



Mit Beteiligung der Europäischen Union aus dem Haushalt der Transeuropäischen Verkehrsnetze finanziertes Vorhaben

Opera finanziata con la partecipazione dell'Unione Europea attraverso il bilancio delle reti di trasporto transeuropee



AUSBAU EISENBAHNACHSE MÜNCHEN-VERONA BRENNER BASISTUNNEL



Ausführungsplanung

POTENZIAMENTO ASSE FERROVIARIO MONACO-VERONA

GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO

Progettazione esecutiva

Projekteinheit	WBS
MA-VORBEREITENDE BAUMAßNAHMEN	MA-OPERE PROPEDEUTICHE
Dokumentenart	Tipo Documento
G-GEOLOGIE UND HYDROGEOLOGIE	G-GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA
Titel	Titolo
Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den durchgeführten Untersuchungen für die seismische Charakterisierung	Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

  <p>GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO - BRENNER BASISTUNNEL BBT SE</p> <p>Piazza Stazione 1 • I-39100 Bolzano Tel.: +39 0471 0622-10 • Fax: +39 0471 0622-11</p> <p>Amraser Str. 8 • A-6020 Innsbruck Tel.: +43 512 4030 • Fax: +43 512 4030-110</p> <p>Email: bbt@bbt-se.com • www.bbt-se.com</p>		Datum/data	Name/nome				
	Bearbeitet / Elaborato	27/05/2016	A.M.Baldi				
	Geprüft / Verificato	27/05/2016	P.Perello				
	Freigegeben Autorizzato	27/05/2016	P.Perello				
	Gesehen BBT Visto BBT_RUP						
Projekt-kilometer / Progressiva di progetto	von / da bis / a bei / al	Bau-kilometer / Chilometro opera	von / da bis / a bei / al	Status Dokument / Stato documento			
Staat Stato	Los Lotto	Einheit Unità	Nummer Numero	Dokumentenart Tipo Documento	Vertrag Contratto	Nummer Codice	Revision Revisione
02	H81	MA	2GH8AF001	GTB	D0932	00301	02

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

Bearbeitungsstand Stato di elaborazione

Revision Revisione	Änderungen / Cambiamenti	Verantwortlicher Änderung Responsabile modifica	Datum Data
02	Deckblatt Bearbeitung / Revisione cartiglio	Perello	27/05/2016
01	Emissions folgenden Prüfungsbericht / Emissione a seguito rapporto di verifica ITCF-C13038-02-ATF-RA-00001	Perello	20/11/2015
00	Erstversion Prima Versione	P.Perello	16/10/2014

INDICE

1	INTRODUZIONE / EINLEITUNG	3
2	FINALITA' DELLA PROSPEZIONE / ZIEL DER ERKUNDUNGEN.....	4
3	INDAGINI SVOLTE / DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN.....	5
4	STRUMENTAZIONI, PERSONALE,QUALITA' / AUSRÜSTUNG, PERSONAL, QUALITÄT	9
5	METODOLOGIA ESECUTIVA DEI RILIEVI / ERHEBUNGSMETHODIK	11
6	ANALISI DEI RISULTATI / ANALYSE DER ERGEBNISSE	20
	APPENDICE : REPORT PROVE HVRS / ANHANG – REPORT HVSR-MESSUNGEN.....	25

1 EINLEITUNG

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchung dargestellt, die im Auftrag von GDP Consulting im Zuge des Ausführungsprojekts für den Brennerbasistunnel in der Gemeinde Franzensfeste durchgeführt wurden.



Abb. 1- Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen bilden die Basis für die seismische Charakterisierung der gelanteten Nebenbauten im Bahnhofsareal von Franzensfeste.

Es wurden seismische Refraktionsprofile mit Messung der P- und SH-Wellen zur Bestimmung der Geschwindigkeiten der Kompressinswellen (P) und der polarisierten Scherwellen (SH) durchgeführt.

Außerdem erfolgten 11 einzelne HVSR-Messungen zur Definition der natürlichen Frequenz des Untersuchungsareals.

Im vorliegenden Bericht werden die Ausführungs- und Interpretationsmethodiken der geophysikalischen Messungen und die Ergebnisse der Untersuchungen nach vorwiegend geophysikalischen Gesichtspunkten erläutert.

1 INTRODUZIONE

Nel presente rapporto sono illustrati i risultati dell'indagine geofisica eseguita per conto della società GDP Consulting, nell'ambito del progetto esecutivo per la realizzazione del tunnel del Brennero nel Comune di Fortezza (BZ).

Fig. 1- Area oggetto di indagine

Le prospezioni sono state eseguite al fine di fornire gli elementi di base per la caratterizzazione sismica dei siti delle opere accessorie in progetto nell'area della stazione ferroviaria di Fortezza.

In dettaglio sono stati realizzati profili sismici a rifrazione con doppia acquisizione (onde P ed onde SH), per la determinazione della velocità delle onde di compressione P e la velocità delle onde di taglio polarizzate SH.

Inoltre sono state eseguite n° 11 misure HVSR a stazione singola per la definizione della frequenza naturale di sito

Nel presente rapporto sono illustrate le metodologie esecutive ed interpretative delle misure geofisiche ed i risultati della prospezione secondo un criterio essenzialmente geofisico.

1.1. Referenzstandard

- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE: Decreto 14 Gennaio 2008, (G.U. 4 Febbraio 2008, n. 29 – S.O. n. 30) Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008).
- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE: Circolare 2 Febbraio 2009, n. 617: Istruzioni per l'applicazione delle „Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni“ di cui al D.M. 14 Gennaio 2008.
- D.P.R. 207/2010, Sezione IV - Progetto Esecutivo, art. 33-43
- D.Lgs 163/2006, Allegato XXI, Sezione III - Progetto Esecutivo, art. 19-26.

2 ZIEL DER ERKUNDUNGEN

Ziel der durchgeführten Erkundungen ist die Unterteilung des Areals in verschiedene seismisch homogene Bereiche; dadurch wird die seismische Charakterisierung und folglich die Bestimmung von lokalen Verstärkungsfaktoren für alle geplanten Bauwerke ermöglicht.

Im Speziellen konnten durch die verschiedenen Untersuchungen und Erkundungen die geometrischen Beziehungen der Bodenschichten (Definition der Tiefe des seismischen Bedrock und der Mächtigkeit der überlagernden Ablagerungen) auf Basis ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften rekonstruiert werden, sowie die Geschwindigkeitsprofile der Oberflächenwellen und die Werte Vs30 und VsH bestimmt werden.

Die verschiedenen Tests und Messungen führen im Detail zu folgenden Informationen:

Refraktionsseismik:

- Definition des Untergrundmodells, bezogen auf die Geschwindigkeit der Raumwellen P;
- Definition des Untergrundmodells, bezogen auf die Geschwindigkeit der polarisierten Scherwellen SH;
- Definition des für das Areal charakteristischen Vs30

1.1. Normativa di riferimento

- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE: Decreto 14 Gennaio 2008, (G.U. 4 Febbraio 2008, n. 29 – S.O. n. 30) Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008).
- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE: Circolare 2 Febbraio 2009, n. 617: Istruzioni per l'applicazione delle „Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni“ di cui al D.M. 14 Gennaio 2008.
- D.P.R. 207/2010, Sezione IV - Progetto Esecutivo, art. 33-43.
- D.Lgs 163/2006, Allegato XXI, Sezione III - Progetto Esecutivo, art. 19-26.

2 FINALITA' DELLA PROSPEZIONE

Lo scopo delle prospezioni eseguite è quello di fornire i dati necessari per la suddivisione dell'area nelle varie zone omogenee dal punto di vista sismico; con tali elementi sarà possibile la caratterizzazione sismica e successivamente la determinazione dei locali fattori di amplificazione relativi a ciascuna delle opere in progetto.

Nello specifico le varie indagini e prospezioni hanno permesso di ricostruire, sulla base delle loro caratteristiche fisiche e meccaniche, i rapporti geometrici degli strati di terreno (definizione della profondità del bedrock sismico e dello spessore del deposito di copertura), i profili di velocità delle onde superficiali ed il computo del valore di Vs30 e di VsH .

Le diverse prove e misure forniscono in dettaglio le seguenti informazioni:

sismica a rifrazione

- definire il modello del sottosuolo in riferimento alla velocità delle onde di volume P;
- definire il modello del sottosuolo in riferimento alla velocità delle onde di taglio polarizzate SH;
- definizione del Vs30 caratteristico dell'area secondo

laut italienischer Gesetzgebung

HVSR-Messungen

- Definition der natürlichen Frequenz des Gebietes

la normativa italiana.

misure HVSR

- definire la frequenza naturale di sito.

3 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN

Die geophysikalische Erkundung erfolgte im Zeitraum 2-3-4 September 2014. Die Positionierung der geophysikalischen Untersuchungen ist im Detail der Unterlage 4535SGG01 im Maßstab 1:2.000 auf dem vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Lageplan zu entnehmen.

Die geophysikalische Untersuchung umfasste 4 seismische Refraktionsprofile mit Messung der Raumwellen (P) und polarisierten Scherwellen (SH); die beiden Daten wurden mittels der tomographischen Methode bearbeitet. Für jedes seismische Profil wurden 24 Vertikal-Geophone und 24 Horizontal-Geophone (Abb. 2.1) im Abstand von 5 m auf einer Länge von 120 m ausgelegt. Bei jedem Profil wurden 9 Explosionpunkte definiert, die 15 m voneinander entfernt angelegt wurden.

Insgesamt wurde daher folgendes durchgeführt:

- 4 seismische Refraktionsprofile mit Messung der Raumwellen (P), ausgearbeitet mit tomographischer Technik, über eine Gesamtlänge von 480 m;
- 4 seismische Refraktionsprofile mit Messung der polarisierten Scherwellen (SH), ausgearbeitet mit tomographischer Technik, über eine Gesamtlänge

3 INDAGINI SVOLTE

La prospezione geofisica è stata eseguita nei giorni 2-3-4 settembre 2014. L'ubicazione delle indagini geofisiche è riportata in dettaglio nell'elaborato 4535SGG01 in scala 1:2.000 su planimetria fornitaci dalla Committenza.

L'indagine geofisica si è svolta attraverso l'esecuzione di n°4 profili sismici a rifrazione con doppia acquisizione: onde di volume P ed onde polarizzate SH; entrambe le tipologie di dati sono state elaborate con metodo tomografico. Gli stendimenti sismici sono stati approntati, ciascuno, con 24 geofoni verticali e 24 geofoni orizzontali (Figura 2.1) spazati di 5 metri per una lunghezza di 120 m ciascuno. Su ogni profilo sono stati eseguiti un numero di 9 punti di scoppio con inter-distanza di 15 metri lineari.

