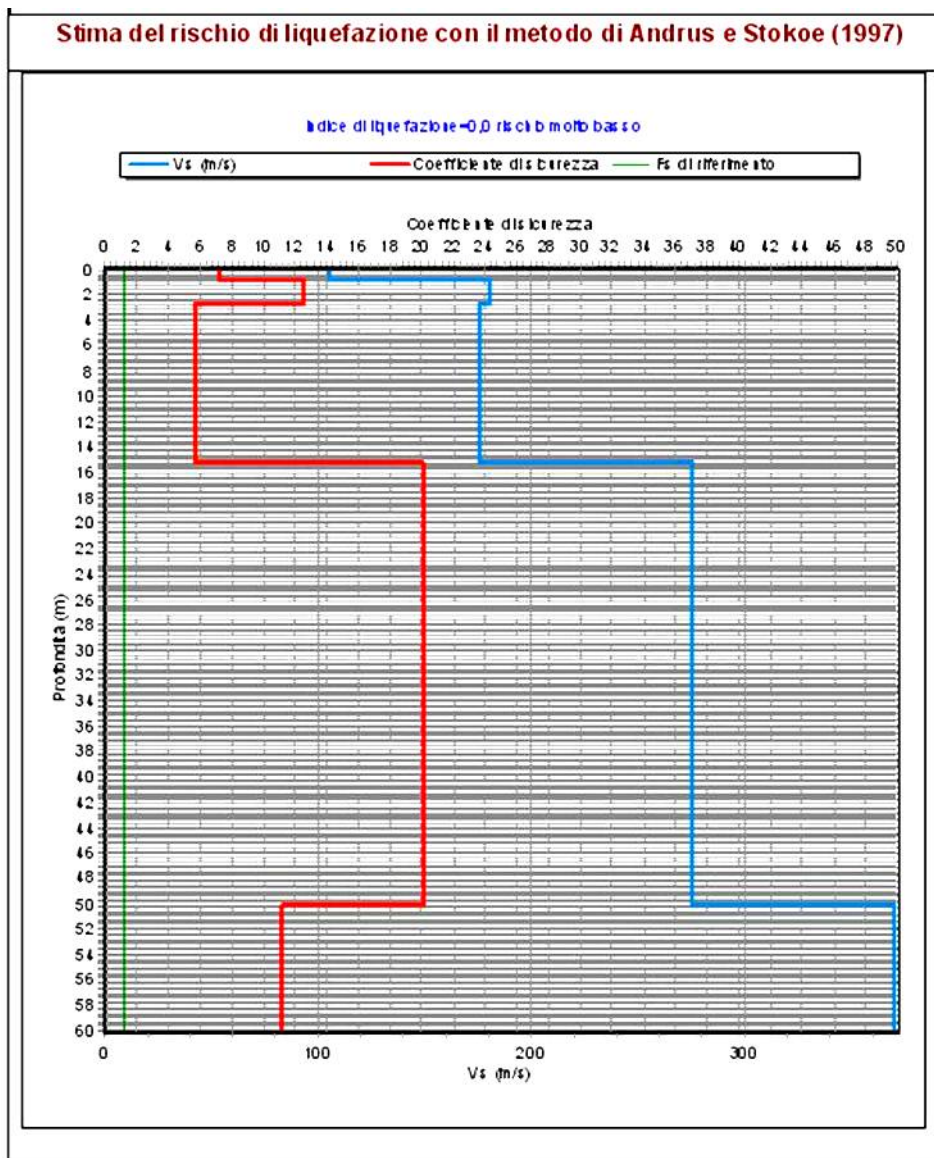
indice di liquefazione IL: 0,0 rischio molto basso



Riva

profondità base (m)	Vs (m/s)	sforzo T (kg/cm ²)	resistenza R (kg/cm ²)	coefficiente di sicurezza Fs
0,7	105	0,049	0,093	7,3
2,6	180	0,048	0,159	12,6
15,1	175	0,073	0,111	5,8
50	275	0,047	0,25	20
60	370	0,049	0,145	11,2

