



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



SED

Schweizerischer Erdbebendienst
Swiss Seismological Service

Report on data formatting

SBUB

Poggi Valerio

Last modified - 24 / 10 / 2013

Note on data formatting

To inflate the SED database we converted the velocity profiles profiled by RoXplore into standard format. The process was done separately for the results from refraction tomography (TOMO) and surface wave analysis (MASW). In both cases, only a limited set of offset was selected as optimal, which are:

- TOMO: 106, 112, 118, 124, 130, 136
- MASW: 118, 124, 130, 136

Offsets too close to edges or with velocity saturation (for Vp) were discarded.

For TOMO, the results for Vs and Vp profiling have been obtained from two independent acquisition and processing steps. As a consequence, Vp and Vs profiles at same offset were not reaching the same depth. Merging these profiles together implied the adjustment for a minimum resolved depth.

For MASW, also the attenuation values were available, in term of Qp and Qs. However, these values have not been included in the database, as no specific field as been yet defined. These will be integrated in the future.

Density was generally missing; we assumed then a constant density of 2300kg/m³.

Note that the results from MASW analysis are not reliable. This is confirmed by comparison of the modeled SH transfer function from these inverted profiles with the empirical amplification at the site from spectral modeling. Therefore, it was decided to integrate only the results from refraction tomography into the SED database.

Official coordinates for the survey are those of the offset 115 in seismic line 2.

Projekt SSMnet SBUB-1, Malbun, Buchs SG

Bericht	zur aktiv-seismischen Untersuchung
----------------	---

Bauherr Schweizerischer Erdbebendienst SED
Institut für Geophysik
Sonneggstr. 5
8092 Zurich

Kontraktor roXplore gmbh
Oberfeldstrasse 6
8514 Amlikon-Bissegg
Telefon 078 687 3999
roXplore@roXplore.ch
www.roXplore.ch

Berichtsdatum 12. Juli 2013

INHALTSVERZEICHNIS

1	Ausgangslage und Aufgabenstellung	3
1.1	Das Untersuchungsobjekt.....	3
1.2	Erkundungsziele.....	3
1.3	Die topographischen und geologischen Verhältnisse.....	3
1.4	Rahmenbedingungen.....	3
2	Messmethodik	4
2.1	Seismische Wellen.....	4
2.2	Tauchwellentomographie (Refraktionsseismik).....	6
2.3	Bestimmung der Grundfrequenz (H/V-Verhältnis).....	8
2.4	Die Oberflächenwellenanalyse (MASW).....	8
3	Messdurchführung und Auswertung	10
3.1	Feldarbeiten	10
3.1.1	Das Messprogramm.....	10
3.1.2	Ablauf der Messungen.....	10
3.1.3	Messequipe seismische Feldarbeiten.....	10
3.1.4	Der Messumfang.....	11
3.1.5	Zusammenfassung der Registrierparameter aktiven Seismik.....	11
3.1.6	Zusammenfassung der Registrierparameter passive Seismik HVSR.....	11
3.1.7	Zusammenfassung der Registrierparameter passive Seismik ESAC.....	12
3.1.8	Situation am Standort Buchserberg.....	12
3.1.9	Die äusseren Messbedingungen, lokale Besonderheiten.....	14
3.2	Datenbearbeitung und Ergebnisse	15
3.2.1	Allgemeines Bemerkungen zur Datenbearbeitung und Interpretation.....	15
3.2.2	Die refraktionsseismische Auswertung der S-Wellen-Daten.....	15
3.2.3	Die refraktionsseismische Auswertung der P-Wellen-Daten.....	22
3.2.4	Bestimmung der Grundfrequenz der Lockergesteinsschicht.....	26
3.2.5	Auswertung der Oberflächenwellen (MASW).....	30
3.2.6	ESAC-Analysen.....	46
3.2.7	Bestimmung des Qs-Faktor.....	47
4	Zusammenfassung und Bewertung der Untersuchung	48
5	Referenzen	50

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

1.1 Das Untersuchungsobjekt

Beim Berghaus Malbun, Buchserberg, Gemeinde Buchs SG, Koordinaten 751.350 / 223.586, wurde im Rahmen der Erweiterung des Starkbebennetzes eine bestehende Erdbebenbeobachtungsstation überarbeitet respektive neu eingerichtet.

1.2 Erkundungsziele

Mittels geophysikalischer Studien soll der den Standort umgebende Untergrund hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Scherwellen untersucht werden. Darunter fallen passive und aktive seismische Messungen. Während die passiven seismischen Messungen (Array-Messungen der Bodenunruhe) durch den Erdbebendienst durchgeführt werden, umfasst der diesen Report abdeckende Teil nur die aktiven seismischen Methoden.

Ergänzend wurden einige passive Verfahren gemessen und testweise ausgewertet.

Das Hauptaugenmerk liegt in der Bestimmung eines vertikalen Scherwellen-Geschwindigkeitsprofils unter der Station bis ungefähr 30 m unter Terrain. Dazu gehört auch die Bestimmung der Ungenauigkeit der Messungen.

1.3 Die topographischen und geologischen Verhältnisse

Der Standort liegt ca. 1371 m ü.M. auf einer Hangterrasse zwischen Buchs und Alvier rund 900 m über dem Alpenrhein.

Die erwarteten geologischen Verhältnisse am Untersuchungsstandort zeigen eine geringmächtige Lockergesteinsbedeckung von wenig Hangschutt über mergelig-kalkigen Sedimenten der Garschella-Formation in der Unteren Kreide.

Nach Auskunft eines lokal bewanderten Geologen (mündl. Mitteilung K. Papritz, 27.5.2013) können die anstehenden Gesteine zu Karsterscheinungen neigen.

1.4 Rahmenbedingungen

Der Standort ist ruhig gelegen und mit Fahrzeugen einfach zu erreichen. Es ist nicht mit grösseren Störsignalen zu rechnen.

Die unmittelbare Umgebung wird alpwirtschaftlich genutzt. Zur Zeit der Messungen (April – Mai) ist die Alp noch nicht bestossen.

2 Messmethodik

2.1 Seismische Wellen

Eine stosswellenartige Erschütterung des Untergrundes mittels Hammerschlag, Fallgewicht, Sprengung oder organisierter Vibration (=Quelle) erzeugt die seismischen Wellen. Abhängig von den Materialeigenschaften Schubmodul und Kompressionsmodul sowie der Dichte durchteilen die Erschütterungswellen den Untergrund mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Dabei werden zwei Formen der Ausbreitung unterschieden: Körperwellen und Oberflächenwellen. Sie können getrennt ausgewertet werden und ermöglichen differente Aussagen über den Untergrund.

Die Körperwellen lassen sich aufgrund der Partikelbewegung (elastische Deformation des Mediums) in P- (=Primär-, auch Longitudinal- oder Kompressionswelle, Fig. 2.1) und S-Welle (=Sekundär-, auch Scherwelle, Fig. 2.2) unterscheiden, wobei sich die Primärwelle bei natürlichen Lithologien knapp doppelt so schnell ausbreitet als die Sekundärwelle.

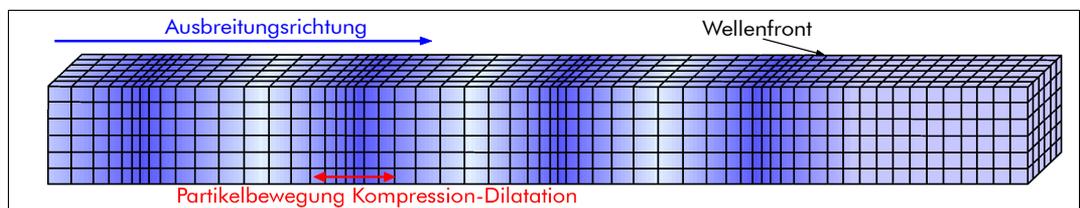


Fig. 2.1 P-Welle: Das Blockdiagramm zeigt, dass die Partikelbewegung und die Ausbreitungsrichtung bei der Kompressionswelle parallel sind. Die stossartige Erschütterung erzeugt einen Wechsel von Kompression und Dilatation, gleich den Schallwellen in der Luft (Druckschwankungen).

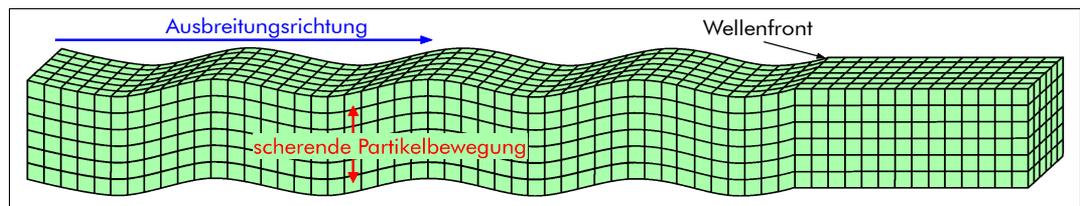


Fig. 2.2 S-Welle: Das Blockdiagramm zeigt, dass bei der Scherwelle die scherende Partikelbewegung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegt. Weil Fluide keine Scherfestigkeit aufweisen, können sich S-Wellen nur in festen Medien ausbreiten.

An der freien Oberfläche sowie am Grund von Seen und in Bohrlöchern werden sogenannte Oberflächenwellen beobachtet. Die Partikelbewegungen sind komplexer als bei Raumwellen, die Energie und damit die Bodenbewegung grösser. Die Bodenpartikel beschreiben bei der Rayleigh-Welle (Fig. 2.3) beschreiben eine retrograd rotierende Bewegung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist sowohl von der Scherfestigkeit als auch vom Kompressionsmodul abhängig und in der Regel etwa geringer als die Scherwelle.

An der Trennfläche festes Medium – Flüssigkeit (z.B. Bohrloch, Meeresgrund) werden Stoneley-Wellen beobachtet werden. Sie sind eine besondere Form der Rayleigh-Wellen.

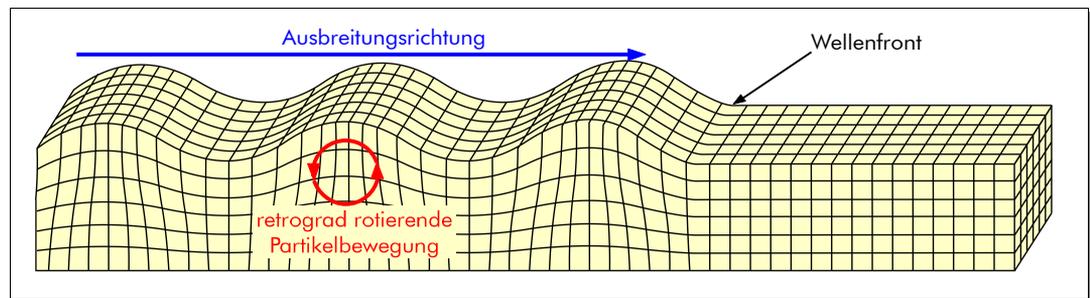


Fig. 2.3 Das Blockdiagramm zeigt, dass bei der Rayleigh-Welle die retrograd rotierende Partikelbewegung sowohl eine Horizontal- als auch eine Vertikalkomponente aufweisen. Rayleigh-Wellen treten nur an der freien Oberfläche auf und haben allgemein den grössten Energieanteil im ganzen Seismogramm.

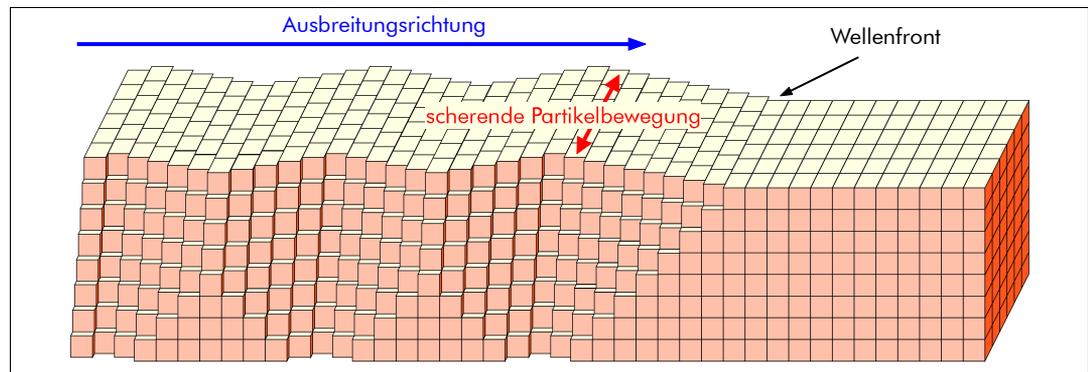


Fig. 2.4 Das Blockdiagramm zeigt, dass bei der Love-Welle die scherende senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegt. Love-Wellen treten nur an der freien Oberfläche und in geschichteten Medien auf.

2.2 Tauchwellentomographie (Refraktionsseismik)

Seismische Körperwellen breiten sich im Untergrund gemäss den Gesetzen der Akustik (Fig. 2.5) aus. An Schichtgrenzen mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten reflektieren und refraktieren bestimmte Energieanteile der seismischen Wellen. Die Bewegungen der reflektierten und totalrefraktierten Wellen werden an der Oberfläche in den Empfängern (in der Regel Geschwindigkeitsaufnehmer = Geophone) gemessen und im Seismographen digitalisiert und aufgezeichnet.

Die bekannte und weit verbreitete Refraktionsseismik wertet nur die Laufzeiten der ersten aufgezeichneten Wellen in jedem Geophon auf. Dabei handelt es sich in den ganz nah gesetzten Geophonen um die direkte Welle, bei weiter entfernten Empfängerstationen um totalrefraktierte Wellen einzelner tiefer liegender Horizonte. Die zeitliche Ableitung der Laufzeiten erlaubt die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten einzelner Schichten.

Durch moderne Auswerteverfahren (z.B. Tauchwellentomographie) können Datensätze mit einer grossen Anzahl an Quellpunkten und Empfängerstationen automatisiert ausgewertet werden. Entgegen der konventionellen Refraktionsseismik mit 3 bis 5 Aufzeichnungen pro Auslage bietet die Refraktionstomographie bei leicht erhöhtem Feldaufwand ein Mehrfaches an Genauigkeit und Aussagekraft der Auswertung. Insbesondere sind auch geologische Aufschlüsse bei nicht sprunghaften Geschwindigkeitsänderungen, wie sie beispielsweise bei verwitterndem Fels oder bei kontinuierlichem Übergang von lockerem Schotter zu zementierter Nagelfluh, möglich.

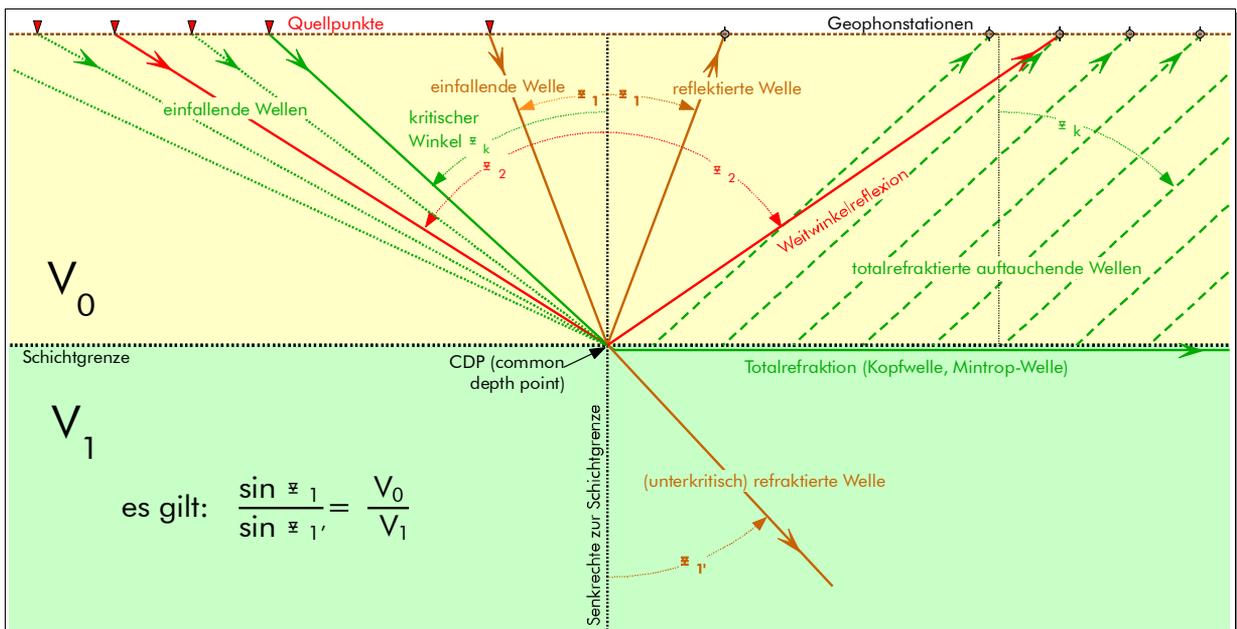


Fig. 2.5 Das Schema zeigt die Zusammenhänge zwischen ein- und ausfallenden seismischen Wellen in Bezug auf Geschwindigkeiten und Winkel. Diese Situation ist beispielsweise beim Grundwasserspiegel oder der Felsoberfläche unter einem weichen Schotter zu beobachten.

Der Ablauf der seismischen Tomographie besteht aus folgenden drei Schritten:

- Bestimmung der Ersteinsatzzeiten der seismischen Wellen (Fig. 2.6, a)
- Die zeitliche Ableitung der Quelle-Empfänger-Distanz (Fig. 2.6, b) ermöglicht die Bestimmung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit in einer bestimmten Schicht.
- Modellierung (Inversion) (Fig. 2.6, c) der Laufzeiten und Geschwindigkeiten zu einem geologischen Modell.