In totale sono stati quindi eseguiti:

- n°4 profili sismici a rifrazione con acquisizione di onde di volume (P), elaborati con tecnica tomografica, per un totale di 480 metri lineari;
- n°4 profili sismici a rifrazione con acquisizione di onde polarizzate di taglio (SH), elaborati con tecnica tomografica, per un totale di 480 metri lineari.

von 480 m.

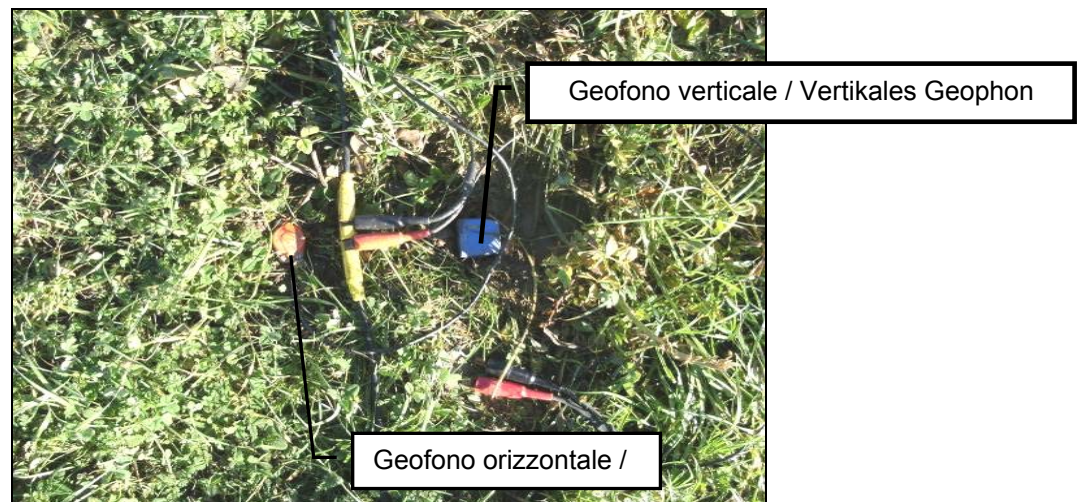


Abb. 2.1 – verwendete Sensoren (Geophone)

Fig. 2.1 - Particolare sensori geofonici utilizzati



Abb. 2.2 – Detail seismisches Profil L2

Fig. 2.2 –Particolare relativo al profilo sismico L2.

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

In der Tabelle sind für alle seismischen Profile die Koordinaten UTM WGS84 der externen Explosionpunkte angegeben:

Nella tabella forniamo per tutti i profili sismici le coordinate UTM WGS84 relativi ai punti di scoppio esterni

	Ps 1		Ps 9	
L1	699291.17	5184641.87	699373.26	5184554.31
L2	699181.89	5184876.55	699236.33	5184770.10
L3	698985.06	5185221.56	699031.44	5185110.88
L4	698940.55	5185282.72	698985.72	5185171.73

Außerdem erfolgten im Untersuchungsareal 11 einzelne HVSR-Messungen (Abb. 2.3) mit einer Dauer von jeweils 16 Minuten.

Inoltre nell'area indagata sono state eseguite n° 11 misure HVSR (fig. 2.3) a stazione singola della durata di 16 minuti ciascuna.



Abb. 2.3 – Detail HVSR-Messung

Fig. 2.3 –Particolare relativo alla misura HVSR .

Auch für die HVSR-Messungen werden die Koordinaten
UTM WGS84 der Messpunkte angegeben:

Anche per le misure HVSR forniamo le coordinate UTM
WGS84 relative al punto di misura:

H1	699436.51	5184569.00
H2	699347.52	5184594.11
H3	699298.93	5184751.91
H4	699189.99	51849734.40
H5	699122.85	5185076.32
H6	699061.14	5185100.27
H7	699002.68	5185190.80
H8	699034.55	5185283.04
H9	699003.11	5185348.80
H10	698965.28	5185417.61
H11	699323.28	5184839.43

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

4 AUSRÜSTUNG, PERSONAL, QUALITÄT

Zur Durchführung der Untersuchung wurden folgende Geräte und Ausrüstung verwendet:

4 STRUMENTAZIONI, PERSONALE, QUALITÀ

Per l'esecuzione della prospezione sono state utilizzate le seguenti strumentazioni ed attrezzature:

n°	STRUMENTAZIONE PER INDAGINI SISMICHE	cod_ID
1	sismografo GEOMETRICS "GEODE" 24 ch-24 bit	SGG-SI-52
1	notebook HP per registrazione dei dati di campagna con MULTIPLEGEODEOPTIMSOFTWARE (MGOS)	
24	geofoni verticali con frequenza pari a 4,5 Hz	SGG-SI-61
24	geofoni orizzontali con frequenza pari a 8 Hz	SGG-SI-63
2	cavi geofonici GEOSPACE con 12 take-out spaziate di 10 metri	SGG-SI-39h
1	hammer switch per dispositivo time-break	
1	connettore ad Y Bendix-Bendix	
1	massa battente da 10 kg	
	piastre di battuta, attrezzi da scavo, cavi e prolunghe per il dispositivo di time-break e per il collegamento GEODE-notebook	

Alle verwendeten Messgeräte werden periodisch vom Labor GammaMisure der CESVIT S.p.A. aus Calenzano laut „Eich-Kalender“ bezogen auf das „Qualitätssystem“ dieses Büros geeicht und laut SIT Nr. 56 (Eichungsdienst in Italien) akkreditiert.

Tutti gli strumenti di misura impiegati, in riferimento con il “calendario di taratura” afferente al “sistema di qualità” in uso presso questo studio, sono periodicamente tarati presso il laboratorio GammaMisure di Calenzano, della CESVIT S.p.A., ed accreditato SIT n°56 (Servizio di Taratura in Italia)

Qualitätssystem

Die geophysikalische Untersuchung wurde in Bezug auf die Angaben SP0302 e SP0901 durchgeführt; die Ausarbeitung der Daten erfolgte in Übereinstimmung mit den Anweisungen IS0901.

Zur Registrierung der verschiedenen Aktivitäten wurden die

Sistema Qualità

La prospezione geofisica è stata eseguita in riferimento alle specifiche SP0302 e SP0901; l'elaborazione dei dati è avvenuta in conformità all'istruzione IS0901.

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Module des in diesem Büro verwendeten Qualitätssystems angewandt.

Verwendete Mittel

Zur Durchführung der Geländeerkundung und der betreffenden Interpretation im Büro wurden folgende Mittel angewandt

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

Per la registrazione delle varie attività sono stati utilizzati i moduli del sistema qualità in uso presso questo studio.

Risorse coinvolte

Per l'esecuzione della prospezione di campagna e della relativa interpretazione in ufficio, sono state coinvolte le seguenti risorse

II

• → Responsabile dell'incarico	A.M.BALDI
• → Responsabile della prospezione	M.SCHEGGI
• → Prospettore geofisico	M.SCHEGGI
• → Interpretazione sismica	M.SCHEGGI
• → Interpretazione HVSR	J.DELUCA
• → Editing	M.SCHEGGI

-

5 ERHEBUNGS METHODIK

Refraktionsseismik P-Wellen

Ziel der seismischen Untersuchung ist die Erstellung eines Festigkeitsprofils des Areals anhand der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswellen „P“ und Scherwellen „SH“.

Zur Erzeugung der P-Wellen werden in einer Reihe von Punkten auf der Geländeoberfläche, die entsprechend dem zu untersuchenden Areal verteilt sind, vertikale dynamische Belastungen verursacht, die sich in einem bestimmten Frequenzfeld befinden müssen. Die produzierten Vibrationen werden von Sensoren registriert, die entsprechend dem zu untersuchenden Areal linear und in bekannten und vordefinierten Abständen angeordnet werden. Für die geophysikalische Untersuchung mittels Refraktionsseismik mit Raumwellen (P-Wellen) wurde folgendes beachtet:

- 24 Vertikal-Geophone mit einer Frequenz von 4,5 Hz;
- Abstand der Geophone: 5,0 Meter;
- Abstand der Explosionspunkte: 15 Meter;
- Mindestanzahl von Explosionspunkten: 9;
- Quelle: Schlaghammer zu 10 kg;
- Registrierungsdauer der einzelnen Events (Öffnung des Speichers): 1,0 Sekunden;
- Messung: 0,125 Millisekunden.

5 METODOLOGIA ESECUTIVA DEI RILIEVI

Sismica a rifrazione onde P

Lo scopo della prova di sismica è quello di ricostruire il profilo di rigidità del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di compressione “P” e di onde di taglio “SH”.

Per l’acquisizione delle onde P la prova consiste nel produrre in una serie di punti sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali in un determinato campo di frequenze e nel registrare tramite uno stendimento lineare di sensori le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate. In riferimento all’indagine geofisica di sismica a rifrazione con onde di volume P sono state adottate le seguenti caratteristiche:

- 24 geofoni verticali con frequenza di 4,5 Hz;
- spaziatura dei geofoni: 5,0 metri;
- spaziatura dei punti di scoppio: 15 metri;
- numero minimo punti di scoppio: 9;
- sorgente: massa battente da 10 kg;
- lunghezza registrazione del singolo evento (apertura memoria): 1,0 secondi;
- campionamento: 0,125 millisecondi

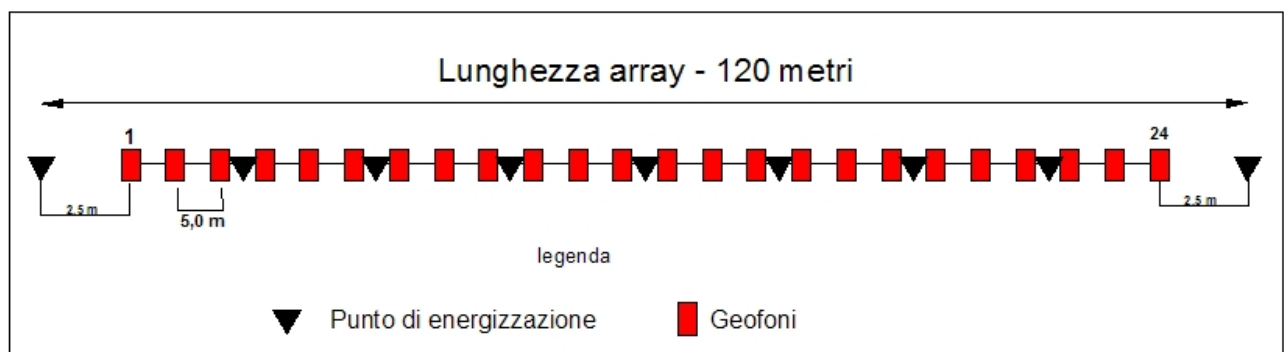


Abb. 5.1 – Schema des seismischen Profils

Fig 5.1 – Schematizzazione profilo sismico

Refraktionsseismik SH-Wellen

Für die geophysikalische Untersuchung mittels Refraktionsseismik mit polarisierten SH-Wellen wurde folgendes beachtet:

- 24 Horizontal-Geophone mit einer Frequenz von 8 Hz;
- Abstand der Geophone: 5,0 Meter;
- Abstand der Explosionspunkte: 15 Meter;
- Mindestanzahl von Explosionspunkten: 9;
- System zur Erzeugung von polarisierten SH-Wellen (Abb. 4)
- Registrierungsdauer der einzelnen Events (Öffnung des Speichers): 2,0 Sekunden;
- Messung: 0,125 Millisekunden.