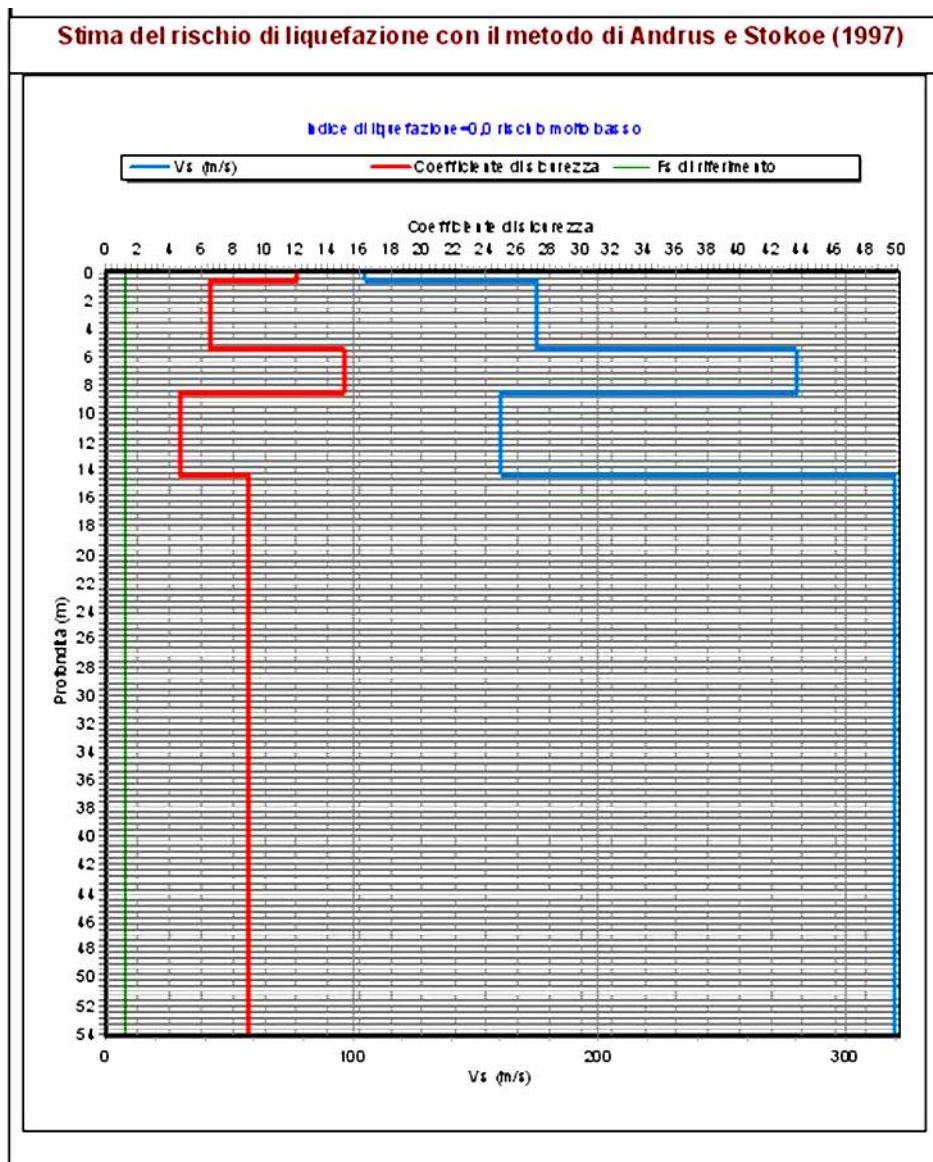
indice di liquefazione IL: 0,0 rischio molto basso



Tabellano

profondità base (m)	Vs (m/s)	sforzo T (kg/cm ²)	resistenza R (kg/cm ²)	coefficiente di sicurezza Fs
0,4	105	0,049	0,154	12
5,4	175	0,048	0,082	6,6
8,4	280	0,052	0,206	15
14,2	160	0,059	0,072	4,6
54	320	0,044	0,104	9