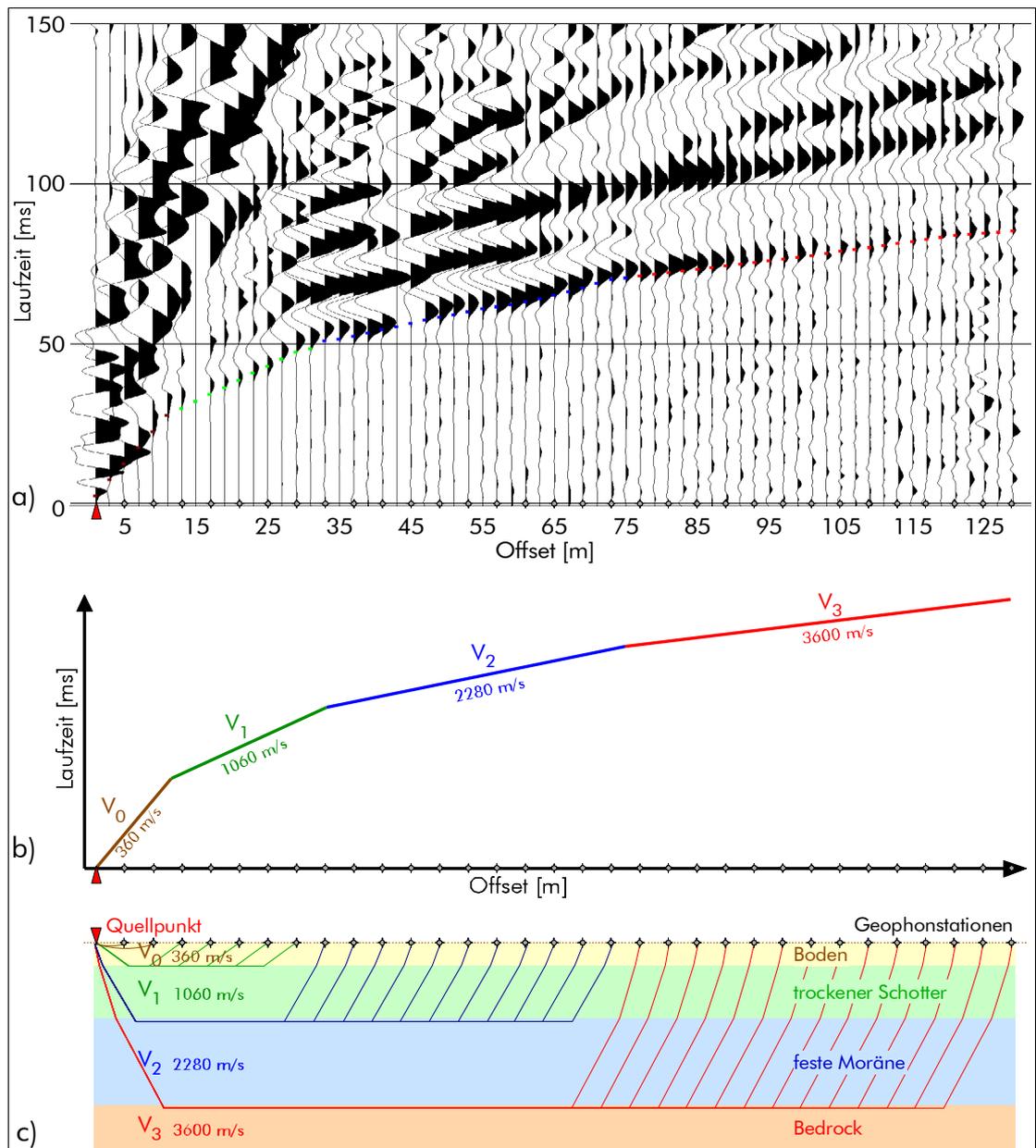


Fig. 2.6 Generalisierter Workflow der Refraktionsseismik:

- a) Die seismischen Daten (im Gegensatz zu Fig. 3.4 wird hier die Laufzeit von unten nach oben dargestellt) werden auf gemeinsamen Schusspunkt sortiert (auch möglich mit Empfänger-, CDP- oder Offset-Sortierung). Die Einsatzzeiten der seismischen Wellen werden mit den farbig markierten Zeitmarken „gepickt“.
- b) Ableitung der seismischen Geschwindigkeiten.
- c) Inversion der Laufzeiten und Geschwindigkeiten zu einem geologischen Modell.

2.3 Bestimmung der Grundfrequenz (H/V-Verhältnis)

Aus dem spektralen Verhältnis der Horizontal- zur Vertikalkomponente aus den Messungen der Bodenunruhe, auch Messungen nach Nakamura (2004) genannt, ermöglicht, die Grundfrequenz (Eigenfrequenz) einer Lockergesteinsbedeckung – für sehr geringe Deformationen – messtechnisch zu bestimmen. Dieses Verfahren basiert auf der Beobachtung, dass das Spektralverhältnis der Fourierspektren zwischen horizontaler und vertikaler Komponente ungefähr bei der Grundfrequenz für Scherwellen oft eine mehr oder weniger gut ausgeprägte Spitze aufweist. Dies gilt sowohl für Messungen von Mikrobeben wie auch, und dies ist von besonderem praktischem Interesse, für Aufzeichnungen der natürlichen (z.B. durch Gezeiten) und der von menschlichen Aktivitäten verursachten Bodenunruhe.

Die Messungen und Auswertungen folgen dabei den Empfehlungen der SE-SAME (2004)-Arbeitsgruppe.

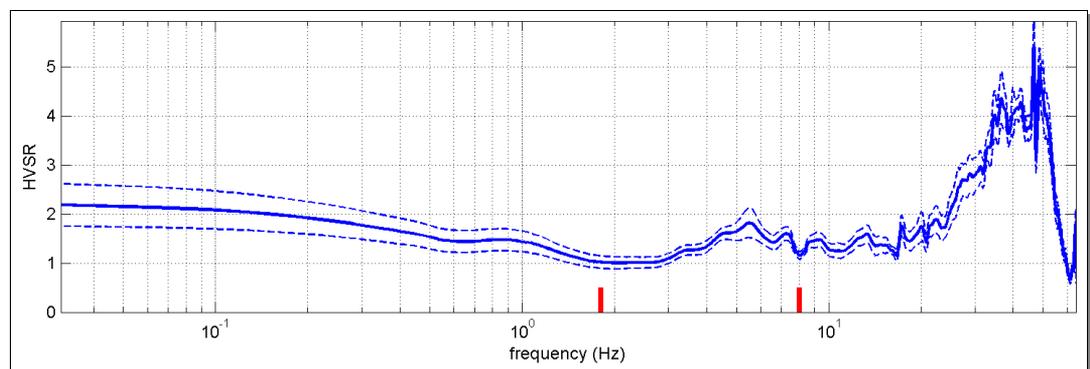


Fig. 2.7 Kurve des Spektralverhältnisses vom Messpunkt Süd am Standort Buchserberg. Die Kurve zeigt ein schwach ausgeprägtes Maximum bei 35 bis 50 Hz – eine Evidenz für sehr unterirdische Felsoberfläche.

2.4 Die Oberflächenwellenanalyse (MASW)

Seit den späten 1990er Jahren wurde vorab an den nordamerikanischen und japanischen geophysikalischen Instituten verschiedener Universitäten und technischer Hochschulen ein Verfahren entwickelt, welches die Möglichkeit bietet, aus herkömmlicher Kompressionswellenseismik Aussagen über die Scherwellengeschwindigkeit zu gewinnen. Die bis dahin als Störsignal möglichst vermiedenen Oberflächenwellenanteile wurden damit plötzlich zum Nutzsignal.

Die Oberflächenwellenanalyse basiert auf zwei grundlegenden Eigenschaften:

- a) Oberflächenwellen zeigen dispersiven Charakter
- b) die Phasengeschwindigkeit der Oberflächenwellen wird wesentlich durch die Scherwellengeschwindigkeit des Mediums beeinflusst.

Dispersion bedeutet, dass die Phasengeschwindigkeit einer (seismischen) Welle abhängig von der Frequenz der im Seismogramm enthaltenen Signalanteile ist. Der Regenbogen ist ein bekanntes Beispiel für dieses Phänomen. Eine Gegenüberstellung der Phasengeschwindigkeit und Frequenz, ein so genannter Dispersionsplot oder Geschwindigkeitsspektrum – respektive die Dispersionskurve, wenn spezifische Phasengeschwindigkeiten zu entsprechenden Frequenzen zugeordnet sind – erlaubt Rückschlüsse auf die Scherwellengeschwindigkeitsverteilung im Untergrund.

In einer natürlichen Umgebung steigt die Scherwellengeschwindigkeit normalerweise mit zunehmender Tiefe an. Entsprechend lassen sich über diese Koppelung die Scherwellengeschwindigkeit in grösserer Tiefe berechnen.

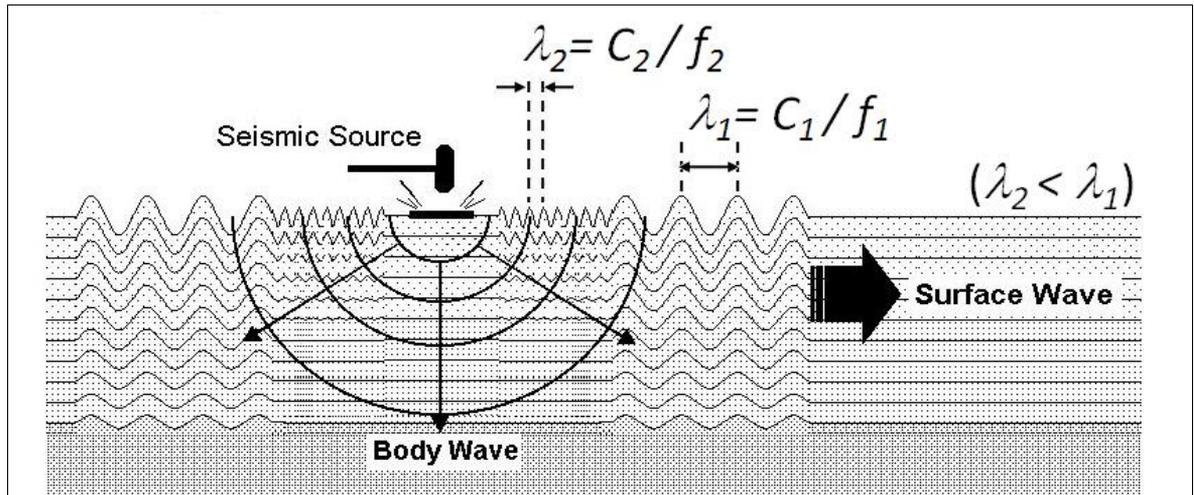


Fig. 2.8 Schematisches Bild der durch die seismische Quelle hervorgerufenen Oberflächenwellen mit der Wellenlänge λ in Beziehung zur Phasengeschwindigkeit c und der Frequenz f . (Bildquelle: www.masw.com)

Die Grundlage für den Inversionsprozess bildet die Annahme, dass in erster Linie die Scherwellengeschwindigkeit die Phasengeschwindigkeit der Rayleigh-Oberflächenwellen in einem geschichteten Medium beeinflusst. Das Poissonverhältnis, die Dichte und die P-Wellengeschwindigkeit zeigen eine untergeordnete Wirkung auf die Phasengeschwindigkeit (Xia 1999).

Seit wenigen Jahren ist es auch mit frei erhältlicher Software möglich, Love-Wellen (Fig. 2.4) zu analysieren. Love-Wellen – quasi die Oberflächenwellenform der Scherwellen – bieten den grossen Vorteil, dass die Grundfrequenz (*fundamental mode*) in der Regel sehr deutlich im Geschwindigkeitsspektrum erkennbar ist und zusätzlich weist sie in aller Regel den höchsten Energieanteil auf (Dal Moro et al. 2007). Daher geschehen wesentlich weniger Fehler in der Interpretation der verschiedenen Oberflächenwellen-Moden. Die in diesem Projekt verwendete Software erlaubt zudem den Inversionsprozess ohne die Zuordnung einzelner Dispersionsäste zu bestimmten Moden (Tokimatsu et al. 1992).

Bei geeigneter Auswahl der Registrierparameter (u.a. genügend lange Horchzeit, tieffrequente Geophone) können aus den Dispersionseigenschaften mittels geeigneter Inversionsprozesse oder Vorwärtsmodellierung die Parameter Scherwellengeschwindigkeit und Mächtigkeit der einzelnen Schichten bestimmt werden.

3 Messdurchführung und Auswertung

3.1 Feldarbeiten

3.1.1 Das Messprogramm

Die seismischen Feldarbeiten umfassten die Datenerfassung auf zwei nahezu rechtwinklig zueinander stehenden Profilen von je 94 m Länge. Es wurden sowohl p-wellenseismische (ZVF¹ und RVF) als auch s-wellenseismische (THF) Messungen durchgeführt.

Im Anschluss an die aktiv-seismischen Untersuchungen auf den beiden Profilen 13SBUB-1 und 13SBUB-2 wurden an 3 Standorten passive Messungen des Hintergrundrauschens zur Bestimmung des Spektralverhältnisses von horizontalen zu vertikalen Komponenten (HVSr) durchgeführt.

Auf einem Messprofil in L-Form wurden bi-direktionale ESAC-Messungen des Hintergrundrauschens durchgeführt (**extended spatial auto-correlation**).

3.1.2 Ablauf der Messungen

Datum	Zeit	Beschreibung
27.05.2013	0800	Anfahrt von Amlikon TG
	0800-0845	Aufbau des Arrays Linie 13SBUB-1
	0845-0850	Tests Oberflächenseismik
	0850-0900	seismische Messungen 13SBUB-1 RVF
	0905-0940	seismische Messungen 13SBUB-1 THF
	0950-1010	seismische Messungen 13SBUB-1 ZVF
	1010-1110	Umbau auf Array 13SBUB-2
	1030-1100	Messung HVSr
	1110-1120	seismische Messungen 13SBUB-2 RVF
	1130-1155	seismische Messungen 13SBUB-2 THF
	1205-1230	seismische Messungen 13SBUB-2 ZVF
	1230-1315	Umbau auf ESAC-array
	1245-1315	Messung HVSr
	1325-1400	Messung HVSr und parallel ESAC
	1400-1430	Aufräumarbeiten
	1430	Rückfahrt nach Amlikon TG

3.1.3 Messequipe seismische Feldarbeiten

a) Personal

Lorenz Keller	dipl. Natw. ETHZ, Geophysiker, Messleitung, Registration
Stefan Fröhlich	Messhelfer, Geophon-Auslage, Bedienung seismische Quelle
Thomas Kuhn	Messhelfer, Geophon-Auslage, Bedienung seismische Quelle

b) Fahrzeuge

1	VW T5 Synchron
---	----------------

¹ Terminologie der einzelnen Quellen- und Empfänger-Komponenten nach R. Herrmanns (2002). Der erste Buchstabe steht für die Orientierung des Empfängers, der 2. und 3. für die Orientierung der Quelle.

ZVF: vertikales Geophon **z** und vertical force (z.B. Hammerschlag) → vertikale Komponente der Rayleighwelle;
RVF: radial ausgerichtetes Horizontal-Geophon und vertical force → horizontale Komponente der Rayleighwelle;
THF: transversales Geophon und horizontal force (z.B. Scherwellenbalken) → Love-Welle.

c) *Seismische Ausrüstung*

- div. Hammer verschiedener Grösse
- 1 Scherwellen-Balken
- 96 Horizontalempfänger 10 Hz
- 96 Vertikalempfänger 4.5 Hz
- div Geophonkabel
- 1 PASI Gemini-2 3-Komponenten-Geophon 2 Hz
- 1 seismische Messapparatur Geode, 24bit A/D der DMT AG, DE-Essen
- 1 Computer für Datenkontrolle und Steuerung
- 2 Kabeltriggerung
- div. Verlängerungskabel 10 - 80 m
- div. Funkgeräte

3.1.4 Der Messumfang

Array	Typ	Empfänger		Quelle		Länge [m]	Anzahl Kanäle	Anzahl Records
		Typ	Δx [m]	Typ	Δx [m]			
13SBUB-1	RVF	radial	2.0	Balken rad	2.0*	94	48	10
13SBUB-1	THF	tangential	2.0	Balken tan	2.0-4.0	94	48	49
13SBUB-1	ZHV	vertikal	2.0	Hammer	2.0	94	48	53
13SBUB-2	RVF	radial	2.0	Balken rad	2.0*	94	48	11
13SBUB-2	THF	tangential	2.0	Balken tan	2.0-4.0	94	48	44
13SBUB-2	ZHV	vertikal	2.0	Hammer	2.0-4.0	94	48	42
HVSR-S,-C,-N	HVSR	3C 2Hz					3	3
ESAC	ESAC	4.5 Hz V	1.0/2.0		6.0	24+48	48	1
TOTAL								213

Tab. 3.1 Zusammenfassung der Messmengen. Gesamte Datenmenge: ca. 500 MBytes.

