GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

FLUGPLATZ KÄGISWIL
BRÜNIGSTRASSE 77
6060 SARNEN

Projekt Nr.: 60-3216
Bericht Nr.: 3216 / 2

Geoprofile GmbH

Version: 01

GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN
FLUGPLATZ KÄGISWIL
BRÜNIGSTRASSE 77
6060 SARNEN

Bauherrschaft	-
Auftraggeber	Strüby Holzbau AG
Geologiebüro	Geologik AG Büttenenhalde 42 6006 Luzern Herr Wolfgang Richter
Referenz Nr. des Auftraggebers	Bestell-Nr.: 167428
Projekt Nr. Geoprofile GmbH	**60-3216**
Bericht Nr.	3216 / 2
Vertraulichkeit	Verteilung des Berichts beschränkt auf vom Auftraggeber genehmigten Projektteilnehmer

Kurzbeschreibung

Die Bauherrschaft fordert geophysikalische Untersuchungen auf dem Flugplatz Kägiswil an der Brünigstrasse 77 in 6060 Sarnen an.

Zur erweiterten Abklärung der lokalen Baugrundverhältnisse wurde Geoprofile GmbH vom Auftraggeber beauftragt, eine Geophysikalische Untersuchungen mit Seismikketten über eine Länge von jeweils 90 m bis 100 m zu messen und vier Messungen mit zwei Triaxialgeophonen durchzuführen.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die folgenden Leistungen:

- 8 Stk. HoliSurface aktive Messungen (Rayleigh- und Love-Wellen)
- 8 Stk. HVSR passive Messungen
- 1 Stk MARW aktive Messungen zur Überprüfung der Felstiefe (Sh-Wellen)

Feldarbeiten : 01. Oktober 2025

Version	Datum	Beschreibung	Kontrolliert	Genehmigt
1	27.06.2025	Schlussbericht	and	hjt

INHALTSVERZEICHNIS Seite

Situation mit ungefährer Lage, geophysikalische Messungen + CPTU und Bohrungen 1

BEILAGEN

Beilage A : Ausführungspraxis
Beilage B : HS (HoliSurface) – Resultate und 1D Model
Beilage C : HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ration) – Resultate
Beilage D : MARW (Multichannel Analysis of Reflected Waves) - Resultate
Beilage E : Interpretation

ANHÄNGE (allgemeine Hintergrundinformationen)

Anhang 1 : Seismiche Messungen
Anhang 2 : HS (HoliSurface)
Anhang 3 : HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)
Anhang 4 : MARW (Multichannel Analysis of Reflected Waves)
Anhang 5 : MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)
Anhang 6 : Gerätespezifikationen



GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

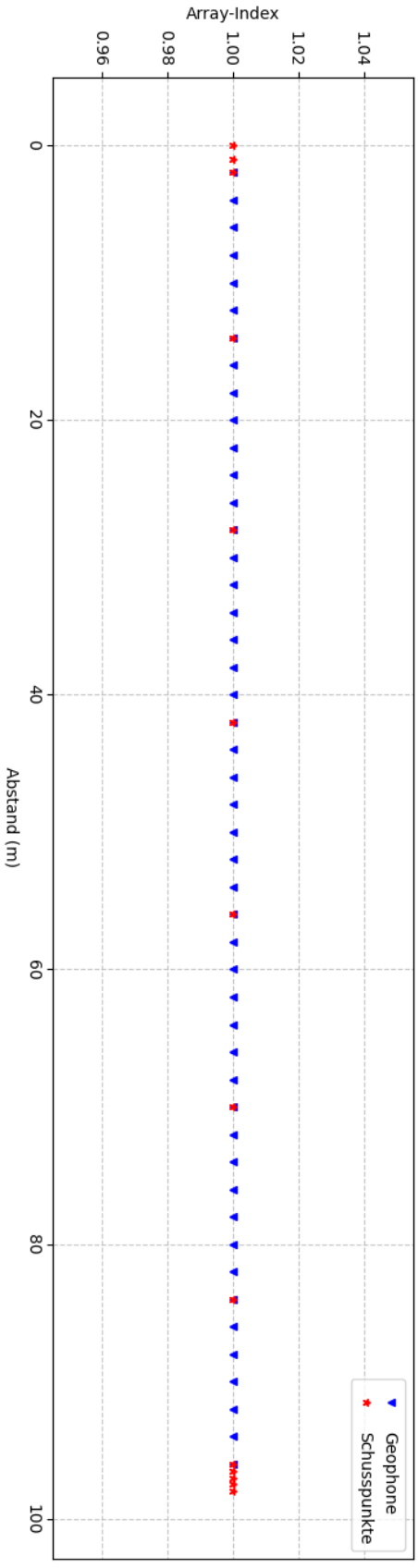
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	**GEOLOGIK AG**	**SITUATION MIT UNGEFÄHRER LAGE** GEOPHYSICALICHE MESSUNGENG + CPTU FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER		SEITE
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01		1

BEILAGE A
AUSFÜHRUNGSPRAXIS

INHALT Beilage

Ausführungspraxis der Seismischen Messungen A1 – A2

AKQUISITIONSSTEUERUNG	
Generelle Testablauf:	Siehe Anhänge: 1) Seismische Messungen 2) HS (HoliSurface) 3) HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) 5) MARW (Multichannel Analysis of Reflected Waves)
Vorbereitungsphase:	– Bestimmung der Sondierstandorte durch Auftraggeber – Auswahl der Messtechnik durch Geoprofile GmbH
Messphase:	– Auslegung des zwei Triaxialgeophone und des Schusspunkts entlang einer Line mit Messband – Auslegung der 48 Horizontalgeophone und des Schusspunktes entlang einer Line mit Messband – Positionierung des Ambosses (S-Wellen) am Schusspunkt – Stapelung von 3 - 10 Schlägen
Messabschluss:	Erreichend der folgenden Kriterien pro Schusspunkt: – Minimale Zahl der Stapelungen erreicht – Raum- und Oberflächenwellen im Seismogramm klar ersichtlich – Erreichen der erforderlichen Anzahl und Länge der Messlinie – Umstände im Ermessen des Geophysikers, wie z.B. das Risiko von Sach- oder Personenschäden
AUSFÜHRUNG	
Qualitätskontrollen im Feld:	– Aufzeichnung des Signals und Beurteilung der Dämpfung und des Geräuschpegels zur Wahl der Aufnahmeeinstellungen vor jeder Aufnahme (“noise test”) – Visuelle Beurteilung des Seismogramms nach jeder Aufnahme – Beurteilung des Frequenzspektrums für jeden Kanal – Punktuelle Beurteilung des Phasengeschwindigkeitsspektrum des Seismogramms
Geometrie:	– Linie: Sh-Wellen, dx 2m, ds 14m
Erfassungs-parameters:	– MARW: SPS 1000 – 4s – HoliSurface: SPS 2000 – 3s – HVSR: SPS 250 – von 20 min bis 40 min
MESSAUSRÜSTUNG	
Seismograph:	– DoReMi 48 Kanälen (24-bit) mit digital Telemetrie
Geophone:	– n° 2 triaxiale Geophone Geospace 4.5 Hz 100 V/m/s – n° 48 horizontale Geophone 4.5Hz 80 V/m/s
Zubehör:	– Auslöser: Geophon 10 Hz 28 V/m/s samt 100m Erweiterung – Anregung: Fausthammer 10 kg mit metallischem Amboss (Sh)
DATENAUFZEICHNUNG UND -BEARBEITUNG	
Auswertung:	HoliSurface, Rayfract, GE HVSR, GE MARW, GE MASW, FrontEND, Surfer, Python

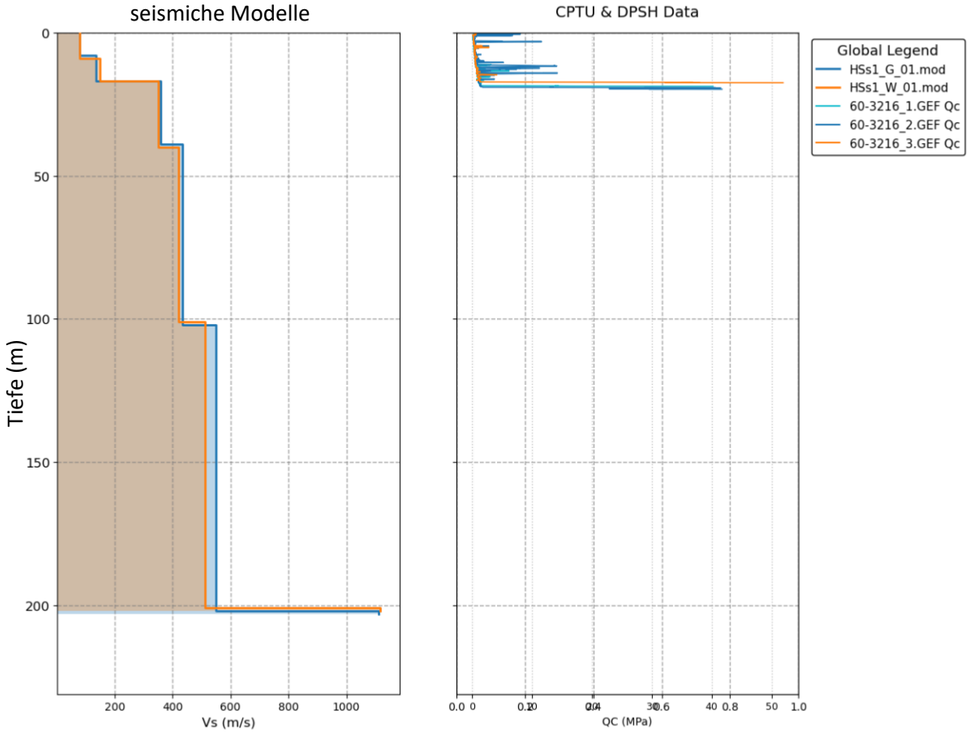

Array-Index
0.96
0.98
1.00
1.02
1.04
Abstand (m)
0
20
40
60
80
100
Geophone
Schusspunkte

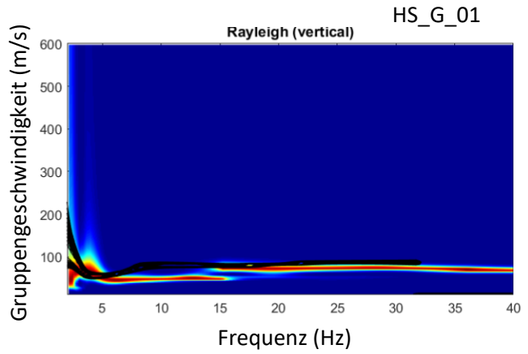
BEILAGE B

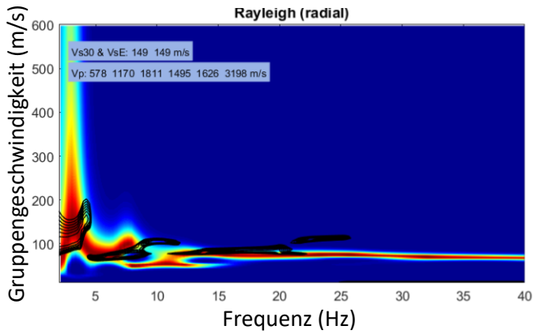
HS (HOLISURFACE) – RESULTAT UND 1D MODEL

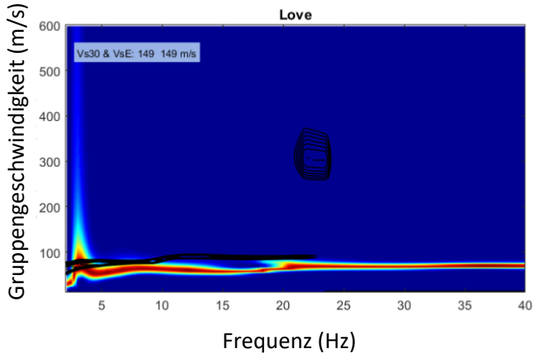
INHALT Beilage

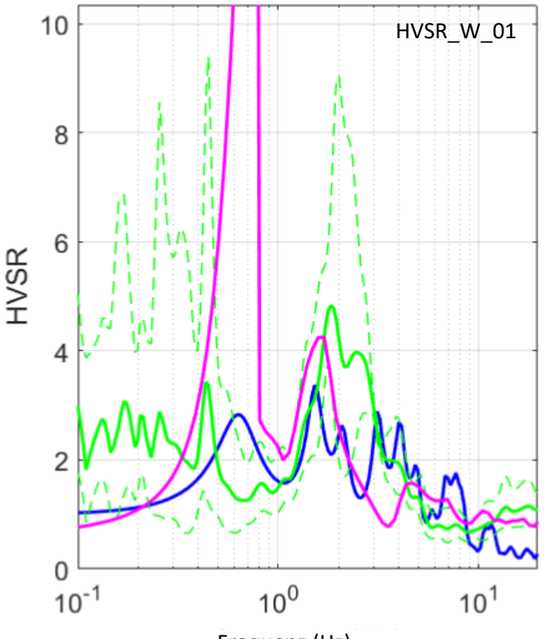
HoliSurface 01	B1
HoliSurface 02	B2
HoliSurface 03	B3
HoliSurface 04	B4

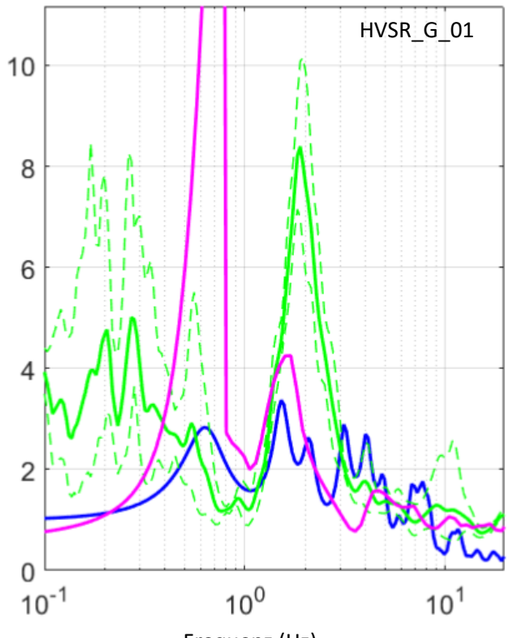


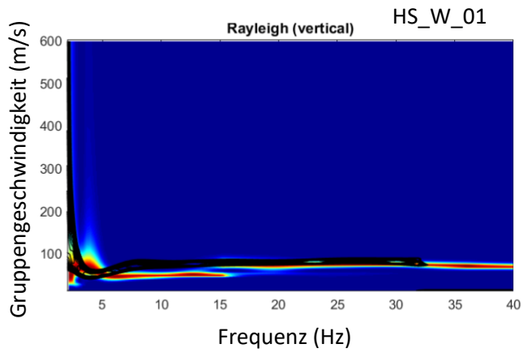


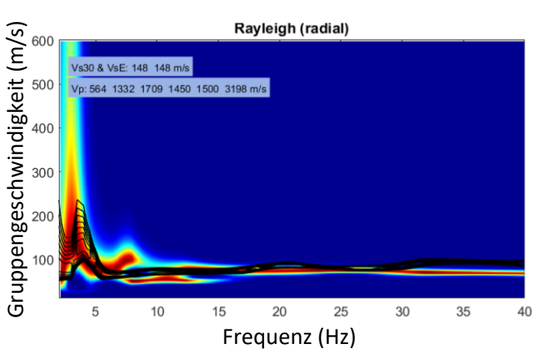


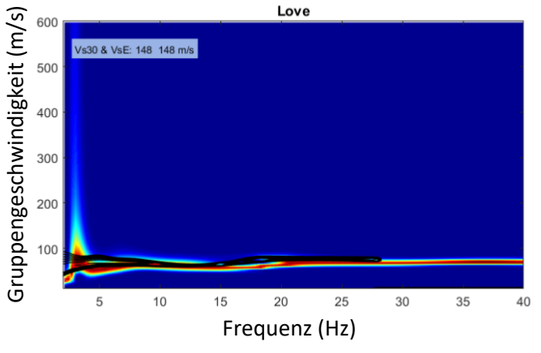






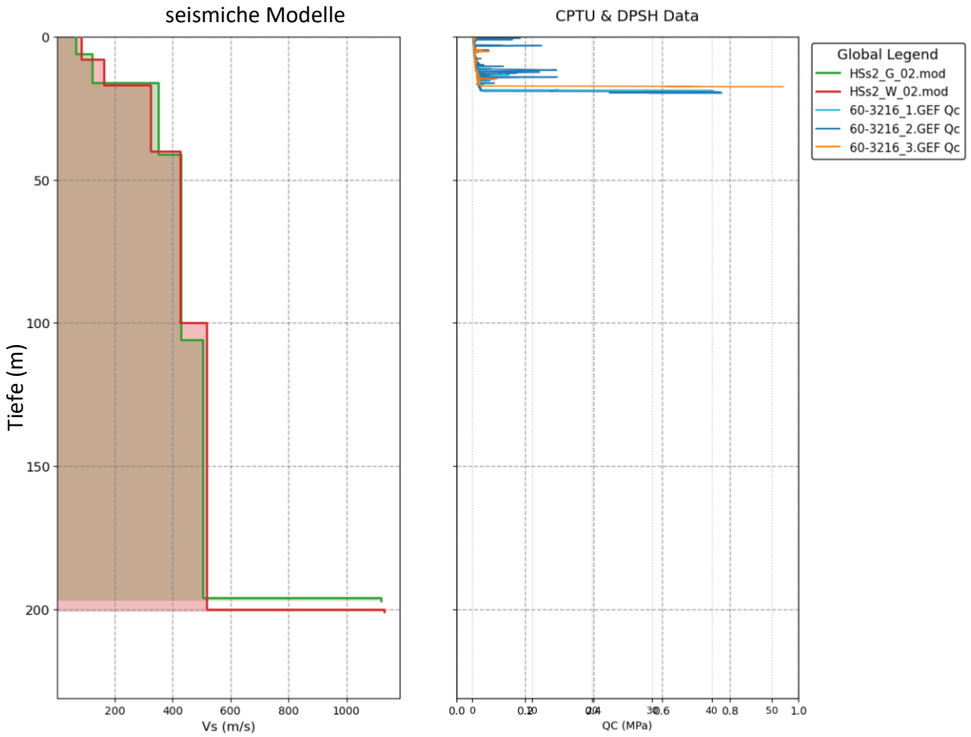


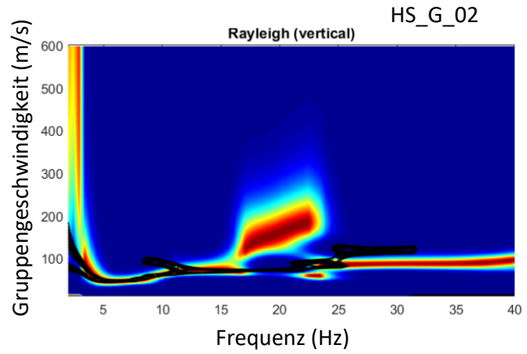


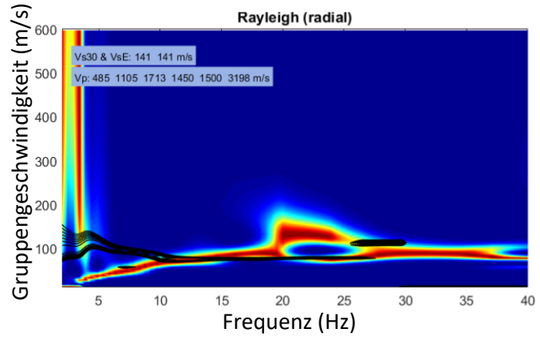


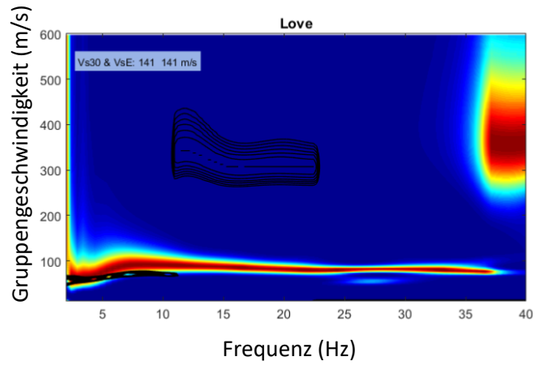
GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

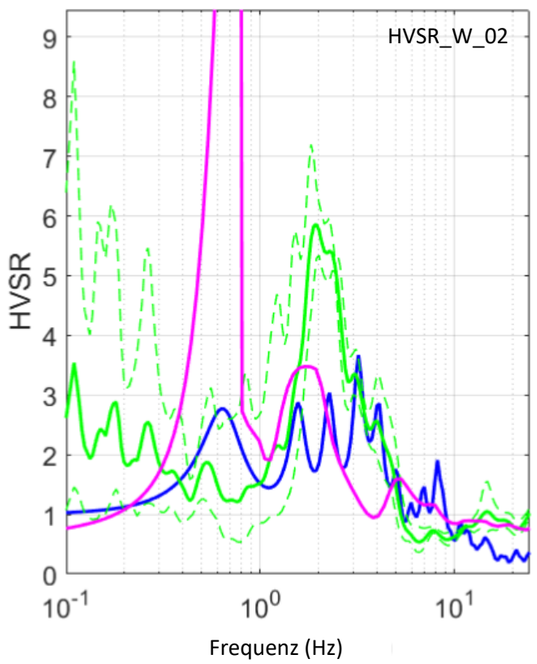
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	GEOLOGIK AG	RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT HS METHODE - 01 *FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER		BEILAGE
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01		B1

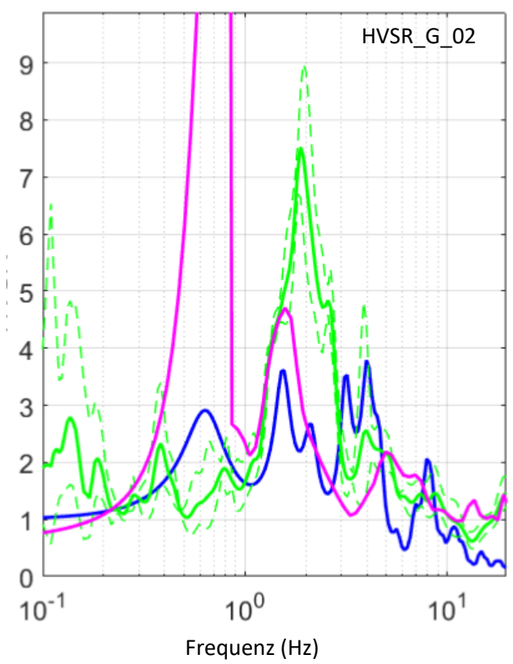


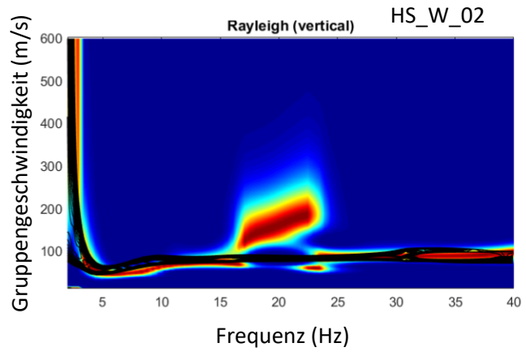


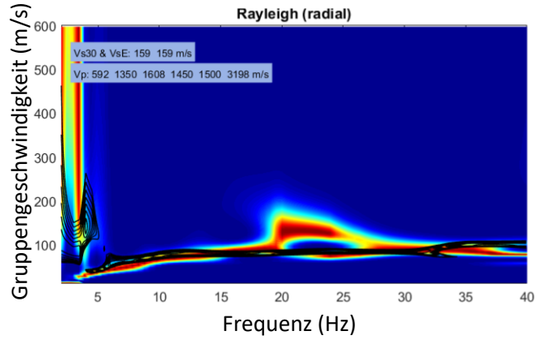


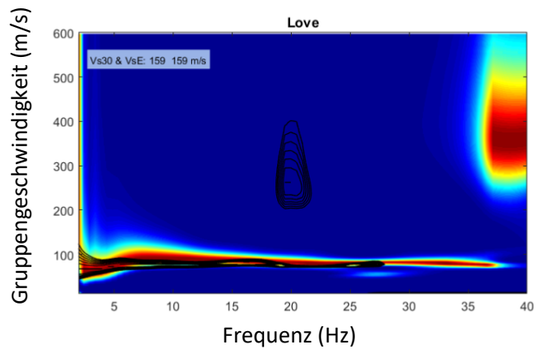










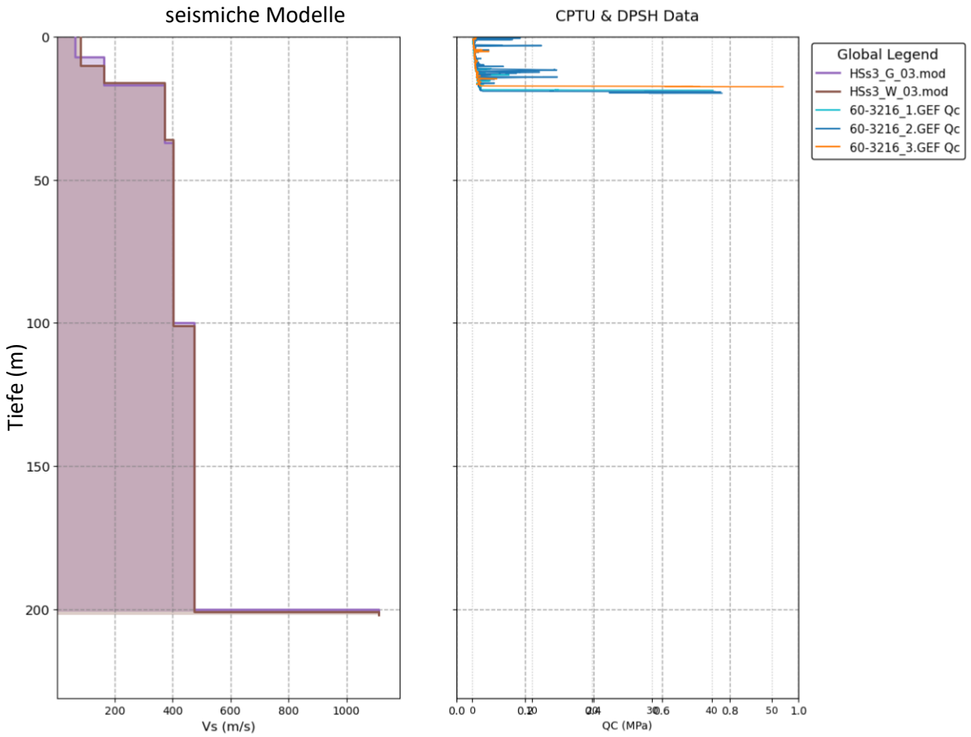


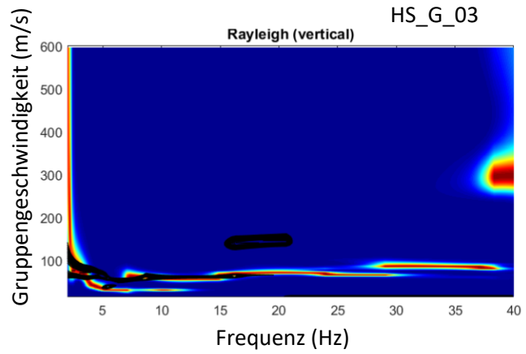
GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