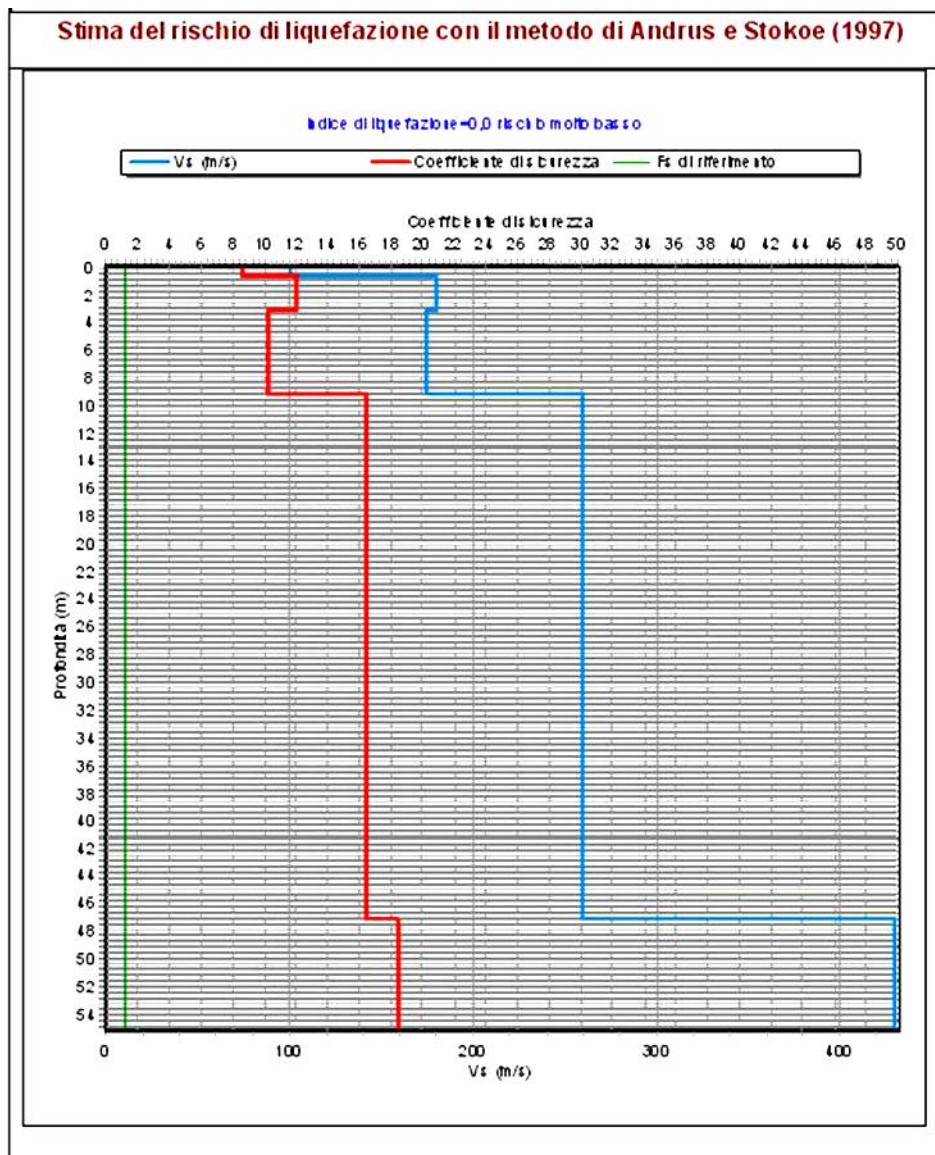
indice di liquefazione IL: 0,0 rischio molto basso



Sailletto

profondità base (m)	Vs (m/s)	sforzo T (kg/cm ²)	resistenza R (kg/cm ²)	coefficiente di sicurezza Fs
0,5	100	0,049	0,11	8,6
3	180	0,048	0,152	12,1
9	175	0,064	0,171	10,2
47	260	0,051	0,219	16,4
55	430	0,048	0,235	18,5

indice di liquefazione IL: 0,0 rischio molto basso



In tutti i casi esaminati il coefficiente di sicurezza Fs è ampiamente maggiore di 1; il valore dell'indice di liquefazione indica sempre un rischio molto basso.