3.1.5 Zusammenfassung der Registrierparameter aktiven Seismik

- Energiequelle** 8 kg Hammer & Platte resp. Scherwellenbalken
- Abstand Anregungspunkte 2 m – 4 m
- Anzahl Schläge / Anregungspunkt 1 – 4
- Empfängerarray** stationäre Aufstellung
- Anzahl Kanäle 48
- Empfängerabstände 2.0 m
- Anzahl Geophone pro Station 1
- Geophontyp 4.5 Hz vertikal
10 Hz horizontal
- Messapparatur** Geode der Geometrics, San José US-CA
- A/D-Wandlung 24bit
- Abtastrate 0.25 Millisekunden
- Horchzeit 4096 Millisekunden
- Hochpassfilter out
- Tiefpassfilter anti-alias

3.1.6 Zusammenfassung der Registrierparameter passive Seismik HVSR

- Empfänger** Gemini-2 der PASI s.r.l., Turin IT
- Anzahl Kanäle 3
- Geophontyp 3C / 2 Hz Geophone, 1 x vertikal, 2 x horizontal (90°)
- Messapparatur** PASI USB 3D recorder, PASI s.r.l., Turin IT
- A/D-Wandlung 24bit
- Abtastrate 2 Millisekunden
- Horchzeit 20 – 45 Minuten

Hochpassfilter out
Tiefpassfilter anti-alias

3.1.7 Zusammenfassung der Registrierparameter passive Seismik ESAC

Empfängerarray L-förmig (2 m / 1 m)
Anzahl Kanäle 2 x 24
Geophontyp 4.5 Hz vertikal
Messapparatur Geode der Geometrics, San José US-CA
A/D-Wandlung 24bit
Abtastrate 4 Millisekunden
Horchzeit 20 Minuten
Hochpassfilter out
Tiefpassfilter anti-alias

3.1.8 Situation am Standort Buchserberg

a) Koordinatenliste

13SBUB-1	Rechtswert	Hochwert	Kote
101	751377.0	223604.5	1367.7
105	751369.1	223605.4	1368.2
110	751359.3	223606.5	1369.4
115	751349.4	223607.8	1372.0
120	751339.5	223609.0	1374.4
125	751329.7	223610.2	1375.5
130	751319.9	223611.4	1376.8
135	751310.0	223612.5	1379.4
140	751300.1	223613.8	1380.9
145	751290.2	223615.0	1383.5
148	751284.3	223615.5	1384.6

13SBUB-2	Rechtswert	Hochwert	Kote
101	751359.4	223631.2	1369.9
105	751357.8	223623.3	1370.7
110	751355.8	223613.5	1370.7
115	751353.8	223603.7	1370.9
120	751351.9	223593.9	1370.9
125	751349.9	223584.1	1370.6
130	751347.9	223574.2	1370.6
135	751345.9	223564.4	1370.9
140	751343.9	223554.6	1371.5
145	751342.0	223544.8	1371.8
148	751341.2	223538.9	1372.0

Tab. 3.2 Koordinatenliste der Geophonstationen. Die Stationen der ESAC-Linie sind in jenen der Refraktion/MASW-Linien enthalten.

b) Situationsübersicht

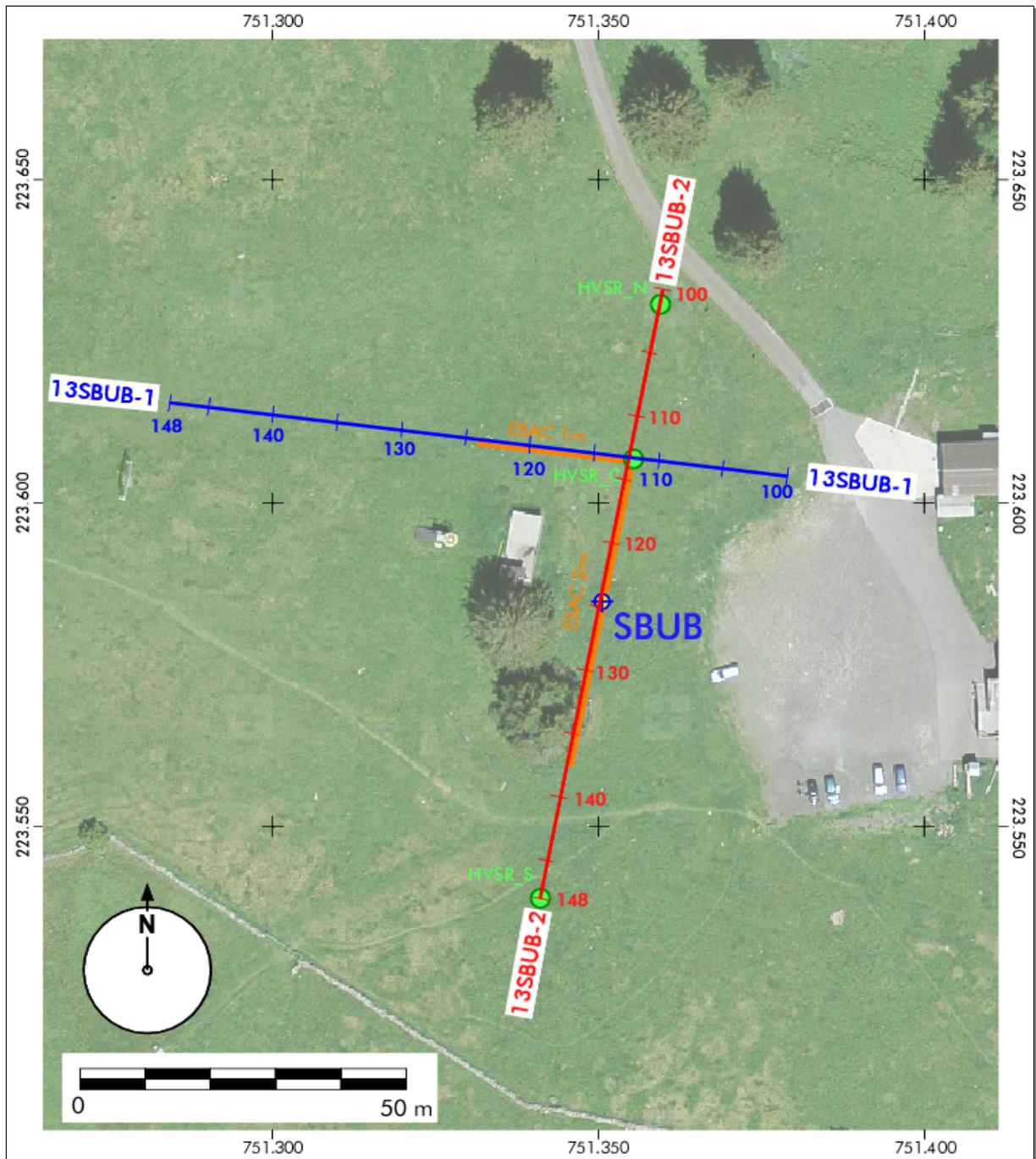


Fig. 3.1 Situationsübersicht mit dem Standort der Erdbebenstation SBUB und den verschiedenen Mess-Arrays:
 13SBUB-1 (blau) und 13SBUB-2 (rot): Refraktionstomographie und MASW-Array
 ESAC (orange): passive Seismik – L-förmige passive Autokorrelation
 HVSR: (grün) passive Seismik – Analyse der Spektralverhältnisse

3.1.9 Die äusseren Messbedingungen, lokale Besonderheiten

Die Messarbeiten fanden bei günstigen Witterungs- und Umweltbedingungen und zu Messbeginn bei leichtem Schneefall statt. Der Boden war sehr feucht, woraus sich eine gute Ankopplung der Quelle und Empfänger ergab. Externe Lärmquellen konnten keine beobachtet werden. Leichter Wind begleitete die Messarbeiten. Bei einigen Aufzeichnungen auf der Messlinie 13SBUB-2 wurden sehr starke $16 \frac{2}{3}$ Hz-Interferenzen unbekanntes Ursprungs beobachtet.

Die Datenqualität kann allgemein als gut bezeichnet werden und eignet sich für eine erfolgreiche Auswertung. Als möglicherweise für die Oberflächenwellenanalyse problematisch zeigte sich schon während der Feldmessungen, dass nur eine geringmächtige Lockergesteinsbedeckung des Festgesteins besteht und dieses Lockergestein zusätzlich von Blöcken durchsetzt ist. So sind nur wenig lineare seismische Events in den Daten erkennbar.

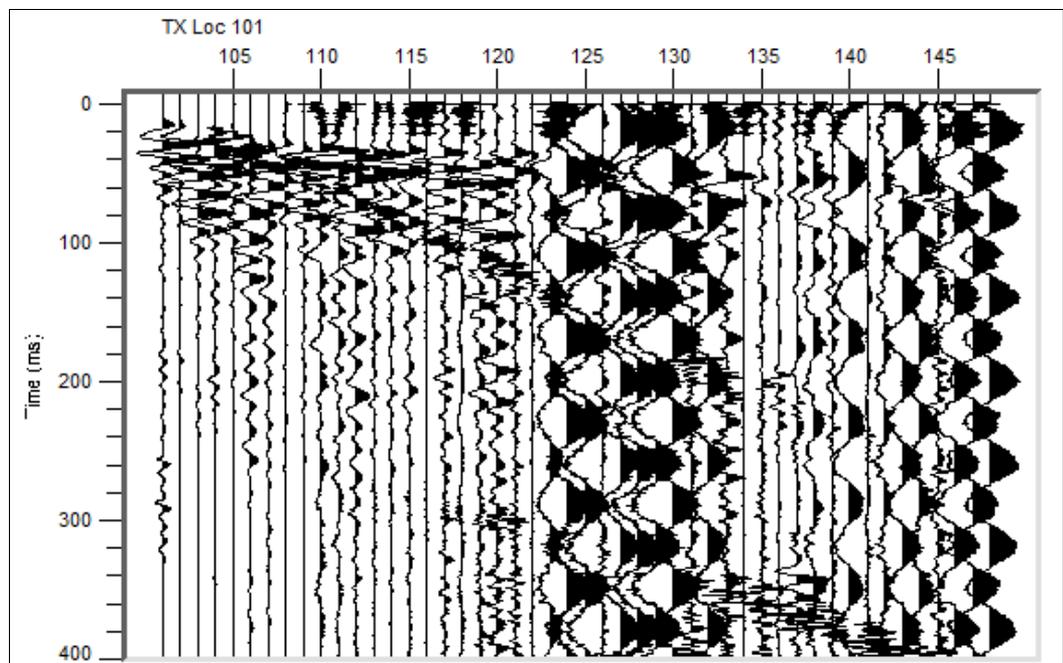


Fig. 3.2 Beispiel von einer Feldaufzeichnung mit teilweise starker $16 \frac{2}{3}$ Hz-Lärmkontamination.

3.2 Datenbearbeitung und Ergebnisse

3.2.1 Allgemeines Bemerkungen zur Datenbearbeitung und Interpretation

a) Personal

Lorenz Keller dipl. Natw. ETHZ, Geophysiker
Giancarlo dal Moro PhD in geophysics, Univ. Trieste.

b) Verwendete Software

Seismic PrePro und Picking: SPW der Parallel Geosc. Corp → www.parallelgeo.com
Refraction seismic: RAYFRACT der Intelligent Resources Inc. → www.rayfract.com
VSP inversion: RAYFRACT der Intelligent Resources Inc. → www.rayfract.com
MASW: winMASW V5.0 prof. der Eliosoft → www.winMASW.com
Gridding: SURFER der Golden Software, Inc. → www.goldensoftware.com
Graphische Aufbereitung: CANVAS der ACDSYSTEMS → www.acdsee.com
Text & Tabellen: OpenOffice der Apache Software Foundation → www.openoffice.org

3.2.2 Die refraktionsseismische Auswertung der S-Wellen-Daten

a) Datenvorbereitung

Das Editing besteht in der Zuordnung der geometrischen Informationen der Schuss- und Empfängerpunkte zu den seismischen Daten. Zusätzlich werden Seismogramme geringer Datenqualität gefiltert oder gelöscht, notwendige Ungenauigkeiten in der Nullzeitbestimmung korrigiert und eine rudimentäre Geschwindigkeitsbestimmung einzelner Refraktoren mittels linearer Regression vorgenommen.

b) Bestimmung der Ersteinsatzeiten

Die Darstellung sämtlicher Seismogramme eines Quellpunktes erlaubt die einfache Bestimmung der Laufzeiten zwischen Quellpunkt und Empfängerstation. Durch manuelles Setzen von Zeitmarken auf jedem Seismogramm werden die Laufzeiten der Schallimpulse (hier der S-Wellen) bestimmt (siehe Fig. 3.4 und Fig. 2.6, a)).

Dabei wird ein iteratives Verfahren mit verschiedenen Kombinationen unterschiedlicher Parameter:

- als *shot*, *receiver* oder *CMP gather*
- unterschiedliche Verstärkung (AGC, div. Gain, spur-normiert)
- mit und ohne Anwendung unterschiedlicher Filter (low/high/bandpass, notch, median)
- unterschiedliche Polarität, unterschiedliche Färbung
- sowie mit und ohne Darstellung der von den Nachbarstationen projizierten Picks der Ersteinsatzeiten angewendet.

In mehreren Durchläufen werden so die bestimmten Laufzeiten der Ersteinsätze so optimiert.

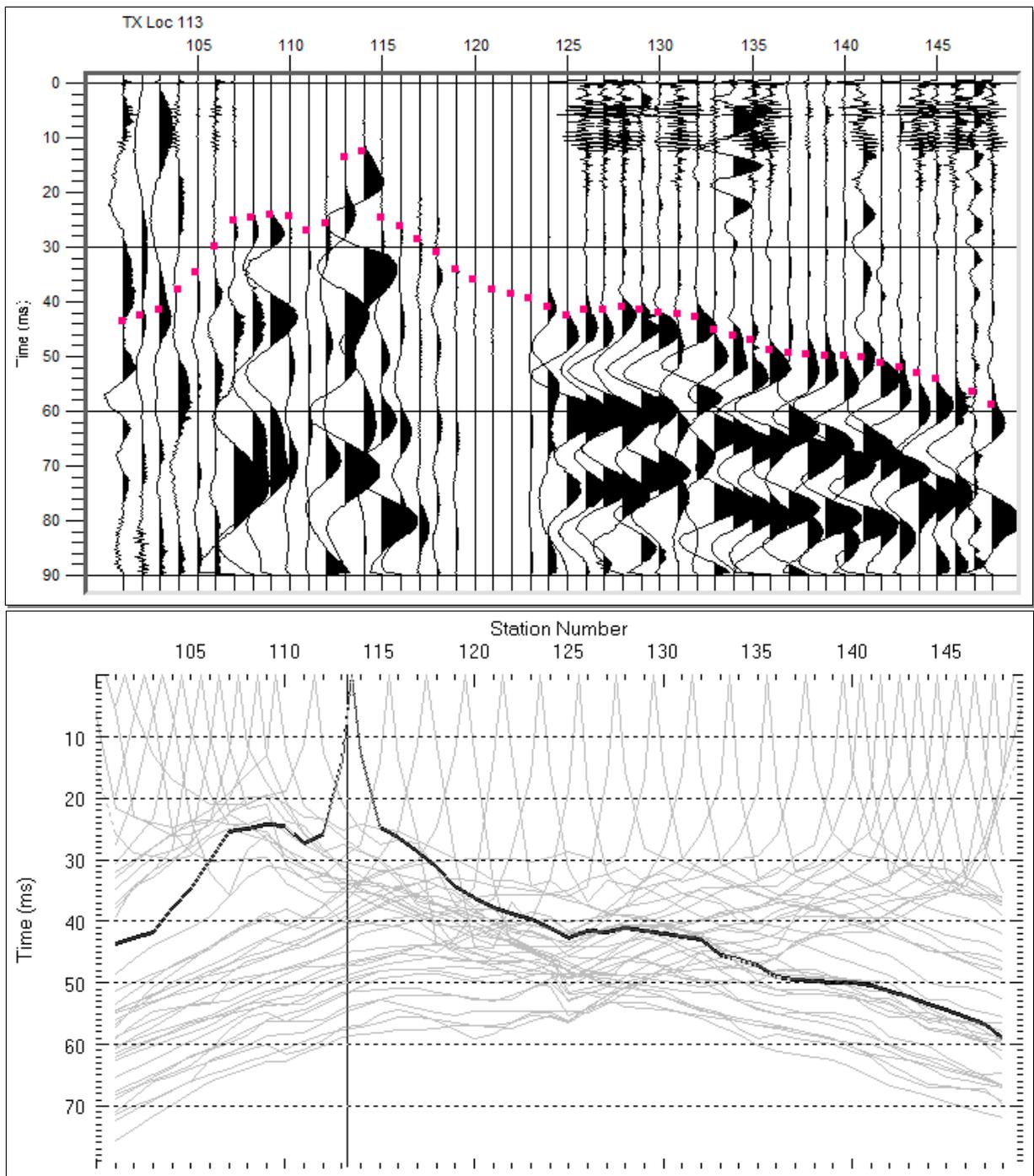


Fig. 3.3 oben: Beispiel eines shot gathers der Scherwellendaten vom Messprofil 13SBUB-1 mit farblich hervorgehobenen Ersteinsatzeiten (ohne Verstärkung, spur-normierter Amplituden und ohne Filter)
unten: Dargestellt ist die Gesamtheit aller Laufzeitkurven des Profils 13SBUB-1.

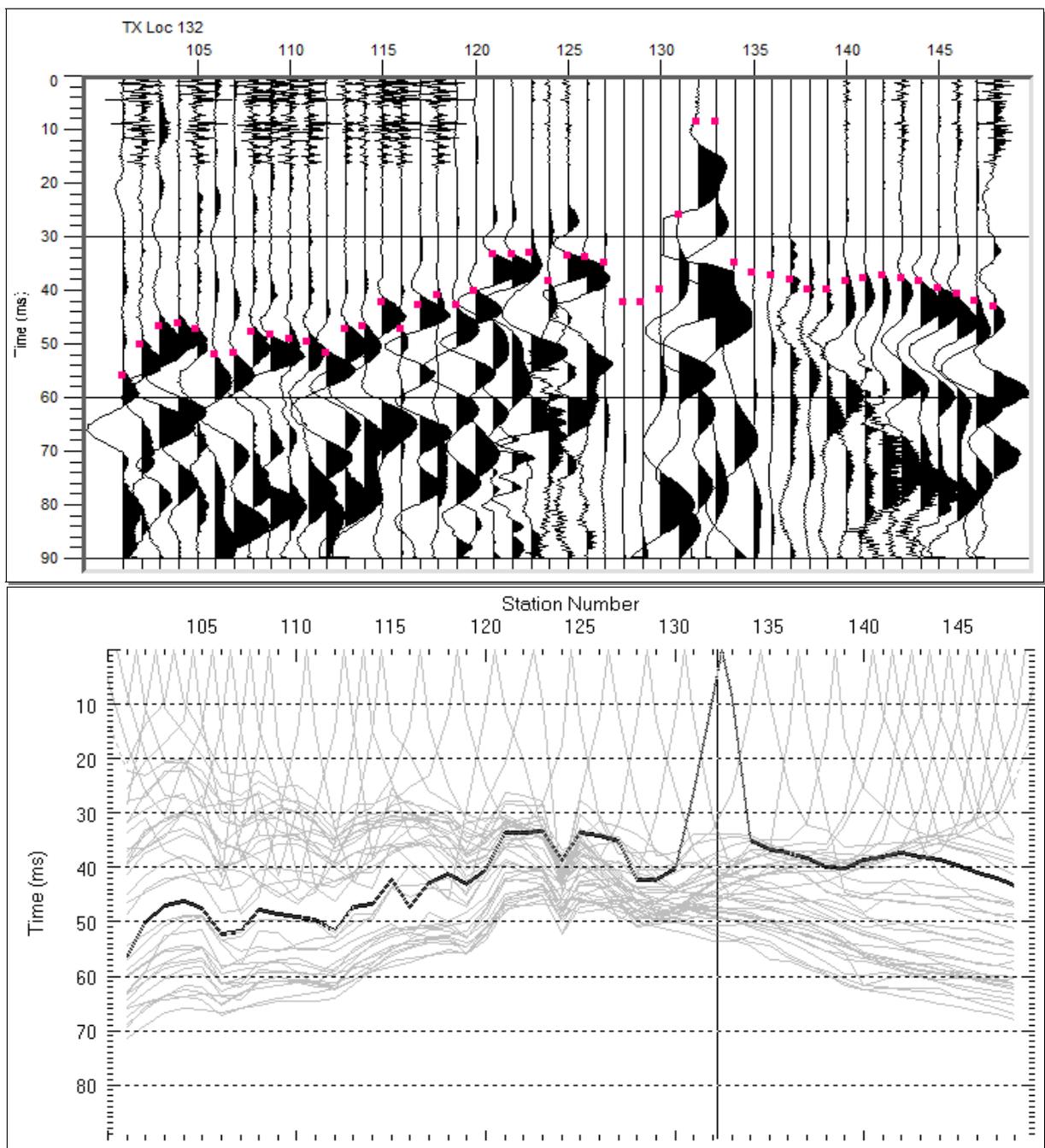


Fig. 3.4 oben: Beispiel eines shot gathers der Scherwellendaten vom Messprofil 13SBUB-2 mit farblich hervorgehobenen Ersteinsatzeiten (ohne Verstärkung, spur-normierter Amplituden und ohne Filter)
 unten: Dargestellt ist die Gesamtheit aller Laufzeitkurven des Profils 13SBUB-2.

c) Ableitung eines geeigneten Startmodells der Inversion (Fig. 2.8, b)

Die refraktionsseismische Auswertung wurde nach dem XTV-Verfahren der CMP-Methode (Δt -v-Methode) berechnet. Dies erlaubt, auch starke Geschwindigkeitskontraste zwischen Locker- und Festgestein besser abzubilden. Dabei werden die Laufzeiten zu gemeinsamen Mittelpunkten (CMP) sortiert und durch zeitliche Ableitung der Quelle-Empfänger-Distanzen die Geschwindigkeiten bestimmt.

d) Dateninversion (Modellierung)

Das Startmodell wird iterativ zum finalen Modell mittels wavepath eikonal traveltime tomography (WET tomography, Schuster 1993; Watanabe 1999) in bis zu 20 Schritten verfeinert (Fig. 2.6 c, Fig. 3.5 und Fig. 3.6).