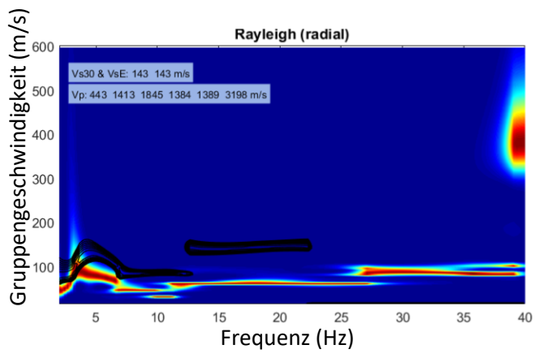
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	**GEOLOGIK AG**
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER	
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01	

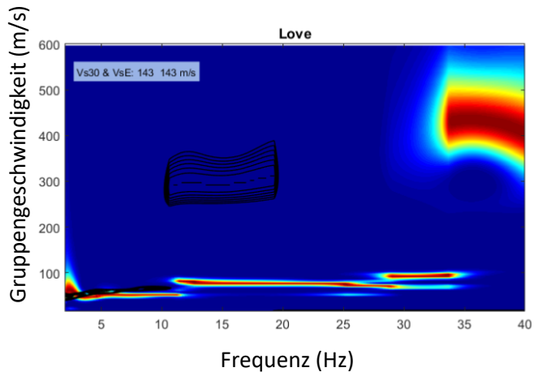
TITEL
RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT
HS METHODE - 02
FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN

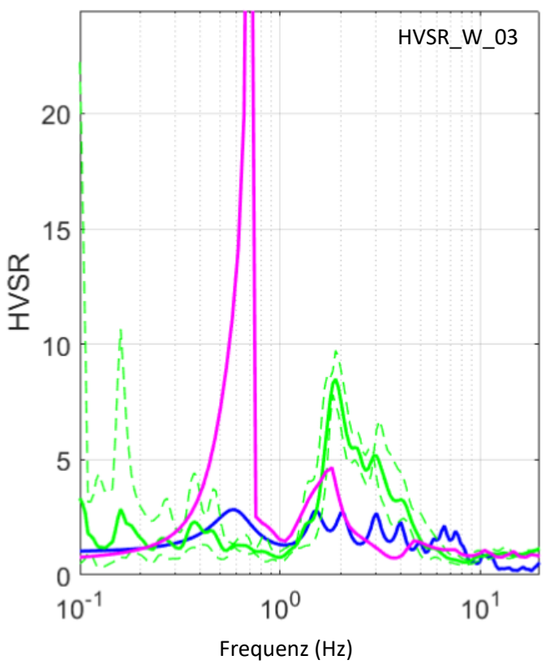
BEILAGE
B2

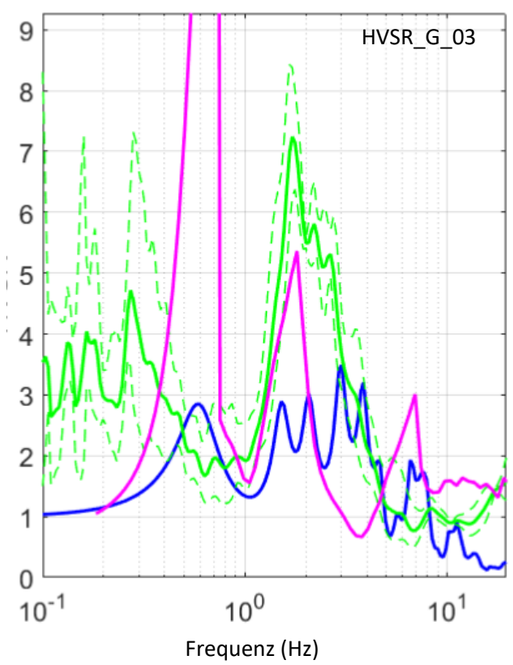


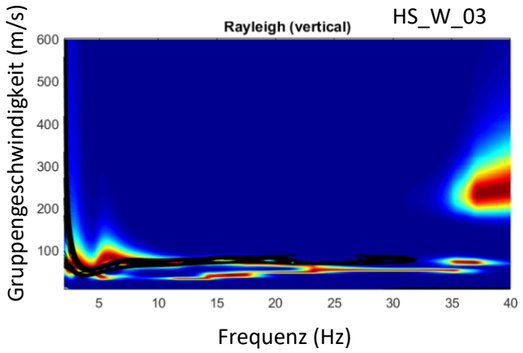


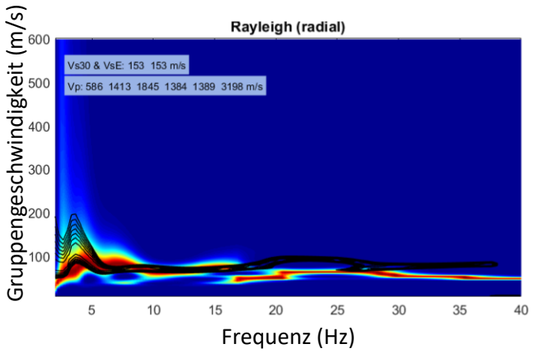


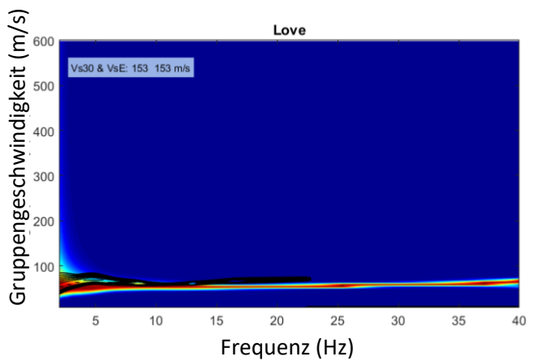








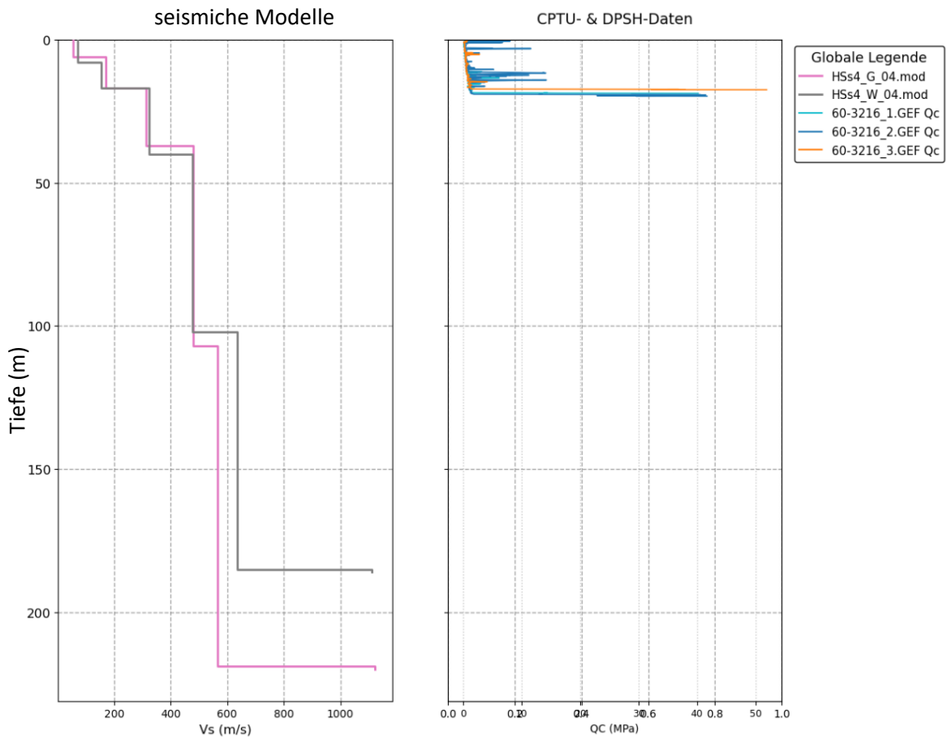


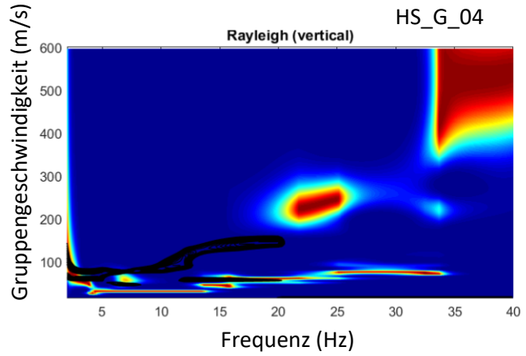


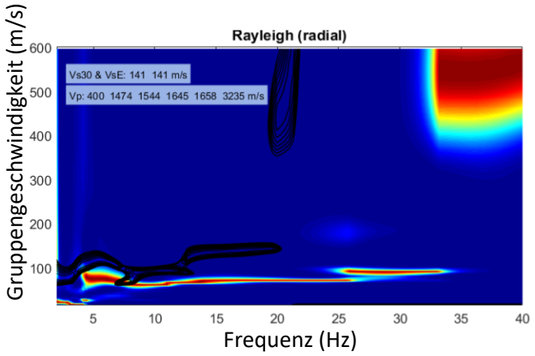
GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

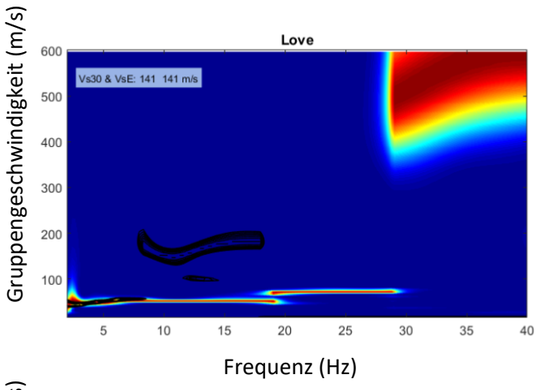
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	**GEOLOGIK AG**	**RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT**
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER		HS METHODE - 03
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01		*FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*

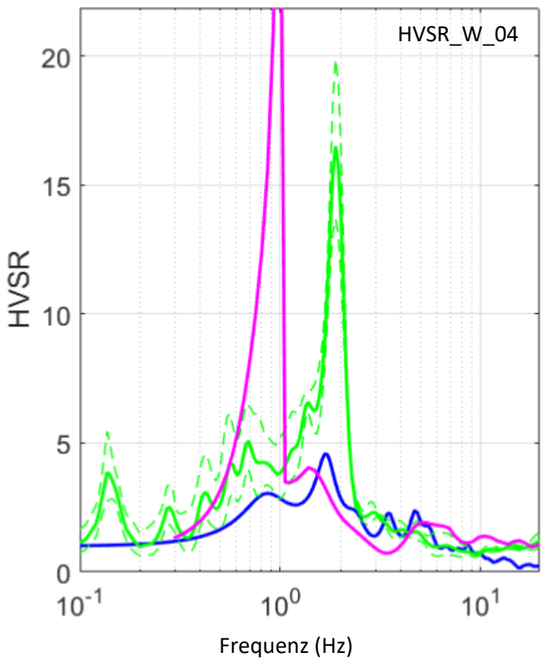
BEILAGE
B3

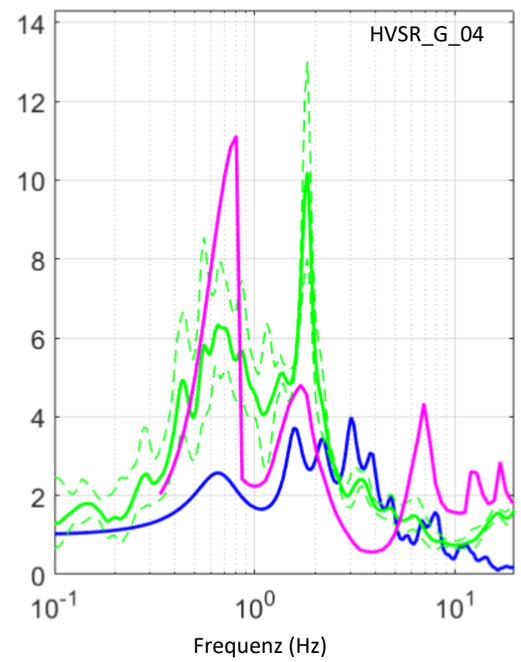


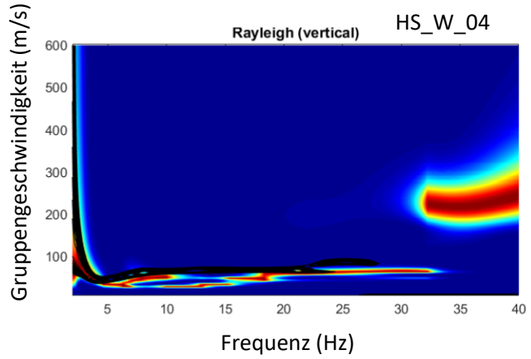


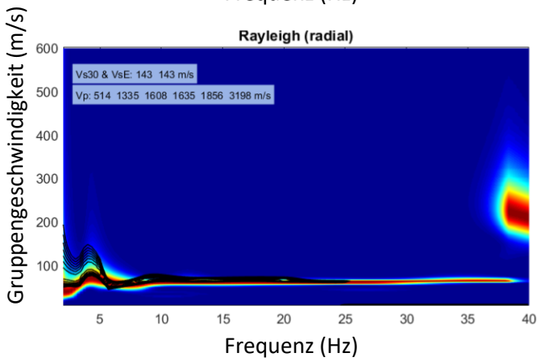


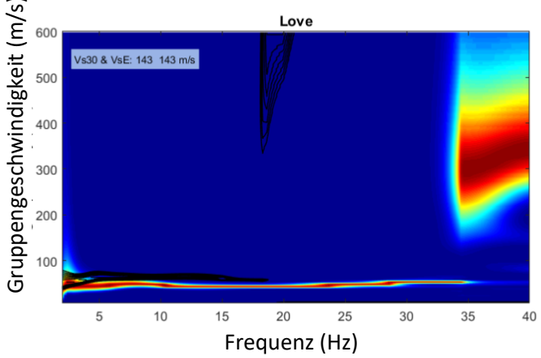












GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

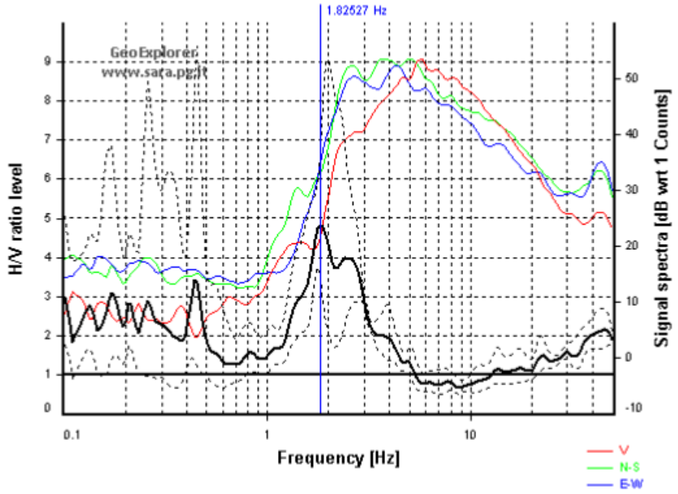
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	GEOLOGIK AG	RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT HS METHODE - 04 *FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER		BEILAGE
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01		B4

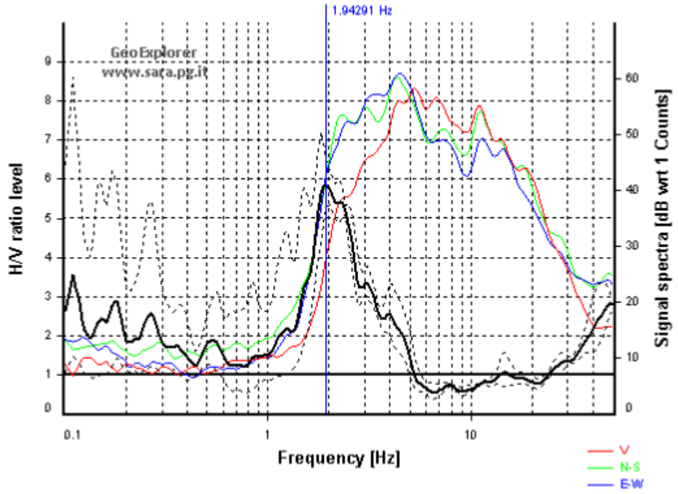
BEILAGE C

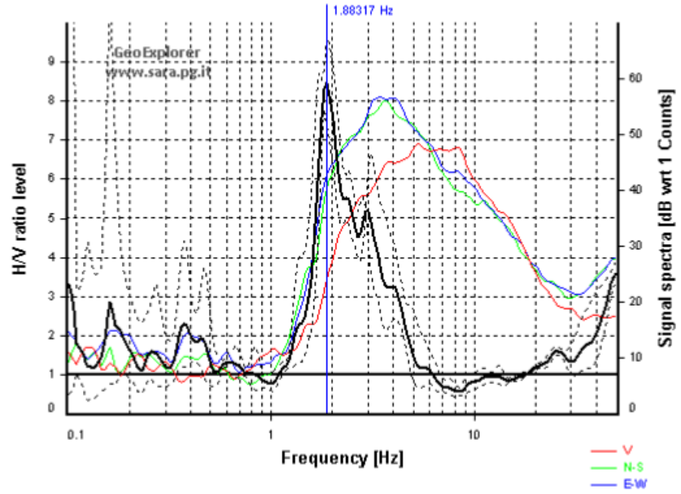
HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) – RESULTATE

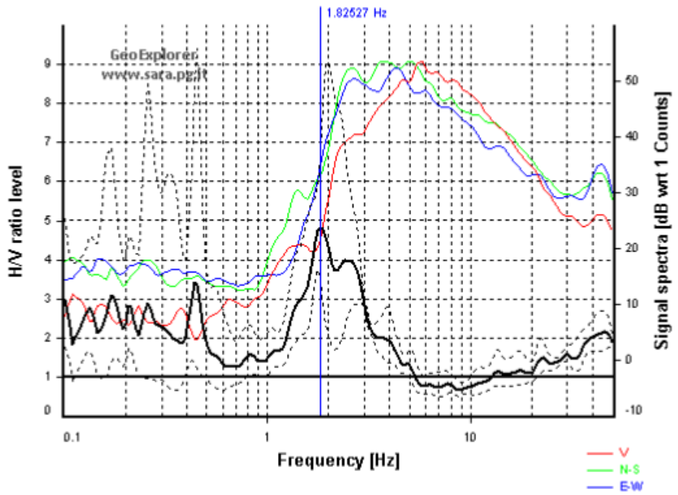
INHALT Beilage

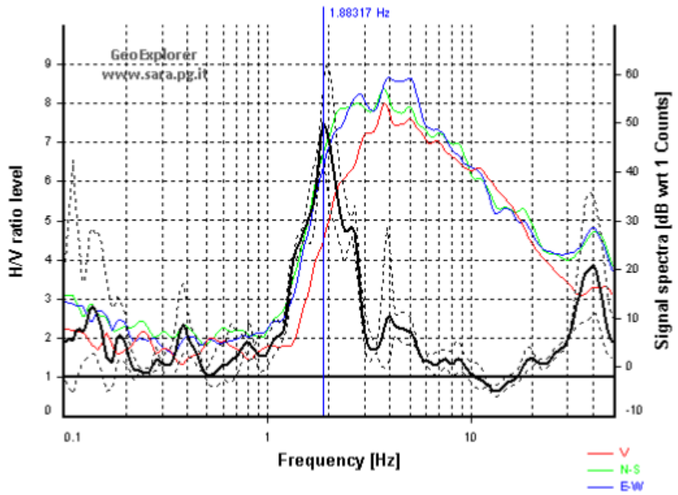
HVSR-Kurven C1

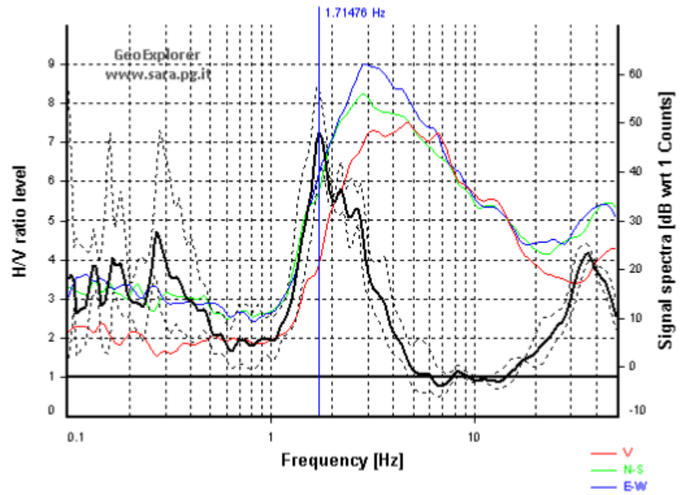


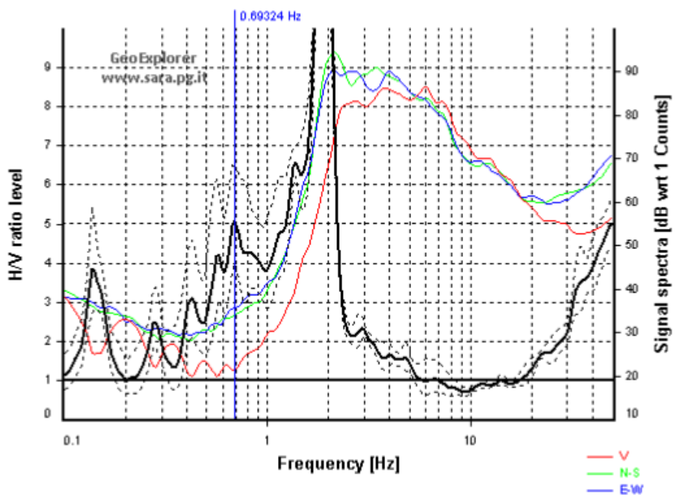


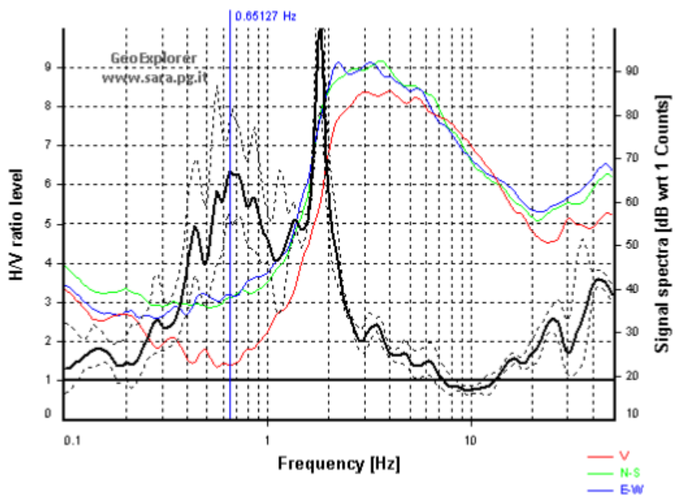












GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

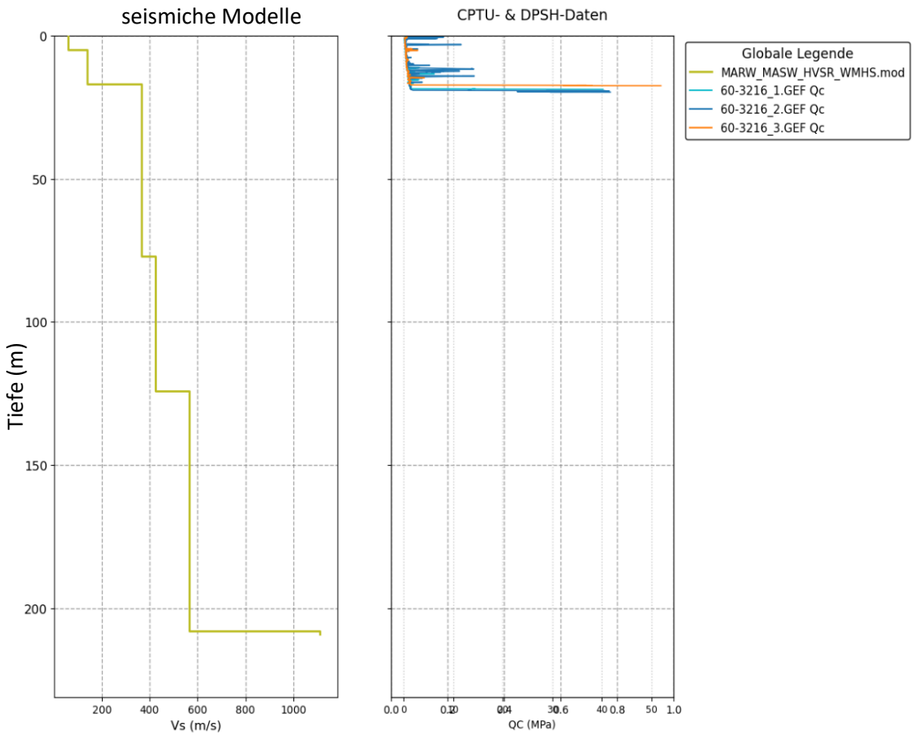
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	GEOLOGIK AG	RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT HVSR METHODE
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER		*FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01		BEILAGE C1