Was den Mechanismus zur Erzeugung von polarisierten SH-Wellen anbelangt, wurde eine spezielle Platte verwendet, die mit dem Gewicht von zwei Arbeitern ruhig auf den Boden gehalten wurde. Alle 15 Meter (entspricht dem Abstand von 3 Geophonen) wurde die Platte seitlich mit einem Hammer geschlagen.



Abb. 5.2 – Platte zur Erzeugung der SH-Wellen

Die Erzeugung von SH-Wellen (polarisierte Scherwellen) erfolgte durch einen doppelten Schlag auf die Seiten der Platte (horizontale Fläche rechtwinklig zur Geophonauslage)

Sismica a rifrazione onde SH

In riferimento all'indagine geofisica di sismica a rifrazione con onde polarizzate SH sono state adottate le seguenti caratteristiche:

- 24 geofoni orizzontali con frequenza di 8 Hz;
- spaziatura dei geofoni: 5,0 metri;
- spaziatura dei punti di scoppio: 15 metri;
- numero minimo punti di scoppio: 9;
- sistema per la generazione di onde polarizzate SH (Fig. 4)
- lunghezza registrazione del singolo evento (apertura memoria): 2,0 secondi;
- campionamento: 0,125 millisecondi.

Per quanto riguarda il meccanismo di generazione di onde polarizzate SH si è utilizzato una speciale tavola, mantenuta solidale al terreno con il peso di due operatori, la quale viene percossa lateralmente con una mazza ogni 15 metri (pari a 3 interdistanzegeofoniche).

Fig 5.2 – Particolare della tavola per la generazione onde SH

La generazione di onde SH (onde polarizzate di taglio), è avvenuta attraverso la duplice battuta sui lati della tavola

entsprechend der folgenden Vorgehensweise:

- a) Linienförmige Anordnung der Horizontal-Geophone mit dem frei zu vibrierenden Sensor (Geophon) entlang der horizontalen Achse senkrecht zur Linie der Versuchsanordnung;
- b) Positionierung der Platte mit der langen Seite senkrecht zur Geophonauslage;
- c) stack1: Schlag auf eine Seite der Platte, üblicherweise definiert als rechter Schlag (dx), vom Seismographen als positive Polarität aufgenommen;
- d) Wechsel der Polarität auf dem Seismographen von positiv auf negativ;
- e) stack2: Schlag auf die andere Seite der Platte (linker Schlag);
- f) das erhaltene File wird erzeugt durch die Summe aus stack1+stack2 - polarisierte SH-Wellen

(piano orizzontale ortogonalmente allo stendimento geofonico), ed è avvenuta secondo la procedura seguente:

- a) disposizione dei geofoni di tipo orizzontale lungo la linea, con il sensore (geofono) libero di vibrare lungo l'asse orizzontale ortogonale alla linea dello stendimento;
- b) posizionamento della piastra con il lato lungo perpendicolare allo stendimento geofonico;
- c) stack1: battuta su un lato della tavola, definita convenzionalmente battuta destra (dx), acquisita con polarità del sismografo positiva;
- d) cambio di polarità sul sismografo, da positiva a negativa;
- e) stack2: battuta sull'altro lato della tavola (battuta sinistra);
- f) acquisizione del file generato dalla somma dello stack1+stack2 - onde SH polarizzate



Abb.5.3 - Ausrüstungsdetail

Fig 5.3 – Particolare relativo alla strumentazione

HVSR-Messungen

Bei der HVSR-Methode (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) wird das mittlere Verhältnis zwischen den spektralen Amplituden der Horizontalkomponenten des seismischen Rauschens und den spektralen Amplituden der Vertikalkomponenten des seismischen Rauschens gemessen. Die Resonanzfrequenzen entsprechen den Maximalwerten der Funktion der mittleren spektralen Verhältnisse in Funktion der Frequenz (Funktion H/V). Die Amplitude dieser

Misure HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale. Le frequenze di risonanza corrispondono ai massimi della funzione che rappresenta rapporti spettrali medi in funzione della frequenza (funzione H/V). L'ampiezza di questi massimi è proporzionale (anche se non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente

Maximalwerte ist proportional (wenn auch nicht linear) zum Wert des seismischen Impedanzkontrastes.

Bei großen Schwankungen des Geschwindigkeitsprofils der S-Wellen im Untergrund (z.B. beim Übergang von weichen Sedimenten zu hartem Grundgebirge) entsprechen die Maximalwerte der Funktion H/V der Resonanzfrequenz f_r bezogen auf diese strukturelle Beschaffenheit (wobei f_r ca. dem Verhältnis zwischen mittlerer Geschwindigkeit der S-Wellen bis zur Tiefe des Geschwindigkeitssprunges und dem Vierfachen dieser Tiefe entspricht). Man kann auch eine gewisse Korrelation (stark nicht-linear) zwischen dem Wert der Geschwindigkeitsschwankung, die zu Resonanzphänomenen führt, und der maximalen Amplitude der Funktion H/V erkennen (je größer der seismische Impedanzkontrast, desto größer der Maximalwert).

Die Struktur des im Untergrund vorliegenden Wellenfeldes (seismisches Hintergrundrauschen, Mikroerschütterungen, seismisches Rauschen oder seismicnoise) ist abhängig von den Eigenschaften der Quelle, aus der sie entsteht (egal ob natürlich oder künstlich erzeugt) und von der mechanischen Beschaffenheit der Böden. Jede Quelle erzeugt einen seismischen Wellenzug (Laufweg), der den Messpunkt mit Eigenschaften erreicht, die vom Belastungswert der horizontalen und vertikalen Bewegungskomponenten und von der Ausbreitungsart zwischen der Quelle und dem Messpunkt in Funktion von Reflexion, Refraktion und Diffraktion, die in Abhängigkeit von Schwankungen der mechanischen Eigenschaften der untergrundaufbauenden Gesteine entstehen, abhängt. Im Bereich des Hintergrundrauschens treten sowohl Raumwellen (P und S in variabler Quantität) als auch Oberflächenwellen (Love und Rayleigh) auf.

Betrachtet man ein geeignet langes Zeitintervall (in der Größenordnung von einigen 10 Minuten), neigt die durchschnittliche Beschaffenheit eines seismischen Wellenfeldes, das von einer Vielzahl von verschiedenen, zufällig um den Messpunkt verstreuten Quellen erzeugt wurde, zu einem Verlauf, der nicht von den einzelnen Quellen, die das Feld erzeugt haben, abhängt, sondern nur von der Beschaffenheit des Mittels, in denen sich die Wellen ausbreiten und vom durchschnittlichen Energieniveau der anthropogenen oder natürlichen Aktivität.

Normalerweise werden die horizontalen und vertikalen Bewegungskomponenten des Untergrundes gleichermaßen angeregt, wobei die mittlere Amplitude dem Durchschnitt des Rauschens in diesem Zeitintervall entspricht. Unter dieser Annahme werden die Verhältnisse zwischen den horizontalen und vertikalen Bewegungskomponenten (H/V) statistisch unabhängig von den Eigenschaften der Quellen

In particolare, in presenza di forti variazioni nel profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo (legate per esempio alla transizione fra sedimenti soffici e basamento rigido), la funzione H/V mostra dei massimi marcati in corrispondenza della frequenza di risonanza f_r relativa a quella configurazione strutturale (con f_r circa uguale al rapporto fra la velocità media delle onde S fino alla profondità del salto di velocità e il quadruplo di questa profondità). Si osserva anche una certa correlazione (fortemente non lineare) fra l'entità della variazione di velocità responsabile del fenomeni di risonanza e l'ampiezza del massimo della funzione H/V (maggiore è il contrasto di impedenza sismica, maggiore è l'entità del massimo).

La struttura del campo d'onde presente nel terreno (rumore sismico ambientale, microtremore, rumore sismico o seismicnoise) è condizionata dalle caratteristiche delle sorgenti che lo determinano (siano esse naturali o antropiche) e dalle proprietà meccaniche dei terreni. Infatti, ciascuna sorgente genera un treno d'onde che raggiunge il punto di misura con caratteristiche che dipendono dall'entità delle sollecitazioni nelle componenti orizzontali e verticali del moto e dalle modalità di propagazione fra la sorgente e il sito in funzione dei fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione che hanno luogo in corrispondenza di variazioni delle proprietà meccaniche dei terreni nel sottosuolo. In genere, nel campo di rumore ambientale, saranno presenti sia onde di volume (P e S in quantità variabili) che onde superficiali (Love e Rayleigh).

Se si considera un intervallo di tempo opportunamente lungo (dell'ordine delle decine di minuti), le proprietà medie di un campo d'onde sismiche generato da una molteplicità di sorgenti differenti, distribuite casualmente attorno a un punto di misura, tendono ad avere un andamento che non dipende dalle singole sorgenti che hanno generato il campo, ma solo dalle proprietà del mezzo in cui le onde si propagano e dal livello energetico medio dell'attività antropica o naturale.

In particolare, si può immaginare che, in media, le componenti orizzontali e verticali del moto del suolo tendano a essere sollecitate in modo equivalente, con un'ampiezza media pari al livello medio del rumore in quell'intervallo temporale. In questa ipotesi, i rapporti fra le ampiezze verticali e orizzontali del moto (H/V) saranno statisticamente indipendenti dalle caratteristiche delle sorgenti.

sein

Die Resonanzfrequenz v_0 einer Sedimentbedeckung mit Mächtigkeit H , die auf einem harten Untergrund aufliegt und eben geschichtet ist, entspricht dem Verhältnis zwischen der mittleren Geschwindigkeit der S-Wellen im Sediment (V_s) und der vierfachen Mächtigkeit H ($v_0 = V_s/4H$). Mit Hilfe dieser Gleichung kann man bei bekannter Geschwindigkeit der Scherwellen von der gemessenen Resonanzfrequenz auf die Mächtigkeit der Deckschicht schließen, oder, umgekehrt auf die Geschwindigkeit der Scherwellen bei bekanntem H .