Der RMS-Fehler (siehe Angaben weiter unten) ist dabei ein Gütemass der Inversion. Je geringer der Fehlerwert ausfällt, desto besser widerspiegeln die modellierten Laufzeiten die tatsächlichen Messwerte.

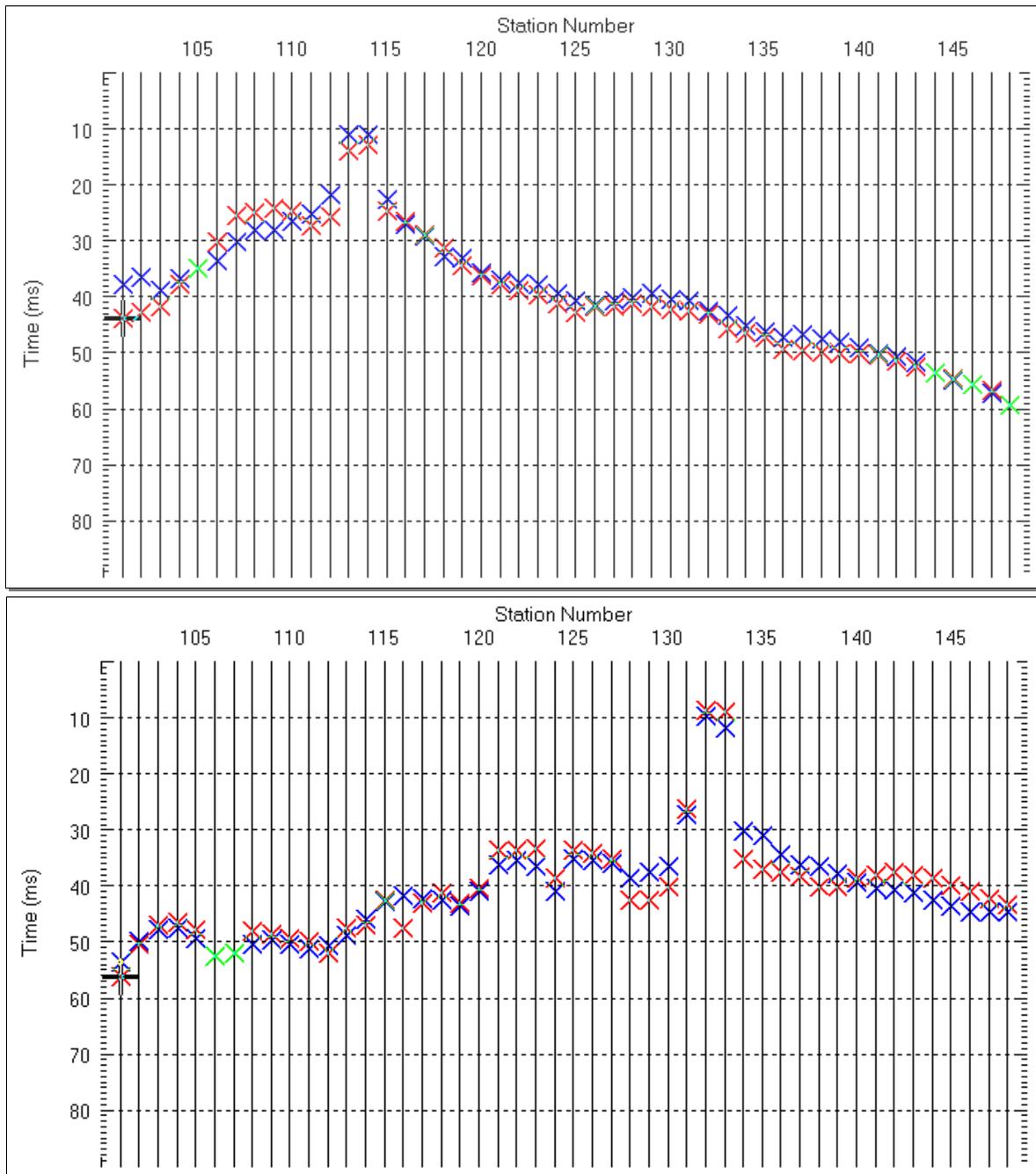


Fig. 3.5 Beispiel der modellierten Laufzeiten eines Schusses vom Messprofil 13SBUB-1 (oben) resp. 13SBUB-2 (unten): rote Kreuze markieren die tatsächlich gemessenen Laufzeiten, die blauen Kreuze die modellierten Werte. Grüne Kreuze stehen für die Übereinstimmung der Modelldaten mit den Messdaten. Der RMS-Fehler aller modellierten Laufzeiten in Bezug auf die Messwerte der Messlinie 13SBUB-1 beträgt 2.9 ms (normierter Fehler 3.8 %), jener auf Messlinie 13SBUB-2 2.5 ms (normiert: 3.5 %).

e) Ergebnisse

Das Ergebnis der Refraktionstomographischen Auswertung besteht aus zwei Illustrationen: Die seismische Geschwindigkeitsverteilung und die Wellenfaddichte.

- ▶ Die Geschwindigkeitsverteilung bildet die seismischen Geschwindigkeiten farbcodiert ab und wird von Isotachen überlagert. Aus der Geschwindigkeitsverteilung lassen sich lithologische Aussagen ableiten und Angaben zur Gesteinsgüte gewinnen.
- ▶ Die Wellenfaddichte zeigt ebenfalls farbcodiert die Anzahl Wellenpfade pro Flächeneinheit. Sie ist ein Mass für den Geschwindigkeitskontrast einzelner Einheiten und somit bestens geeignet, die Felsoberfläche zu definieren.

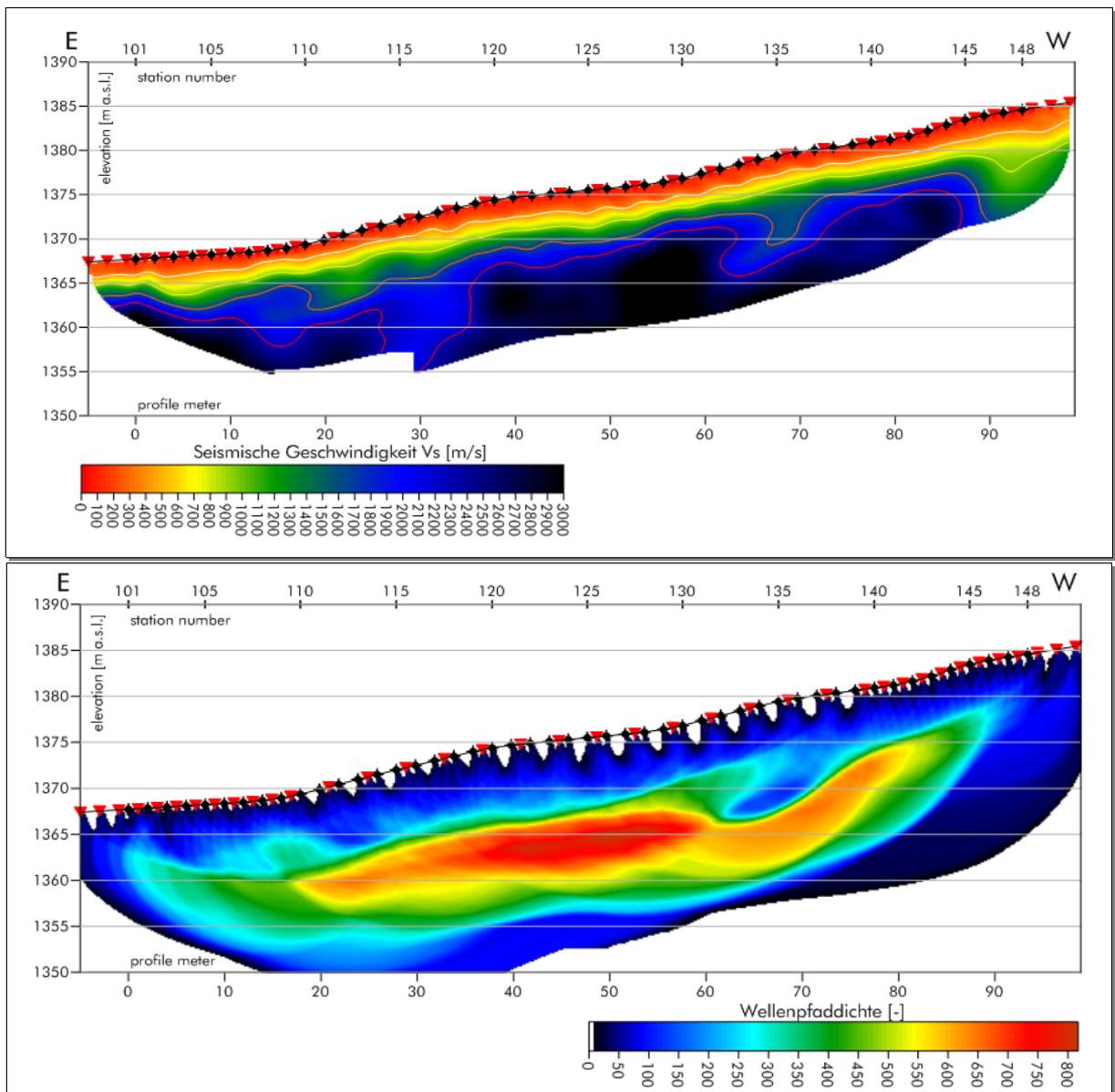


Fig. 3.6 Oben: Refraktionstomographische Geschwindigkeitsverteilung V_s beim Profil 13SBUB-1. Folgende Isotachen sind gezeichnet: 450 m/s (weiss), 1000 m/s (gelb), 1700 m/s (orange) und 2300 m/s (rot). Unten: Refraktionstomographische Wellenfaddichte beim Profil 13SBUB-1. Sie charakterisiert die Refraktivität einzelner Grenzflächen, bei hohen Werten ist mit einem (lithologisch bedingten) Geschwindigkeitssprung zu rechnen.

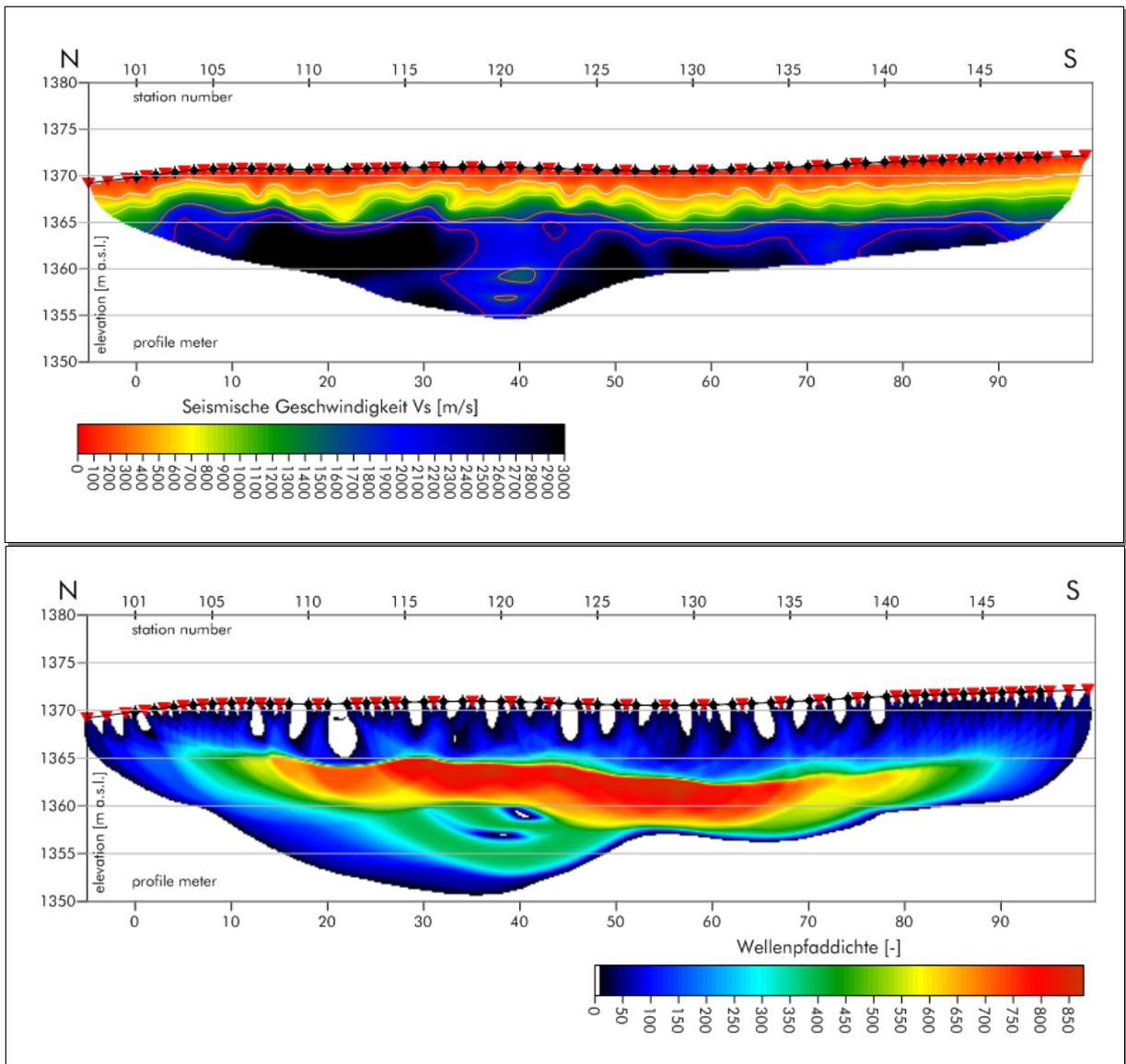


Fig. 3.7 *Oben: Refraktionsseismische Geschwindigkeitsverteilung V_s beim Profil 13SBUB-2. Folgende Isotachen sind gezeichnet: 450 m/s (weiss), 1000 m/s (gelb), 1700 m/s (orange) und 2300 m/s (rot). Im Bereich zwischen Station 106 und 118 ab einer Tiefe 7.20 m sind die Messwerte auf das Maximum von 3000 m/s fixiert.*
Unten: Refraktionsseismische Wellenpaddichte beim Profil 13SBUB-2. Sie charakterisiert die Refraktivität einzelner Grenzflächen, bei hohen Werten ist mit einem (lithologisch bedingten) Geschwindigkeitssprung zu rechnen.

Die Genauigkeit der Inversion wird mit einem normierten RMS-Fehler von 3.1 % bei einem maximalen absoluten Fehler von 16.1 ms (Profil 13SBUB-1) resp. 2.8 % normRMSE bei 15.3 ms maxErr (Profil 13SBUB-2) angegeben.