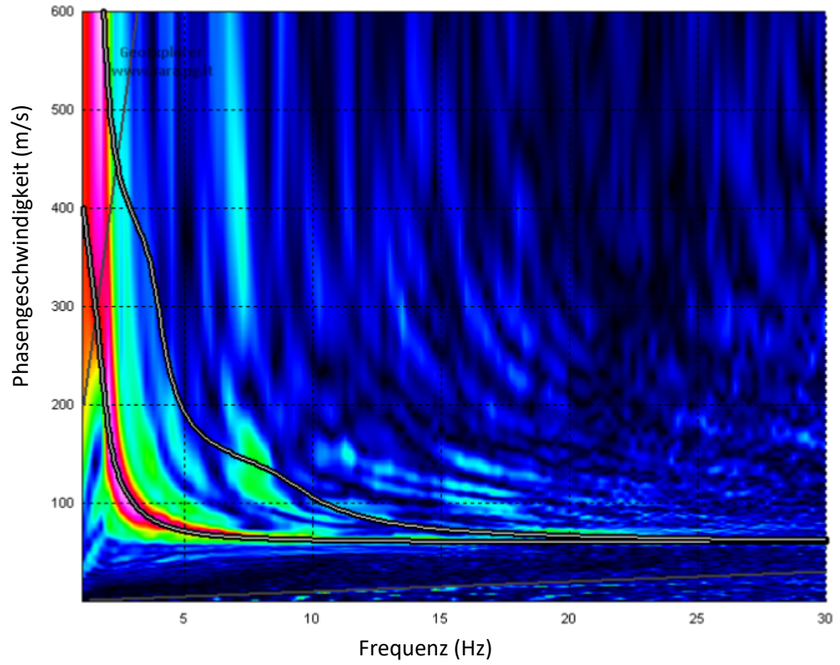
BEILAGE D

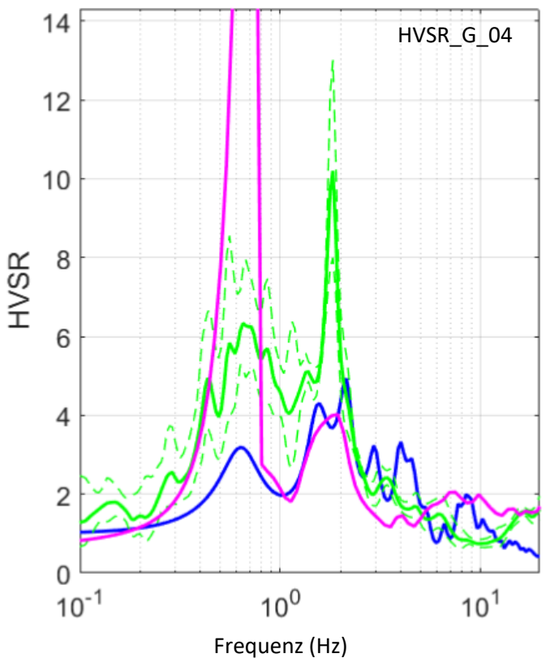
MARW (Multichannel Analysisi of Reflected Waves) – RESULTATE

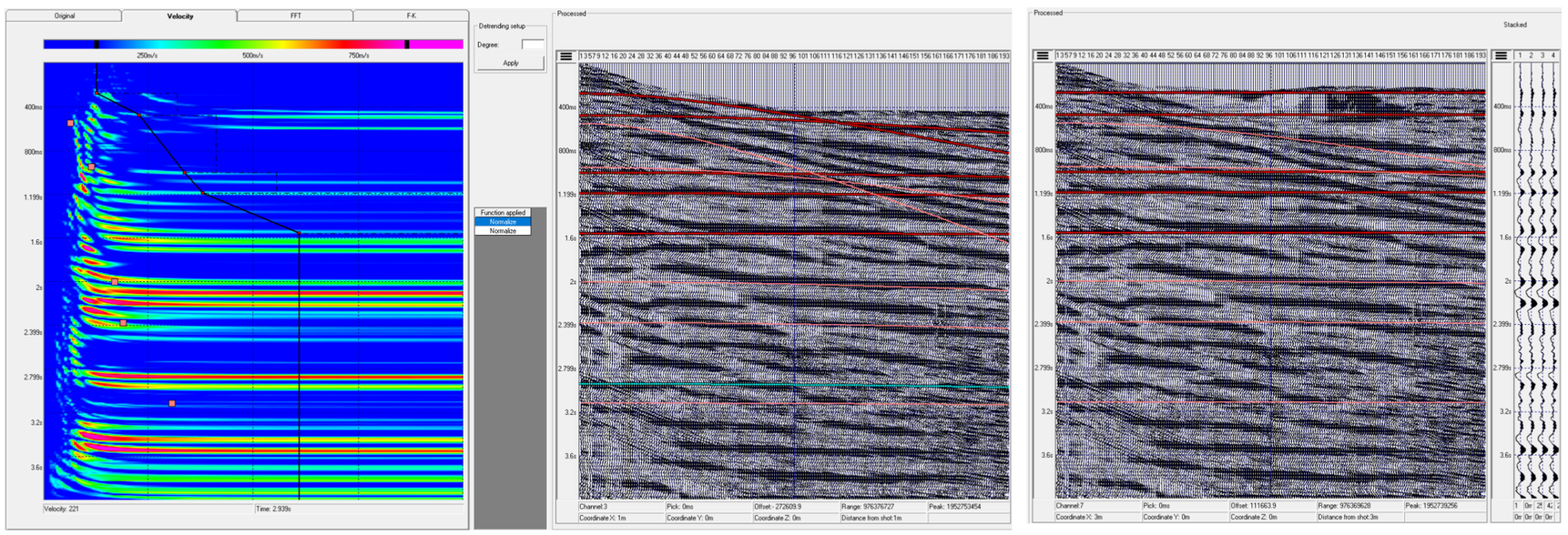
INHALT Beilage

MARW + MASW + HVSR 1D Model D1









GEOPROFILE BAUEN AUF WISSEN	DATUM: OKT - 2025	GEZEICHNET VON: ANDREA PROSPERI	GENEHMIGT VON: HENDRIK JAN TUENTER	KUNDE: **GEOLOGIK AG**
	SKALA: SIEHE ZEICHNUNG	PROJEKTNUMMER: 60-3216	REVISIONSNUMMER: 01	TITEL: **RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT** MARW+MASW METHODE *FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*
				BEILAGE: D1

BEILAGE E

INTERPRETATION

INHALT Beilage

Eräuterungen zur Interpretation	E1 – E2
1D Modellen Interpretation	E3
3D Modell	E4

ERÄUTERUNGEN ZUR INTERPRETATION

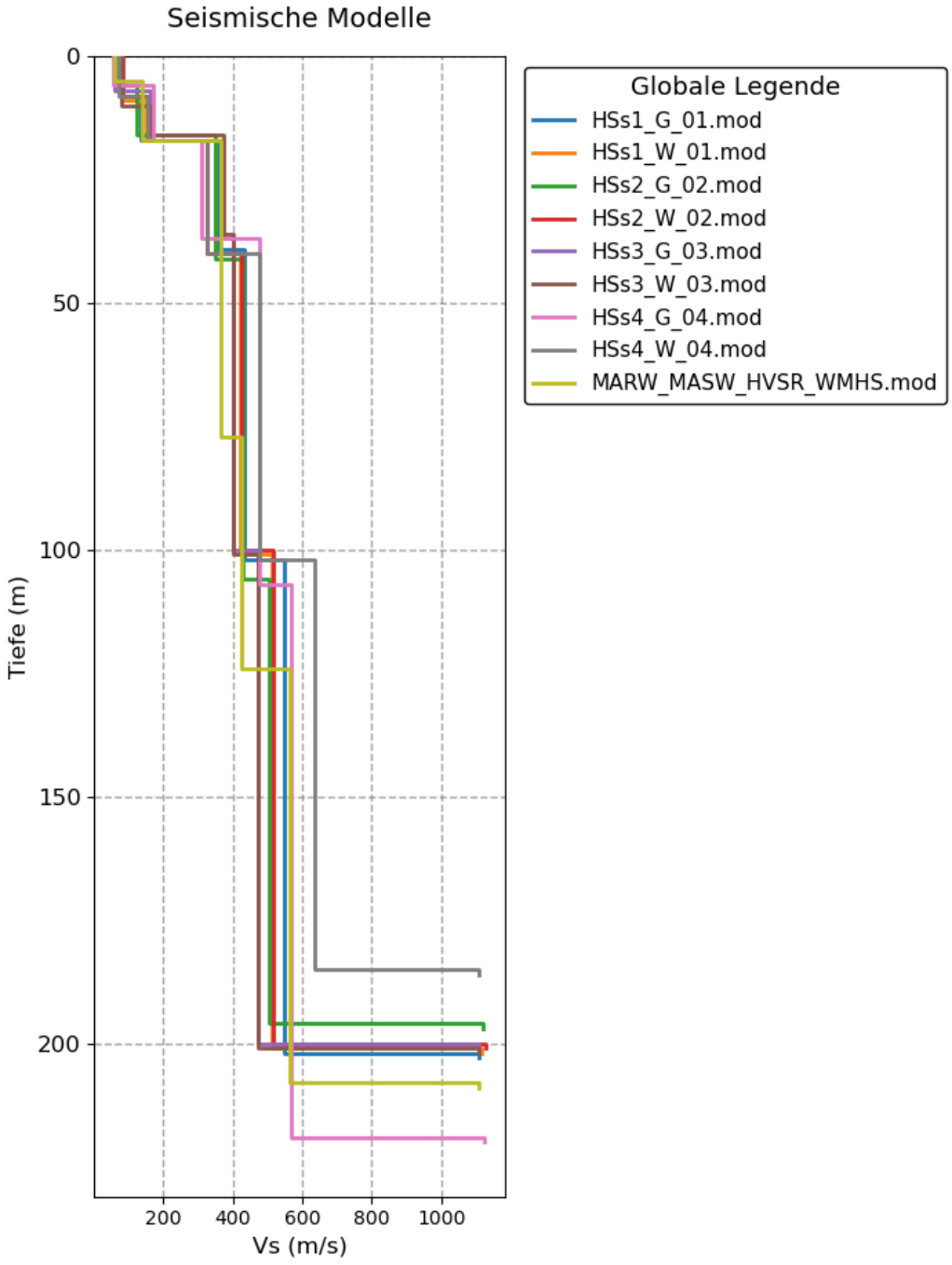
Die kombinierten Methoden HS+HVSR und MARW+MASW+HVSR zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den CPTu-Daten. Die bibliographischen Informationen [1] bezüglich der Mächtigkeiten der unverfestigten Ablagerungen werden bestätigt. Die HVSR-Kurven zeigen eine klare Frequenz, die mit der ersten bedeutenden oberflächennahen Geschwindigkeitsänderung korreliert. Bei sorgfältiger Analyse zeigen einige HVSR-Kurven einen zweiten, niederfrequenteren Peak, der mit dem vom MARW erkannten tiefen Übergang in Verbindung gebracht werden kann (die HVSR-Messungen an Position 04). Bei den anderen HVSR-Kurven ist ein Verlauf im Frequenzbereich des synthetischen Peaks zu erkennen.

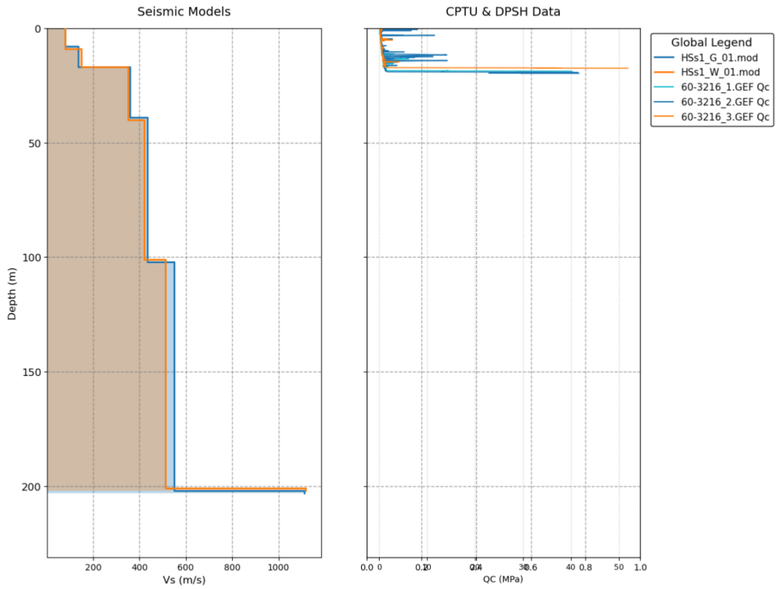
Die Geophysikalischen Modelle der Scherwellengeschwindikeit lassen sich wie folgt schematisieren:

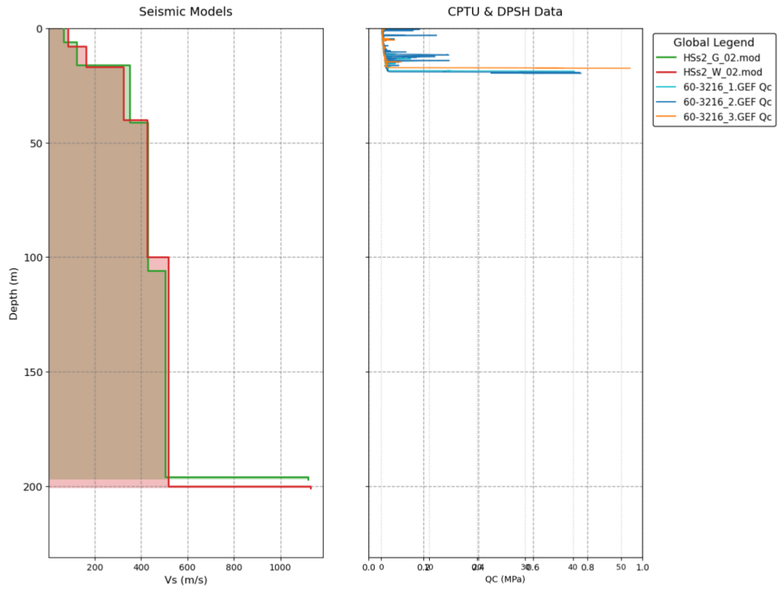
1) Eine oberflächennahe Schicht, charakterisiert durch Geschwindigkeiten zwischen 50 und 80 m/s mit einer Tiefe, die zwischen 5 und 10 m variiert.
2) Eine zweite Schicht, charakterisiert durch Geschwindigkeiten zwischen 120 und 170 m/s und einer Tiefe zwischen 16 und 17 m.
3) Die dritte Schicht weist Geschwindigkeiten zwischen 312 und 373 m/s und eine Tiefe zwischen 36 und 41 m auf; nur die Reflexionsmethode hat diesen Übergang tiefer bei etwa 60 m positioniert.
4) Eine vierte Schicht mit Geschwindigkeiten zwischen 400 und 480 m/s und einer Tiefe von etwa 100 – 107 m. Auch in diesem Fall zeigt die 1D-Reflexionsseismik eine grössere Variabilität und setzt den Übergang bei etwa 124 m Tiefe an.
5) Die fünfte Schicht weist Geschwindigkeiten zwischen 475 und 639 m/s und eine Tiefe zwischen 184 und 218 m auf.
6) Die letzte Schicht, die der geophysikalischen Felsgrenze zugeordnet wird, weist Geschwindigkeiten über 1110 m/s auf.

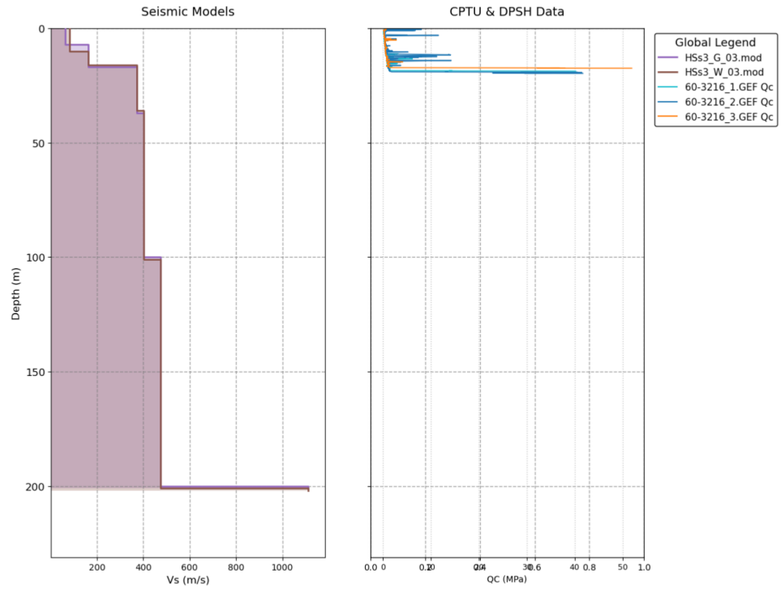
Model	Vs30 (m/s)
HSs1_G_01	147.9
HSs1_W_01	147.8
HSs1_G_02	141.4
HSs1_W_02	159.4
HSs1_G_03	143.5
HSs1_W_03	152.8
HSs1_G_04	140.5
HSs1_W_04	143.2
MARW_MASW_HVSR	146.6

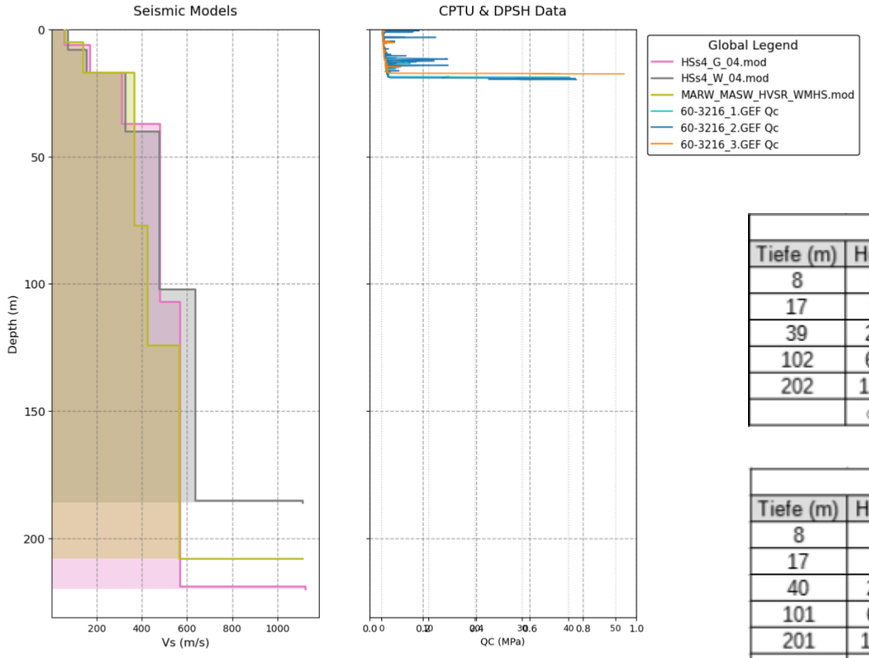
[1] Schweizerische Eidgenossenschaft. https://map.geo.admin.ch/


Seismische Modelle
Tiefe (m)
0
50
100
150
200
200
400
600
800
1000
Vs (m/s)
Globale Legende
HSs1_G_01.mod
HSs1_W_01.mod
HSs2_G_02.mod
HSs2_W_02.mod
HSs3_G_03.mod
HSs3_W_03.mod
HSs4_G_04.mod
HSs4_W_04.mod
MARW_MASW_HVSR_WMHS.mod









HS_G_01			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
8	8	80	Verlandungssedimente
17	9	135	überschwemmungssedimente
39	22	360	Melchaa-Schotter
102	63	435	Melchaa-Schotter
202	100	550	Flysch
	∞	1110	Fels

HS_G_02			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
6	6	66	Verlandungssedimente
16	10	123	überschwemmungssedimente
41	25	350	Melchaa-Schotter
106	65	428	Melchaa-Schotter
196	90	504	Flysch
	∞	1120	Fels

HS_G_03			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
7	7	62	Verlandungssedimente
17	10	163	überschwemmungssedimente
37	20	373	Melchaa-Schotter
100	63	403	Melchaa-Schotter
200	100	475	Flysch
	∞	1110	Fels

HS_W_01			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
8	8	80	Verlandungssedimente
17	9	150	überschwemmungssedimente
40	23	350	Melchaa-Schotter
101	61	422	Melchaa-Schotter
201	100	513	Flysch
	∞	1117	Fels

HS_W_02			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
8	8	86	Verlandungssedimente
17	9	163	überschwemmungssedimente
40	23	325	Melchaa-Schotter
100	60	426	Melchaa-Schotter
200	100	518	Flysch
	∞	1130	Fels

HS_W_03			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
10	10	82	Verlandungssedimente
16	6	163	überschwemmungssedimente
36	20	373	Melchaa-Schotter
101	65	403	Melchaa-Schotter
201	100	475	Flysch
	∞	1110	Fels

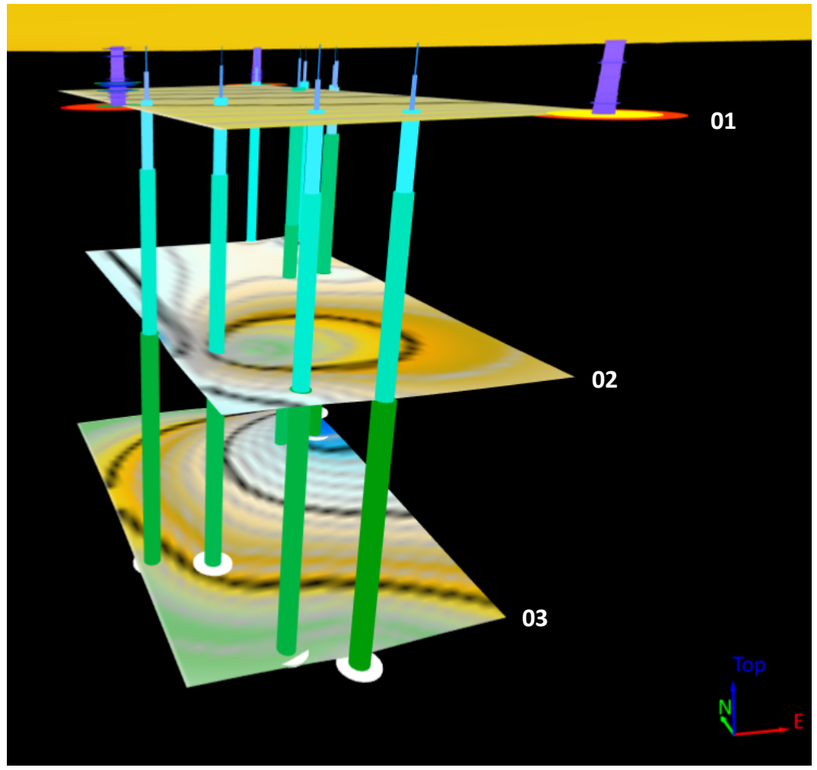
HS_W_04			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
8	8	72	Verlandungssedimente
17	9	154	überschwemmungssedimente
40	23	325	Melchaa-Schotter
102	62	476	Melchaa-Schotter
185	83	635	Flysch
	∞	1110	Fels

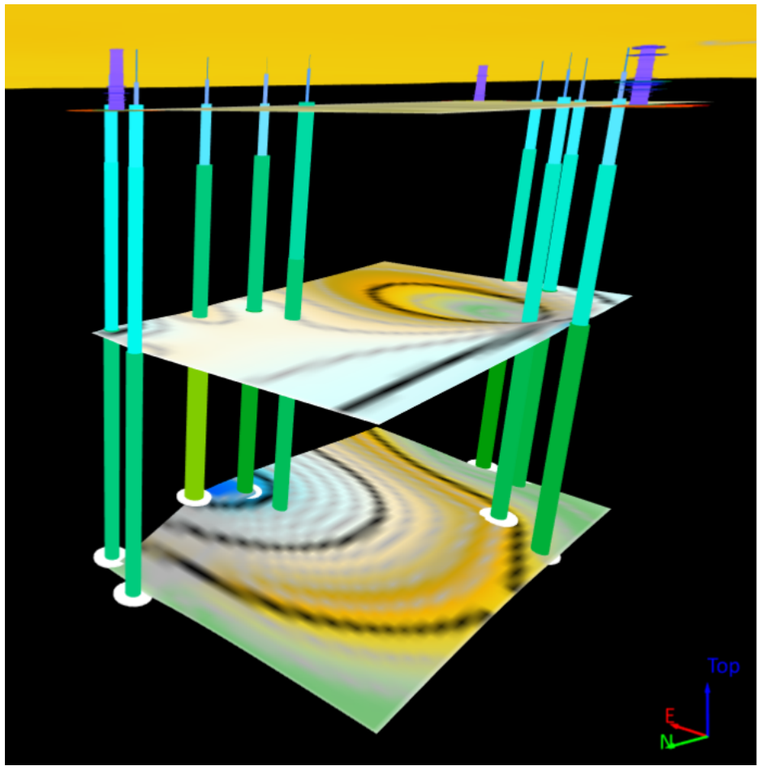
HS_G_04			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
6	6	56	Verlandungssedimente
17	11	170	überschwemmungssedimente
37	20	312	Melchaa-Schotter
107	70	479	Melchaa-Schotter
219	112	567	Flysch
	∞	1123	Fels