Theoretische Studien zeigen, dass im Falle eines von sub-vertikalen Raumwellen ausgelösten Rauschens die Funktion der sedimentären Ablagerung vom Verlauf und der Amplitude der Funktion H/V widergespiegelt wird. Im gegenteiligen Fall sieht man, dass die Amplitude der Maxima der Funktion H/V mit dem seismischen Impedanzkontrast an der Basis der Deckschicht korreliert (aber nicht linear).

Die Abwesenheit von Maxima der Funktion H/V deutet auf die Abwesenheit von seismischen Verstärkungsphänomenen aufgrund von Resonanzphänomenen hin.

Die Registrierung von Mikroerschütterungen über eine Dauer von 16 Minuten erfolgte mit dem digitalen Tomographen TROMINO ENGY PLUS (technische Details auf www.tromino.it), der eigens für diesen Zweck entwickelt wurde.

Geschwindigkeitsanalysen P- und SH-Wellen

Die Interpretation der im Feld gemessenen Daten erfolgte durch das Ablesen der registrierten seismischen Zeiten. Die Ankunftszeiten der „P“ und „SH“-Wellen wurden anhand eines speziellen „picking“-Programms ausgelesen und tabelliert. Bei diesem Programm werden Zeitschwankungen in der Größenordnung von 0,1 Millisekunden berücksichtigt. Daher erfolgte durch das Programm SeisOptPro v5.0 eine Interpretation des seismischen Profils nach tomographischer Methode.

Bei der tomographischen Methode wird der zweidimensionale Raum anhand eines vordefinierten Rasters in Zellen geteilt. Jeder Zelle wird ein bestimmter seismischer Geschwindigkeitswert zugeordnet. Das Programm berechnet die Laufzeit der seismischen Welle durch das Modellraster und vergleicht diesen Wert mit dem experimentellen Wert, unter iterativer Verwendung von geeigneten Berechnungsalgorithmen, nach vorheriger Kontrolle der Strecke

Si può dimostrare che la frequenza di risonanza v_0 di una copertura sedimentaria di spessore H sovrapposta a un basamento rigido e in condizioni di stratificazione piana è data dal rapporto fra la velocità media delle onde S nel sedimento (V_s) e 4 volte lo spessore H ($v_0 = V_s/4H$). Utilizzando questa relazione è possibile risalire dalla frequenza di risonanza misurata allo spessore della copertura una volta nota la velocità delle onde di taglio v_0 , viceversa a questa ultima se lo spessore H è noto.

Studi teorici mostrano che se il rumore è effettivamente dominato da onde di volume emergenti da direzioni sub-verticali, l'andamento e l'ampiezza della funzione H/V riflettono quelle della funzione di risposta del deposito sedimentario analizzato. In caso contrario si vede che l'ampiezza dei massimi della funzione H/V è correlata (ma non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica presente alla base della copertura.

L'assenza di massimi della funzione H/V suggerisce l'assenza di fenomeni di amplificazione sismica dovuti a fenomeni di risonanza.

Le registrazioni di microtremiti, della durata di 16 minuti, sono state effettuate con il tomografo digitale TROMINO ENGY PLUS (specifiche tecniche su www.tromino.it), strumento appositamente progettato per questo scopo

Analisi velocità onde P ed onde SH

La fase d'interpretazione dei dati acquisiti in campagna è preceduta dalla lettura dei tempi sismici registrati. I tempi d'arrivo delle onde „P“ ed „SH“ sono letti attraverso uno specifico programma di picking ed in seguito tabellati. Tale programma permette di apprezzare variazioni di tempo dell'ordine di 0,1 millisecondi. Quindi, per mezzo dello specifico programma SeisOptPro v5.0, è eseguita un'interpretazione con metodologia tomografica del profilo sismico.

La metodologia tomografica prevede la suddivisione dello spazio bidimensionale in celle secondo una maglia prefissata, con l'attribuzione ad ognuna di un determinato valore di velocità sismica. Il programma calcola quindi il tempo di transito dell'onda sismica attraverso le maglie del modello e confronta tale valore con quello sperimentale, impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati, previo controllo dei tragitti dei raggi sismici. Per successive iterazioni si perviene a dei valori

der seismischen Strahlen. Durch Wiederholungen gelangt man zu Werten für die seismische Geschwindigkeit für die verschiedenen Zellen, die gleichzeitig mehrere seismische Strahlen abdecken.

Die Bearbeitung der Daten wird anhand einer Analyse mit anisotroper Modellierung des Untergrundes erzeugt, aus der sich, in Folge einer Bearbeitung mit iterativen R.T.C.-Methoden und Algorithmen der tomographischen Rekonstruktion, das seismische Geschwindigkeitsfeld des Untergrundes durch die Unterteilung des Raumes in reguläre Zellen ergibt. Im spezifischen Fall wurde für die Raumwellen (P-Wellen) ein rechteckiges Gitter (1,7x0,9 Meter) verwendet; in der graphischen Darstellung sind die seismischen Geschwindigkeitswerte der einzelnen Zellen in Farbskala 0-2.500 m/s abgebildet. Außerdem wurden für das bessere Erkennen der Geschwindigkeiten in den Schnitten die Kurven gleicher seismischer Geschwindigkeit mit Abständen von 200 m/s dargestellt. Für die polarisierten Scherwellen (SH-Wellen) wurde auch ein rechteckiges Gitter (1,7x0,9 Meter) verwendet; in der graphischen Darstellung sind die seismischen Geschwindigkeitswerte der einzelnen Zellen in Farbskala 0-1.000 m/s abgebildet. Außerdem wurden für das bessere Erkennen der Geschwindigkeiten in den Schnitten die Kurven gleicher seismischer Geschwindigkeit mit Abständen von 200 m/s dargestellt.

Zur Definition des Interpretationsmodells verwendet die Software die kontrollierte Monte Carlo-Inversionsmethode, die auf einer fortgeschrittenen Modellierung basiert, wo die aus den programmeigenen Algorithmen errechneten Modelle auf Basis eines statistischen Kriteriums angenommen oder abgelehnt werden. Folgende Ergebnisse ergaben sich in Bezug auf die statistische Zuverlässigkeit der Interpretation:

profilo sismico / seismisches Profil	Onde P / P-Wellen		Onde Sh / Sh-Wellen	
	Precisione / Präzision (s ²)	Iterazioni / iteration n°	Precisione / Präzision (s ²)	Iterazioni / iteration n°
L1	2,6x10 ⁻⁵	34.018	9,0x10 ⁻⁵	80.601
L2	5,6x10 ⁻⁶	83.460	4,3x10 ⁻⁵	44.312
L3	2,2x10 ⁻⁵	35.396	1,7x10 ⁻⁴	30.141
L4	9,6x10 ⁻⁵	72.977	1,4x10 ⁻⁴	156.500

wobei die Präzision der Standardabweichung zwischen den experimentellen Werten und den aus den Dromochronen

di velocità sismica per le diverse celle che soddisfino contemporaneamente più raggi sismici.

L'elaborazione dei dati è sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropa, la quale fornisce, in seguito ad un'elaborazione con metodologie iterative R.T.C. e ad algoritmi di ricostruzione tomografica, il campo delle velocità sismiche del sottosuolo attraverso la suddivisione dello spazio in celle regolari. Nel caso specifico è stata utilizzata, per le onde di volume (onde P), una maglia rettangolare di dimensioni 1,7x0,9 metri; nella restituzione grafica i valori di velocità sismica attribuiti alla singola cella sono rappresentati con scala colorimetrica 0-2.500 m/s. Inoltre, per facilitare la lettura delle velocità sulle sezioni, sono state riportate le curve di isovelocità sismica con equidistanza pari a 200 m/s. In riferimento alle onde di taglio polarizzate (onde SH) è stata utilizzata sempre una maglia rettangolare di dimensioni 1,7x0,9 metri; nella restituzione grafica i valori di velocità sismica attribuiti alla singola cella sono rappresentati con scala colorimetrica 0-1.000 m/s. Inoltre, per facilitare la lettura delle velocità sulle sezioni, sono state riportate le curve di isovelocità sismica con equidistanza pari a 200 m/s.

Per la determinazione del modello d'interpretazione, il software utilizza il metodo d'inversione controllato Monte Carlo, basato su una modellizzazione avanzata, dove i modelli derivati dagli algoritmi propri del programma sono accettati o rifiutati basandosi su un criterio statistico. I risultati, in termini di affidabilità statistica dell'interpretazione operata, risultano essere i seguenti:

dove per precisione si intende la sommatoria degli scarti al quadrato tra i valori sperimentali e quelli calcolati nelle dro-

errechneten Werten geteilt durch die Anzahl an Punkten entspricht; die Iteration entspricht der Anzahl an Modellüberprüfungen durch das Programm.

Analyse und Anwendung der Spektralverhältnisse

Die Messung der Funktion H/V erfolgte durch die Aufnahme des seismischen Hintergrundrauschens an einem Punkt für 20 Minuten. Diese Dauer garantiert die Messung des Rauschens von einer Vielzahl von Quellen aus verschiedenen Richtungen.

Die Ergebnisse aller in dieser Arbeit vorgestellten Analysen wurden durch die Software GRILLA erstellt, die die mittleren Verhältnisse zwischen den spektralen Komponenten des Rauschens auf horizontaler und vertikaler Ebene festlegt. Zu diesem Zweck wurde die Serie des Hintergrundrauschens in eine Serie von zeitlichen Fenstern gleicher Dauer (Fenster von 20 Sekunden) unterteilt, für die jeweils das Bewegungsspektrum bestimmt wurde.

Auf jedem dieser Fenster wird das Amplitudenspektrum des Signals in den drei Komponenten berechnet. In dieser Phase wurde für die Bestimmung des Spektrums ein dreieckiges System zur 10%igen Glättung (smoothing) angewandt.

Der Verlauf der spektralen Verhältnisse ergab sich also aus dem Mittel der für die verschiedenen berücksichtigten Zeitfenster erhaltenen Werte. Zur Definition der Qualität der Messungen wurden die zeitlichen und die Azimut-Schwankungen der spektralen Verhältnisse im Verlauf der Messung bewertet und eine Schätzung des relativen Konfidenzintervalls gemacht.