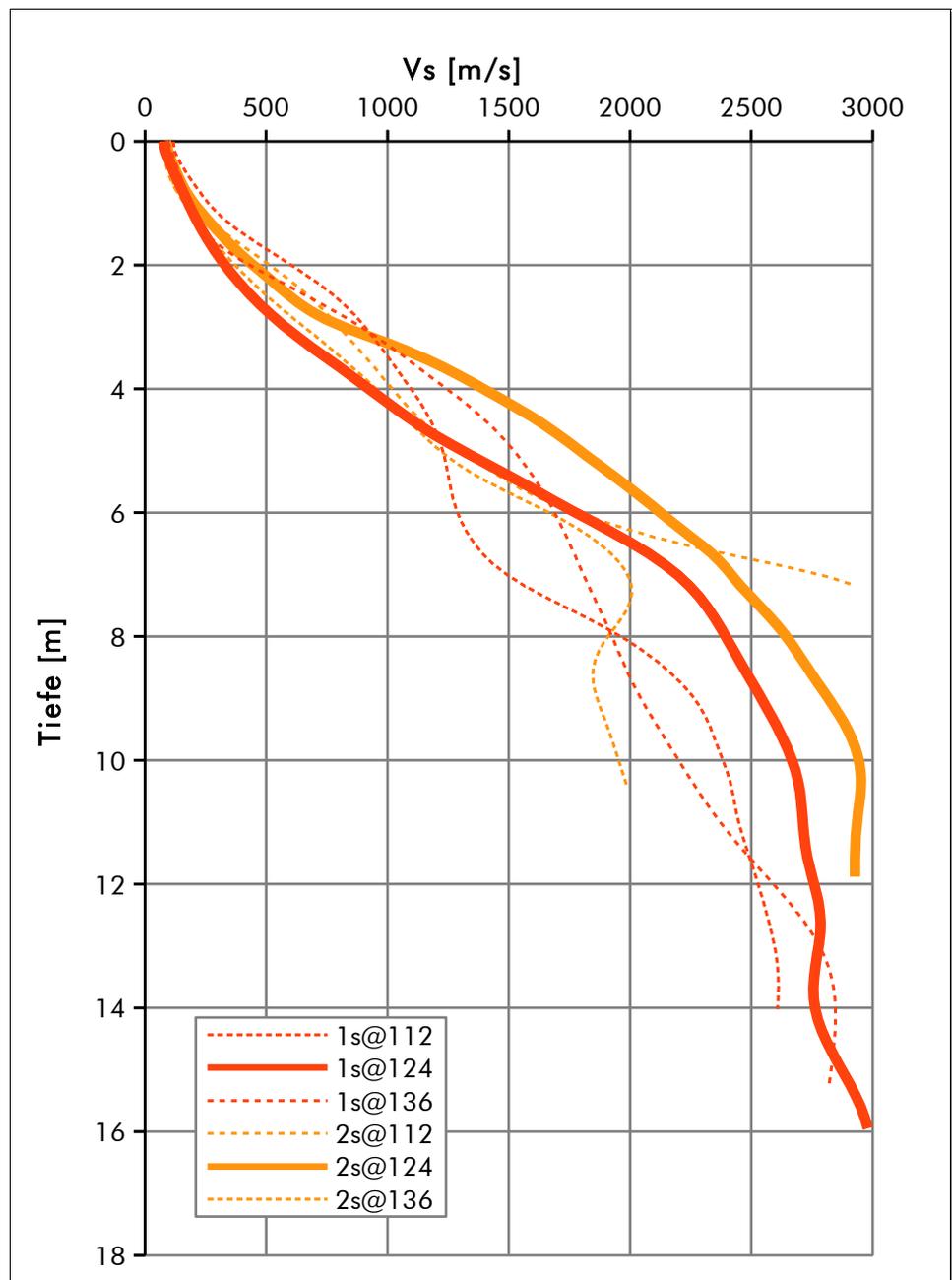


Fig. 3.8 Seismische Scherwellengeschwindigkeiten V_s aus den beiden refraktionstomographischen Profilen 13SBUB-1 und 13SBUB-2. Die Geschwindigkeitsfunktionen wurden jeweils aus den beiden zweidimensionalen Geschwindigkeitsverteilungen im Abstand von 24 m extrahiert. Die dicken Linien zeigen die Geschwindigkeitsfunktionen in den jeweiligen Mitten der Messlinien.
Die Messwerte vom Profil 2s@112 wurden in der Tiefe 7.2 m aufgrund der unrealistischen Messwerte ($V_s > 3000$ m/s) für die Darstellung abgeschnitten.

f) Bewertung der Ergebnisse

Die refraktionstomographischen Sektionen zeigen generell eine vermutlich zu homogene Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten. Der Vergleich mit den Ergebnissen der weiter unten beschriebenen Verfahren legt den Schluss nahe, dass der 2-m-Stationsabstand zu gross gewählt ist um auch oberflächennah eine gute Auflösung sowohl lateral als auch vertikal zu gewährleisten. Trotzdem sind die bestimmten seismischen Geschwindigkeiten gute Mittelwerte über einige Meter.

3.2.3 Die refraktionsseismische Auswertung der P-Wellen-Daten

a) Datenverarbeitung und Ergebnisse

Die seismischen Messdaten wurden auch hinsichtlich der P-Wellen-Geschwindigkeitsverteilung refraktionstomographisch ausgewertet. Das Verfahren entspricht jenem der Scherwellenseismik, wobei nur die ZVF-Daten ausgewertet wurden.

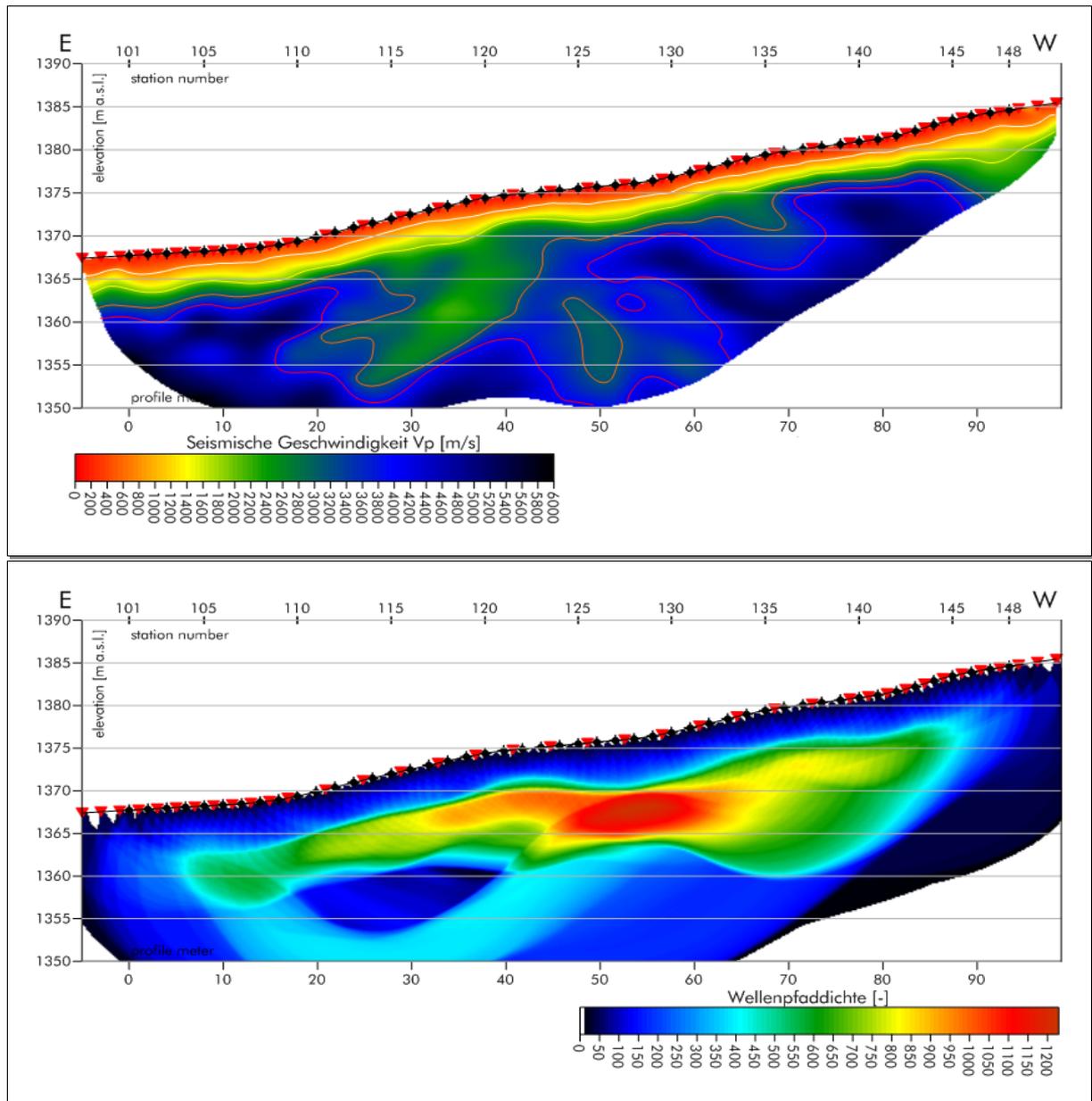


Fig. 3.9 Oben: Refraktionsseismische Geschwindigkeitsverteilung V_p beim Profil 13SBUB-1. Folgende Isotachen sind gezeichnet: 800 m/s (weiss), 2000 m/s (gelb), 3200 m/s (orange) und 4400 m/s (rot).
 Unten: Refraktionsseismische Wellenfaddichte beim Profil 13SBUB-1. Sie charakterisiert die Refraktivität einzelner Grenzflächen, bei hohen Werten ist mit einem (lithologisch bedingten) Geschwindigkeitssprung zu rechnen.

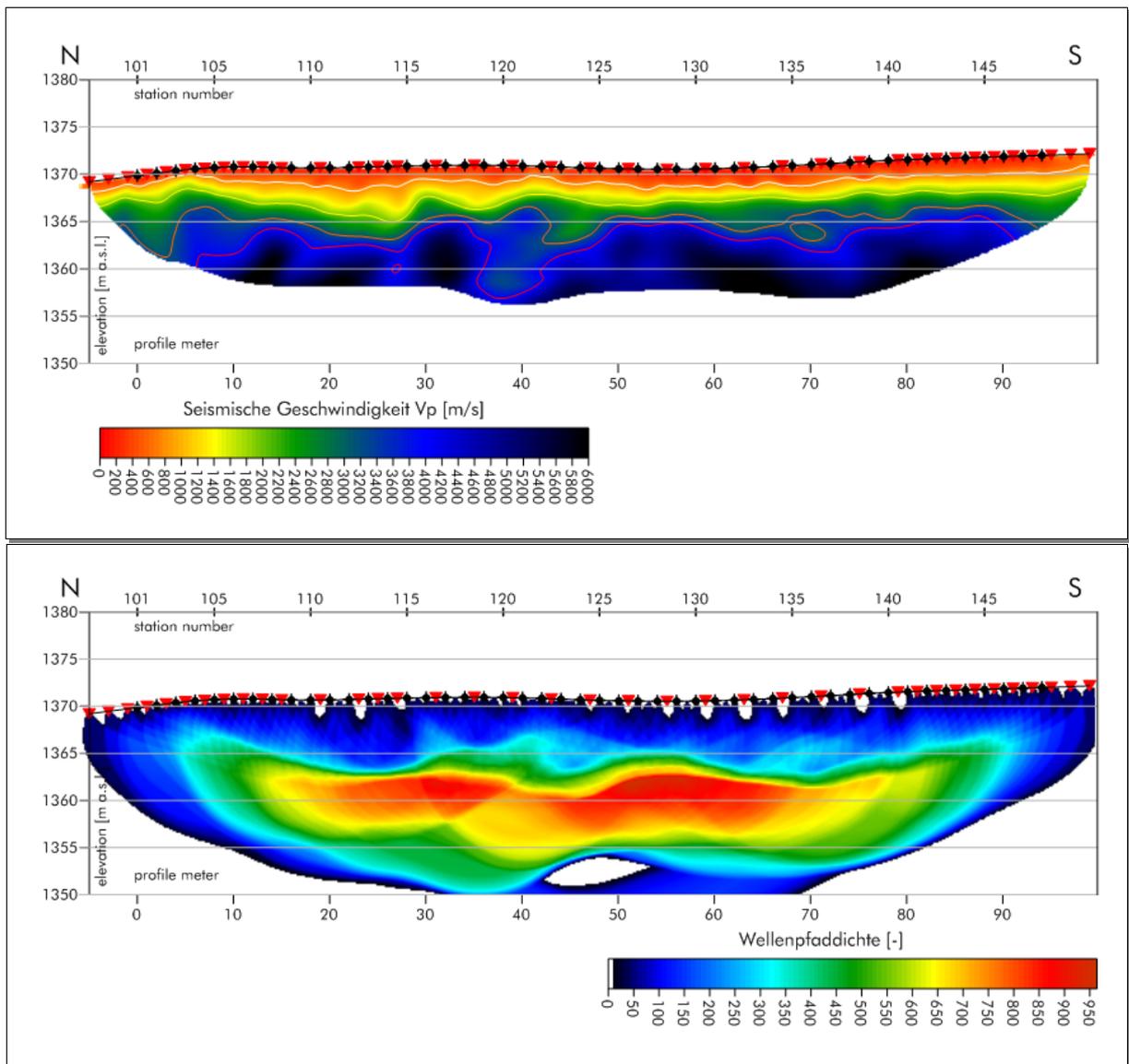


Fig. 3.10 Oben: Refraktionsseismische Geschwindigkeitsverteilung V_p beim Profil 12SBUB-2. Folgende Isotachen sind gezeichnet: 800 m/s (weiss), 2000 m/s (gelb), 3200 m/s (orange) und 4400 m/s (rot).

Unten: Refraktionsseismische Wellenfaddichte beim Profil 13SBUB-2. Sie charakterisiert die Refraktivität einzelner Grenzflächen, bei hohen Werten ist mit einem (lithologisch bedingten) Geschwindigkeitssprung zu rechnen.

Die Genauigkeit der Inversion wird mit einem normierten RMS-Fehler von 3.3 % bei einem maximalen absoluten Fehler von 8.7 ms (Profil 13SBUB-1) resp. 3.3 % normRMSE bei 4.2 ms maxErr (Profil 13SBUB-2) angegeben.

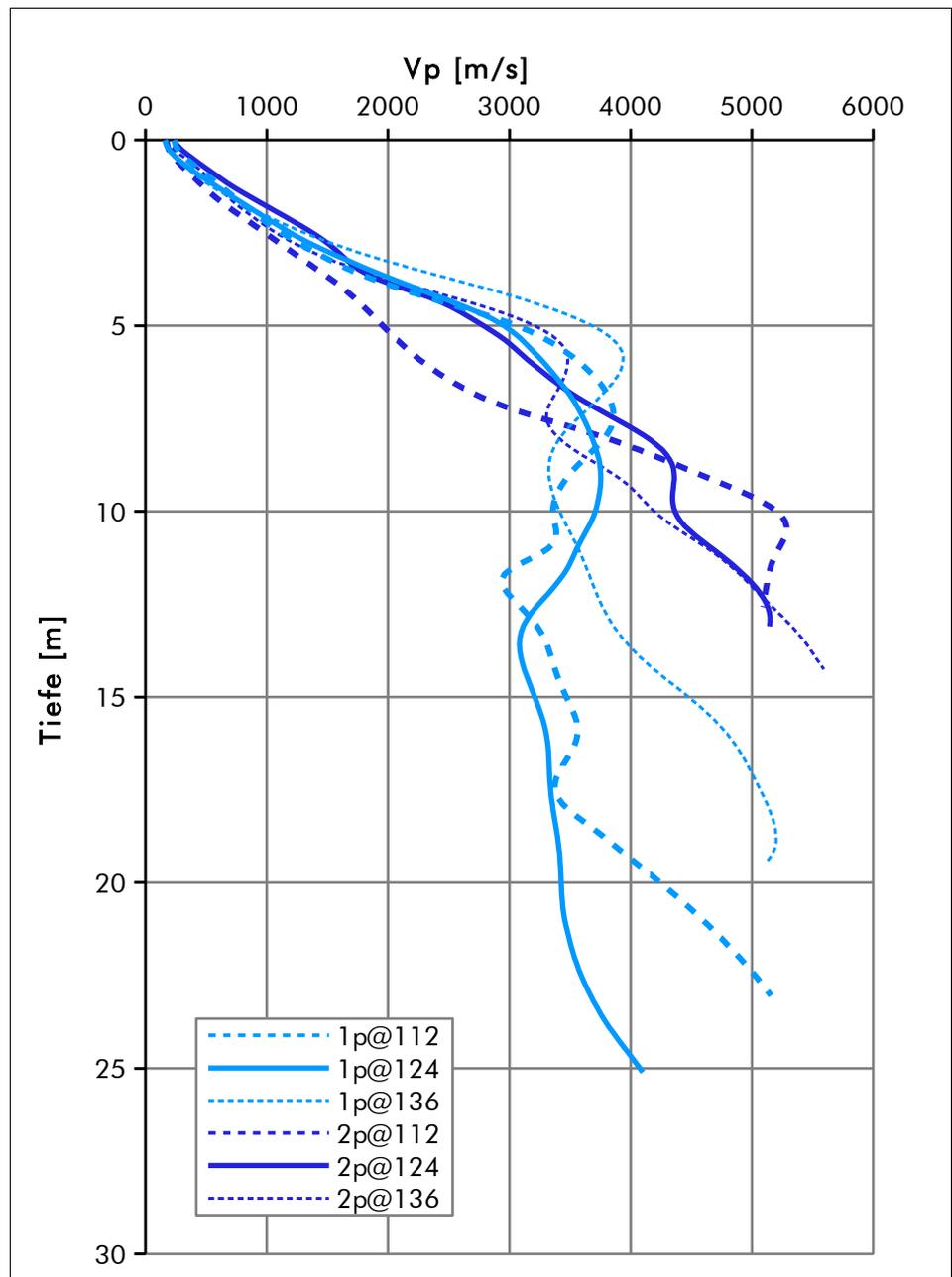


Fig. 3.11 Seismische Kompressionswellengeschwindigkeiten V_p aus den beiden refraktionstomographischen Profilen 13SBUB-1 und 13SBUB-2. Die Geschwindigkeitsfunktionen wurden jeweils aus den beiden zweidimensionalen Geschwindigkeitsverteilungen im Abstand von 24 m extrahiert. Die dicken Linien zeigen die Geschwindigkeitsfunktionen in den jeweiligen Mitten der Messlinien.

b) Bewertung der Ergebnisse

Die Geschwindigkeitssektionen der P-Wellen zeigen sehr ähnliche Strukturen wie jene der S-Wellen (siehe Fig. 3.12), allerdings generell eine vermutlich zu homogene Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten. Der Vergleich mit den Ergebnissen der weiter unten beschriebenen Verfahren legt den Schluss nahe, dass der 2-m-Stationsabstand zu gross gewählt ist um auch oberflächennah eine gute Auflösung sowohl lateral als auch vertikal zu gewährleisten. Trotzdem sind die bestimmten seismischen Geschwindigkeiten gute Mittelwerte über einige Meter.