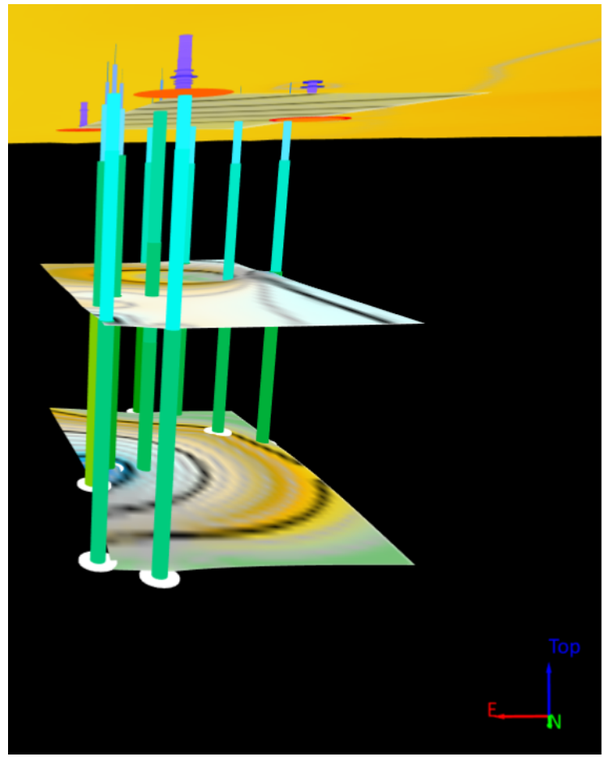
MARW_MASW_HVSR			
Tiefe (m)	H(m)	Vs(m/s)	Lithologie
5	5	60	Verlandungssedimente
17	12	140	überschwemmungssedimente
77	60	365	Melchaa-Schotter
124	47	425	Melchaa-Schotter
208	84	564	Flysch
	∞	1110	Fels

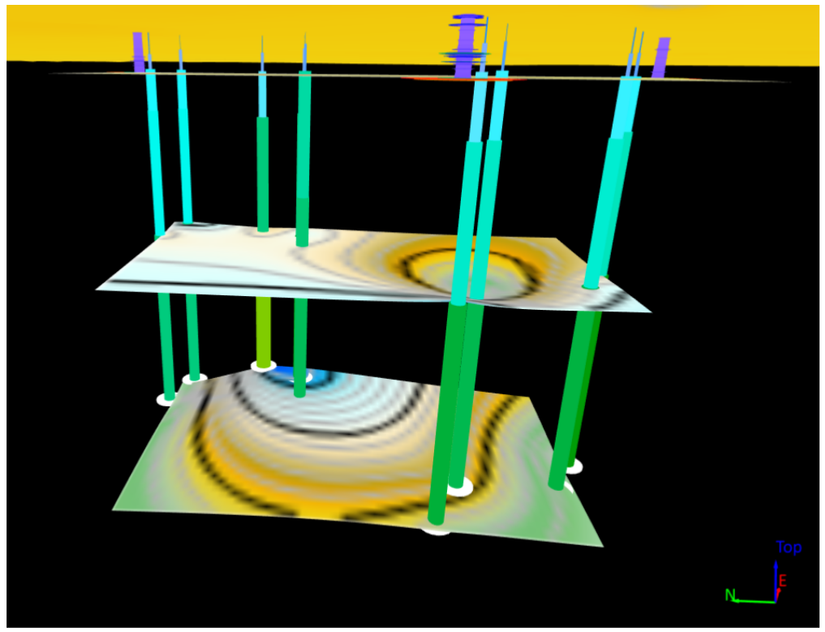
GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

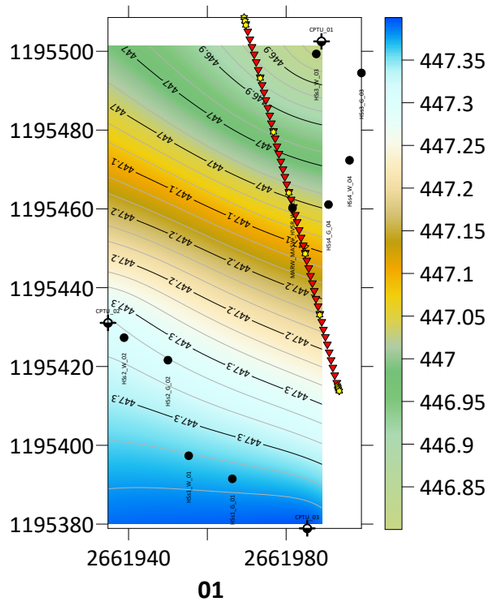
DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL	BEILAGE
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	GEOLOGIK AG	RÄUMLICHE VERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEIT HS + HVSR / MARW + MASW + HVSR METHODE *FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*	E3
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER			
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01			



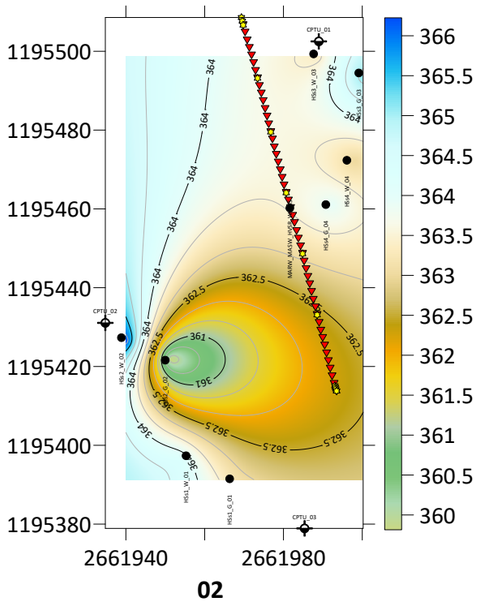




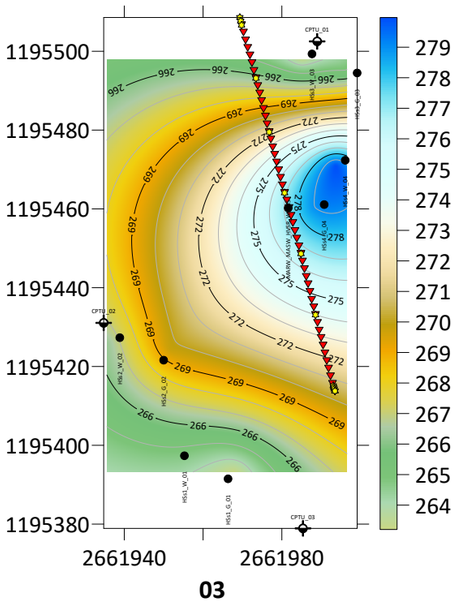




01



02



03

GEOPROFILE
BAUEN AUF WISSEN

DATUM	GEZEICHNET VON	GENEHMIGT VON	KUNDE	TITEL	
OKT - 2025	ANDREA PROSPERI	HENDRIK JAN TUENTER	**GEOLOGIK AG**	**GEOLOGISCHED 3D-MODELL** GEOPHYSIKALISCHE MODELLE + CPTU *FLUGPLATZ KÄGISWIL BRÜNIGSTRASSE 77 6060 SARNEN*	
SKALA	PROJEKTNUMMER	REVISIONSNUMMER			BEILAGE
SIEHE ZEICHNUNG	60-3216	01			E4

ANHÄNGE

ALLGEMEINE HINTERGRUNDINFORMATION

INHALT

Anhang 1 : Seismiche Messungen
Anhang 2 : HS (HoliSurface)
Anhang 3 : HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)
Anhang 4 : MARW (Multichannel Analysis of Reflected Waves)
Anhang 5 : MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)
Anhang 6 : Gerätespezifikationen

ALLGEMEINES

Die Seismik (auch Geoseismik; von altgriechisch σεισμός seismós „[Erd-]Erschütterung, Erdbeben“) ist ein Teilgebiet der Angewandten Geophysik, das Methoden zur Erforschung und Abbildung des Erdreiches auf der Basis von seismischen Wellen umfasst. Dazu wird die Änderung der Amplitude von Bewegungen im Erdreich aufgezeichnet, welche durch Wellen hervorgerufen werden. Diese Bewegungen können sowohl natürlich oder von Menschen hervorgerufen, spezifisch für eine Messkampagne erzeugt werden oder ständig im Hintergrund vorhanden sein. Die Änderung der Amplitude der Bewegungen werden durch eines oder mehrere Geophone gemessen. In Abhängigkeit der Zeit entsteht für jedes Messkanal somit eine Aufzeichnung, welche die Amplitude als Funktion der Zeit darstellt und oft als «Trace» bezeichnet wird. Eine Serie von ein oder mehreren hinter einander gesetzten Traces wird «Seismogramm» genannt.

Die seismische Wissenschaft lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Die Seismologie, die sich mit der Untersuchung seismischer Ereignisse wie Erdbeben befasst, und die Explorationsseismik, die darauf abzielt, Oberflächen des Bodens/Gesteins für verschiedene Zwecke zu charakterisieren (Erkundung von Ressourcen, Erkundung für Bauzwecke usw.). Letztere bedient sich zahlreicher Techniken, die in zwei grosse Gruppen unterteilt werden können:

- aktive Seismik (mit aktiver Anregung des Untergrundes, z. B. einen Hammerschlag)
- passive Seismik (ohne aktive Anregung; Verwendung von natürlichen und anthropogenen Hintergrundgeräuschen)

Grundprinzip des Verfahrens ist, dass die seismischen Wellen, während sie die Erdschichten durchlaufen, an Grenzflächen zwischen verschiedenen Gesteinen gebrochen und reflektiert und anschliessend durch Aufnehmer (z. B. Geophone, Hydrophone) aufgezeichnet werden. Durch die Analyse von spezifischen Eigenschaften dieser Wellen, wie z. B. die Laufzeit, der Wellenform, die hervorgerufenen Reflexionen oder aber der Frequenzinhalt ergeben sich Rückschlüsse auf die geometrische Struktur des Untergrundes sowie deren Deformationseigenschaften der vorhandenen Schichten. Je nach Anwendungsgebiet kann zwischen der Landseismik, die am Festland eingesetzt wird, und der Seeseismik, welche auf Wasseroberflächen Anwendung findet, unterschieden werden.

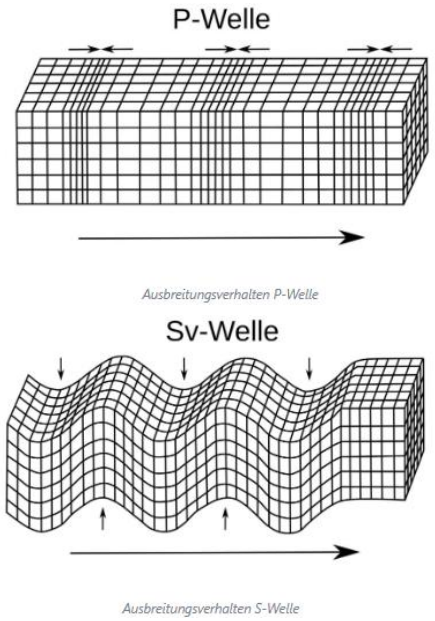
SEISMISCHE WELLEN

In der Explorationsseismik sind seismische Wellen von grundlegender Bedeutung für die Erkundung des Untergrunds. Diese Wellen, die künstlich durch kontrollierte Quellen wie Fausthammer oder Sprengstoffe erzeugt werden, breiten sich durch das Erdmaterial aus und werden von Sensoren an der Oberfläche aufgezeichnet. Es können die folgenden Arten von Wellen unterschieden werden:

Copyright Geoprofile GmbH

Raumwellen:

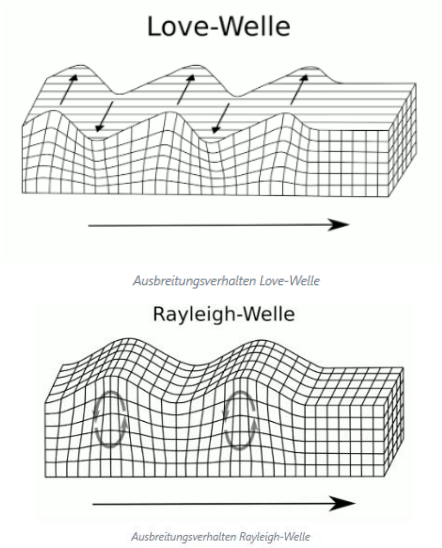
- *P-Welle* (primär): Kompressionswellen, welche sich in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen ausbreiten. Diese Wellen breiten sich am Schnellsten aus.
- *S-Welle* (sekundär): Scherwellen, welche sich nur in Festkörpern ausbreiten und langsamer sind als P-Wellen. Die Schubbewegung der einzelnen Teilchen steht immer lotrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen und kann sowohl horizontal (s_h) als auch vertikal (s_v) sein. Scherwellen spielen bei der Erkundung von Lockergesteinen eine wichtige Rolle, da die Fortpflanzung der Welle über einzelne Kornkontakte stattfindet und demnach nicht von der Lage des Grundwasserspiegels abhängt.



Figur 1. Schematische Darstellung von P—und S-Wellen

Oberflächenwellen:

- *Rayleigh-Welle:* Wellen, die eine rückläufige elliptische Bewegung von Teilchen verursachen und vertikale und horizontale Komponenten kombinieren. Sie umfasst im Wesentlichen die kombinierte Ausbreitung von P- und S-Wellen entlang der Oberfläche.
- *Love-Welle:* Wellen, die eine horizontale Bewegung der Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verursachen. Diese Wellen entstehen im Wesentlichen durch die Ausbreitung von S_h-Wellen entlang der Oberfläche.



Figur 2. Schematische Darstellung von Rayleigh-- und Love-Wellen

BEZIEHUNG ZU ELASTISCHEN PARAMETERN

Seismische Wellen erhalten Informationen über die (elastischen) Deformationseigenschaften des Untergrundes. Durch die Messung der Geschwindigkeit von P- und S-Wellen sind somit Aussagen zum Deformationsverhalten des Untergrundes möglich. Die folgenden Gleichungen beschreiben die Beziehung zwischen den elastischen Deformationsmodulen, dem Volumengewicht und den seismischen Geschwindigkeiten V_s und V_p:

Copyright Geoprofile GmbH

Schubmodul G	$G = \rho \cdot V_s^{\,2}$	[1]
Elastizitätsmodul E	$E = \rho \cdot V_s^{\,2} \cdot \left(\frac{3 \cdot V_p^{\,2} - 4 \cdot V_s^{\,2}}{V_p^{\,2} - V_s^{\,2}}\right)$	[2]
Kompressionsmodul K	$K = \rho \cdot \left(V_p^{\,2} - \frac{4}{3} \cdot V_s^{\,2}\right)$	[3]
Zusammendrückungsmodul	$M = \rho \cdot V_p^{\,2}$	[4]
Querdehnungszahl (Poisson-Zahl)	$\nu = \frac{V_p^{\,2} - 2 \cdot V_s^{\,2}}{2 \cdot (V_p^{\,2} - V_s^{\,2})}$	[5]

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass nur die Scherwellengeschwindigkeit unabhängig vom Grundwasserspiegel ist und somit Aufschluss über die drainierten Eigenschaften gibt.

ERFASSUNG UND AUFZEICHNUNG VON AKTIVEN SEISMISCHEN DATEN

Bei der aktiven Seismik werden die an der Quelle erzeugten Wellen mit Geophonen aufgezeichnet. Je nach den zu analysierenden Wellen und den für die Analyse zu verwendenden Techniken müssen die richtigen Erfassungsparameter gewählt werden, welche auch von der erwarteten Geologie abhängen.

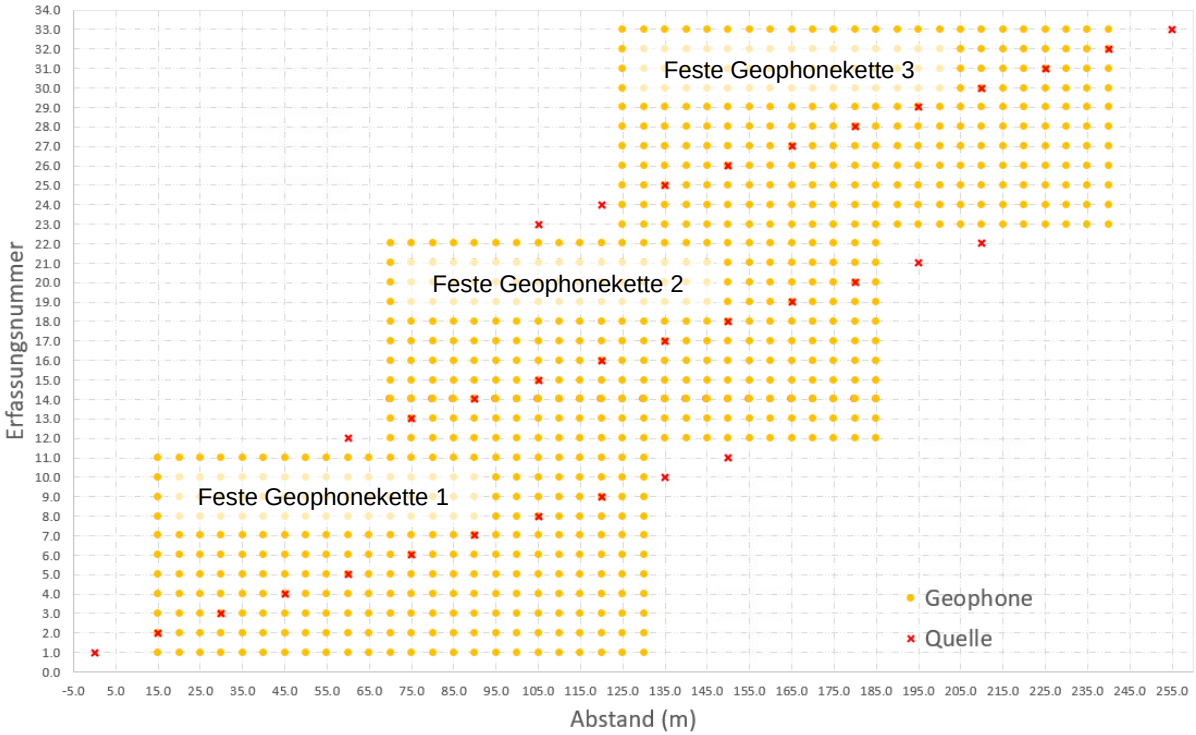
Eine seismische Erfassung umfasst folgende Schritte:

- Auswahl der Messungsgeometrie
- Auswahl der Erfassungsparameter
- Datenerfassung und Qualitätskontrolle

Auswahl der Messungsgeometrie: Die seismische Liniengeometrie ist einer der wichtigsten Aspekte für eine qualitativ hochwertige Akquisition. Je nach verwendeter Technik wirkt sie sich auf verschiedene Aspekte aus, vor allem auf die erreichbare Tiefe, die Auflösung der Erfassung und die 2D-Schnittverlängerung. Die zu berücksichtigenden Parameter sind:

- *Geometrie der Geophone*: Ein Abstand zwischen 3 und 5 m ist zwingend erforderlich, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Auflösung (lateral und vertikal) und erreichbarer Tiefe zu erzielen.
- *Geometrie der Schusspunkte*: Eine Mindestanzahl von 7-10 Schüssen für jede seismische Linie ist für eine gute Auflösung unerlässlich, wobei ein regelmässiger Abstand in der Linie und eine hervorgehobene laterale Variation zu beachten sind.
- *Topographie*: Es ist wichtig, starke topografische Schwankungen in der seismischen Linie sowie starke Neigungen zu vermeiden. Diese Informationen sind für die Topografiekorrektur unerlässlich, um Artefakte zu vermeiden. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, die GPS-RTK aller Schusspunkte und Geophone zu haben.

Copyright Geoprofile GmbH



Figur 3. Schematischen «Roll-Along»-Technik

- *Erfassungstechniken*: Wenn grosse Entfernungen überbrückt werden müssen, kann die «Roll-along»-Technik (William Harry - 1962), eingesetzt werden. Bei dieser Technik wird die seismische Linie entlang einer Richtung bewegt, was zu umfangreicheren lateralen Ergebnissen führt. Um die Datenqualität zu erhöhen, wird der Stapelung-Erfassungsprozess («stacking») an jedem Schusspunkte durchgeführt, wobei mindestens 3 Aktivierungen vorgenommen werden.

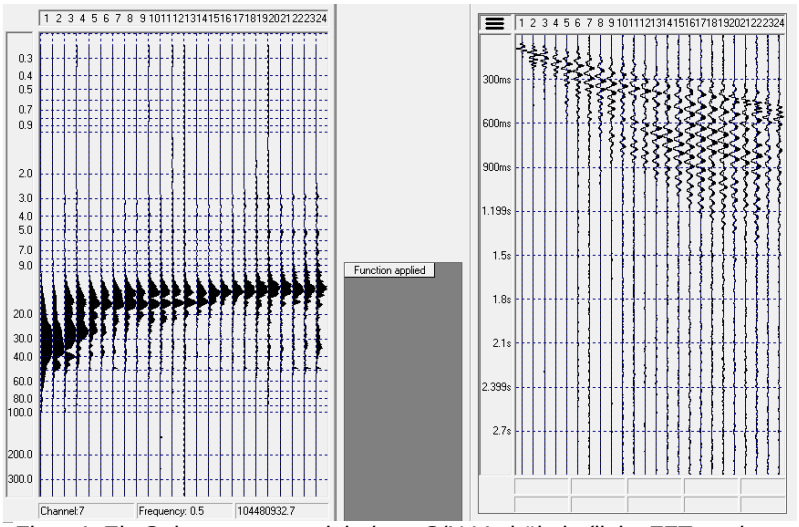
Erfassungsparameter: Die SPS-Parameter (Abtastung pro Sekunde) und die Aufzeichnungsdauer beeinflussen direkt die Qualität der aufgezeichneten Daten. Je nach den aufzuzeichnenden Wellen, dem geologischen Kontext und der Geometrie müssen diese Parameter passend gewählt werden. Im Allgemeinen ist eine Aufzeichnungsdauer zwischen 2 und 3s und eine SPS zwischen 3000 und 5000 ausreichend (Nyquist-Shannon-Abtasttheorem), um alle erzeugten Wellen aufzuzeichnen (Raum- und Oberflächenwellen).

Datenerfassung und Qualitätskontrolle: Während der Erfassungsphase wird die Qualität der einzelnen aufgezeichneten Daten überprüft; wird eine Mindestqualität nicht erreicht, wird die Anzahl der Schläge erhöht. Um die Mindestqualität zu definieren, muss es möglich sein, die Erstankunft («First-Break») im Seismogramm zu identifizieren und die Oberflächenwelle vollständig aufzuzeichnen.
Darüber hinaus wird der spektrale Inhalt («Fast Fourier Transfrom») jedes Traces überprüft und das Dispersionsspektrum angezeigt.

Copyright Geoprofile GmbH

Der Rauschtest ist ein Test, der vor der Datenerfassung durchgeführt wird. Er besteht darin, einen Schuss aufzuzeichnen und in den Daten einige Aspekte zu überprüfen:

- Welcher maximale Offset ist unter den spezifischen Erfassungsbedingungen mit einem einzelnen Schuss erreichbar.
- Wie ist das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N-Verhältnis).
- Welcher Frequenzinhalt ist vorhanden.



Figur 4. Ein Seismogramm mit hohem S/N-Verhältnis (links FFT, rechts Seismogramm)

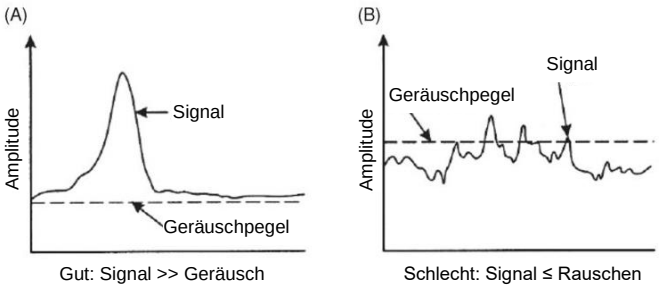
Diese drei Informationen ermöglichen es, den Erfassungsprozess anzupassen und auf die spezifischen Bedingungen abzustimmen, indem die Geometrieparameter der Erfassung, die Anzahl der Stapelungen und die Erfassungsparameter geändert werden.