Im Folgenden wird kurz das angewandte Analyseverfahren beschrieben:

- Jede Spur ist in Segmente oder Fenster von 20 Sekunden unterteilt.
- In jedem Fenster und für jede Spur wird Folgendes durchgeführt:

- eine vorbereitende Analyse: Beseitigen von linearen Trends (detrend) und Reduzierung (tapering) der Extremwerte.

- Fourier-Transformation (FFT)

- das Glätten der Spektren mit dreieckigem Fenster entsprechend einem Teil der zentralen Frequenz (in dieser Arbeit generell 10%).

- Die Spektralampplituden der horizontalen Komponenten werden geometrisch gemittelt, und es werden die HVSR-Verhältnisse (f) in jedem zeitlichen

mocrone diviso per il numero dei punti; per iterazioni il numero di volte che il programma ha eseguito la verifica del modello totale

Analisi ed utilizzo dei rapporti spettrali

La misura della funzione H/V è stata effettuata tramite l'acquisizione del rumore sismico ambientale in un punto per un tempo di venti minuti. Questa durata ha lo scopo di garantire la misura del campo di rumore generato da una molteplicità di sorgenti dalle diverse direzioni dello spazio.

I risultati di ogni analisi presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con il software GRILLA, che permette di determinare i rapporti medi fra le componenti spettrali del rumore misurate sul piano orizzontale e verticale. A questo scopo, la serie di rumore ambientale è stata suddivisa in una serie di finestre temporali di uguale durata (finestre di 20 secondi) per ciascuna delle quali è stato determinato lo spettro del moto.

Su ciascuna di queste finestre viene calcolato lo spettro di ampiezza del segnale nelle tre componenti. In questa fase è stata applicato un sistema di lisciamento (smoothing) triangolare del 10% adottato per la determinazione dello spettro.

L'andamento dei rapporti spettrali è stato quindi ottenuto mediando i valori ottenuti per le diverse finestre temporali considerate. Per definire la qualità delle misure sono state anche valutate le variazioni temporali e azimutali dei rapporti spettrali nel corso della sessione di misura e fatta una stima del relativo intervallo di confidenza.

Di seguito sarà brevemente descritta la procedura di analisi seguita:

- Ciascuna delle tracce è suddivisa in segmenti o finestre di 20 secondi.
- In ogni finestra e per ciascuna delle tracce viene eseguita:

- un'analisi preliminare: eliminazione di trend lineari (detrend) e tapering delle estremità.

- la trasformata di Fourier (FFT)

- il lisciamento degli spettri con finestra triangolare ampia una frazione della frequenza centrale (in questo lavoro generalmente il 10%).

- Le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali vengono mediate in modo geometrico, e vengono calcolati i rapporti HVSR (f), in ciascuna finestra

Fenster berechnet.

- Es werden die mittleren HVSR-Verhältnisse und das entsprechende Konfidenzintervall zu 95% berechnet. Der Resonanzfrequenz wird eine Schätzung der Messunsicherheit zugeordnet.

Man erhält das Spektrum der Horizontalkomponente aus dem Mittelwert (üblicherweise geometrisch) der beiden Spektralkomponenten des Rauschens auf horizontaler Ebene. Die Kombination der aus den verschiedenen zeitlichen Fenstern erhaltenen Schätzungen wird anschließend zur Konstruktion der finalen Funktion H/V und zur Abschätzung des entsprechenden Konfidenzintervalls verwendet. Die Funktion H/V erhält man aus dem Mittelwert der in jedem zeitlichen Fenster errechneten Werte der Funktionen H/V.

Experimentell kann die Qualitätsanalyse der Messung auf zwei Weisen erfolgen: entweder durch den Vergleich der mittleren Spektralampplituden des Rauschens, das entlang der zwei Horizontalkomponenten gemessen wird, oder durch die Berechnung verschiedener Werte der Funktion H/V von Zeit zu Zeit durch die Projektion der Spektralampplituden aus der horizontalen Ebene (Abb. 6.1) in verschiedene Richtungen. Die zeitliche Stationarität kann hingegen durch die Darstellung der in den verschiedenen berücksichtigten Zeitfenstern (Abb. 6.1) erhaltenen Funktionen H/V in Funktion der Zeit abgeschätzt werden.

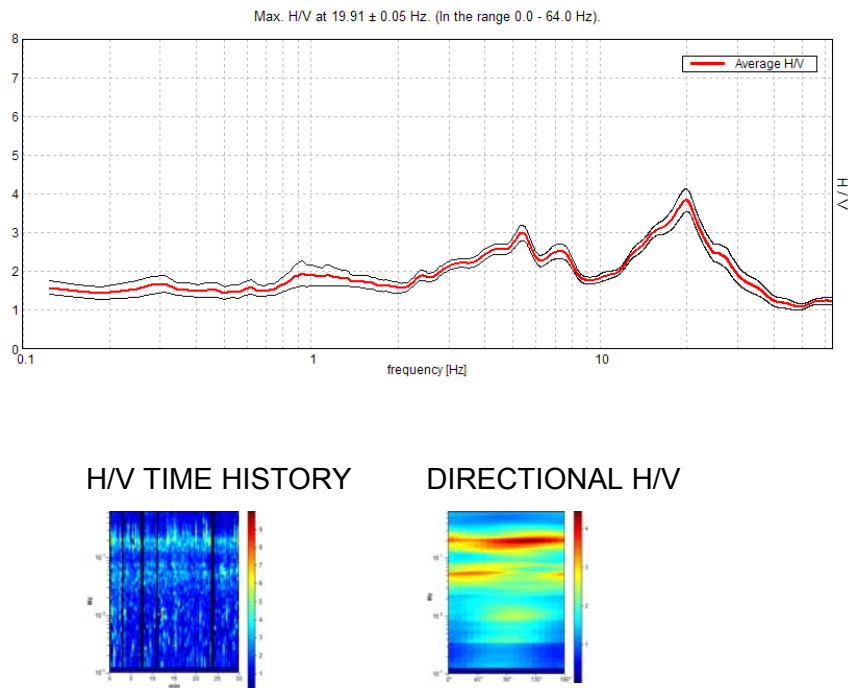


Abb 5.4: Ergebnisse der Analyse des seismischen Rauschens bezogen auf eine korrekte H/V-Messung. Oben: Werte des spektralen Verhältnisses H/V in Funktion der Frequenz mit dem entsprechenden Konfidenzintervall zu 95%. Unten links: zeitlicher Verlauf (Abszisse) der H/V-Werte

temporale.

- Si calcolano i rapporti HVSR medi ed il relativo intervallo di confidenza al 95%. Alla frequenza di risonanza viene associata una stima dell'incertezza sperimentale.

Lo spettro relativo alla componente orizzontale viene ottenuto effettuando la media (solitamente geometrica) delle due componenti spettrali del rumore sul piano orizzontale. La combinazione delle stime ottenute nelle diverse finestre temporali viene poi utilizzata per costruire la funzione H/V finale e stimare il relativo intervallo di confidenza. In particolare, la funzione H/V è ottenuta facendo la media dei valori delle funzioni H/V calcolate in ogni finestra temporale.

Sperimentalmente, l'analisi di qualità della misura può essere effettuata confrontando le ampiezze spettrali medie del rumore misurato lungo le due componenti orizzontali, oppure calcolare diversi valori della funzione H/V di volta in volta proiettando lungo direzioni differenti le ampiezze spettrali ottenute sul piano orizzontale (fig. 6.1). La stazionarietà nel tempo, invece, può essere valutata rappresentando in funzione del tempo le funzioni H/V ottenute nelle diverse finestre temporali considerate (fig. 6.1).

Fig 5.4: Esempio di risultati delle analisi di rumore sismico relative a una corretta misura H/V. In alto sono riportati i valori del rapporto spettrale H/V in funzione della frequenza con il relativo intervallo di confidenza al 95%. In basso a sinistra è riportato l'andamento nel tempo (ascissa) dei

(Farben) in Funktion der Frequenz (Ordinate). Unten rechts: Werte der Funktion H/V (Farbe) in Funktion der Frequenz (Ordinate) in Variation der Signalrichtung (Abszisse).

Für die Zuverlässigkeit und Klarheit des Maximalwertes der Funktion H/V wurde schließlich eine Analyse folgend den Kriterien des europäischen Projekts SESAME durchgeführt, um die scheinbaren Maxima der Funktion H/V zu beseitigen, die durch die Eigenschaften des seismischen Wellenfeldes und nicht durch die lokale Struktur des Untergrundes entstehen.

Schließlich kann die Qualität der Spitze des H/V auch gut durch eine Prüfung der einzelnen Spektren überprüft werden. Physikalisch signifikante Maximalwerte sind generell an Minimalwerte der Spektralampplitude auf der Vertikalkomponente gebunden. Die unten abgebildete Kurve ist ein Beispiel für eine klare und physikalisch signifikante H/V-Spitze (Abb. 5.5).

valori H/V (colori) in funzione della frequenza (ordinata). In basso a destra sono invece riportati i valori della funzione H/V (colore) in funzione della frequenza (in ordinata) al variare della direzione del segnale (ascissa).

Ai fini dell'affidabilità e della chiarezza del massimo della funzione H/V, infine è effettuata una analisi secondo i criteri determinati nell'ambito del progetto europeo SESAME per l'eliminazione di massimi spuri della funzione H/V, la cui presenza è frutto delle caratteristiche del campo d'onde sismiche e non della struttura locale del sottosuolo.

Infine, un buon indicatore della qualità del picco H/V può essere ottenuto dall'esame degli spettri singoli. Infatti, massimi fisicamente significativi sono generalmente associati a valori di ampiezza spettrale minima sulla componente verticale. La curva sottostante può essere riportata come un esempio di picco H/V chiaro e fisicamente significativo (fig. 5.5).