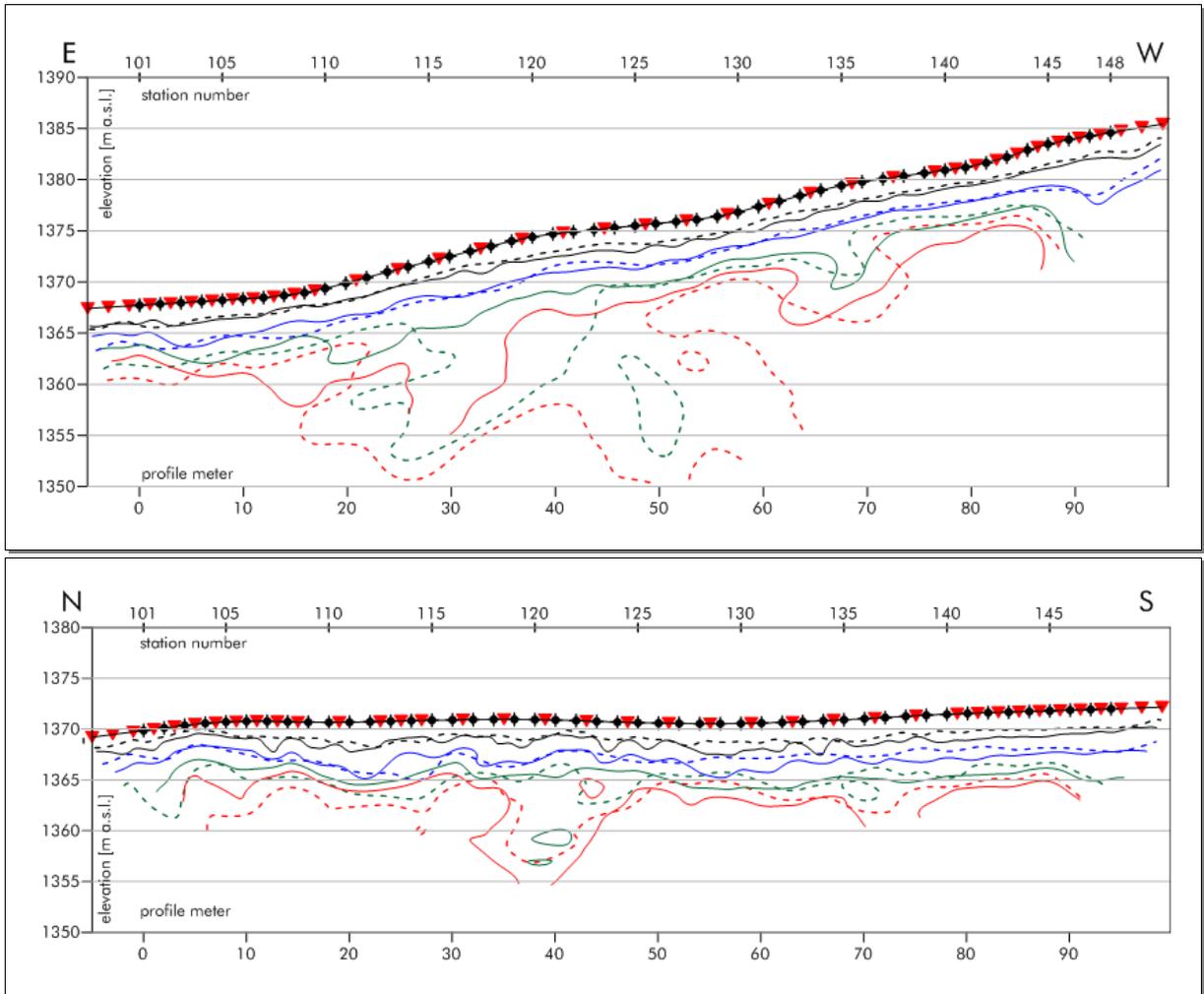


Fig. 3.12 Der Vergleich der Strukturen zwischen den Ergebnissen der V_p - (gestrichelte Isotachen) und V_s - (durchgezogene Isotachen)-Refraktionsseismik zeigt eine überraschend gute Übereinstimmung.

3.2.4 Bestimmung der Grundfrequenz der Lockergesteinsschicht

Die passiven seismischen Daten des Hintergrundrauschens an den drei Standorten Nord (N), Mitte (C) und Süd (S) (siehe Karte Fig. 3.1) wurden mit der Software winMASW gemäss den Empfehlungen der SESAME (2004)-Arbeitsgruppe durchgeführt und hinsichtlich der spektralen Verhältnisse der Horizontal- zu Vertikalkomponenten ausgewertet (HVSr, *horizontal to vertical spectral ratio*).

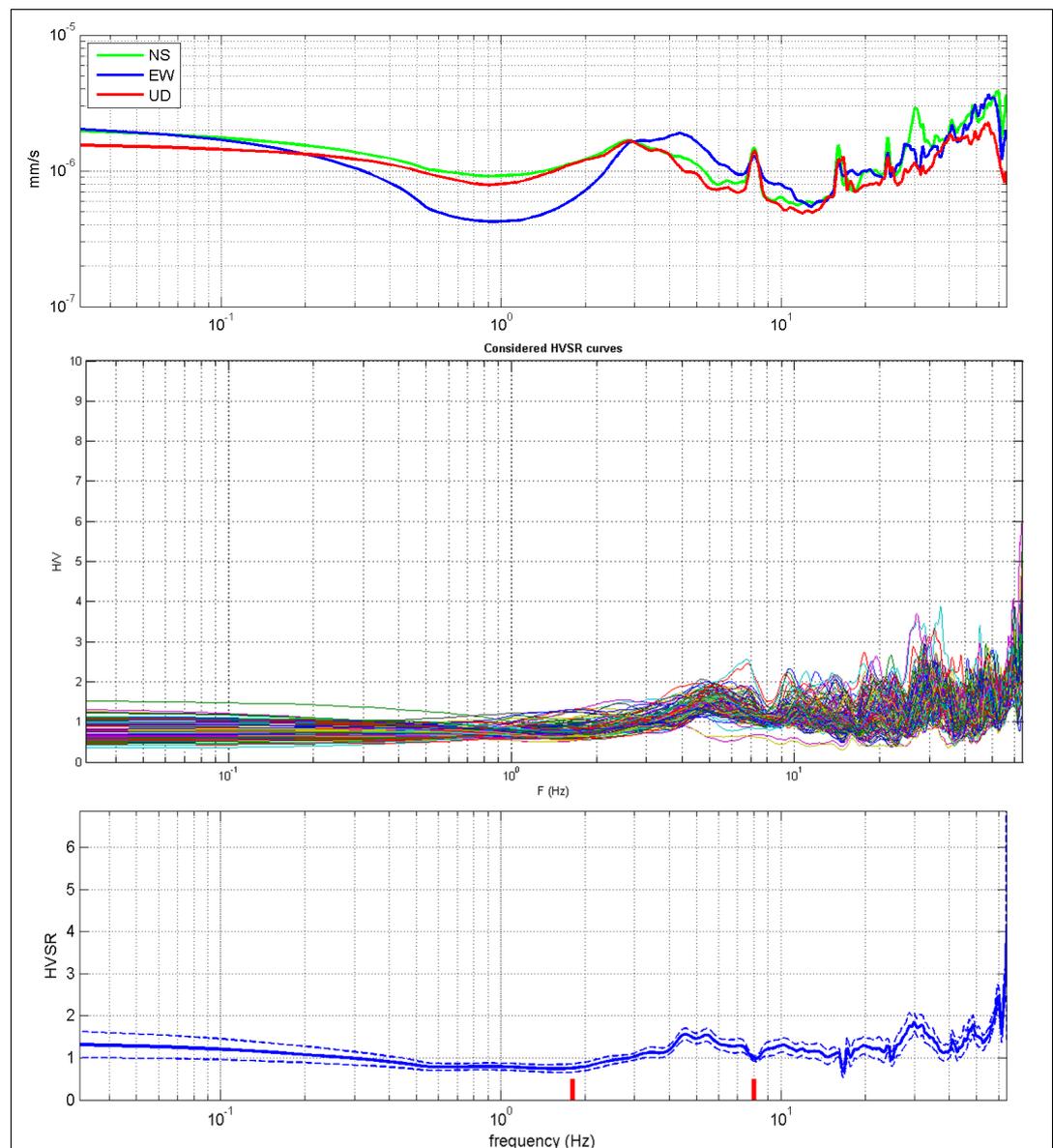


Fig. 3.13 *Oben: Frequenzspektren der drei Komponenten vom Messpunkt Nord.
Mitte: Spektralverhältnisse der horizontalen zu vertikalen Komponenten sämtlicher analysierter Zeitefenster von 20 Sekunden Dauer.
Unten: Mittelwert der Spektralverhältnisse (durchgezogen) +/- σ (gestrichelt).*

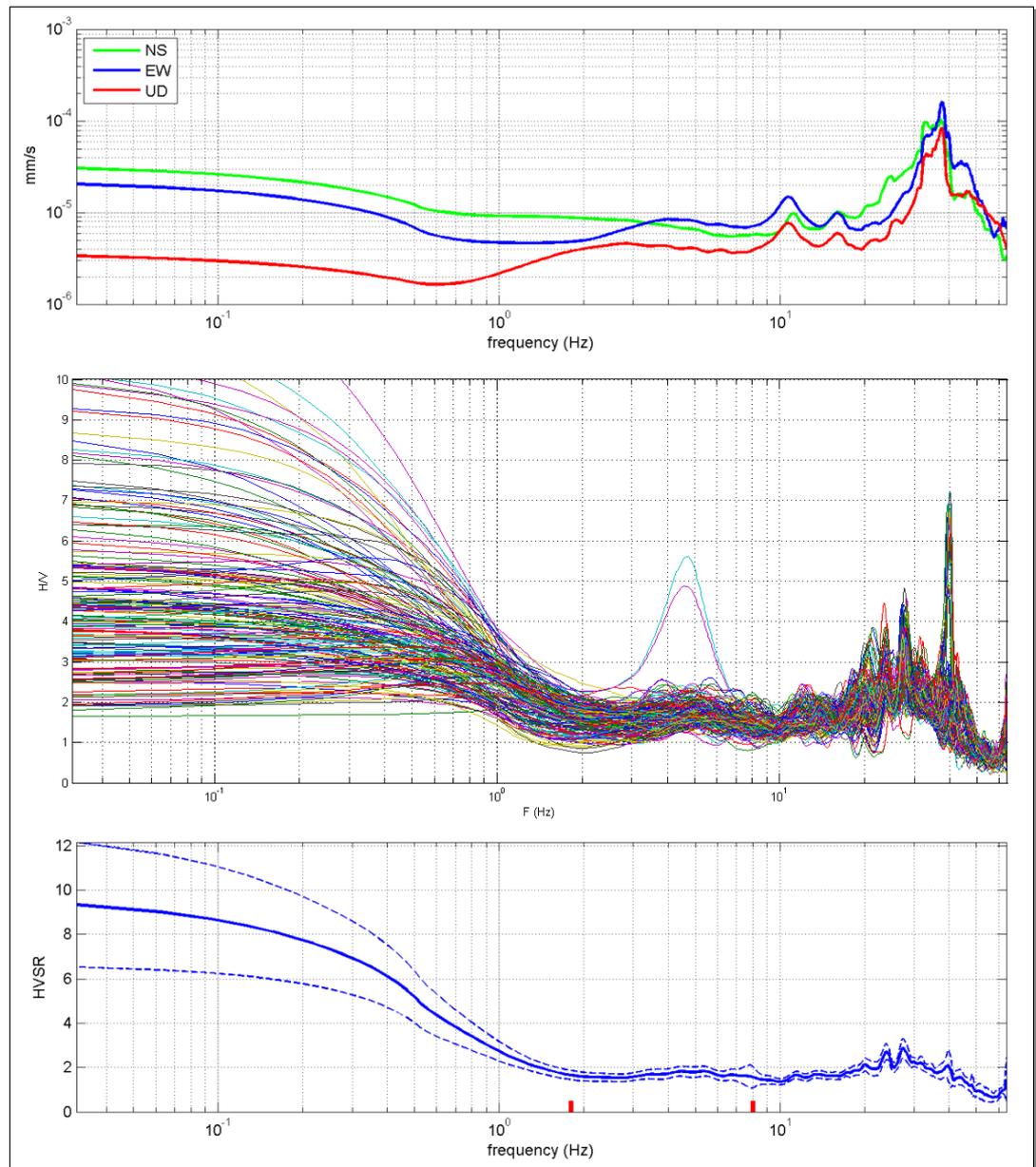


Fig. 3.14 *Oben: Frequenzspektren der drei Komponenten vom Messpunkt Mitte.
Mitte: Spektralverhältnisse der horizontalen zu vertikalen Komponenten sämtlicher analysierter Zeitfenster von 20 Sekunden Dauer.
Unten: Mittelwert der Spektralverhältnisse (durchgezogen) $\pm \sigma$ (gestrichelt).*

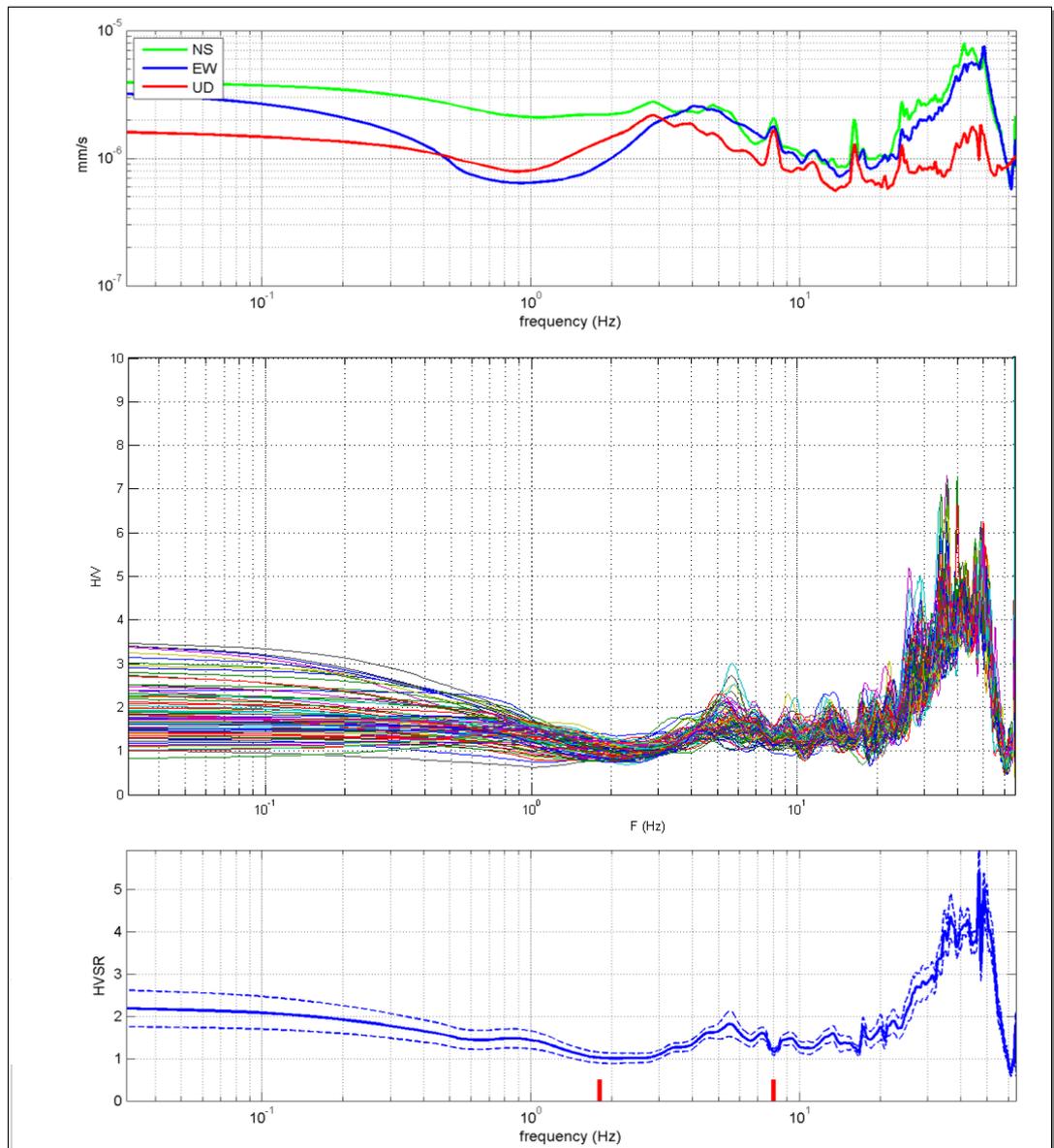


Fig. 3.15 Oben: Frequenzspektren der drei Komponenten vom Messpunkt Süd.
 Mitte: Spektralverhältnisse der horizontalen zu vertikalen Komponenten sämtlicher analysierter Zeitfenster von 20 Sekunden Dauer.
 Unten: Mittelwert der Spektralverhältnisse (durchgezogen) $\pm \sigma$ (gestrichelt).

a) *Bewertung der Ergebnisse*

Der Vergleich der drei Spektralverhältniskurven Nord, Mitte und Süd zeigt im tieferen Frequenzbereich <20 Hz ein recht einheitliches Bild. Während die beiden Kurven Nord und Mitte auch für das höhere Frequenzband annähernd parallel verlaufen und keine signifikante Spitze aufweisen, zeigt die Kurve vom Messpunkt Süd einen doch recht deutlichen Peak bei ungefähr 35-50 Hz. Dieser dürfte mit einem recht tief liegenden Impedanzkontrast an der Grenze zwischen Lockergestein und Fels korrelieren.

Diese Beobachtung wird in den Grundzügen von der Refraktionsseismik gestützt.

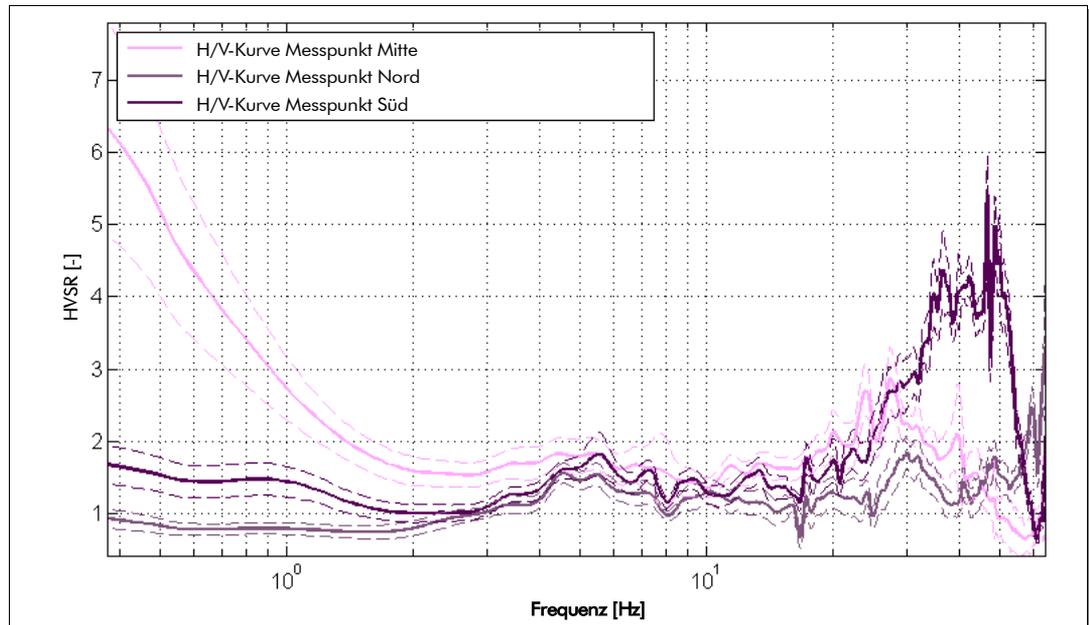


Fig. 3.16 Vergleich der Spektralverhältniskurven der drei Messpunkte am Standort Buchserberg.