Die Qualitätskontrolle der Daten im Feld wird während der Erfassung in verschiedenen Schritten durchgeführt:

- *FFT*: Dies umfasst die Auswertung der Ein-Kanal-Schnellen-Fourier-Transformation (Fast-Fourier-Transform), um den Frequenzinhalt jedes Geophons zu überprüfen. Wichtig ist hierbei, das Vorhandensein von niedrigen Frequenzen (<4 Hz) sowie elektromagnetischen Störungen (50-60 Hz) in den Daten zu kontrollieren.
- *Auswertung des S/N-Verhältnisses*: Diese steht in engem Zusammenhang mit dem Frequenzinhalt sowie mit natürlichen und anthropogenen Vibrationen. Allgemein ist das S/N-Verhältnis das Verhältnis zwischen der Signalamplitude und dem Rauschpegel, berechnet durch:

$$SNR = 20 * \log(\frac{Signal}{Noise}) \quad [6]$$

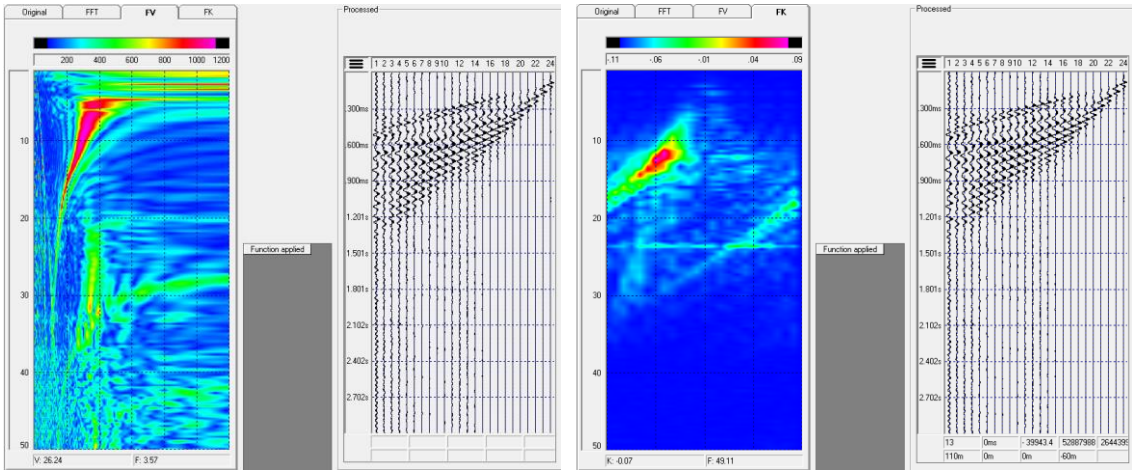
Die Auswertung erfolgt qualitativ, indem der erste Eintreffpunkt der Raumwellen am entferntesten Geophon (aktive Technik mit Raumwellen) oder die Oberflächenwellen am entferntesten Geophon (aktive Technik mit Oberflächenwellen) überprüft wird.



Figur 5. Ein schematisches Diagramm, das ein Signal mit hohem S/R Verhältnis (links) und ein Signal mit niedrigem S/R Verhältnis (rechts) darstellt.

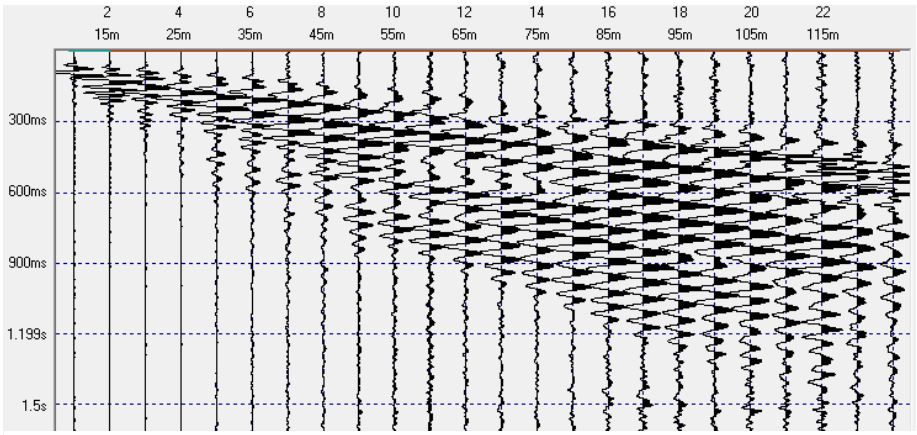
Copyright Geoprofile GmbH

– *Dispersionsgeschwindigkeitsspektrum und Frequenz-Wellenzahl-Spektrum:* Diese Qualitätskontrolle wird durchgeführt, um die Dispersionsphänomene der Oberflächenwellen und die räumlichen Aliasing-Phänomene der seismischen Linie zu überprüfen.



Figur 6. Ein Beispiel für die gleichen Daten: Dispersionsspektrum (links), Frequenz-Wellenzahl-Spektrum (rechts)

– *Überlagerung:* Dabei werden mehrere Aufzeichnungen an derselben Schussposition durchgeführt und zu einem neuen Seismogramm summiert. Aufgrund der zufälligen Natur des Rauschens nähert sich die Rauschsumme bei einer grösseren Anzahl von Seismogrammen gegen null, während das Signal eine höhere Amplitude erreicht und das S/N-Verhältnis verbessert wird.

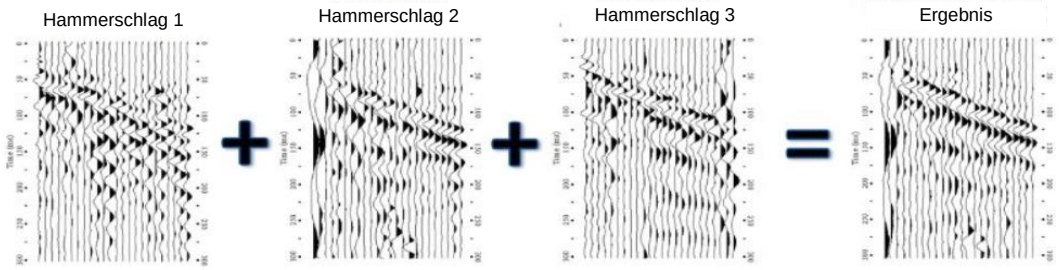


Figur 7. Ein Beispiel für qualitativ hochwertige Daten sowohl für Raumrwellen als auch für Oberflächenwellen.

Copyright Geoprofile GmbH

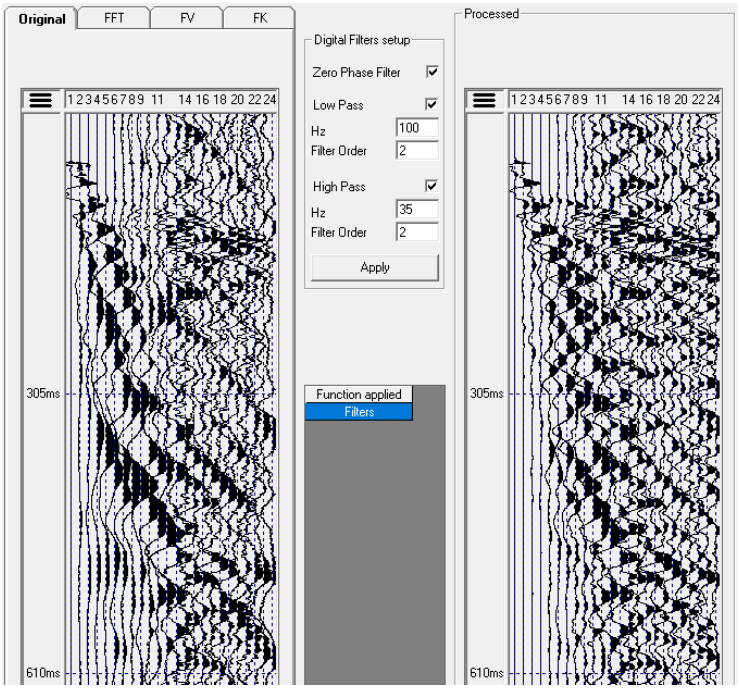
$$SNR_{improvement} = \sqrt{N} \qquad [7]$$

Dabei ist N die Anzahl der Signale im Stapel.



Figur 6. Ein praktisches Beispiel für die Verbesserung des Signals durch Überlagerung

– *Filter:* Die Filter spielen eine wichtige Rolle, da sie es ermöglichen, das Interessensfrequenzband von Signalen zu isolieren, die nicht von Interesse sind oder als Störungen gelten. Es ist sehr wichtig, den Frequenzinhalt auf Basis der Interessen mittels FFT zu überprüfen und den richtigen Filter auszuwählen (Tiefpass, Hochpass, Bandpass, Bandstoppfilter, Kerbfilter).



Figur 7. Ein Beispiel für einen Bandpassfilter (32 Hz, 2. Ordnung – 100 Hz, 2. Ordnung) mit Nullphase

Copyright Geoprofile GmbH

ERFASSUNG UND AUFZEICHNUNG VON PASSIVEN SEISMISCHEN DATEN

In der passiven Seismik werden Wellen registriert, die natürlichen (Wind, Regen, etc.) oder menschlichen Ursprungs sind (Verkehr, Industrie etc.). Um eine gute Aufnahme zu gewährleisten und die Ergebnisse statistisch zu validieren, ist eine ausreichend lange Aufzeichnungszeiten erforderlich. Ausserdem muss die richtige Geometrie bzw. der richtige Standort der Sensoren unter Berücksichtigung der Geologie ausgewählt werden.

Die Datenerfassung umfasst die folgenden Schritte:

- Auswahl der Messungsgeometrie, Positionierung und Kopplung der Geophone
- Auswahl der Erfassungsparameter
- Datenerfassung und Qualitätskontrolle

Auswahl der Messungsgeometrie, Positionierung und Kopplung der Geophone: Die seismische Liniengeometrie ist einer der wichtigsten Aspekte für eine qualitativ hochwertige Akquisition. Je nach verwendeter Technik wirkt sie sich auf verschiedene Aspekte aus, insbesondere auf die erreichbare Tiefe und die Auflösung der Erfassung sowie die 2D-Schnittverlängerung. Die zu berücksichtigenden Parameter sind:

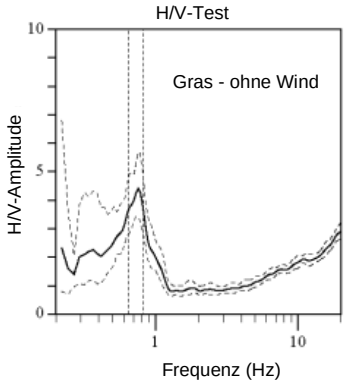
- *Geometrie der Geophone*: Ein Abstand von 3 bis 5 m ist unbedingt erforderlich, um bei Mehrkanalmessungen ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Auflösung (lateral und vertikal) und erreichbarer Tiefe zu erreichen.
- *Auswahl des Messpunktes für das triaxiale Geophon*: für diese Aufnahme ist es von fundamentaler Bedeutung, einen Punkt zu wählen, der auf (kompaktem) Boden und so weit wie möglich von Vibrationsquellen entfernt liegt, den Messpunkt vorzubereiten, Gras zu entfernen und das Geophon vor Stössen und Wind zu schützen. Der Sensor muss gut mit dem Boden verbunden sein und die Neigung des triaxialen Geophons muss innerhalb des Toleranzbereichs des Geräts liegen.
- *Topographie*: Es ist wichtig, starke topografische Schwankungen und Neigungen in der seismischen Linie zu vermeiden. Diese Informationen sind wichtig für die Topografiekorrektur, um Artefakte zu vermeiden oder um topografische Effekte anstelle von HVSR zu messen. Aus diesem Grund ist es unabdingbar, die GPS-RTK aller Kamerapunkte und Geophone zu haben.

Erfassungsparameter: Die SPS-Parameter (Abtastung pro Sekunde) und die Aufzeichnungsdauer beeinflussen direkt die Qualität der aufgezeichneten Daten. Je nach den aufzuzeichnenden Wellen, dem geologischen Kontext und der Geometrie müssen diese Parameter ausgewählt werden. Im Allgemeinen ist eine Aufzeichnungsdauer zwischen 15 und 30min und eine SPS zwischen 200 und 500 ausreichend (Nyquist-Shannon-Abtasttheorem).

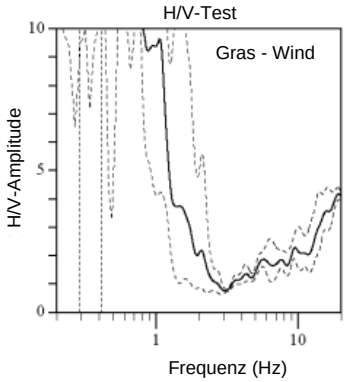
Copyright Geoprofile GmbH

Datenerfassung und Qualitätskontrolle: Während der Erfassungsphase wird die Qualität der Dispersionsspektren oder der HVSR-Kurve (SESAME) überprüft. Falls diese nicht ausreichend ist, wird entweder die Aufnahmezeit verlängert oder das Instrument bewegt und/oder die Aufnahmezeit geändert.

a



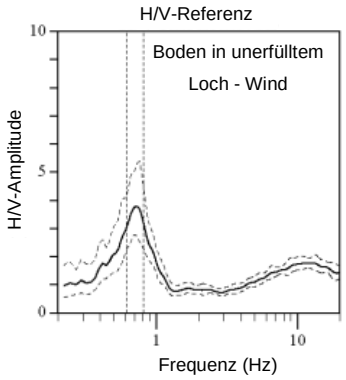
b



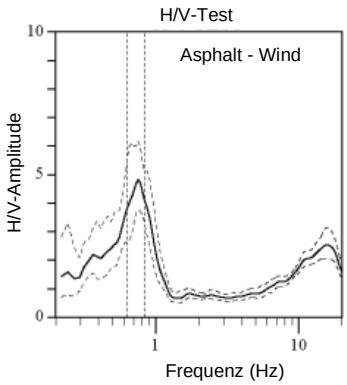
a) Referenz HVSR (Gras - ohne Wind)

b) HVSR (Gras - Wind)

c



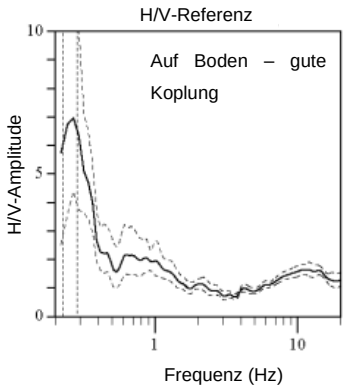
d



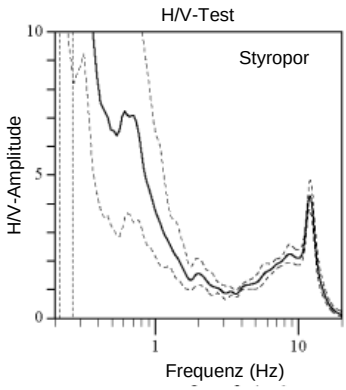
c) HVSR (Boden in unerfülltem Loch - Wind)

d) HVSR (auf Asphalt - Wind)

e



f



e) HVSR (auf Boden - gute Kopplung)

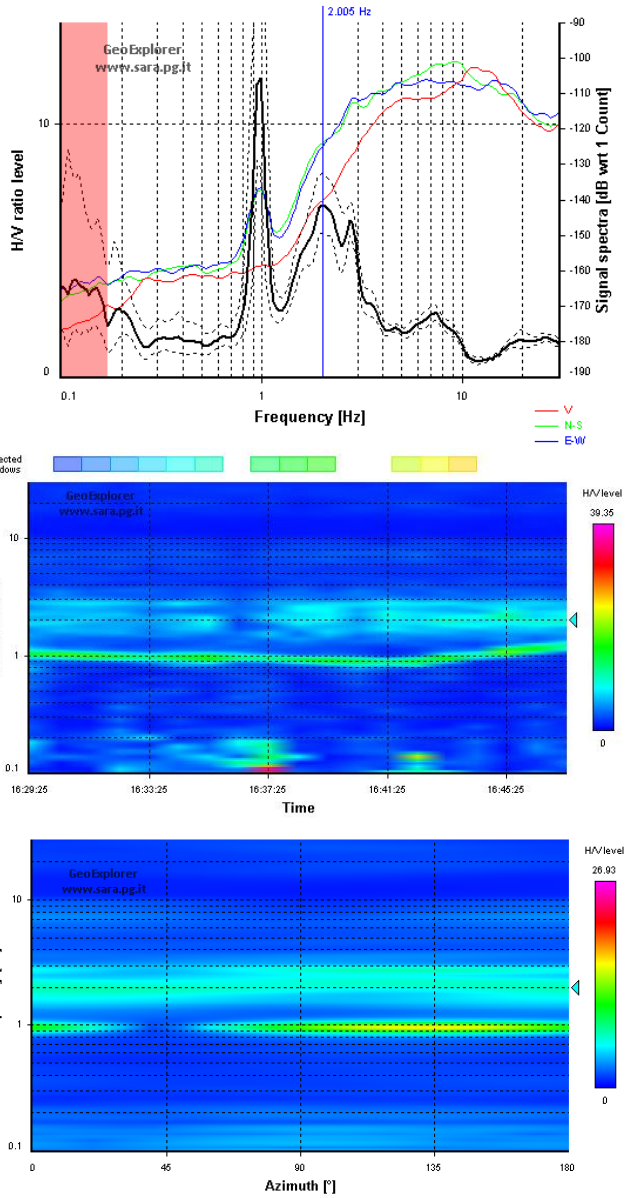
f) HVSR (auf schlecht haftendem Boden - Styropor)

SESAME

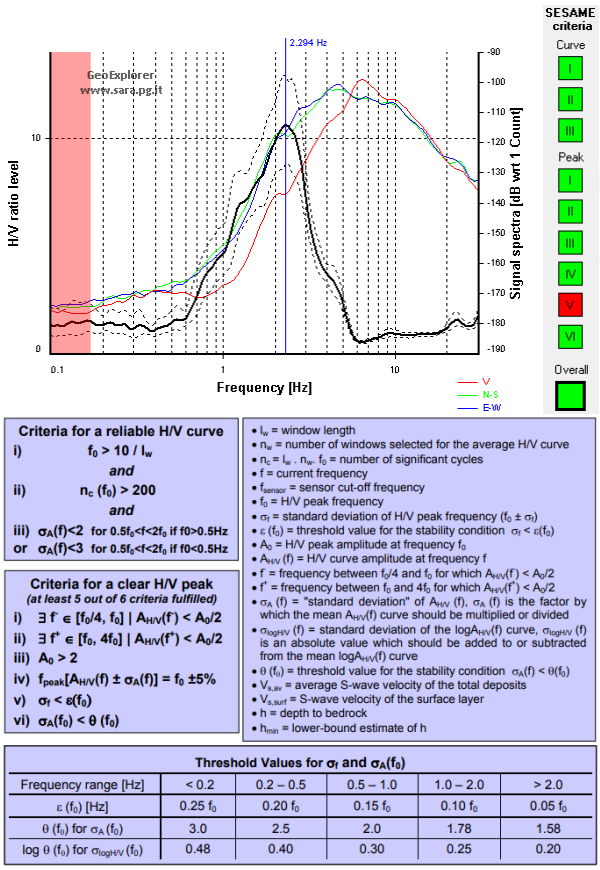
Copyright Geoprofile GmbH

Beispiel für anthropogenes Rauschen in einem HVSR (Figur 10). Es ist eine starke Polarisierung im Azimutal-/Frequenz-Diagramm sowie eine Veränderung der Frequenz im Zeit-/Frequenz-Diagramm erkennbar.

SESAME-Kriterien-Validierung für das ausgewählte f_0 (Figur 11)



Figur 8. Beispiel einer anthropischen Spitze (ca. 0.9 – 1 Hz), HVSR-Kurve (links), zeitliche Kontinuität (rechts), direktionale Analyse (unten)



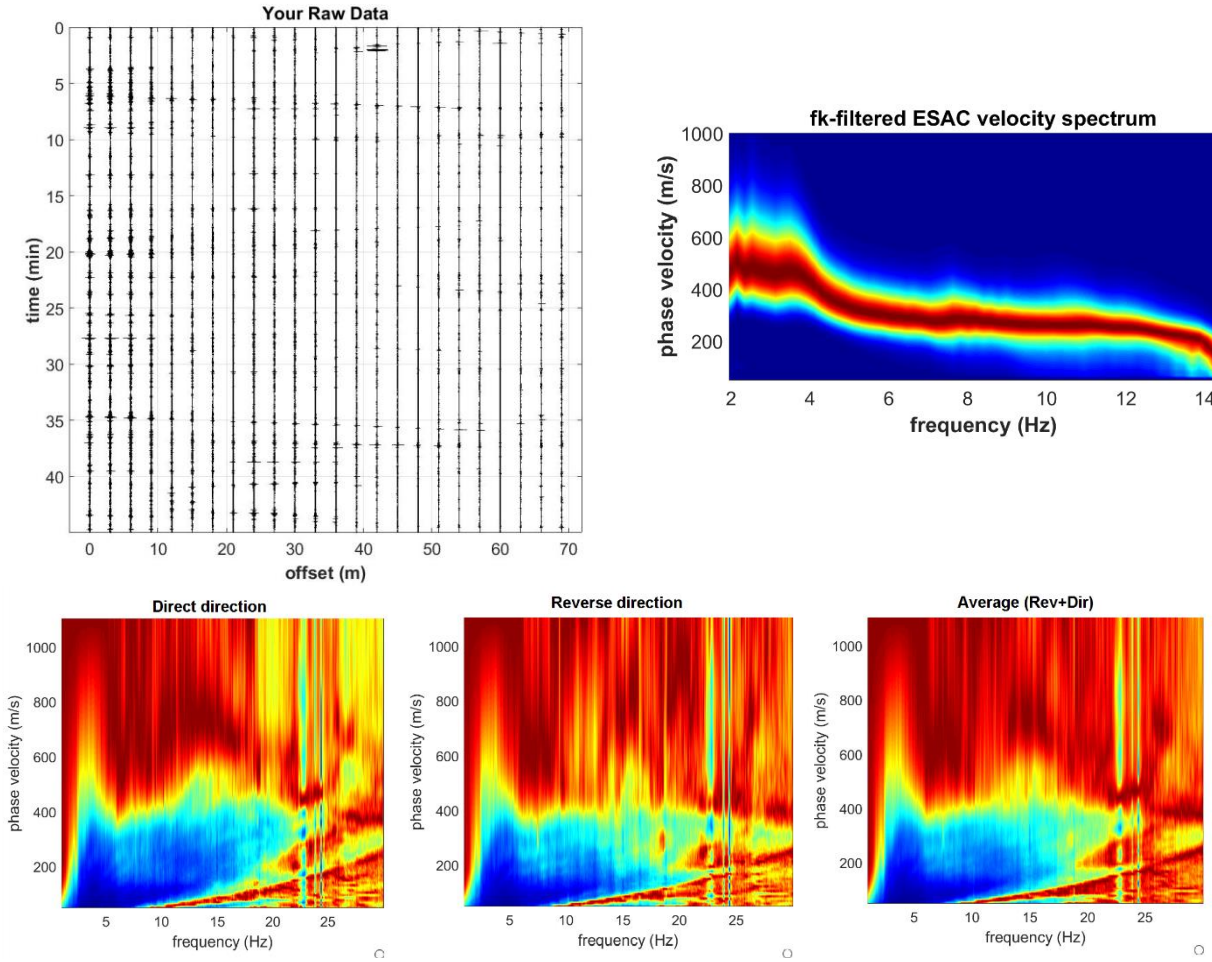
Threshold Values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Frequency 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	0.20 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 $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Figur 9. SESAME-Kriterien

Copyright Geoprofile GmbH

Für eine Akquisition mit einer seismischen Linie (ReMi) oder einer seismischen 2D-Geophonkette (ESAC/MAAM) werden die Dispersionsspektren berechnet und überprüft. Beispiel einer passiven Erfassung mit einer seismischen Linie und Spektralanalyse ESAC und ReMi (Figur 12).



Figur 10. Beispiel für passive Daten und Spektren SPAC (über-rechts) und ReMi (unten)

Copyright Geoprofile GmbH

LITERATURANGABEN

Bard, P.-Y., Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Basili, R., Bertrand, E., Bettig, B., Blarel, F., Bonnefoy-Claudet, S., Bordoni, P., Borges, A., Sørensen, M., Bourjot, L., Cadet, H., Cara, F., Caserta, A., Chatelain, J.-L., & Zacharopoulos, S. (2008). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Bulletin of Earthquake Engineering, 6(1), 1-2.

Budihardjo, A. (1988). Quantifying limitations on signal-to-noise ratio improvement in the stacking process (Master's thesis). Colorado School of Mines, Golden, CO.

Dal Moro, G. (2020). Efficient joint analysis of surface waves and introduction to vibration analysis: Beyond the clichés. Springer. ISBN: 978-3-030-46303-8.

Dal Moro, G. (2020). The magnifying effect of a thin shallow stiff layer on Love waves as revealed by multi-component analysis of surface waves. Scientific Reports, 10, 9071.

Foti S, Hollender S, Garofalo F, Albarello D, Asten M, Bard P-Y, Comina C, Cornou C, Cox B, Di Giulio G, Forbriger T, Hayashi K, Lunedei E, Martin A, Mercerat D, Ohrnberger M, Poggi V, Renalier F, Sicilia D, Socco LV (2017) Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. Bull Earthq Eng 16:2367–2420. https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7

Garofalo F, Foti S, Hollender F, Bard PY, Cornou C, Cox BR, Ohrnberger M, Sicilia D, Asten M, Di Giulio G, Forbriger T, Guillier B, Hayashi K, Martin A, Matsushima S, Mercerat D, Poggi V, Yamanaka H (2016a) InterPACIFIC project: comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods. Soil Dyn Earthq Eng 82:222–240. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.010

Garofalo F, Foti S, Hollender F, Bard PY, Cornou C, Cox BR, Dechamp A, Ohrnberger M, Perron V, Sicilia D, Teague D, Vergniault C (2016b) InterPACIFIC project: comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: inter-comparison between surface-wave and borehole methods. Soil Dyn Earthq Eng 82:241–254. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.009

Hayashi K (2009) Effect of array shape on the spatial auto-correlation analysis of micro-tremor array measurements. Proc Symp Appl Geophys Eng Environ Probl 2009:616–625. https://doi.org/10.4133/1.3176749

Copyright Geoprofile GmbH

Hayashi K, Cakir R, Walsh TJ (2016) Comparison of dispersion curves obtained by active and passive surface wave methods: examples from seismic site characterization surveys for school seismic safety evaluations in Thurston County, Washington. Proc Symp Appl Geophys Eng Environ Probl 2016:475–483. https://doi.org/10.4133/SAGEEP.29-081

Louie JN (2001) Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bull Seismol Soc Am 91(2):347–364. https://doi.org/10.1785/0120000098

Louie JN, Pancha A, Kissane B (2021) Guidelines and pitfalls of refraction microtremor surveys. J Seismol this issue

Mayne, W. (1962), Common reflection point horizontal stacking techniques, Geophysics. 27, 927-938.
Sajid, Muhammad & Ghosh, Deva & Satti, Iftikhar. (2013). Comparative study of new signal processing to improve S/N ratio of seismic data. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 4. 10.1007/s13202-013-0092-8.