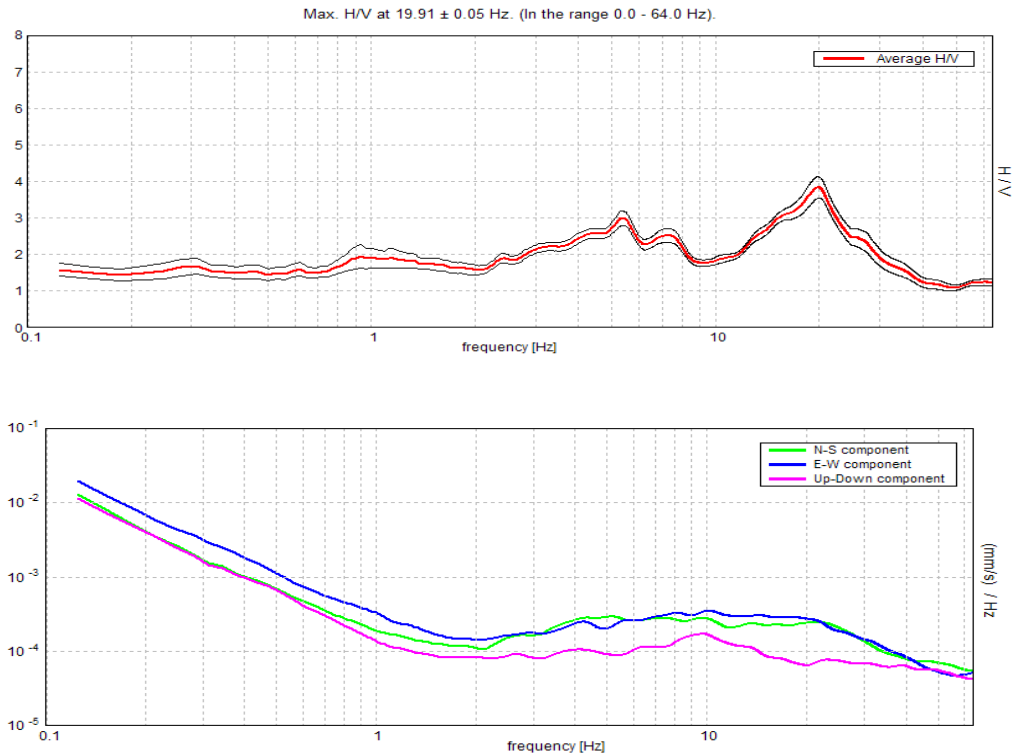


Abb 5.5: Verlauf der Spektren bezogen auf eine korrekte H/V-Messung, in der eine signifikanter Spitze identifiziert wird. Oben: Verlauf der H/V-Kurve (rote Kurve) und entsprechendes Konfidenzintervall (schwarze Kurven). Unten: Verlauf der Spektralampplituden des Rauschens auf der vertikalen Komponente (magenta Kurve) und auf den horizontalen Komponenten (grüne und blaue Kurven).

Fig 5.5: Esempio di andamento degli spettri relativi a una corretta misura H/V nella quale viene identificato un picco fisicamente significativo. Nella figura superiore è riportato l'andamento della curva H/V (curva rossa) e il relativo intervallo di confidenza (curve nere). Nella figura in basso sono riportati gli andamenti degli spettri di ampiezza del rumore sulla componente verticale (curva magenta) e sulle componenti orizzontali (curve verde e blu).

Wie bereits erwähnt, bedeutet eine klare und deutliche Spitze einen guten seismischen Impedanzkontrast, und folglich einen signifikanten lithologischen Übergang zu einem Lithotyp mit konsistenter Mächtigkeit, der daher seismisch als

Come già ricordato, un picco chiaro e netto indica un buon contrasto di impedenza sismica; di conseguenza, un passaggio litologico significativo ad un litotipo avente spessori consistenti e che quindi può essere considerato sismicamen-

Substrat bezeichnet werden kann.

6 ANALYSE DER ERGEBNISSE

Refraktionsseismik

Die Untersuchungen waren insgesamt sehr zufriedenstellend und haben es ermöglicht, den Untergrund sowohl mit einem Modell der Geschwindigkeitsverteilung der Raumwellen (P-Wellen) als auch mit einem Modell der Geschwindigkeitsverteilung der polarisierten Scherwellen (SH-Wellen) zu charakterisieren.

Die graphische Interpretation ist in den Anlagen des vorliegenden Berichtes dargestellt.

Im Folgenden werden die Interpretationsergebnisse beschrieben:

Seismisches Profil L1

Das Seismische Profil L1 wurde im südlichsten Bereich des Untersuchungsareals durchgeführt. Es zeigt eine relativ homogene Geschwindigkeitsverteilung der seismischen P-Wellen, ohne bedeutende Schwankungen. Die Werte der seismischen Geschwindigkeit nehmen mit zunehmender Tiefe kontinuierlich ohne unerwartete Schwankungen des seismischen Gradienten zu.

Das tomographische Modell zeigt oberflächennahe Böden mit geringen seismischen Geschwindigkeiten zwischen 600 und 1.000 m/s mit einer größeren Mächtigkeit am Beginn des Profils, die zum Ende des Profils hin abnimmt. Darunter nehmen die seismischen Geschwindigkeiten konstant zu mit Werten zwischen 1.000 und 2.500 m/s. Nur am Anfang des Profils scheint die Tiefe des letzten Refraktors größer zu sein.

Für den Verlauf der SH-Wellen ergibt die Interpretation eindeutig geringe Werte für die seismische Geschwindigkeit im Bereich zwischen 200 und 500 m/s mit einer konstanten Mächtigkeit von ca. 20 m unter GOK für die gesamte Länge des Profils. Unterhalb dieser Tiefe zeigt die Interpretation Böden mit Geschwindigkeiten zwischen 500 und 1.000 m/s.

te come il sub-strato.

6 ANALISI DEI RISULTATI

Sismica a rifrazione

La prospezione è risultata nel complesso molto soddisfacente ed ha permesso di caratterizzare il sottosuolo sia con il modello di distribuzione della velocità delle onde di volume (onde P), sia con il modello di distribuzione della velocità delle onde di taglio polarizzate (onde SH).

L'interpretazione grafica viene evidenziata nelle tavole allegata alla presente relazione.

Qui di seguito vengono descritti i risultati interpretativi:

Profilo sismico L1

Eseguito nella parte più a sud dell'area indagata, evidenzia una distribuzione delle velocità delle onde sismiche P piuttosto omogenea, senza variazioni significative. I valori delle velocità sismiche aumentano progressivamente con la profondità non evidenziando variazioni improvvise nell'andamento del gradiente sismico.

Il modello tomografico mostra superficialmente terreni con bassi valori di velocità sismiche compresi tra 600 e 1.000 m/s con spessore maggiore nella parte iniziale del profilo per poi diminuire procedendo verso la parte terminale. Inferiormente le velocità sismiche aumentano in maniera costante con valori compresi tra 1.000 e 2.500 m/s. Solamente nella parte iniziale del profilo la profondità di quest'ultimo rifrattore sembrerebbe essere maggiore.

Per quanto riguarda l'andamento delle Onde SH, l'interpretazione evidenzia valori di velocità sismica decisamente bassi, compresi tra 200 e 500 m/s con spessore di circa 20 m p.c. costante per tutta la lunghezza del profilo. Al di sotto di questa profondità l'interpretazione evidenzia, terreni con velocità sismica compresa tra 500 e 1.000 m/s.

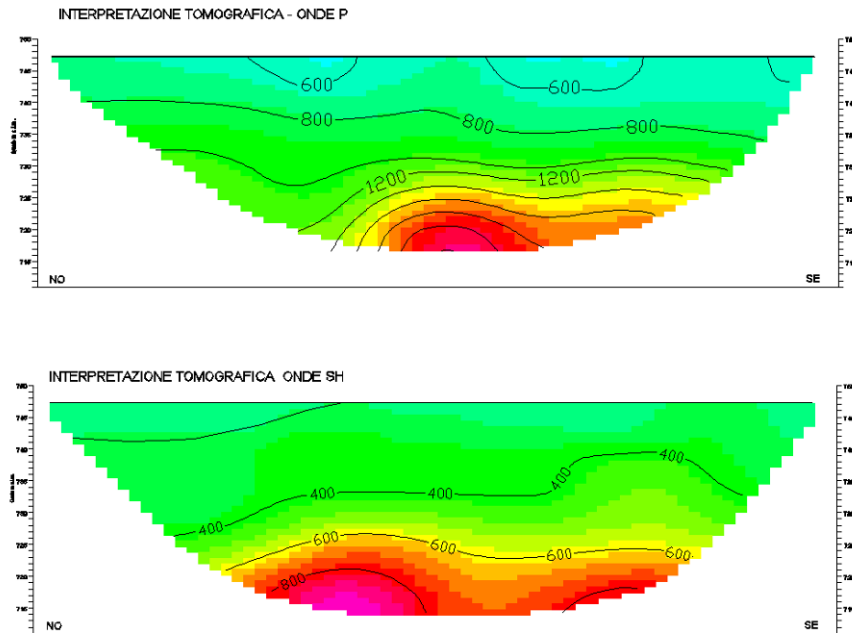


Abb. 6.1: Seismisches Profil L1 - tomographische Interpretation nach P-Wellen (oben) und Sh-Wellen (unten)

Fig. 6.1: Profilo sismico L1 – interpretazioni tomografiche in onde P (alto) ed onde Sh (basso)

Basierend auf die Werte für die SH-Wellen konnte der charakteristische Wert für Vs30 für diesen Bereich (Zone Südunterführung Franzensfeste) berechnet werden

$$Vs30 = 461 \text{ m/s Klasse B}$$

Der berechnete Wert bezieht sich auf die Vertikale in der Mitte des seismischen Profils.

Seismisches Profil L2

Die Interpretation des seismischen Profils L2 unterscheidet sich ziemlich vom vorangegangenen.

Die Böden im oberflächennahen Bereich zeigen eindeutig mittlere-hohe Geschwindigkeiten mit Werten zwischen 1.000 und 1.400 m/s und Mächtigkeiten zwischen 3 m unter GOK und 9 m unter GOK. Darunter nimmt der seismische Gradient kontinuierlich ohne bedeutende Schwankungen zu. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen 1.400 und 2.600 m/s.

Auch die Verteilung der SH-Wellen in diesem Profil unterscheidet sich vom vorherigen. Die Geschwindigkeiten sind höher als im Profil L1. Der oberflächennahe Bereich ist von einer mittleren seismischen Geschwindigkeit von ca. 500 m/s charakterisiert, die einen ziemlich unregelmäßigen Verlauf und eine zunehmende Mächtigkeit gegen Ende des Profils aufweist.

Darunter befindet sich ein Bodenbereich mit seismischen Geschwindigkeiten zwischen 600 und 800 m/s., der im Bereich zwischen dem Explosionspunkt 1 und dem Explosionspunkt 7 eine ordentliche Mächtigkeit aufweist und danach

Sulla base dei valori delle onde Sh è stato possibile calcolare il valore di Vs30 caratteristico per quest'area:

$$Vs30 = 461 \text{ m/s Classe B}$$

Il valore calcolato è riferito alla verticale al centro del profilo sismico.

Profilo sismico L2

L'interpretazione del profilo sismico L2, ha invece evidenziato una situazione abbastanza differente dal precedente.