3.2.5 Auswertung der Oberflächenwellen (MASW)

a) Vorabbemerkung

Die Komplexität und Heterogenität der Messdaten vom Standort Buchserberg erlaubte nicht, die Analyse der Oberflächenwellendaten gemäss einem allgemein gültigen Schema durchzuführen. So konnte selbst bei Daten von Quellpunkten mit wenigen Metern Distanz zu einander kaum Gemeinsamkeiten im Gehalt der Oberflächenwellen gefunden werden. Dies führen wir einerseits auf sehr unterschiedlich mächtige Lockergesteinsbedeckung (0 bis 3 m) – eventuell durchsetzt von grösseren Blöcken – sowie komplexe Verhältnisse im Festgestein zurück.

Aus diesen Gründen wurden die einzelnen Daten einem aufwändigen, von Datensatz zu Datensatz unterschiedlichem Auswerteverfahren unterzogen.

b) Messlinie 13SBUB-1, Ostende

Aus der Gesamtheit der Einzelrekords von der Messlinie 13SBUB-1 wurden Daten mit subjektiv vielversprechendem Anteil an Oberflächenwellen zu beiden Enden je ein Datensatz der ZVF, RVF und THF-Komponenten ausgewählt. (Zur Terminologie der einzelnen Komponenten siehe die Fussnote auf Seite 10.)

In einem ersten Schritt wurden über sämtliche Spuren des Rekords (Offset-Bereich von 5 bis 81 m) die Geschwindigkeitsspektren der Phasengeschwindigkeit weiter untersucht (Fig. 3.17).

Mit einer Vorwärtsmodellierung (Fig. 3.18) wurde im Folgenden versucht, ein V_s -Modell zu finden, welches den Messdaten genügt. Für die Modellierung der Seismogramme wurde im Wesentlichen die Summation der Moden nach Herrmann (2002) angewendet. Die Referenzfrequenz zur Berücksichtigung der Dämpfung wurde dabei bei 30 Hz festgelegt (was ungefähr den Messdaten entspricht).

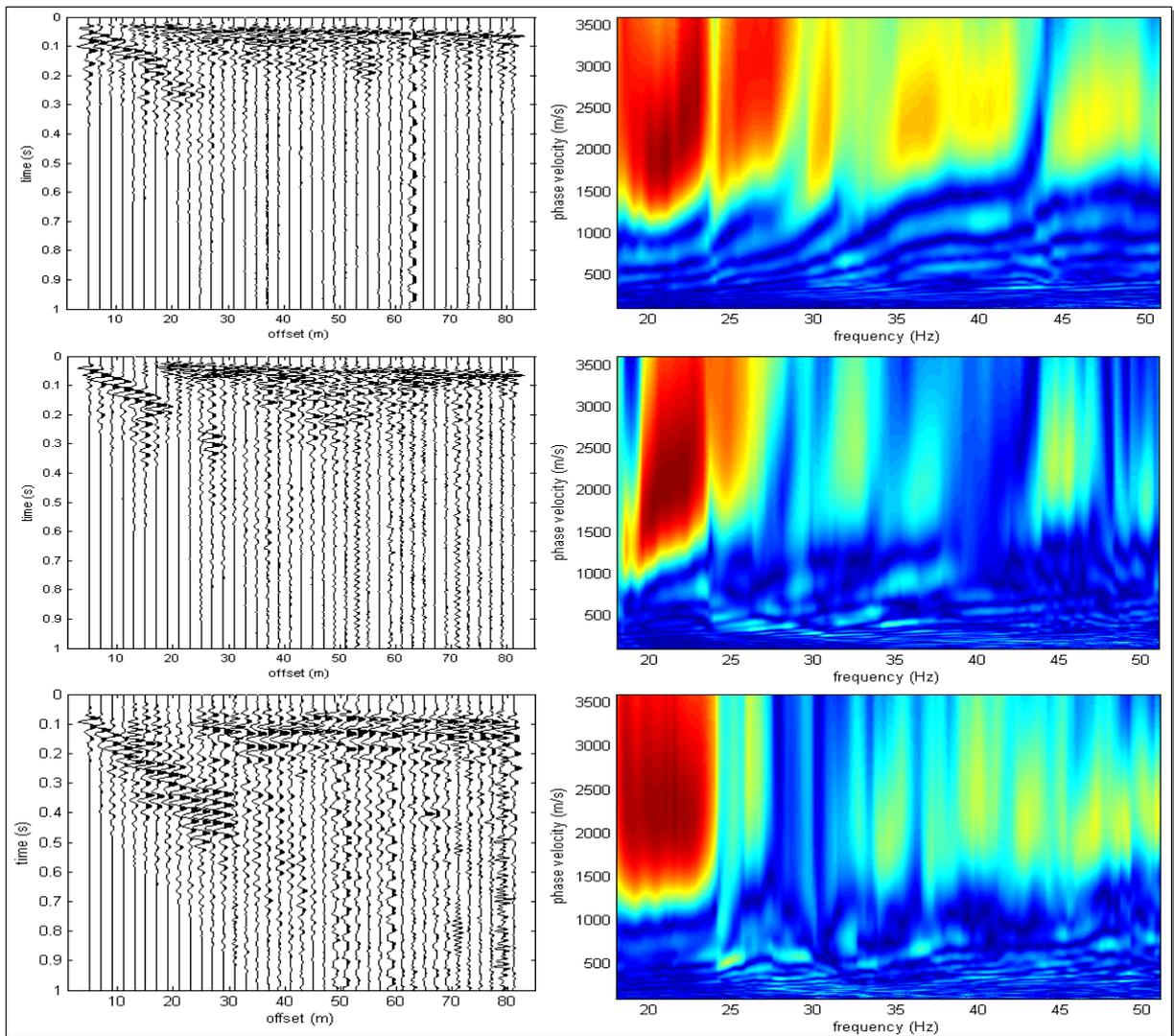


Fig. 3.17 Seismische Aufzeichnungen (links) und entsprechende Phasenspektren (rechts) 13SBUB-1, Quelle am östlichen Profilende:
 oben: vertikale Anregung und Empfänger, Rayleigh-Welle
 mitte: vertikale Anregung und radiale Empfänger, Rayleigh-Welle
 unten: transversale Anregung und Empfänger, Love-Welle.

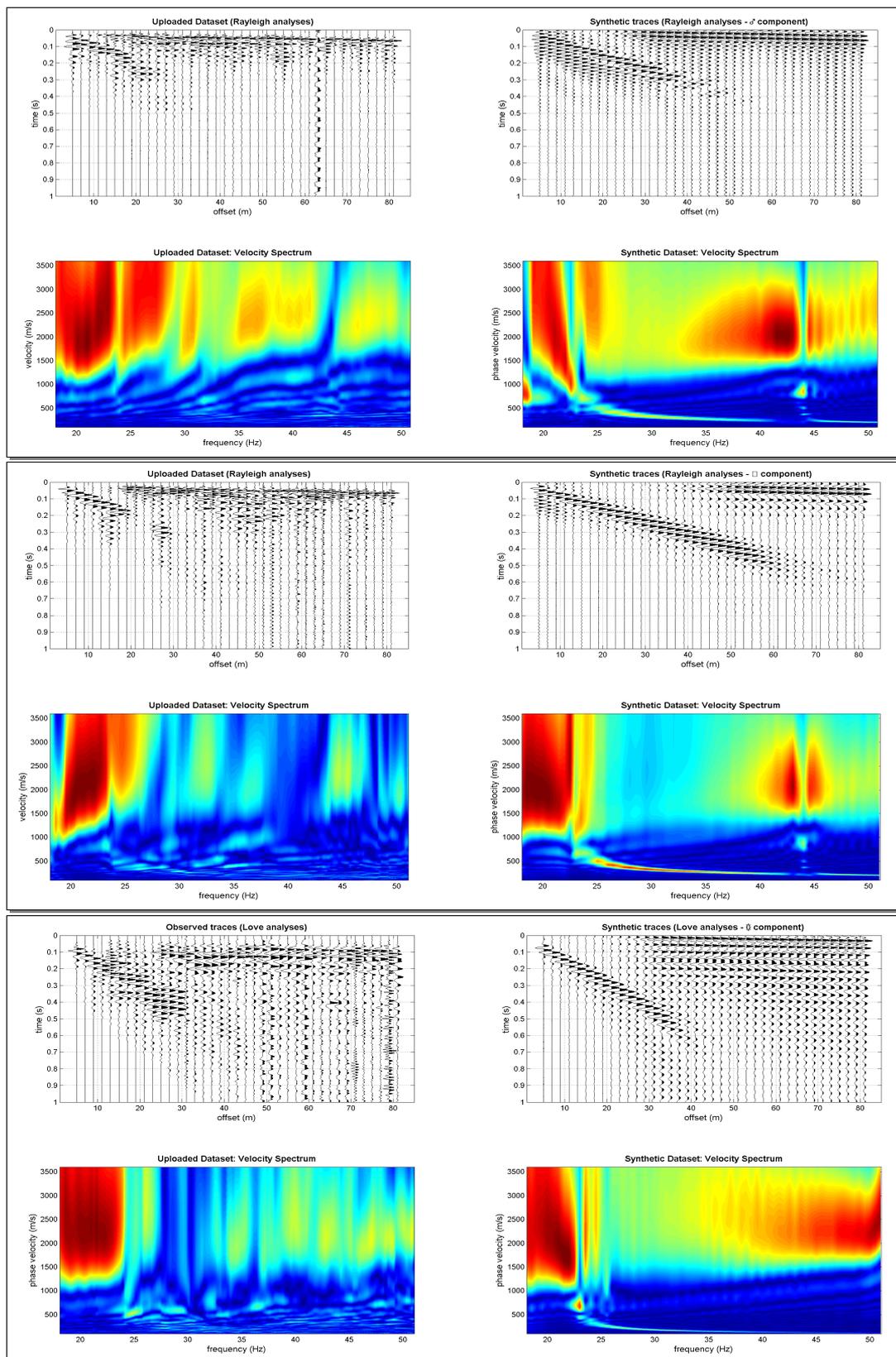


Fig. 3.18 Ergebnisse der Vorwärtsmodellierung im ganzen Offsetbereich, Profil 13SBUB-1, Quelle am östlichen Profilende:
 Links: Messdaten, rechts: Synthetische Daten.
 Oben: ZVF-Daten (vertikale Komponente der Rayleigh-Welle)
 Mitte: RVF-Daten (radialer Komponente der Rayleigh-Welle)
 Unten: THF-Daten (Love-Welle)

Die Beobachtung der Daten zeigt (siehe Fig. 3.19), dass die ersten ungefähr 15 Spuren sich durch einen hohen Anteil an sehr langsamen Oberflächenwellen des fundamentalen Mode (ca. 150 m/s, Bereich A in der Figur) auszeichnen, während die Spuren mit grösserem Offset von Moden höherer Ordnung (Bereich B) geprägt sind. Durch die starke Dämpfung der Signale verliert sich die hohe Energie rasch mit zunehmendem Offset.

Daher wurde eine zweite Vorwärtsmodellierung der seismischen Daten nur im Offsetbereich zwischen 5 und 15 m durchgeführt (Fig. 3.20).

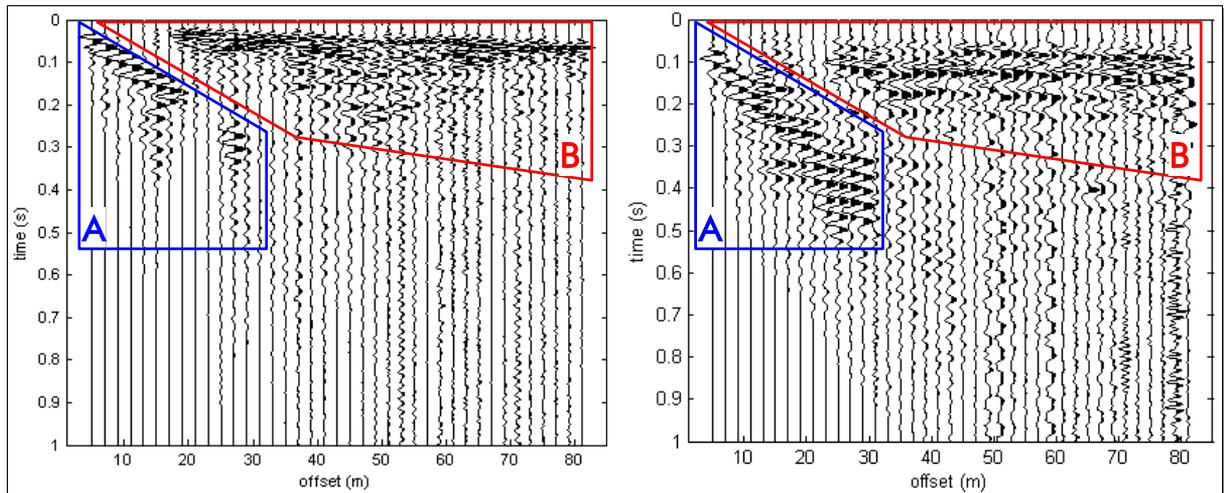


Fig. 3.19 links: Seismische ZVF-Daten (Vertikalkomponente der Rayleigh-Welle)
 rechts: Seismische THF-Daten (Love-Welle)
 Mit A sind die Daten der Empfängerstationen im nahen Offset-Bereich mit sehr langsamen Oberflächenwellen bezeichnet, mit B jener der schnellen Oberflächenwellen.

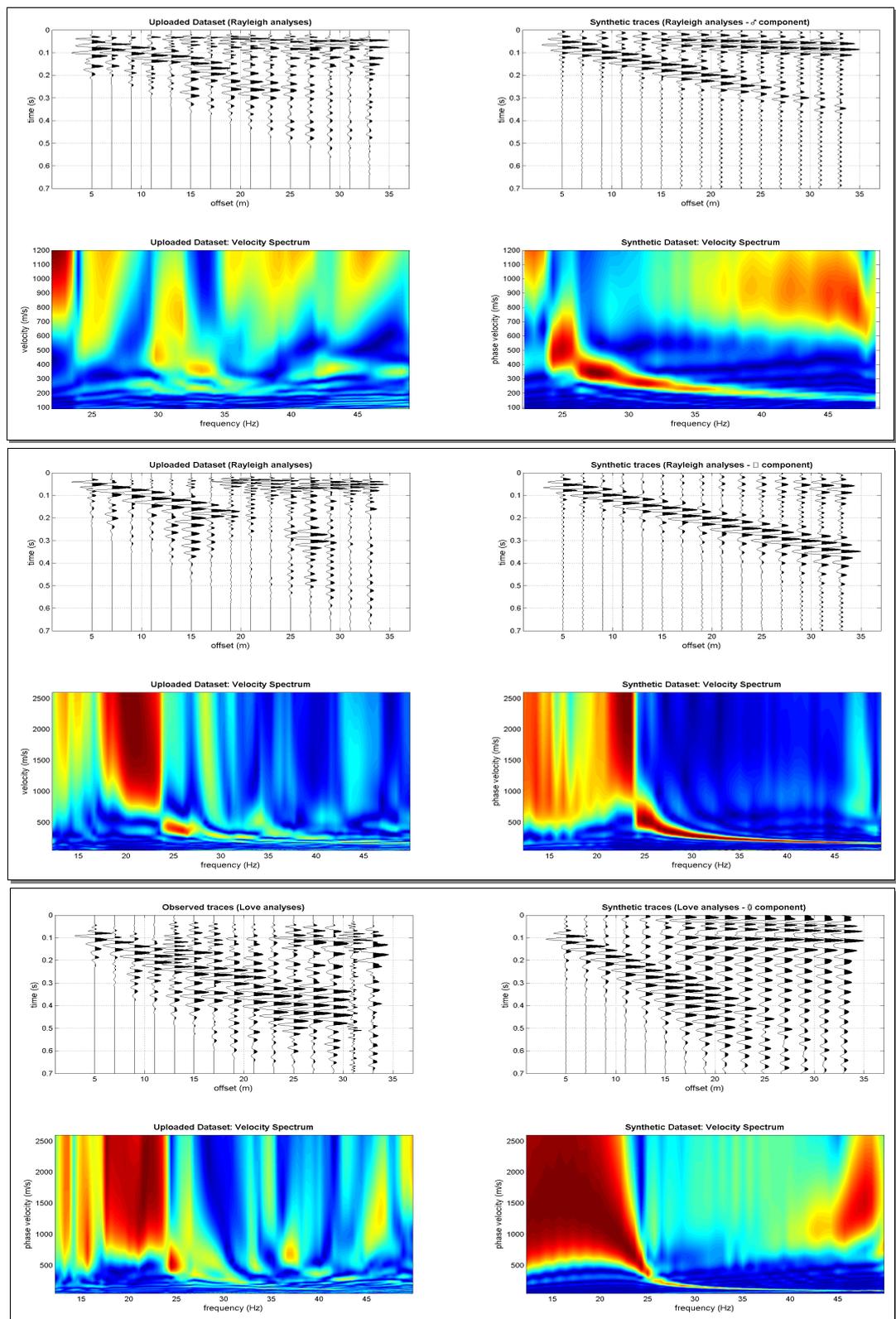


Fig. 3.20 Ergebnisse der Vorwärtsmodellierung im nahen Offset-Bereich (Bereich A in Fig. 3.19), Profil 13SBUB-1, Quelle am östlichen Profilende:
 Links: Messdaten, rechts: Synthetische Daten.
 Oben: ZVF-Daten (vertikale Komponente der Rayleigh-Welle)
 Mitte: RVF-Daten (radialer Komponente der Rayleigh-Welle)
 Unten: THF-Daten (Love-Welle).

Zur Überprüfung dieser zweiten, schussnahen Vorwärtsmodellierung wurde eine gemeinsame Analyse sowohl der Gruppen- als auch der Phasengeschwindigkeit durchgeführt (Fig. 3.21).