SESAME European Research Project (2004): Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation, http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr/ Delivrables/ Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf

Socco, L. V., & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: A tutorial. Near Surface Geophysics, 2(4), 165-185.

Yilmaz, ö. (2021). Land Seismic Case Studies for Near-Surface Modelling and Subsurface Imaging, Society of Exploration Geophysicists

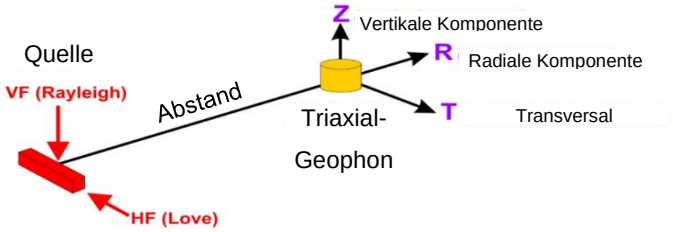
Copyright Geoprofile GmbH

ALLGEMEIN

Die Holistic Analysis of Surface waves (HS) ist eine nicht-invasive seismische Methode zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils von Scherwellen im Untergrund. Die Methode basiert auf der Analyse der Dispersion von Oberflächenwellen, die von einer seismischen Quelle erzeugt und an der Oberfläche mit einem Triaxial-Geophon aufgezeichnet werden. Abhängig von der Art der Oberflächenwelle kann dabei entweder die vertikale (V_{sv}) oder die horizontale (V_{sh}) Komponente der Scherwellengeschwindigkeit bestimmt werden. Rayleigh-Wellen dienen dabei als Grundlage für die Bestimmung der vertikalen Komponente, während Love-Wellen zur Bestimmung der horizontalen Komponente herangezogen werden. Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist das Vorliegen eines Seismogramms, das mit einem Triaxial-Geophon im Rahmen eines aktiven Seismikverfahrens aufgezeichnet wurde. Mit dieser Methode können Geschwindigkeitsinversionen erkannt werden, jedoch ist die laterale Auflösung von Pseudo-2D-Modellen aufgrund der räumlichen Mittelung begrenzt. (Serie von konsekutiven 1D Modellen).

THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Oberflächenwellen sind dispersiv, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit V sind somit frequenzabhängig,

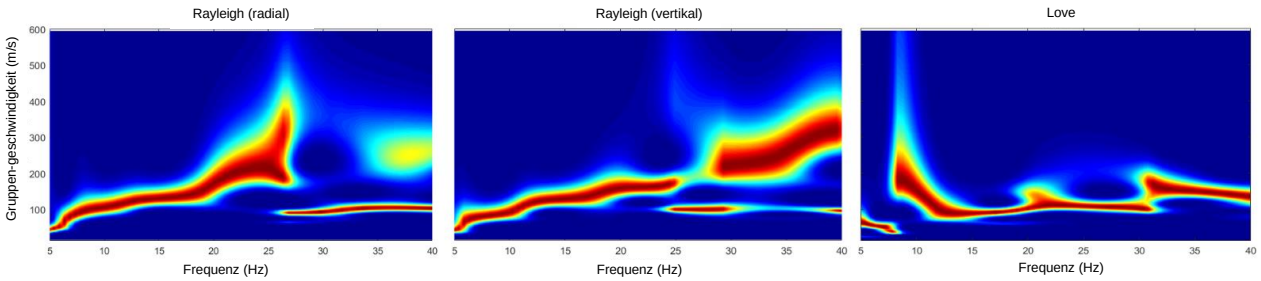


Figur 1. Messanordnung im Feld

$$V = \lambda \cdot f \qquad [1]$$

wobei λ die Wellenlänge und f die Frequenz darstellt. Diese Frequenzabhängigkeit wird durch Dispersionskurven beschrieben, bei welchen die Phasen-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt wird.

Dem gegenüber bildet das Dispersionsspektrum die Energieverteilung der Frequenzen in Abhängigkeit von der Phasengeschwindigkeit ab. Die Phasengeschwindigkeit kann als die Steigung der Oberflächenwellen im Seismogramm interpretiert werden. Die Gruppengeschwindigkeit, die nur über einen einzelnen Kanal erfasst wird, beschreibt die Zeit und somit die Geschwindigkeit, mit der eine bestimmte Frequenz von der



Figur 2. Dispersionsspektren (Rayleigh- und Love-Wellen Gruppengeschwindigkeit)

Quelle zum Empfänger übertragen wird. Abbildung 1 veranschaulicht ein Beispiel eines Dispersionsspektrums.

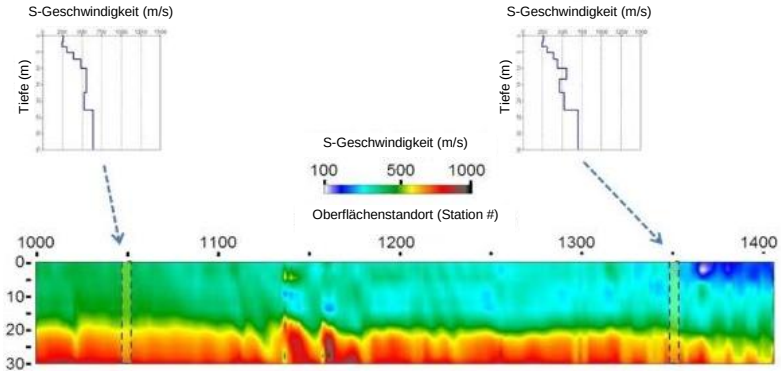
Copyright Geoprofile GmbH

Durch die Analyse der Ausbreitungseigenschaften von Oberflächenwellen, insbesondere der Mächtigkeit der einzelnen Schichten und der jeweils zugehörigen äquivalenten Scherwellengeschwindigkeit, können wertvolle Informationen über den Schichtaufbau und die elastischen Eigenschaften des Bodens gewonnen werden. Das Resultat ist ein 1D-Modell der Scherwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe, das sich auf die Mittelachse zwischen dem jeweiligen Schusspunkt und dem Triaxial-Geophon bezieht.
Demnach stellt das Ergebnis einen Mittelwert von sämtlichen räumlichen Variationen innerhalb dieser Zone dar. Die erreichte Tiefe kann nicht direkt aus den Daten berechnet werden, sondern erst nach der 1D-Modellierung und der Analyse der synthetischen Daten. Im Allgemeinen ist die Untersuchungstiefe eine Funktion der Wellenlänge des aufgezeichneten Signals und beträgt in der Regel etwa die Hälfte der Distanz zwischen dem Triaxial-Geophon und dem Schusspunkt (Offset). Bei der Anwendung der HS-Methode ist es in der Regel sinnvoll, die Messungen mit dem Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) Methode zu kombinieren Dies erlaubt es, die Daten zu aggregieren und eine grössere Aufschlusstiefen zu erreichen. Zudem erlaubt diese Kombination eine robustere Modellbildung.

$$V_{s\,eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{V_{si}}} \qquad [2]$$

Mit dieser Formel, in der d_i die Dicke der Schichten und V_{si} die Scherwellengeschwindigkeit bezeichnet, wird die Äquivalente Scherwellengeschwindigkeit zwischen der Oberfläche und dem Felsen bis zu einer maximalen Tiefe von 30 m berechnet.

Die HS Methode kann an mehreren Punkten im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Durch die Integration dieser Messungen ist es möglich, einen pseudo-2D Schnitt zu erzeugen, welcher Einblicke in die räumliche Variation der Scherwellengeschwindigkeit liefert.



Figur 3. HS Pseudo-2D Schnitt

Copyright Geoprofile GmbH

DATENERFASSUNG UND AUSWERTUNG

Die Anwendung der HS Methode umfasst die folgenden Schritte:

- Datenerfassung und Qualitätskontrolle im Feld
- Datenverarbeitung und -aufbereitung
- Auswertung und Modellbildung

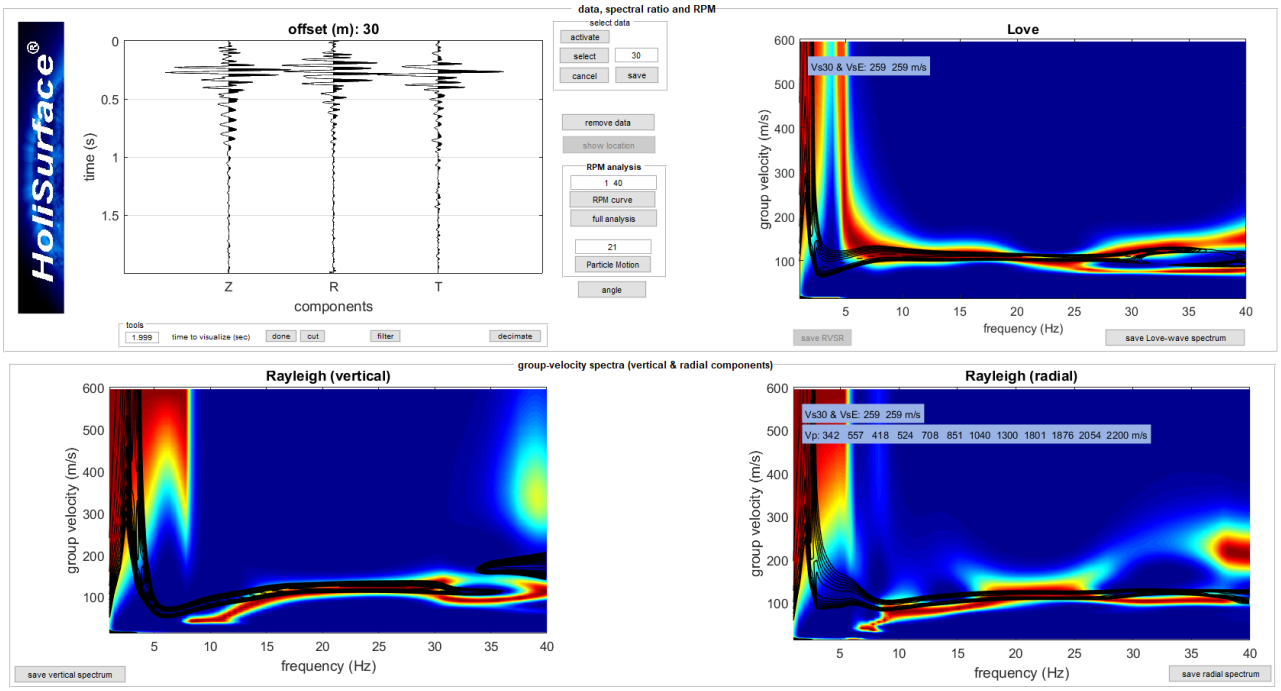
Es gelten die folgenden Bemerkungen und Ergänzungen:

- *Datenerfassung und Qualitätskontrolle im Feld*

- *Datenverarbeitung und -aufbereitung: D*ieser Schritt zielt darauf ab, die Datenqualität zu verbessern, die Daten zu verarbeiten und zu überlagern sowie die tatsächliche Geometrie der seismischen Erfassung zu überprüfen. Er umfasst daher mehrere Maßnahmen und Kontrollen:
  - die Datenüberlagerung zur Erhöhung des Verhältnisses vom Signal zu Geräusch (S/N ratio), insofern nicht bereits im Feld vorgenommen;
  - Kontrolle der Geometrie der Datenakquisition;

- *Auswertung und Modellbildung: Z*urzeit ein Initialmodell der Schwerwellengeschwindigkeit festgelegt («forward modelling»). Aus diesem Modell wird ein Respons berechnet (Dispersionskurve, Dispersionsspektrum oder Seismogramm) und mit den gemessenen Daten abgeglichen. Anschliessend wird das Geschwindigkeitsmodell iterativ so optimiert, bis die synthetisch berechneten Daten mit den Messungen übereinstimmen. Bei diesem Ansatz werden alle aufgezeichneten Komponenten verwendet (vertikale und radiale Komponente der Rayleigh-Wellen sowie die transversale Komponente der Love-Wellen). Alle Komponenten und der HVSR werden gemeinsam modelliert, um den Modellierungsfehler und die Unsicherheit zu verringern.
  1. *Full Velocity Spectrum (FVS)*: Iterativer Abgleich des aus dem Geschwindigkeitsmodells errechneten Dispersionsspektrum mit dem gemessenen Dispersionsspektrum. Die Anwendung dieser Methode hat den entscheidenden Vorteil, dass die Notwendigkeit einer handmässigen Extraktion der Dispersionskurve und die Introduktion der damit verbundenen Subjektivität und Risiken entfallen. Der Modellabgleich basiert auf dem gemessenen Dispersionsspektrum inklusive sämtliche Folgemodi (erste Modus, zweite Modus,… «Overtones»). Zurzeit gibt es nur wenige Computerprogramme, welche eine Implementierung der FVS Methode beinhalten. Von diesen wenigen Programme ist HoliSurface am bekanntesten.

Copyright Geoprofile GmbH



Figur 4. Berechnetes und gemessenes Dispersionsspektrum für den Fundamentalmodus

Bei der Erkennung des Fundamentalmodus besteht die Möglichkeit, dass dieser von höheren Modi («overtones») verschleiert wird. Dies ist insbesondere der Fall, wenn eine Schicht mit einer geringen Scherwellengeschwindigkeit und geringer Mächtigkeit über eine Schicht mit einer signifikant höheren Geschwindigkeit liegt. Andere Faktoren, welche eine Verschleierung des Fundamentalmodus begünstigen, sind eine sehr unregelmässige oder stark geneigte Geländeoberkante. Diese Problematik ist in der Regel weniger vorhanden, wenn Love-Wellen verwendet werden.

Insofern aus anderen Quellen zusätzliche Informationen bzgl. der Scherwellengeschwindigkeit und/oder dem Schichtverlauf vorliegen (z. B. aus anderen geophysikalischen Messungen, Bohrungen oder Drucksondierungen), sollten diese bereits beim Initialmodell berücksichtigt werden, und das resultierende Modell mit den zusätzlichen Informationen integriert werden. Zudem sind solche Informationen für die Erkennung von Multimodi sehr hilfreich.

Copyright Geoprofile GmbH

LITERATURANGABEN

Budihardjo, A. (1988). Quantifying limitations on signal-to-noise ratio improvement in the stacking process (Master's thesis). Colorado School of Mines, Golden, CO.

Dal Moro, G., Coviello, V., & Del, G. (2014). Shear-wave velocity reconstruction via unconventional joint analysis of seismic data: A case study in the light of some theoretical aspects. In Proceedings of the 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (pp. 225-234). Springer.

Dal Moro, G., Moustafa, S., & Alarifi, N. (2018). Improved holistic analysis of Rayleigh waves for single- and multi-offset data: Joint inversion of Rayleigh-wave particle motion and vertical- and radial-component velocity spectra. Pure and Applied Geophysics, 175(1), 69-85.

Dal Moro, G. (2019). Surface wave analysis: Improving the accuracy of the shear-wave velocity profile through the efficient joint acquisition and Full Velocity Spectrum (FVS) analysis of Rayleigh and Love waves. Exploration Geophysics, 50(4), 408–419.

Dal Moro, G. (2020). Efficient joint analysis of surface waves and introduction to vibration analysis: Beyond the clichés. Springer. ISBN: 978-3-030-46303-8.

Dal Moro, G. (2020). The magnifying effect of a thin shallow stiff layer on Love waves as revealed by multi-component analysis of surface waves. Scientific Reports, 10, 9071.

Foti, Sebastiano & Hollender, Fabrice & Garofalo, Flora & Albarello, Dario & Asten, Michael & Bard, Pierre-Yves & Comina, Cesare & Cornou, Cécile & Cox, Brady & Di Giulio, Giuseppe & Forbriger, Thomas & Hayashi, Koichi & Lunedei, Enrico & Martin, Antony & Mercerat, E. & Ohrnberger, Matthias & Poggi, Valerio & Renalier, F. & Sicilia, Deborah & Socco, Laura Valentina. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. Bulletin of Earthquake Engineering. 16. 10.1007/s10518-017-0206-7.

Pan, Y., Gao, L., & Bohlen, T. (2019). High-resolution characterization of near-surface structures by surface-wave inversions: From dispersion curve to full waveform. Surveys in Geophysics, 40(1), 89-118.

Sajid, Muhammad & Ghosh, Deva & Satti, Iftikhar. (2013). Comparative study of new signal processing to improve S/N ratio of seismic data. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 4. 10.1007/s13202-013-0092-8.

Socco, L. V., & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: A tutorial. Near Surface Geophysics, 2(4), 165-185.

Copyright Geoprofile GmbH

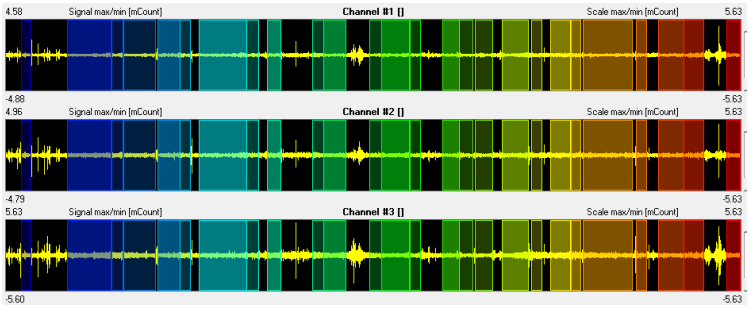
Yilmaz, ö. (2021). Land Seismic Case Studies for Near-Surface Modelling and Subsurface Imaging, Society of Exploration Geophysicists

Copyright Geoprofile GmbH

ALLGEMEIN

Die HVSR-Methode (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), auch bekannt als „Nakamura-Methode“, ist ein Verfahren zur Bestimmung der Grundfrequenz f_0 in Lockergestein. Liegen zusätzliche Informationen bezüglich der Scherwellengeschwindigkeit der oberflächennahen Schichten vor (minimale Tiefe ca. 15 m), kann das Verfahren auch dazu verwendet werden, Informationen zur Scherwellengeschwindigkeit in größeren Tiefen zu gewinnen. Die Methode kann das Vorhandensein einer Inversion der Scherwellengeschwindigkeit erkennen, jedoch ist die vertikale Auflösung begrenzt. Diese beträgt im Nahbereich der Geländeoberkante etwa 5 bis 10 m und nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Die laterale Auflösung von pseudo-2D-Modellen ist aufgrund des sehr großen Messvolumens stark eingeschränkt.

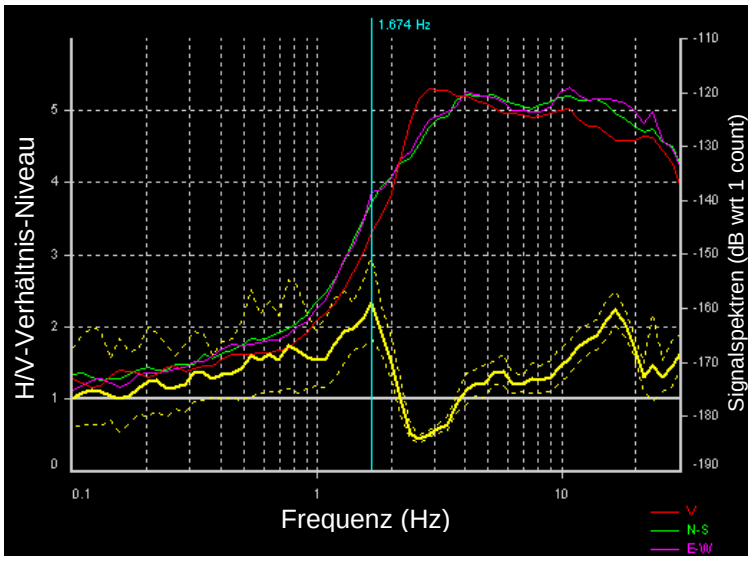
Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist das Vorliegen einer passiven seismischen Aufzeichnung von natürlichen und anthropogenen Hintergrundgeräuschen über einen bestimmten Zeitraum mit einem triaxialen Geophon (Figur 1). Diese Zeitdauer beträgt in der Regel rund 30 Minuten, kann je nach Intensität der Hintergrundgeräusche auch kürzer oder wesentlich länger sein.



Figur 1. Beispiel einer passiven triaxialen Aufzeichnung von Hintergrundgeräuschen im Erdreich

THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Das Verfahren basiert auf der Bestimmung der Energieverteilung von Wellen als Funktion des Frequenzinhalts (Spektralinhalt). Dabei wird die Grundfrequenz f_0 des Standorts durch das Verhältnis zwischen den Mittelwerten der Spektralinhalte der horizontalen und vertikalen Komponenten ermittelt (Figur 2). Die Grundfrequenz wird in der Regel gleichgesetzt mit der tiefsten Frequenz, welche ein Verhältnis grösser als 2 aufweist.



Figur 2. Beispiel einer HVSR Kurve

Copyright Geoprofile GmbH

Qualitativ kann die HVSR-Kurve nach dem Gesetz von Roesset (1970) interpretiert werden:

$$f_0 = \frac{V_s}{4 * Z} \rightarrow Z = \frac{V_s}{4 * f_0} \quad [1]$$

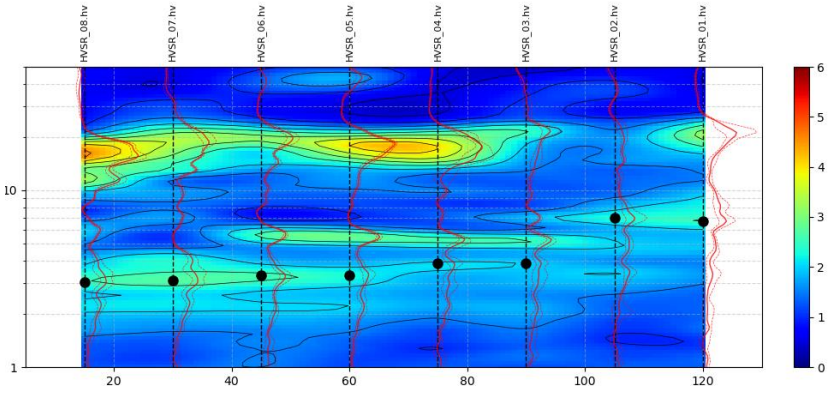
Dabei gilt:

- Z ist die Tiefe [m]
- V_s ist die äquivalente Scherwellengeschwindigkeit [m/s]
- f_0 ist die Grundfrequenz [Hz]

Je höher der Amplitudenwert des Spektralverhältnisses von f_0, desto höher ist der Kontrast der Scherwellengeschwindigkeit. Die höchste Amplitude wird in der Regel als Übergang von Locker- zu Festgestein interpretiert. Wenn die Kurve einen Wert von f_0=1 aufweist, gibt es keinen Kontrast zwischen der horizontalen und vertikalen Scherwellengeschwindigkeit, so dass von einer homogenen seismischen Stratigraphie ausgegangen werden kann (gleiche äquivalente Scherwellengeschwindigkeit innerhalb der Messzone). Ein Amplitudenwert des Spektralverhältnisses kleiner als f_0<1 bedeutet eine Geschwindigkeitsinversion (Zone mit einer höheren Scherwellengeschwindigkeit über einer Zone mit einer geringeren Scherwellengeschwindigkeit).

Es ist möglich, dass das Spektralverhältnis mehrere Spitzen aufweist. Wenn dies der Fall ist, bedeutet dies, dass in mehreren Tiefen relevante Geschwindigkeitskontraste vorliegen. Die Frequenz, wo diese zusätzlichen Spitzen auftreten, werden mit f_1, f_2,… usw. bezeichnet.

Die Aufzeichnung weiterer HVSR-Messungen kann an mehreren Punkten im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Durch die Integration dieser Messungen ist es möglich, einen pseudo-2D Schnitt zu erzeugen, welcher Einblicke in die räumliche Variation der Resonanzfrequenzen und Eigenschaften des Untergrundes liefern kann. Durch die Invertierung des Datensatzes mit weiteren geophysikalischen Informationen ist es möglich, die Tiefe des Hauptgeschwindigkeitskontrastes zu ermitteln.