I terreni nella parte superficiale evidenziano velocità decisamente medio alti con valori compresi tra 1.000 e 1.400 m/s e spessori compresi tra un minimo di 3 m p.c. ad un massimo di 9 m p.c. Inferiormente il gradiente sismico aumenta in maniera costante senza variazioni significative con velocità comprese tra 1.400 e 2.600 m/s .

Anche la distribuzione delle onde Sh per questo profilo è diversa dal precedente con valori di velocità decisamente più alti rispetto al profilo L1. La parte superficiale è caratterizzata da velocità sismica media di circa

500 m/s, con un andamento piuttosto irregolare e spessore che aumenta nella parte finale del profilo.

Inferiormente si evidenzia una porzione di terreno con velocità sismica compresa tra 600 e 800 m/s che presenta uno spessore decisamente importante tra il punto di scoppio 1 ed

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

plötzlich abnimmt.

Darunter nehmen die Geschwindigkeiten konstant ohne bedeutende Schwankungen zu. Die maximalen Geschwindigkeiten liegen bei ca. 1.800 m/s.

il punto di scoppio 7, per poi diminuire bruscamente. Inferiormente le velocità aumentano in maniera costante senza variazioni significative con velocità massime di circa 1.800 m/s .

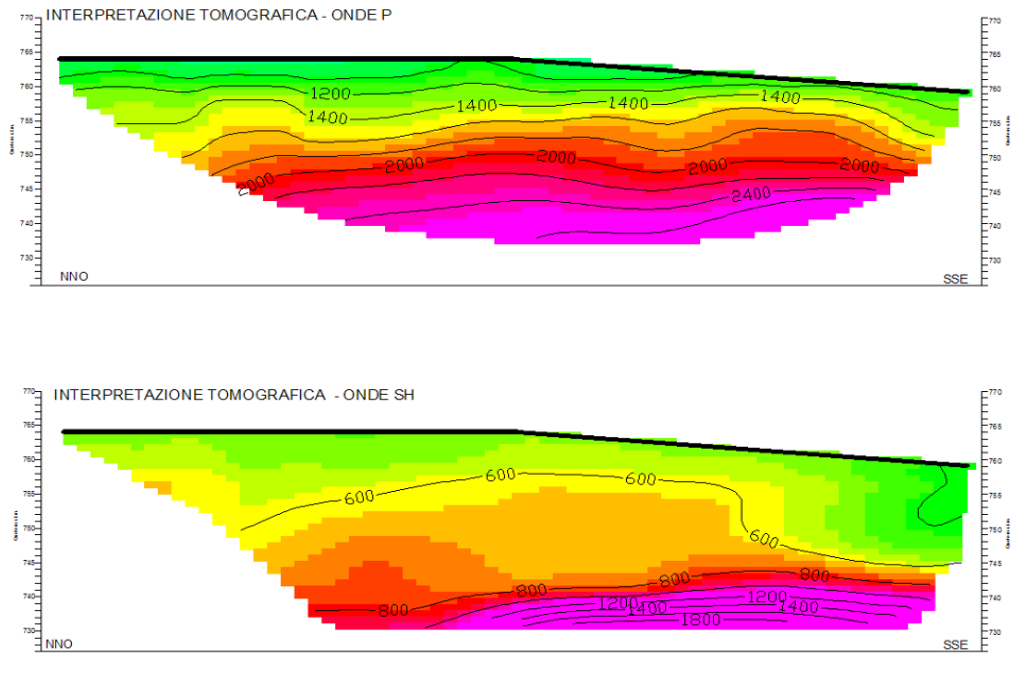


Abb. 6.2: Seismisches Profil L2 - tomographische Interpretation nach P-Wellen (oben) und Sh-Wellen (unten)

Fig. 6.2: Profilo sismico L2 – interpretazioni tomografiche in onde P (alto) ed onde Sh (basso)

Basierend auf die Werte für die SH-Wellen konnte der charakteristische Wert für Vs30 für diesen Bereich (Zone neue Brücke über den Riobach) berechnet werden

$$Vs30 = 665 \text{ m/s Klasse B}$$

Der berechnete Wert bezieht sich auf die Vertikale in der Mitte des seismischen Profils.

Seismisches Profil L3

Das seismische Profil L3 wurde auf Quote der Eisenbahnlinie aufgenommen und zeigt einen sehr konsistenten Bodenbereich mit geringen seismischen Geschwindigkeiten, sowohl für die Raumwellen (P-Wellen) als auch für die polarisierten Scherwellen (SH-Wellen).

Die Interpretation der P-Wellen zeigt Böden mit Geschwindigkeiten unter 600 m/s und Mächtigkeiten zwischen 6 m unter GOK am Beginn und in der Mitte des Profils, die gegen Ende des Profils bis zum Maximum von 18 m unter GOK ansteigen. Darunter nehmen die seismischen Geschwindigkeiten zu und erreichen Werte zwischen 600 und 1.700 m/s mit einem unregelmäßigen seismischen Gradienten am Beginn des Profils. Darunter nehmen die seismischen Ge-

Sulla base dei valori delle onde Sh è stato possibile calcolare il valore di Vs30 caratteristico per quest'area:

$$Vs30 = 665 \text{ m/s Classe B}$$

Il valore calcolato è riferito alla verticale al centro del profilo sismico.

Profilo sismico L3

Eseguito alla stessa quota della linea ferroviaria, evidenzia una porzione molto consistente di terreni con basse velocità sismiche, sia per le onde di volume P che per le onde di taglio polarizzate SH.

L'interpretazione delle Onde P evidenzia terreni con velocità inferiori a 600 m/s e spessori compresi tra 6 metri p.c. nella parte iniziale e centrale del profilo per poi aumentare fino ad una massimo di circa 18 metri p.c. nella parte terminale. Inferiormente le velocità sismiche aumentano con valori compresi tra 600 e 1.700 m/s con un gradiente sismico più irregolare nella parte iniziale del profilo. Al di sotto le velocità sismiche aumentano in maniera regolare fino ad un massimo di circa 2.600 m/s .

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

schwindigkeiten regelmäßig zu und erreichen einen Höchstwert von 2.600 m/s.

Die Interpretation der SH-Wellen zeigt Böden mit geringer seismischer Geschwindigkeit, die für einen sehr konsistenten Bodenbereich zwischen 200 und 500 m/s liegt. Am Beginn des Profils bis zum Explosionspunkt 4 wurden die kleinsten Geschwindigkeiten mit ca. 200 m/s festgestellt. Darunter weisen die Böden Geschwindigkeiten zwischen 500 und 800 m/s auf.

Per quanto riguarda l'andamento delle onde Sh l'interpretazione evidenzia terreni con bassa velocità sismica, compresa tra 200 e 500 m/s per una porzione molto consistente di terreno. Nella parte iniziale del profilo, fino al punto di scoppio 4, si evidenziano le minime velocità sismiche circa 200 m/s .

Inferiormente i terreni sono caratterizzati da velocità comprese tra 500 e 800 m/s .

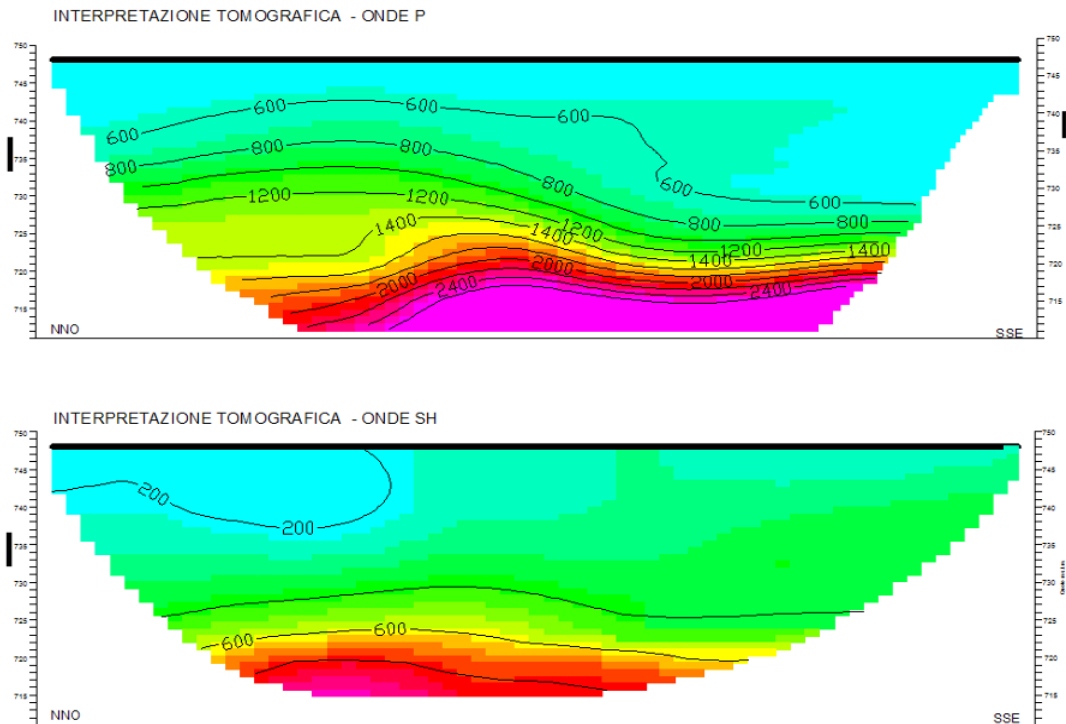


Abb. 6.3: Seismisches Profil L3 - tomographische Interpretation nach P-Wellen (oben) und Sh-Wellen (unten)

Fig. 6.3: Profilo sismico L3 – interpretazioni tomografiche in onde P (alto) ed onde Sh (basso)

Basierend auf die Werte für die SH-Wellen konnte der charakteristische Wert für Vs30 für diesen Bereich (Zone Nordunterführung Franzensfeste, Bauwerke Nordeinmündung BBT, Betriebsgebäude Mittelspannung, etc.) berechnet werden

$$Vs30 = 362 \text{ m/s Klasse B}$$

Der berechnete Wert bezieht sich auf die Vertikale in der Mitte des seismischen Profils.

Sulla base dei valori delle onde Sh è stato possibile calcolare il valore di Vs30 caratteristico per quest'area (zona sottopassaggio Nord Fortezza, opere di imbocco Sud del BBT, fabbricato MT, etc.):

$$Vs30 = 362 \text{ m/s Classe B}$$

Il valore calcolato è riferito alla verticale al centro del profilo sismico.

Seismisches Profil L4

Die Interpretation dieses Profils zeigt Böden mit seismischen Geschwindigkeiten der P-Wellen zwischen 800 und 1.200 m/s im oberen Bereich mit einer homogenen Mächtigkeit über die gesamte Länge des Profils. Darunter zeigt der seismische Gradient einen konsistenten Bodenbereich mit

Profilo sismico L4

L'interpretazione di questo profilo evidenzia terreni con velocità sismica delle onde P comprese tra 800 e 1.200 m/s nella parte sommitale e con spessori omogenei per tutta la lunghezza del profilo. Inferiormente il gradiente sismico evidenzia una porzione consistente di terreno con valori compresi

Titel: Bahnhofsareal Franzensfeste - Bericht zu den für die seismische durchgeführten Untersuchungen Charakterisierung

Titolo: Area Stazione di Fortezza - Relazione descrittiva delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica

Geschwindigkeiten zwischen 1.200 und 1.600 m/s. Darunter nehmen die Geschwindigkeiten in homogener Weise und regelmäßig zu mit Maximalwerten von ca. 2.600 m/s im untersten Bereich.

tra 1.200 e 1.600 m/s fino ad una profondità di circa 16 metri p.c. Al di sotto di questa quota le velocità aumentano in maniera omogenea e regolari con valori massimi nella parte più profonda di circa 2.600 m/s .

Die Interpretation der SH-Wellen hat bis in eine Tiefe von ca. 25 m unter GOK Böden mit einer seismischen Geschwindigkeit zwischen 400 und 600 m/s ergeben. Darunter sind die Böden durch Geschwindigkeiten zwischen 600 und 800 m/s charakterisiert.

L'interpretazione delle onde Sh ha evidenziato fino ad una profondità di circa 25 metri piano campagna terreni con velocità sismica compresa tra 400 e 600 m/s . Inferiormente i terreni sono caratterizzati da velocità comprese tra 600 e 800 m/s .

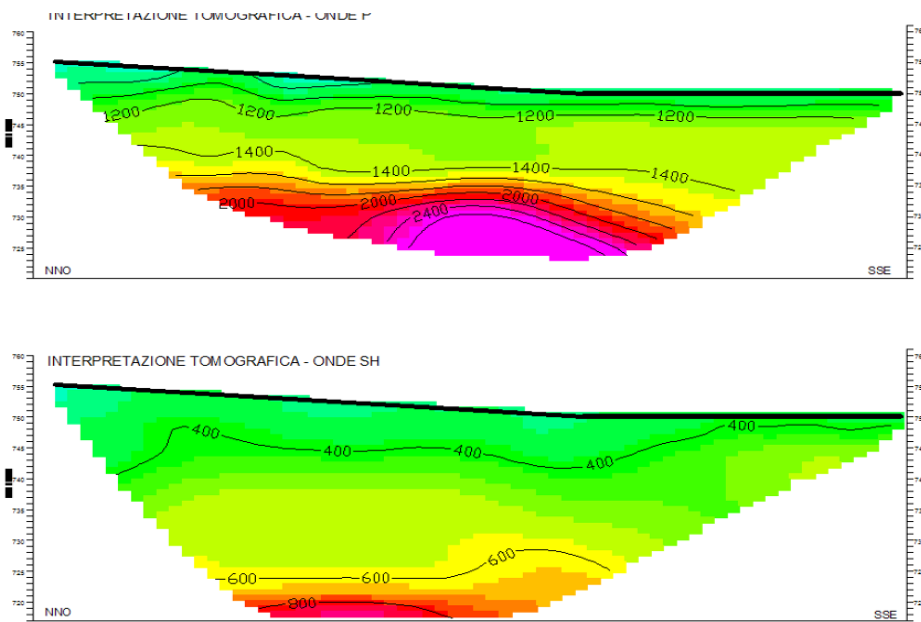


Abb. 6.4: Seismisches Profil L4 - tomographische Interpretation nach P-Wellen (oben) und SH-Wellen (unten)

Fig. 6.4: Profilo sismico L4 – interpretazioni tomografiche in onde P (alto) ed onde Sh (basso)

Basierend auf die Werte für die Sh-Wellen konnte der charakteristische Wert für Vs30 für diesen Bereich (Zone der Bauwerke Südeinmündung BBT) berechnet werden

Sulla base dei valori delle onde Sh è stato possibile calcolare il valore di Vs30 caratteristico per quest'area:

$$Vs_{30} = 497 \text{ m/s Klasse B}$$

$$Vs_{30} = 497 \text{ m/s Classe B}$$

Der berechnete Wert bezieht sich auf die Vertikale in der Mitte des seismischen Profils.

Il valore calcolato è riferito alla verticale al centro del profilo sismico.

HVSR-Messungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der HVSR-Analysen durch Registrierung von seismischem Umweltlärm angegeben.

Für jeden Messpunkt mit der Bezeichnung H mit einer fortschreitenden Nummer werden die Frequenzwerte der Resonanz angegeben, die signifikante Spitzen im der HVSR-Diagramm darstellen.

Mit der Bezeichnung F0 (Grundfrequenz der Resonanz) wurden jene Frequenzen bezeichnet, die die Hauptspitze im HVSR-Diagramm darstellen.

Wenn im HVSR-Diagramm eine weitere signifikante Spitze vorhanden ist, wurde diese Resonanzfrequenz mit F1 bezeichnet.

Für jede einzelne Probe wird die Resonanzfrequenz F0 angegeben mit der jeweiligen Amplitude der Spitze im HVSR-Diagramm und die Resonanzfrequenz F1, wenn vorhanden

Misure HVSR

Di seguito si riportano i risultati delle analisi HVSR delle registrazioni di rumore sismico ambientale.

Per ciascun sito di misura identificato dalla denominazione H e da un numero progressivo, si riportano i valori delle frequenze di risonanza associate a picchi significativi della curva HVSR.

Con la denominazione F0 (frequenza di risonanza fondamentale) sono state identificate le frequenze associate al picco principale della curva HVSR.

Nel caso in cui la curva HVSR abbia evidenziato un ulteriore picco significativo, questa frequenza di risonanza è stata identificata con la denominazione F1.

Per ciascuna prova tomografica, si riporta la frequenza di risonanza F0 con relativa ampiezza del picco della curva HVSR e, quando presente, la frequenza di risonanza F1.

Misura HVSR / HVSR-Messung	F0 (Hz)	Ampiezza / Amplitude
H1	4.03	>8
H2	2.03	>6
H3	8.84	>4
H4	1.63	>7
H5	2.81	>3
H6	5.88	>7
H7	6.25	>8
H8	2.34	>3
H9	3.13	>3
H10	11.13	<3
H11	8.91	<3

**APPENDICE – REPORT MISURE HVSR /
ANHANG – REPORT HVSR-MESSUNGEN**

H1

Max. H/V at 4.03 ± 0.02 Hz (in the range 0.0 - 10.0 Hz)					
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]					
$f_0 > 10 \cdot L_w$	4.03 > 0.50	OK			
$n_c(f_0) > 200$	645.0 > 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 194 times	OK			
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]					
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ · $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	3.125 Hz	OK			
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ · $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	4.75 Hz	OK			
$A_0 > 2$	8.30 > 2	OK			
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.00194 < 0.05	OK			
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.00781 < 0.20156	OK			
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.5822 < 1.58	OK			
L_w n_w $n_c = L_w \cdot n_w \cdot f_0$ f f_0 σ_f $\varepsilon(f_0)$ A_0 $A_{H/V}(f)$ f^- f^+ $\sigma_A(f)$ $\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$ $\theta(f_0)$	window length number of windows used in the analysis number of significant cycles current frequency H/V peak frequency standard deviation of H/V peak frequency threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ H/V peak amplitude at frequency f_0 H/V curve amplitude at frequency f frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$ frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$ 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 standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve 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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

H2



Max. H/V at 2.03 ± 0.03 Hz (in the range 2.0 - 2.1 Hz).					
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]					
$f_0 > 10 / L_w$		2.03 > 0.20		OK	
$n_c(f_0) > 200$		1421.9 > 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 196 times		OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]					
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$		0.984 Hz		OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$		6.438 Hz		OK	
$A_0 > 2$		6.16 > 2		OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$		0.00581 < 0.05		OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$		0.01181 < 0.10156		OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$		0.6902 < 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				
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

H3



Max. H/V at 8.84 ± 0.28 Hz (in the range 3.0 - 10.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	8.84 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	7605.6 > 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 426 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	3.938 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	12.438 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.86 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.01543 < 0.05	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.13647 < 0.44219	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.405 < 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

H4

Max. H/V at 1.66 ± 0.03 Hz (in the range 1.6 - 1.7 Hz).			
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	1.66 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	231.9 > 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 80 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.031 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.063 Hz	OK	
$A_0 > 2$	6.14 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00713 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01181 < 0.16563$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.9219 < 1.78$	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
$\sigma_{\log A_{H/V}}(f)$	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 $\sigma_{\log A_{H/V}}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

H5

Max. H/V at 2.81 ± 0.13 Hz (in the range 2.0 - 10.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$2.81 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$2137.5 > 200$	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 136 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$3.17 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.02283 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0642 < 0.14063$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.5118 < 1.58$	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
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

H6

Max. H/V at 5.88 ± 1.26 Hz (in the range 0.0 - 20.0 Hz).			
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	5.88 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	3642.5 > 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 283 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	8.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.96 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.10303 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.60531 < 0.29375		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.3023 < 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

H7

Max. H/V at 6.25 ± 0.12 Hz (in the range 0.0 - 60.0 Hz).			
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	6.25 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	5125.0 > 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 301 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	4.625 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	6.969 Hz	OK	
$A_0 > 2$	8.60 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00974 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.06088 < 0.3125	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.539 < 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

H8

Max. H/V at 2.34 ± 0.07 Hz (in the range 0.0 - 60.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$2.34 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1687.5 > 200$	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 114 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.531 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	4.188 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.40 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01422 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.03334 < 0.11719$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.4079 < 1.58$	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



H9

Max. H/V at 3.13 ± 0.04 Hz (in the range 0.0 - 60.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	3.13 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	2875.0 > 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 151 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.938 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.688 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.63 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00626 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01957 < 0.15625$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.6866 < 1.58$	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
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

H10

Max. H/V at 11.13 ± 0.77 Hz (in the range 0.0 - 20.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	11.13 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	10457.5 > 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 535 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	7.25 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	20.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.64 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03404 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.37865 < 0.55625	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1875 < 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
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

H11

Max. H/V at 8.91 ± 0.03 Hz (in the range 3.0 - 10.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	8.91 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	7125.0 > 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 428 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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	12.719 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.47 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00164 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.01464 < 0.44531	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2644 < 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
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20