Figur 3 Beispeil eines HVSR Pseudoprofils

Copyright Geoprofile GmbH

DATENERFASSUNG UND AUSWERTUNG

Die Ausführung von HVSR-Messungen umfasst die folgenden Schritte:

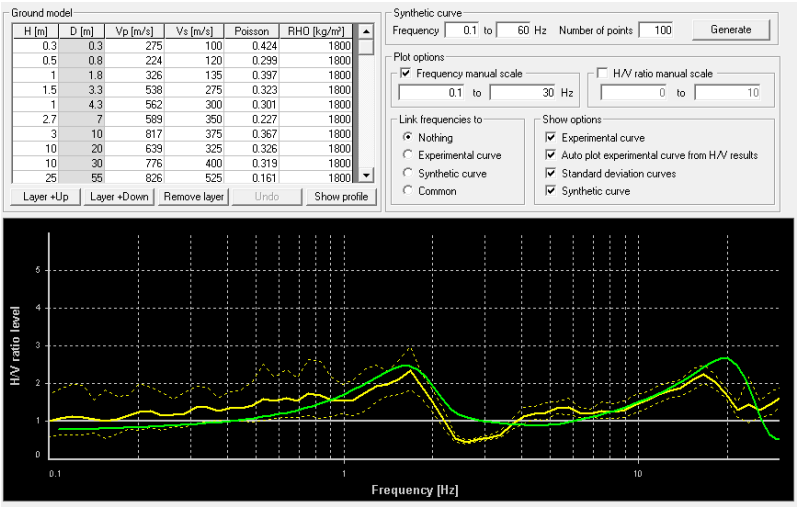
- Datenerfassung
- Spektralanalyse und Bestimmung des H/V Spektralverhältnisses
- Identifizierung der Grundfrequenz f0 und Qualitätsbewertung
- Erweiterte Auswertung und Modellbildung

Spektralanalyse und Bestimmung des H/V Spektralverhältnisses: Für die Spektralanalyse werden mehrere Datenfenster erzeugt, um den Energiegehalt der horizontalen und vertikalen Wellenkomponenten mittels einer Fourier-Transfortmation im gewünschten Frequenzbereich zu berechnen (Figur 1).

Identifizierung von f_0 und Qualitätsbewertung: Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes SESAME (Site EffectS Assessment using AMbient Excitations) wurden Kriterien festgelegt, um die Qualität der Aufzeichnung und Analyse quantifizieren und bewerten zu können. Die Anwendung dieser Kriterien ist fester Bestandteil der Auswertung. Werden die Qualitätskriterien nicht eingehalten, werden die Parameter, welche die Auswertung steuern, nach Möglichkeit optimiert. Dies betrifft insbesondere die Wahl der Datenfenster (Figure 2).

Erweiterte Auswertung und Modellbildung: Insofern aus weiteren Quellen zusätzliche Informationen bzgl. der Scherwellengeschwindigkeit und/oder dem Schichtverlauf vorliegen (z. B. aus anderen geophysikalischen Messungen, Bohrungen oder Drucksondierungen), kann eine erweiterte Auswertung und Modellbildung vorgenommen werden.

Dafür wird der Untergrund mit übereinanderliegenden elastischen Schichten modelliert und in einem iterativen Prozess verfeinert. Es wird eine Lösung angestrebt, bei welcher die Abweichungen zwischen der synthetisch errechneten Kurve und der gemessenen Kurve minimiert wird (Inversion und Vorwärtsmodellierung), sowie auch mit allen weiteren bekannten Informationen bezüglich des Schichtaufbaus übereinstimmt.



Figur 4. Vergleich zwischen dem gemessenen (gelb) und berechneten (grün) Signal (Inversion und Vorwärtsmodellierung)

Copyright Geoprofile GmbH

LITERATURANGABEN

Bard, P.-Y., Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Basili, R., Bertrand, E., Bettig, B., Blarel, F., Bonnefoy-Claudet, S., Bordoni, P., Borges, A., Sørensen, M., Bourjot, L., Cadet, H., Cara, F., Caserta, A., Chatelain, J.-L., & Zacharopoulos, S. (2008). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Bulletin of Earthquake Engineering, 6(1), 1-2.

Dal Moro, G., Coviello, V., & Del, G. (2014). Shear-wave velocity reconstruction via unconventional joint analysis of seismic data: A case study in the light of some theoretical aspects. In Proceedings of the 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (pp. 225-234). Springer.

Dal Moro, G. (2020). Efficient joint analysis of surface waves and introduction to vibration analysis: Beyond the clichés. Springer. ISBN: 978-3-030-46303-8.

Foti, Sebastiano & Hollender, Fabrice & Garofalo, Flora & Albarello, Dario & Asten, Michael & Bard, Pierre-Yves & Comina, Cesare & Cornou, Cécile & Cox, Brady & Di Giulio, Giuseppe & Forbriger, Thomas & Hayashi, Koichi & Lunedei, Enrico & Martin, Antony & Mercerat, E. & Ohrnberger, Matthias & Poggi, Valerio & Renalier, F. & Sicilia, Deborah & Socco, Laura Valentina. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. Bulletin of Earthquake Engineering. 16. 10.1007/s10518-017-0206-7.

Francisco J. Sánchez-Sesma, Miguel Rodriguez, Ursula Iturraran-Viveros, Francisco Luzón, Michel Campillo, Ludovic Margerin, Antonio Garcia-Jerez, Martha Suarez, Miguel A. Santoyo & Alejandro Rodriguez-Castellanos (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered medium. Geophysical Journal International. 186. 221-225. 10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x.

Mantovani, Ambra & Valkaniotis, Sotirios & Rapti, Dimitra & Caputo, Riccardo. (2018). Mapping the Palaeo-Piniada Valley, Central Greece, Based on Systematic Microtremor Analyses. Pure and Applied Geophysics. 175. 10.1007/s00024-017-1731-7.

Mucciarelli, Marco & Gallipoli, Maria. (2001). A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 42. 255-266.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), 30(1).

Nakamura, Y. (2008). ON THE H / V SPECTRUM. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China

Copyright Geoprofile GmbH

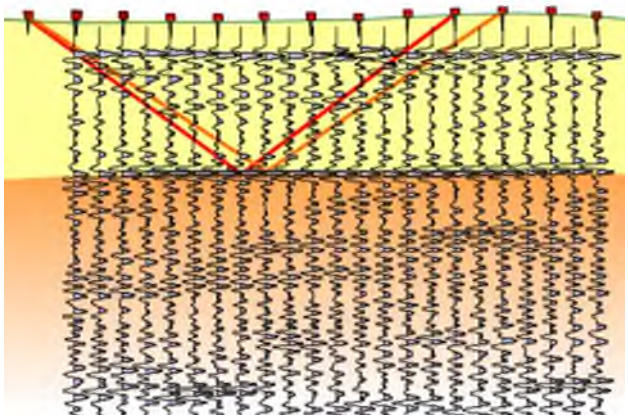
Roesset, J.M. (1970): Fundamentals of soil amplification. In: Hansen R (ed) – Seismic design of nuclear power plants. Cambridge/Mass, 489pp

SESAME European Research Project (2004): Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation, http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr/ Delivrables/ Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf

Copyright Geoprofile GmbH

ALLGEMEIN

Die Multichannel Analysis of Reflected Waves (MARW) ist eine nicht-invasive seismische Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder von P- und/oder S-wellen im Baugrund. Das Verfahren basiert auf der Messung der Laufzeit von Raumwellen im Baugrund. Dazu wird eine Schallquelle, wie zum Beispiel ein Hammer oder ein Fallgewicht, an der Oberfläche eingesetzt, um seismische Wellen zu erzeugen.



Figur 1. Skizze eines 2D-reflexionsseismischen Schnitts

Diese Wellen breiten sich nach unten aus und werden an Flächen reflektiert die eine unterschiedliche Wellengeschwindigkeit aufweisen. Mithilfe der bekannten Messgeometrie und der Topographie wird anschließend versucht, das seismostratigraphische Profil zu rekonstruieren, das die Reflexionen verursacht hat.

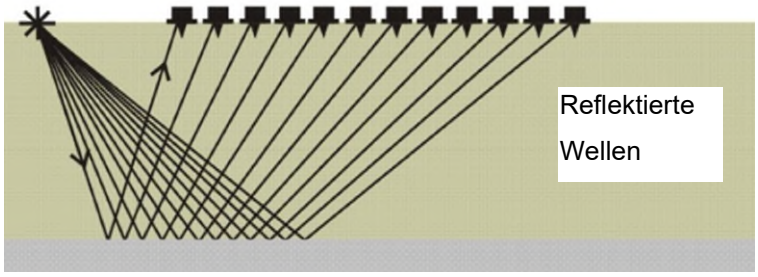
Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist das Vorliegen eines Seismogramms, welches mit einer Geophonkette im aktiven Seismikverfahren aufgezeichnet wurde. Die erzielbare Untersuchungstiefe beträgt ca. 70 bis 110 Prozent der Länge der Geophonkette. Als Ergebnis entsteht ein 1D-Modell der Raumschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe, welches sich auf das Mittel zwischen dem jeweiligen Schusspunkt und dem letzten Geophon bezieht.

THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Raumwellen werden entlang einer Flächen mit einer sich ändernden Geschwindigkeit gemäss dem Snellius-Gesetz wie folgt reflektiert:

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} \qquad [1]$$

Figur 2. zeigt eine schematische Darstellung der Wellenausbreitung im Untergrund.



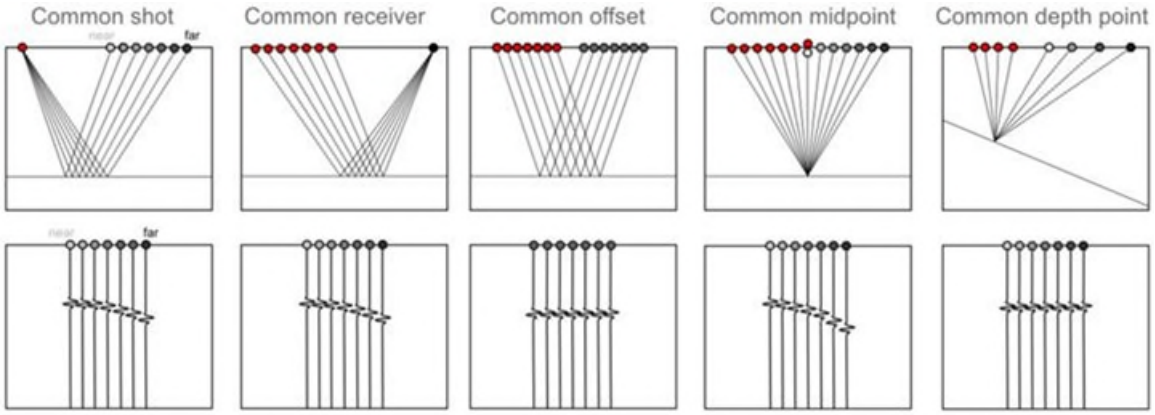
Figur 2. Darstellung der schematischen seismischen Reflexion

Copyright Geoprofile GmbH

Reflektierte Wellen liegen bei den Ankunftszeiten unter den direkten und gebrochenen Wellen und zeigen einen hyperbolischen Trend in Abhängigkeit von der Entfernung.

Die aufgezeichneten Daten können dann je nach Bedarf wie folgt strukturiert werden:

- *Common Shot Gather (CSG)*
- *Common Receiver*
- *Common Offset*
- *Common Mid Point (CMP)*
- *Common Depth Point (CDP)*



Figur 3. Schematisierung möglicher Kanal-/Spurenanordnungen von Seismogrammen

Bei der MARW Methode wird davon ausgegangen, dass die Stratigraphie flach geneigt ist, so dass sowohl CSG als auch CMP zur Erstellung eines 1D-Profils verwendet werden können. Durch die Kombination mehrerer CMPs oder CSGs ergibt sich ein «Super-Gather» mit besserer Geschwindigkeitsanalyse. Dafür werden mehr Kanale virtualisiert und das Verhältnis Signal zu Geräusch verbessert («S/N ratio»).

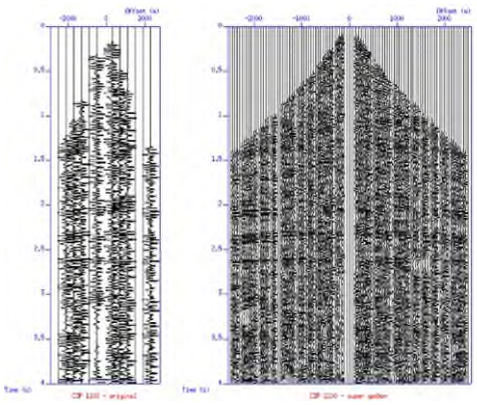


Figure 1. Ein Beispiel für CMP (links) und «Super-Gather» (rechts)

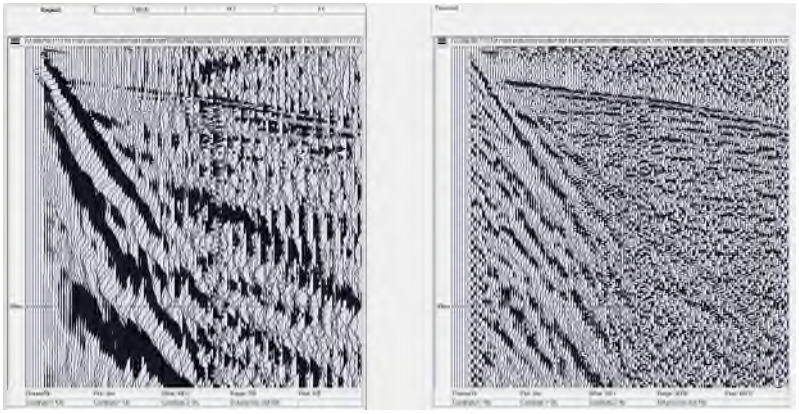
Durch die Kombination von MARW mit weiteren, eher oberflächennahen Methoden wie MASW und seismischer Refraktionstomographie (SRT) ist es dann möglich, ein detailliertes Modell zu rekonstruieren. Der Prozess der Datenanalyse mit der MARW-Methode ist auch derselbe für die Erstellung von 2D-Schnitten in der klassischen Reflexionsseismik, die jedoch auf mehr Schusspunkte angewiesen ist, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Im Allgemeinen handelt es sich bei der Verarbeitung nicht um eine Inversion, sondern um einen datengesteuerten Abbildungsprozess.

Copyright Geoprofile GmbH

DATENERFASSUNG UND AUSWERTUNG

Die Anwendung der Reflexionsseismik umfasst die folgenden Schritte:

- Datenerfassung und Qualitätskontrolle im Feld
- Datenverarbeitung und -aufbereitung
- Analyse der Geschwindigkeit (Normal Move Out – «NMO»)
- Tiefenkonversion

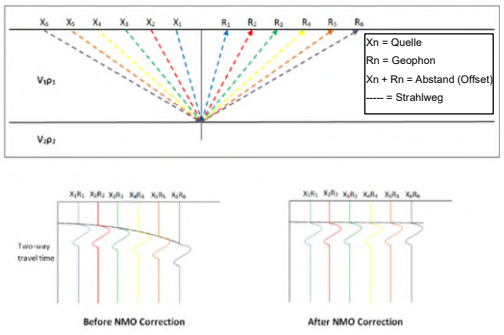


Figur 4. Ein Beispiel für den Vergleich zwischen Rohdaten und verarbeiteten Daten

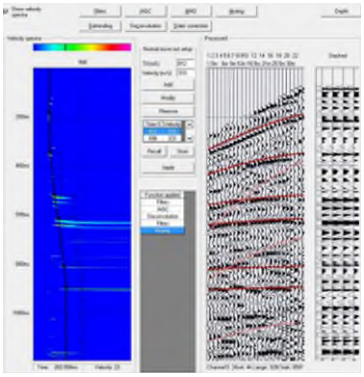
Datenverarbeitung und -aufbereitung: Dieser Schritt verfolgt das Ziel, die Datenqualität zu erhöhen, die Daten zu verarbeiten und überlagern und so die tatsächliche Geometrie der seismischen Erfassung zu überprüfen. Er umfasst somit mehrere Schritte und Kontrollen:

- Überprüfen der Geometrie der Datenakquisition
- Import von Topographiedaten
- Datenüberlagerung zur Erhöhung des Verhältnisses vom Signal zu Rausch (S/N ratio - Figur 4), sofern nicht bereits im Feld durchgeführt, Anwendung von Filtern, «Detrending» und «Instantaneous Automatic Gain Control» («IAGC»), Stummschaltung irrelevanter Signale, prädiktive Dekonvolution, topografische Korrektur und Normalisierung des Seismogramms. All diese Schritte werden in mehreren Iterationen optimiert, um die besten Parameter und die beste Anwendungssequenz zu ermitteln und so das beste Ergebnis für die Geschwindigkeitsanalyse zu erhalten.

Analyse der Geschwindigkeit (Normal Move Out – «NMO»): Die NMO zielt darauf ab, die Verzögerung, die das reflektierte Signal aufgrund der unterschiedlichen Signalwege aufweist, zu kompensieren und die Reflexionshyperbeln zu horizontalisieren für die Datenstapelung.



Figur 6. Schematisierung der NMO



Figur 6 Geschwindigkeitsspektrum und Interpretation für die NMO

Tiefenkonversion: Mittels Spectrum Picking ist es möglich, die Daten vom Zeitbereich in einen Tiefenbereich umzuwandeln und so ein eindimensionales Seismostratigraphie Modell zu erstellen.

Copyright Geoprofile GmbH

LITERATURANGABEN

Budihardjo, A. (1988). Quantifying limitations on signal-to-noise ratio improvement in the stacking process (Master's thesis). Colorado School of Mines, Golden, CO.

Don W. Steeples, Richard D. Miller – Seismic reflection methods applied to engineering, environmental and groundwater problems. – Kansas Geological Survey – University of Kansas – Lawrence, Kansas.

Don W. Steeples and Richard D. Miller – 1998 – Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys – Geophysics vol 63 No 4 (July-August 19981), P 1213-1224 14 FIGS. – University of Kansas – Lawrence, Kansas.

Hagedoorn, J. (1959). The Plus-Minus Method of Interpreting Seismic Refraction Sections. Geophysical Prospecting, 7, 158-182.

Jean-Luc Mari and Manuela Mendes (2019), Seismic imaging: a practical approach, DOI: 10.1051/978-2-7598-2351-2

Mayne, W. (1962), Common reflection point horizontal stacking techniques, Geophysics. 27, 927-938.

Sajid, Muhammad & Ghosh, Deva & Satti, Iftikhar. (2013). Comparative study of new signal processing to improve S/N ratio of seismic data. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 4. 10.1007/s13202-013-0092-8.

SARA electronic instruments s.r.l (2022). GeoExplorer M.A.R.W. – Manuale d'uso

Varriale, F., anno accademico 2010 – 2011 – Dottorato in scienze della terra: Metodi di imaging sismico ad alta risoluzione per lo studio di faglie sismogenetiche: il caso di studio della faglia Apricena (Puglia settentrionale). Tutore: Prof. Antonio Rapolla, Cotutore: Dott. Pier Paolo Bruno, Coordinatore: Prof. Maria Bruni. – Università degli studi di Napoli "Federico II" dip. Di scienze della terra.

Yilmaz, ö. (1987), Seismic data Processing, society of exploration geophysicists – EDP Sciences, ISBN 10: 0931830400 / ISBN 13: 9780931830402

Yilmaz, ö. (2021). Land Seismic Case Studies for Near-Surface Modelling and Subsurface Imaging, Society of Exploration Geophysicists

Copyright Geoprofile GmbH

ALLGEMEIN

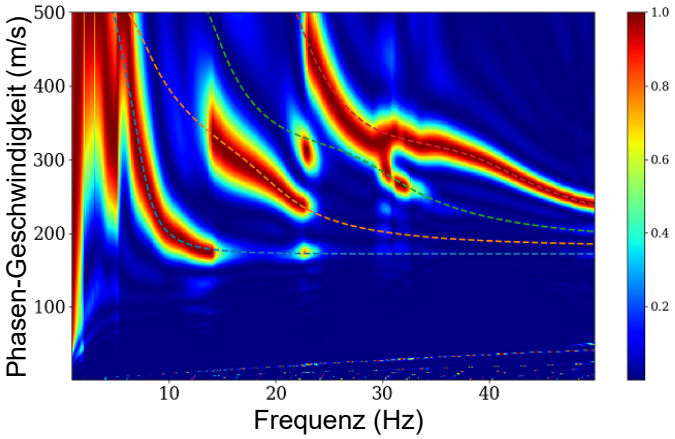
Die Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) ist eine nicht-invasive seismische Methode zur Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils von Scherwellen im Untergrund. Die Methode basiert auf der Analyse der Dispersion von Oberflächenwellen, die von einer seismischen Quelle erzeugt und von einer Reihe von linear auf der Bodenoberfläche angeordneten Geophonen aufgezeichnet werden. Dabei kann je nach Oberflächenwelle die vertikale (V_{sv}) oder horizontale (V_{sh}) Komponente der Scherwellengeschwindigkeit bestimmt werden. Rayleigh-Wellen bilden die Grundlage für die Bestimmung der vertikalen, und Love-Wellen die der horizontalen Komponente der Scherwellengeschwindigkeit. Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist das Vorliegen eines Seismogramms, welche mit einer Geophonkette im aktiven Seismikverfahren aufgezeichnet wurde. Die Methode kann Geschwindigkeitsinversionen erkennen, jedoch ist die laterale Auflösung von Pseudo-2D Modellen aufgrund der räumlichen Mittelung begrenzt.

THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Oberflächenwellen sind dispersiv, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit V sind somit frequenzabhängig:

$$V = \lambda \cdot f \qquad [1]$$

wobei λ die Wellenlänge und f die Frequenz darstellt. Diese Frequenzabhängigkeit wird durch Dispersionskurven beschrieben, in denen die Phasen-Geschwindigkeit gegen die Frequenz dargestellt ist. Demgegenüber stellt das Dispersionsspektrum die Energieverteilung für jeder Frequenz als Funktion der Geschwindigkeit. Figur 1 zeigt ein Beispiel eines Dispersionsspektrums sowie mehrere Dispersionskurven.



Figur 1. Dispersionsspektrum mit Dispersionskurven

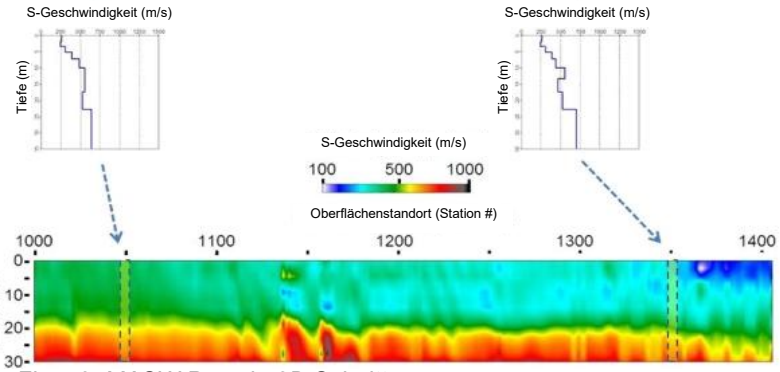
Durch die Analyse der Ausbreitungseigenschaften der Oberflächenwellen, insbesondere die Mächtigkeit der einzelnen Schichten sowie die jeweils dazu gehörende äquivalente Scherwellengeschwindigkeit, lassen sich Informationen über der Schichtaufbau und die elastischen Eigenschaften des Bodens gewinnen. Als Resultat entsteht ein 1D-Modell der Scherwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe, welche sich auf der Mitte zwischen dem jeweiligen Schusspunkt und dem letzten Geophon bezieht. Demnach stellt das Ergebnis einen Mittelwert von sämtlichen räumlichen Variationen innerhalb von dieser Zone dar. Die erzielbare Untersuchungstiefe ist eine Funktion der Wellenlänge des aufgezeichneten Signals und beträgt in der Regel ca. 20 bis 30 m.

Copyright Geoprofile GmbH

$$V_{s\,eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{V_{si}}} \quad [2]$$

Mit dieser Formel [2], in der d_i die Mächtigkeit der Schichten und V_s die Scherwellengeschwindigkeit der Schichten ist, wird die Äquivalentgeschwindigkeit zwischen der Oberfläche und dem Felsen bis zu einer maximalen Tiefe von 30 m berechnet.

Die MASW Methode kann an mehreren Punkten im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Durch die Integration dieser Messungen ist es möglich, einen pseudo-2D Schnitt zu erzeugen, welcher Einblicke in die räumliche Variation der Scherwellengeschwindigkeit liefert. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass seismische Daten, welche ursprünglich für Refraktions- oder Reflexionszwecke aufgezeichnet wurden, auch mit der MASW verarbeitet werden können. Dazu kann eine beliebige Kombinations-menge aus Schusspunkten und Geophonketten gewählt werden.



Figur 2. MASW Pseudo-2D Schnitt

DATENERFASSUNG UND AUSWERTUNG

Die Anwendung der MASW-Methode umfasst die folgenden Schritte:

- Datenerfassung und Qualitätskontrolle im Feld
- Datenverarbeitung und -aufbereitung
- Auswertung und Modellbildung

Datenverarbeitung und -aufbereitung: Dieser Schritt hat als Ziel, die Datenqualität zu erhöhen, die Daten zu verarbeiten und zu stapeln, und die tatsächliche Geometrie der seismischen Erfassung zu überprüfen. Sie umfasst somit mehrere Handlungen und Kontrollen:

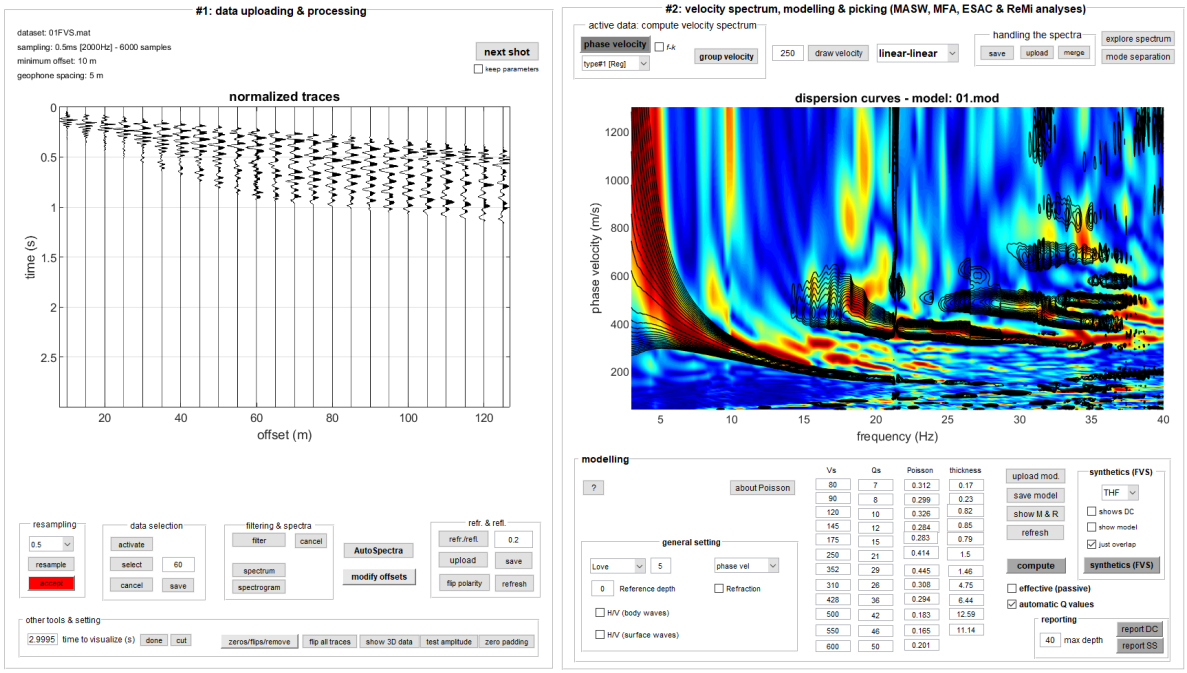
- die Datenstapelung zur Erhöhung des Verhältnisses vom Signal zu Geräusch (S/N ratio), insofern nicht bereits im Feld vorgenommen;
- Kontrolle der Geometrie der Datenakquisition;
- Import von Topographiedaten.

Copyright Geoprofile GmbH

Auswertung und Modellbildung: Zurzeit stehen grundsätzlich drei verschiedene Techniken für die Auswertung und Modellbildung zur Verfügung. Bei sämtlichen Methoden wird zuerst ein Initialmodell der Schwerwellengeschwindigkeit festgelegt («forward modelling»). Aus diesem Modell wird ein Respons berechnet (Dispersionskurve, Dispersionsspektrum oder Seismogramm) und mit den gemessenen Daten abgeglichen. Anschliessend wird das Geschwindigkeitsmodell iterativ so optimiert, bis die synthetisch berechneten Daten mit den Messungen übereinstimmen. In den folgenden Abschnitten werden die drei Methoden weiter erläutert.

1. *«klassisch»*: handmässige Festlegung und Extraktion der Dispersionskurve («picking») des Fundamentalmodus mit anschliessendem iterativem Abgleich des aus dem Geschwindigkeitsmodell errechneten Dispersionskurve («curve matching»). Die handmässige Festlegung beinhaltet zwangsmässig eine gewissen Subjektivität. Der Modellabgleich basiert ausschliesslich auf dem Fundamentalmodus. Computerprogramme, welche nur eine Implementierung der klassischen MASW Methode beinhalten, sind u. A. Geopsy, GeoGiga Surface, GeoExplorer MASW, Easy MASW (GeoStru), ZondST2d, SurfSEIS, SeisImager, Parkseis oder Swan.

2. *Full Velocity Spectrum (FVS)*: Iterativer Abgleich des aus dem Geschwindigkeitsmodells errechneten Dispersionsspektrum mit dem gemessenen Dispersionsspektrum. Die Anwendung dieser Methode hat den entscheidenden Vorteil, dass die Notwendigkeit einer handmässigen Extraktion der Dispersionskurve und die Introduktion der damit verbundenen Subjektivität und Risiken entfallen. Der Modellabgleich basiert auf dem gemessenen Dispersionsspektrum inklusive sämtliche Folgemodi (erste Modus, zweite Modus,… «Overtones»). Zurzeit gibt es nur wenige Computerprogramme, welche eine Implementierung der FVS Methode beinhalten. Von diesen wenigen Programme ist WinMASW am bekanntesten.



Figur 3. Berechnetes und gemessenes Dispersionsspektrum für den Fundamentalmodus und höhere Modi

Copyright Geoprofile GmbH

3. *Full Wave Inversion (FWI)*: Wie FVS, jedoch mit iterativem Abgleich zwischen den synthetischen und gemessenen Daten aufgrund des Seismogramms. Zurzeit hat diese Methode eher experimentellem Character; kommerzielle Implementierungen für MASW liegen noch keine vor.

Bei der Erkennung des Fundamentalmodus besteht die Möglichkeit, dass dieser von höheren Modi («Overtones») verschleiert wird. Dies ist insbesondere der Fall, wenn eine Schicht mit einer geringen Scherwellengeschwindigkeit und geringer Mächtigkeit über eine Schicht mit einer signifikant höheren Geschwindigkeit liegt. Andere Faktoren, welche eine Verschleierung des Fundamentalmodus begünstigen, sind eine sehr unregelmässige oder stark geneigte Geländeoberkante. Diese Problematik ist in der Regel weniger vorhanden, wenn Love-Wellen verwendet werden.

Insofern aus anderen Quellen zusätzliche Informationen bzgl. der Scherwellengeschwindigkeit und/oder dem Schichtverlauf vorliegen (z. B. aus anderen geophysikalischen Messungen, Bohrungen oder Drucksondierungen), sollten diese bereits beim Initialmodell berücksichtigt werden, und das resultierende Modell mit den zusätzlichen Informationen integriert werden. Zudem sind solche Informationen für die Erkennung von Multimodi sehr hilfreich.

Copyright Geoprofile GmbH

LITERATURANGABEN

Budihardjo, A. (1988). Quantifying limitations on signal-to-noise ratio improvement in the stacking process (Master's thesis). Colorado School of Mines, Golden, CO.

Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, 57, 1408–1418.

Dal Moro, G., Coviello, V., & Del, G. (2014). Shear-wave velocity reconstruction via unconventional joint analysis of seismic data: A case study in the light of some theoretical aspects. In Proceedings of the 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (pp. 225-234). Springer.

Dal Moro, G., Moustafa, S., & Alarifi, N. (2018). Improved holistic analysis of Rayleigh waves for single- and multi-offset data: Joint inversion of Rayleigh-wave particle motion and vertical- and radial-component velocity spectra. Pure and Applied Geophysics, 175(1), 69-85.

Dal Moro, G. (2019). Surface wave analysis: Improving the accuracy of the shear-wave velocity profile through the efficient joint acquisition and Full Velocity Spectrum (FVS) analysis of Rayleigh and Love waves. Exploration Geophysics, 50(4), 408–419.

Dal Moro, G. (2020). Efficient joint analysis of surface waves and introduction to vibration analysis: Beyond the clichés. Springer. ISBN: 978-3-030-46303-8.

Dal Moro, G. (2020). The magnifying effect of a thin shallow stiff layer on Love waves as revealed by multi-component analysis of surface waves. Scientific Reports, 10, 9071.

Foti, Sebastiano & Hollender, Fabrice & Garofalo, Flora & Albarello, Dario & Asten, Michael & Bard, Pierre-Yves & Comina, Cesare & Cornou, Cécile & Cox, Brady & Di Giulio, Giuseppe & Forbriger, Thomas & Hayashi, Koichi & Lunedei, Enrico & Martin, Antony & Mercerat, E. & Ohrnberger, Matthias & Poggi, Valerio & Renalier, F. & Sicilia, Deborah & Socco, Laura Valentina. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. Bulletin of Earthquake Engineering. 16. 10.1007/s10518-017-0206-7.

Louie, J. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(2), 347-364.

Ohori, M., Nobata, A., & Wakamatsu, K. (2002). A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(6), 2323-2332.

Copyright Geoprofile GmbH

Pan, Y., Gao, L., & Bohlen, T. (2019). High-resolution characterization of near-surface structures by surface-wave inversions: From dispersion curve to full waveform. Surveys in Geophysics, 40(1), 89-118.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. In Proceedings of the 68th Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists (pp. 1377-1380).

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multi-channel analysis of surface waves. Geophysics, 64(3), 800-808.

Park, C. (2005). MASW horizontal resolution in 2D shear-velocity (Vs) mapping. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP).

Sajid, Muhammad & Ghosh, Deva & Satti, Iftikhar. (2013). Comparative study of new signal processing to improve S/N ratio of seismic data. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 4. 10.1007/s13202-013-0092-8.

Socco, L. V., & Strobbia, C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: A tutorial. Near Surface Geophysics, 2(4), 165-185.

Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations: Surface-wave inversion. PhD thesis, Université de Liège, 155 pp.

Yilmaz, ö. (2021). Land Seismic Case Studies for Near-Surface Modelling and Subsurface Imaging, Society of Exploration Geophysicists

Copyright Geoprofile GmbH

Seismograph PASI GEA-24

TECHNICAL SPECIFICATIONS GEA24

5-YEAR WARRANTY

Number of channels	24 chs + trigger (AUX ch) - 2 units can be serialized for a total of 48 chs
Data Conversion	24 real bits Sigma-Delta ADC (compatible with analog geophones of any resonance frequency)
Sampling intervals	Single acquisition (active and passive): -from 1 to 6 chs : up to 31.25 microsec/32000 Hz -from 7 to 12 chs : up to 62.5 microsec/16000 Hz -from 13 to 24 chs : up to 125 microsec/8000 Hz Continuous acquisitions (passive): -from 1 to 3 chs : up to 500 microsec/2000 Hz -from 4 to 6 chs : up to 1 millisec/1000 Hz -from 7 to 12 chs : up to 2ms /500 Hz -from 13 a 24 chs : up to 4ms /250 Hz
Acquisition length	27500 samples @ 24 chs (+aux) 174500 samples @ 3 chs (+aux) Unlimited samples for continuous acquisitions
Preamp. gain	LOW (0dB) - HIGH (52dB), software selectable
Stacking	Unlimited number of stackings
Input impedance	2MOhm // 22nF
Dynamic Range	144dB (system); >117db (instantaneous, measured @1ksps
Distortion	0.007% @16kHz

TECHNICAL SPECIFICATIONS GEA24

5-YEAR WARRANTY

Bandwidth -3dB Bandwidth +/- 0.1dB	From DC to 6.8kHz@32ksps - from DC to 0.21 kHz@1ksps From DC to 3.5 kHz@32ksps - from DC to 0.11 kHz@1ksps
Filters	Low Pass:125-200-500-1000Hz High Pass: 10-20-30-40-50-70-100-150-200-300-400Hz
Notch Filter	50-60Hz + harmonics
Trigger	Normally closed contact, normally open contact (e.g. with explosive), analog signal (starter geophone, hammer switch), TTL triggering. Trigger sensibility adjustable via software
Trace Display	Wiggle-trace / variable area
Noise-monitor	All channels + trigger; real time display
AUX channel	1x (for trigger or any other input signal)
Communication interface	1x USB 2.0 to external PC (not included)
Data format	SEG2 (other formats available on request)
Power supply	5VDC from USB, 0.25A
Operating/Storage Temp.	from -30°C to + 80°C
Humidity	80% relative humidity, non condensing
Dimension and Weight	24cm x19.5cm x11cm, 2kg Shock-resitant PELI CASE IP67

Copyright Geoprofile GmbH

Seismograph SARA electronic instruments s.r.l. – DoReMi 24bit

sara
electronic instruments

DoReMi SEISMOGRAPH



The DoReMi seismograph is an innovative instrument which distributes along the cable all the electronics needed to record a seismic signal.

This architecture has several benefits which on the whole make the system very convenient to use in any operating conditions.

It is not possible to list all of its features and practical uses on this page, therefore we invite you to visit our web site at *www.sara.pg.it* for further information.

Simplicity & Flexibility
Each channel itself is a seismograph that, linked to the other elements, creates a network, easy to transport in its cable wheeler. The system is fully modular; you can purchase the exact number of channels you need, from 1 to *N*.

Energy
A rechargeable battery is embedded in the main interface. The system goes into standby as not in use, so the battery is lightweight and durable.

Precision
With the a/d converter placed VERY near to the geophone, most of the electro-magnetic environmental noise, affecting other instruments, is eliminated. Transmission is digital, so no signal loss or crosstalk can happen along the string.

Completeness
The system allow you to run a wide range of surveys using seismic sources or just ambient noise.

User friendly
Since the channels are completely independent, you can: add cable extensions, overcome obstacles, replace channels without the need to change the entire cable and share channels with working partners.

Reliability
Entirely designed and produced inside our company, we guarantee fast customer service, training, customization and consultant. After 12 years of heavy operation and hundreds of clients worldwide the system has proven to be one of the most reliable and practical system in the market.

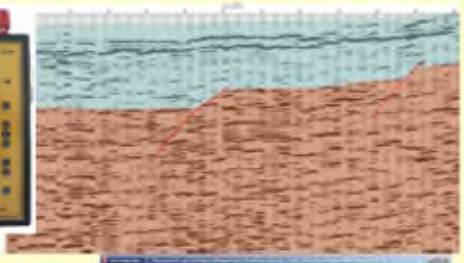
Software
The software, available in Italian, English and Chinese, is flexible and able to drive all system features as well as several tools for a first on-site data check.
Several functions for facilitating field operations include: pre-shot noise monitor, downhole data re-arrangement, SH shots inversion and overlapping, data interlacing and roll-along,refraction and HVSR preview, filtering, frequency spectrum and more.
For data processing we recommend use of our GeoExplorer, ReflexW and Geopsy covering all types of geophyisical analysis.

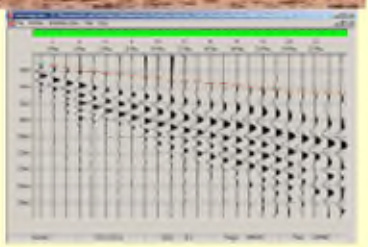
Technical Features

No. of Bits	16 (96dB dynamic range)	24 (144dB dynamic range)
A/D Converter Type	SAR	SIGMA DELTA
Converter Input Span	5 V	5 V
S/N Ratio @ 500 SPS	96 dB (@ 27dB gain)	140 dB
S/N Ratio @ 5000 SPS	94 dB (@ 27dB gain)	130 dB
S/N Ratio @ 20000 SPS	92 dB (@ 27dB gain)	105 dB
Input Type	for geophone	for geophones
Input impedance	> 100 kΩ	> 20 kΩ
Common Mode Rejection	> 80 dB	> 80 dB
Band pass:	2-200 Hz	DC-400 Hz
Filters (IIR or 0 Phase):	Low pass, High pass, notch and customizable	Low pass, High pass, notch and customizable
Max Sampling Lag Between Ch.:	< 30 ppm	< 30 ppm
Max Error Between Trigger Ch.:	< 0.2us	< 0.2 us
Memory per channel:	64000 bytes	128000 bytes
Maximum Samples:	30000	40000
Sampling Rates:	200 Hz to 50000 Hz	200 Hz to 20000 Hz
Maximum Connectable Channels:	255	255
Power Consumption:	≈ 0.3 W per Ch.	≈ 0.3 W per Ch.
Instrument Chain Max Length:	1000 m	1000 m
Best results geophones:	4.5 Hz High Gain 80 V/m/s	4.5 Hz High Gain 80 V/m/s
Diagnosis:	Memory Status (OK / Fault)	Memory Status (OK / Vdc)
BUS Communication:	115200 baud, N, 8,1	115200/230400, N, 8,1
DATA transfer to PC:	USB	USB
Data format:	.dmt, SEG-2, SEG-Y, .saf, .csv	.dmt, SEG-2, SEG-Y, .saf, .csv









Applications
Typically used for MASW surveys, it can be used for any other seismic surveys like:

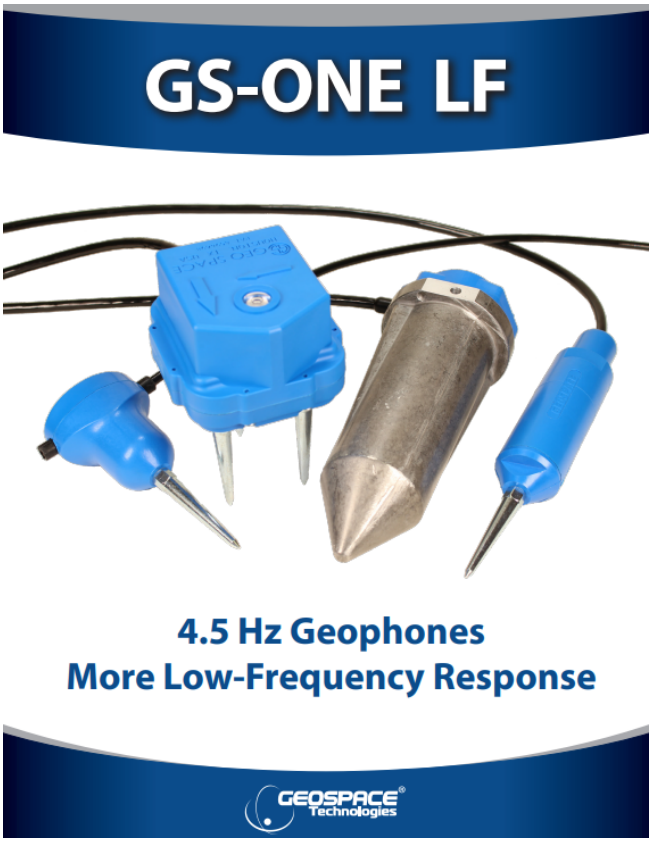
- Refraction
- Reflection
- Tomography
- HVSR
- ESAC/SPAC and ReMi
- Water search
- Landslide survey
- Downhole / Crosshole

Notice! SARA Electronic Instruments s.r.l. reserves the right to make changes to the product specifications at any time and without notice, including changes in price, content, description, terms, etc.

SARA electronic instruments s.r.l. – 06129 – Perugia – Via Armando Mercuri, 4 – ITALY
Phone: +39 075 5051014 – Fax: +39 075 5006315 - www.sara.pg.it - info@sara.pg.it
Reg. Trib. Perugia N-5718 – C.C.I.A.A. 109864 - C.F. e P.iva 00380320549 - N.Reg.RAEE: IT08020000001128

Copyright Geoprofile GmbH

Geospace GS-ONE

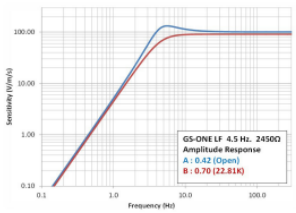


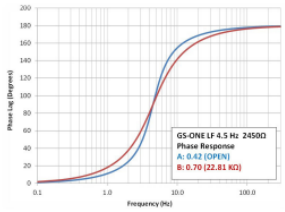
GS-ONE LF VERTICAL

MECHANICAL SPECIFICATIONS		
Moving Mass	25.2 g	0.889 oz
Maximum coil excursion p-p	3.05 mm	0.120 in.
Diameter	30.5 mm	1.2 in.
Height	40.6 mm	1.6 in.
Weight	131 g	4.62 oz
Operating and Storage Temperature Range	–40°C to +80°C	–40°F to +176°F

ELECTRICAL SPECIFICATIONS	
All parameters are specified at 25°C in the vertical position unless otherwise stated.	
Open-circuit sensitivity	2.55 V/in/s (100.4 V/m/s) +10%, –10%
Frequency	4.5 Hz ±0.75 Hz
Spurious frequency	120 Hz Typical
Distortion at vertical	0.25% Typical measured at 12 Hz with 0.7 in/s p-p
Open-circuit damping	0.42 ±0.10
Coil resistance	2450 Ω ±5%
Sensitivity with 20 kΩ load	2.27 V/in/s (89.4 V/m/s) Typical
Damping with 20 kΩ load	0.735 Typical
Tilt angle when coil hit end stop	24° from vertical Typical

All rights reserved. Specifications subject to change at sole discretion of Geospace Technologies.



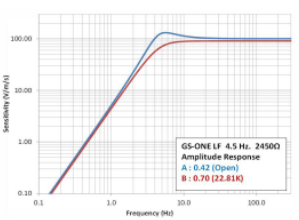


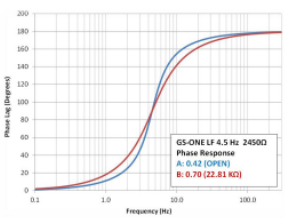
HORIZONTAL GS-ONE LF

MECHANICAL SPECIFICATIONS		
Moving Mass	25.2 g	0.889 oz
Maximum coil excursion p-p	3.05 mm	0.120 in.
Diameter	30.5 mm	1.2 in.
Height	40.6 mm	1.6 in.
Weight	131 g	4.62 oz
Operating and Storage Temperature Range	–40°C to +80°C	–40°F to +176°F

ELECTRICAL SPECIFICATIONS	
All parameters are specified at 25°C in the horizontal position unless otherwise stated.	
Open-circuit sensitivity	2.55 V/in/s (100.4 V/m/s) +10%, –10%
Frequency	4.5 Hz ±0.75 Hz
Spurious frequency	120 Hz Typical
Distortion at horizontal	0.25% Typical measured at 12 Hz with 0.7 in/s p-p
Open-circuit damping	0.42 ±0.10
Coil resistance	2450 Ω ±5%
Sensitivity with 20 kΩ load	2.27 V/in/s (89.4 V/m/s) Typical
Damping with 20 kΩ load	0.735 Typical
Tilt angle when coil hit end stop	5° Typical from horizontal

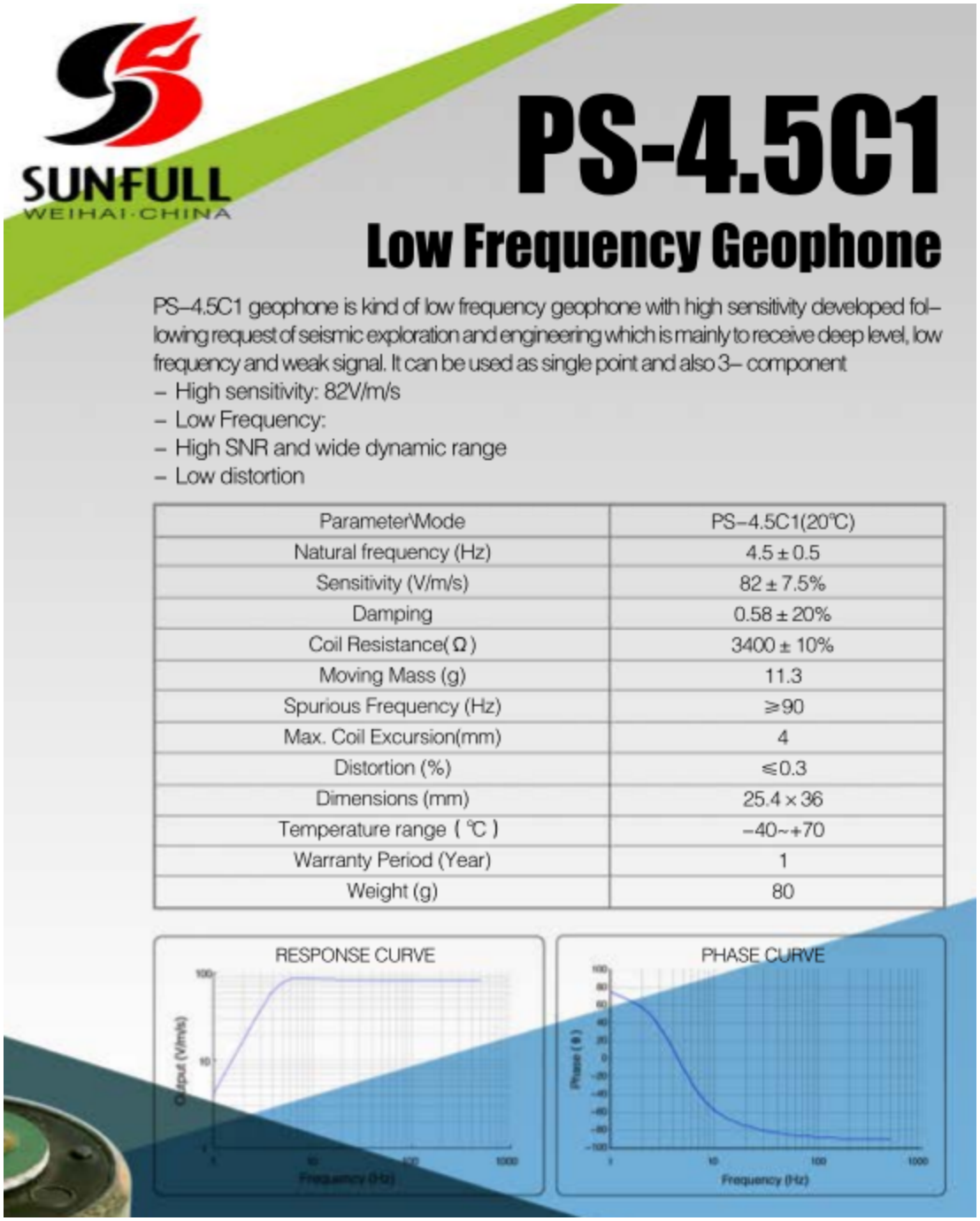
All rights reserved. Specifications subject to change at sole discretion of Geospace Technologies.





Copyright Geoprofile GmbH

Sunfull PS-4.5C1 horizontal und vertikal



Parameter\Mode	PS–4.5C1(20℃)
Natural frequency (Hz)	4.5 ± 0.5
Sensitivity (V/m/s)	82 ± 7.5%
Damping	0.58 ± 20%
Coil Resistance(Ω)	3400 ± 10%
Moving Mass (g)	11.3
Spurious Frequency (Hz)	≥90
Max. Coil Excursion(mm)	4
Distortion (%)	≤0.3
Dimensions (mm)	25.4 × 36
Temperature range (℃)	–40~+70
Warranty Period (Year)	1
Weight (g)	80

Copyright Geoprofile GmbH