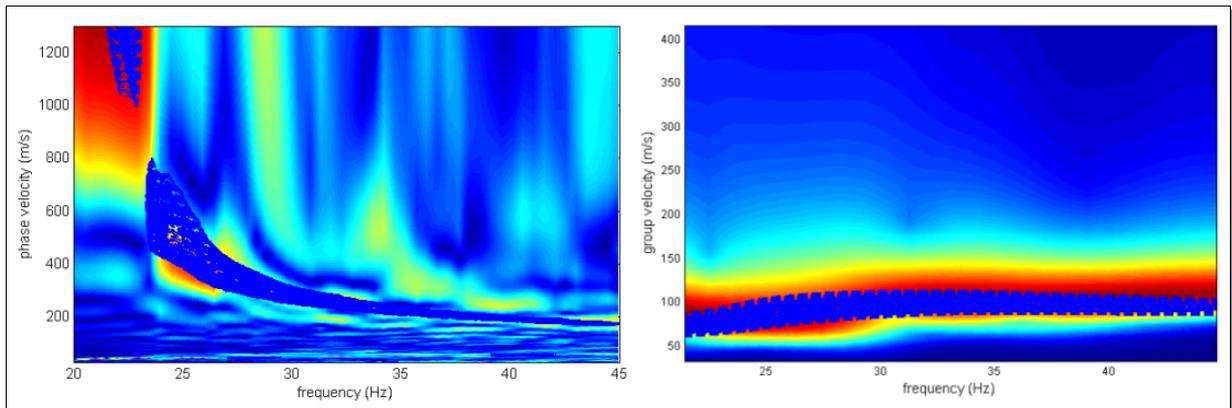


Fig. 3.21 Die gemeinsame Analyse der Phasen- (links) und Gruppengeschwindigkeiten (rechts). Den Geschwindigkeitsspektren der Messdaten (farbige Plots) sind die Geschwindigkeits-Konturlinien der synthetischen Daten (blaue Linien) überlagert.

Die sehr gute Übereinstimmung sowohl der Phasen- als auch Gruppengeschwindigkeit ist eine Bestätigung der Verlässlichkeit des zu Grunde liegenden Geschwindigkeitsmodells.

c) Messlinie 13SBUB-1, Westende

Schon der Vergleich des Geschwindigkeitsspektrum einer Aufzeichnung im nahen Offsetbereich der Messdaten vom westlichen Ende mit der berechneten Dispersionskurve des bestimmten Geschwindigkeitsmodells vom Ostende zeigt, dass die Felslinie leicht höher liegen dürfte (Fig. 3.22).

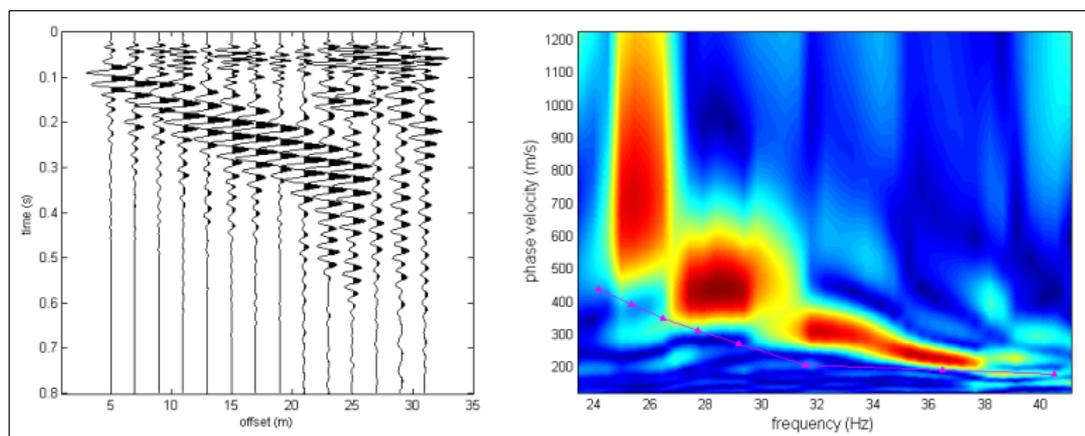


Fig. 3.22 Die berechnete Dispersionskurve des Geschwindigkeitsmodells vom östlichen Profilende (magenta Picks in der rechte Bildhälfte) zeigt, dass im Westen eine leicht höhere Felslinie zu erwarten ist.

Die Phasengeschwindigkeitsspektren der drei Rekords mit umfassendem Offsetbereich vom westlichen Ende (Fig. 3.23) zeigen grundsätzlich ähnliche Ausgestaltungen wie jene vom östlichen Ende (Fig. 3.17), auch wenn der Array-Ausschnitt bei den beiden Auslagen nicht ganz der gleiche ist – er ist rund 10 m verschoben.

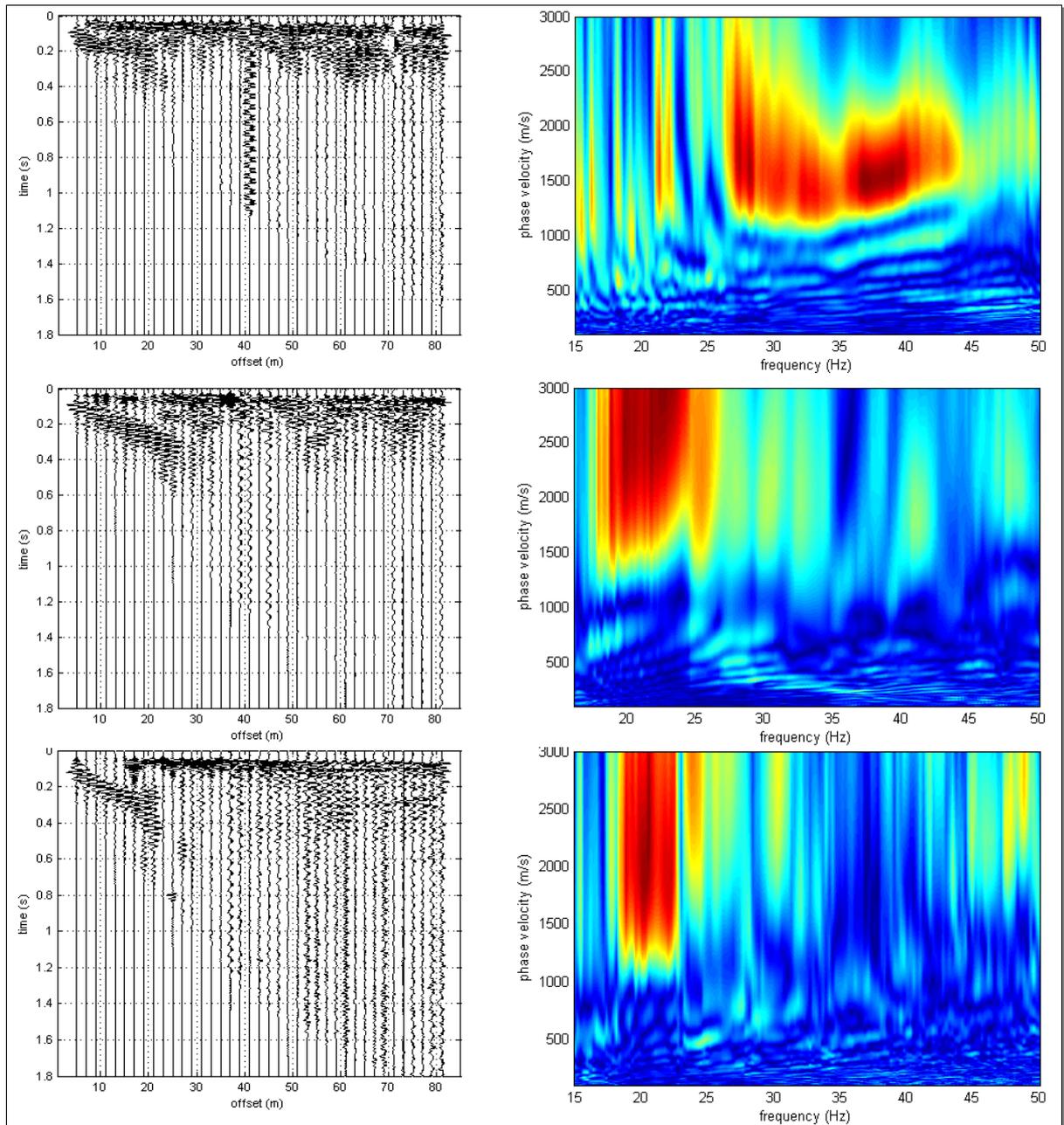


Fig. 3.23 Seismische Aufzeichnungen (links) und entsprechende Phasenspektren (rechts) 13SBUB-1, Quelle am westlichen Profilende:
 oben: vertikale Anregung und Empfänger, Rayleigh-Welle
 mitte: vertikale Anregung und radiale Empfänger, Rayleigh-Welle
 unten: transversale Anregung und Empfänger, Love-Welle.

Die Daten vom Westende wurden nur im nahen Offsetbereich genauer untersucht (Fig. 3.24). Das daraus abgeleitete Geschwindigkeitsmodell ist nur in geringem Masse verschieden zu jenem vom Westende.

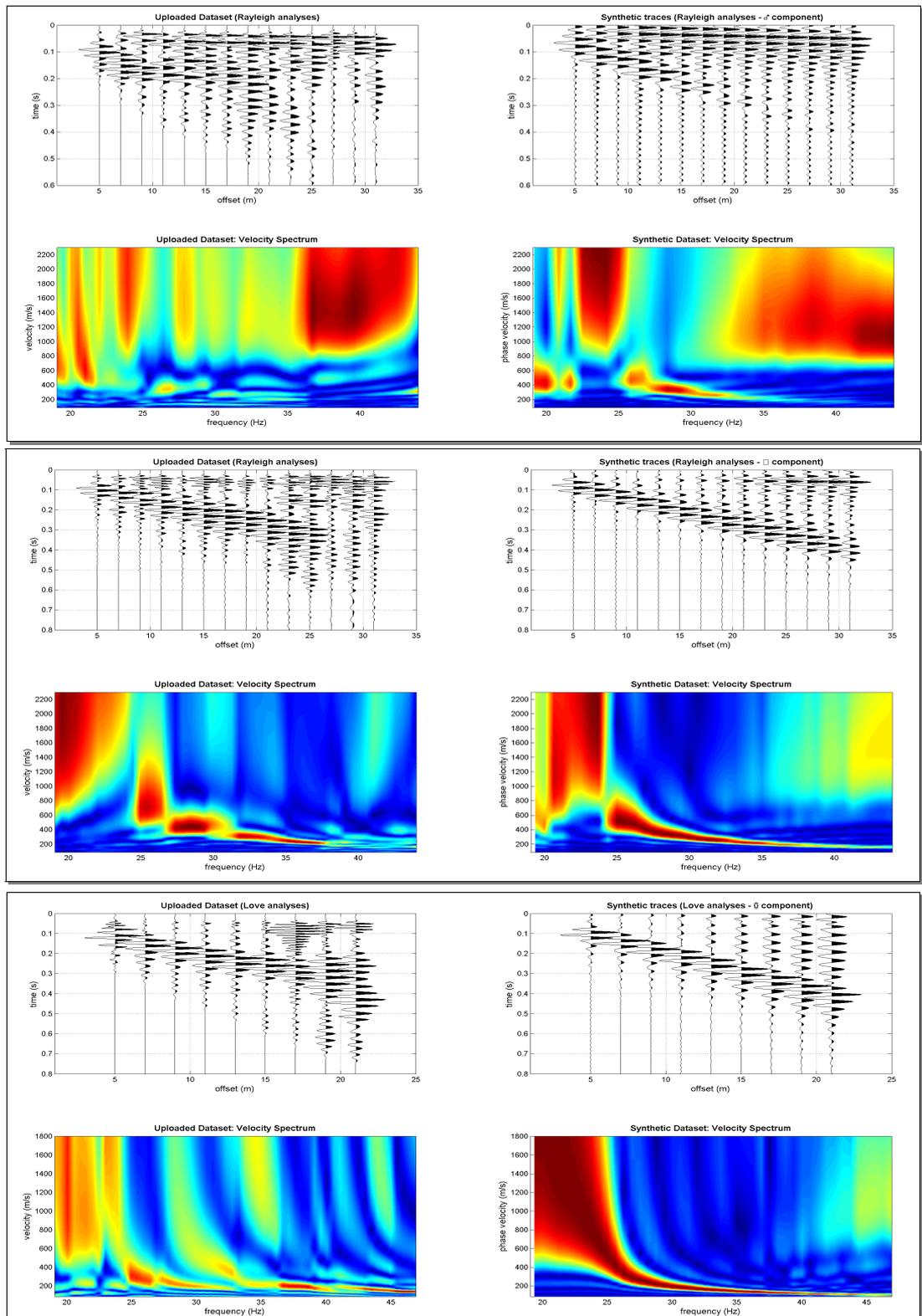


Fig. 3.24 Ergebnisse der Vorwärtsmodellierung im nahen Offset-Bereich, Profil 13SBUB-1, Quelle am westlichen Profilende:
 Links: Messdaten, rechts: Synthetische Daten.
 Oben: ZVF-Daten (vertikale Komponente der Rayleigh-Welle)
 Mitte: RVF-Daten (radialer Komponente der Rayleigh-Welle)
 Unten: THF-Daten (Love-Welle).

d) Messlinie 13SBUB-2, Nordende

Die Beobachtung der Daten (Fig. 3.25) zeigt, dass die zu den Oberflächenwellen gehörende Energie schon nach sehr wenigen (2 bis 3) Spuren (rund 10 m) in den oberflächlichen Bodenschichten vollständig absorbiert wird. Dies bedeutet, dass die Felsoberfläche noch tiefer als an den Enden Ost und West des Profils 13S-BUB-1 liegen dürfte. Hier ist anzumerken, dass die HVSr-Messung keinerlei Peak in der Spektralverhältniskurve aufweist.

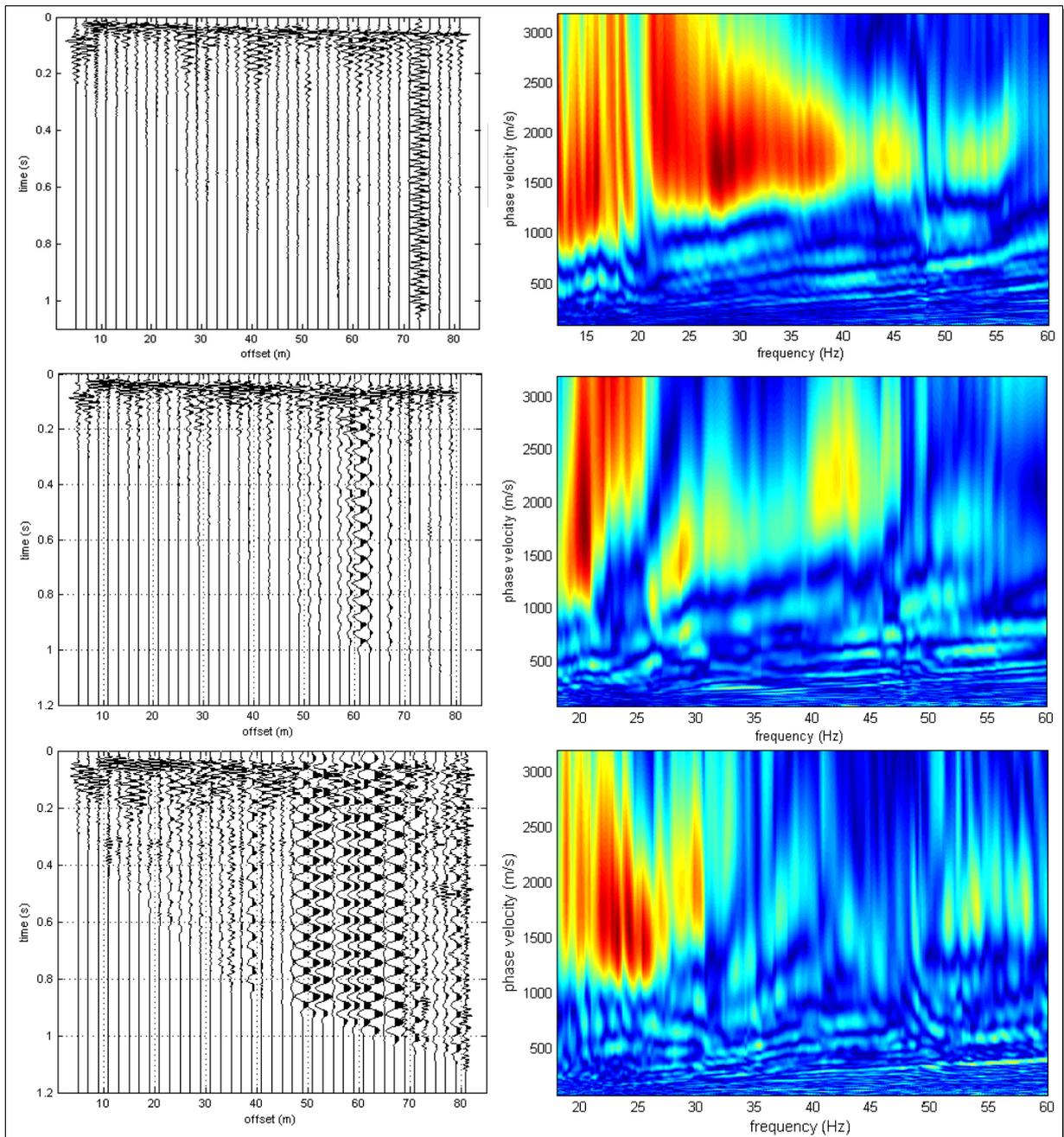


Fig. 3.25 Seismische Aufzeichnungen (links) und entsprechende Phasenspektren (rechts) 13SBUB-2, Quelle am nördlichen Profilende:
 oben: vertikale Anregung und Empfänger, Rayleigh-Welle
 mitte: vertikale Anregung und radiale Empfänger, Rayleigh-Welle
 unten: transversale Anregung und Empfänger, Love-Welle.

Um trotzdem eine Auswertung der Daten zu bewerkstelligen, wurde versucht, die Rayleigh-Wave-Dispersion der schussnächsten Spuren mittels Full-Velocity-Spectrum-(FVS)-Inversion zu invertieren. Die Gruppengeschwindigkeiten wurden mittels MFA (multiple filter analysis, Dziewonski et al., 1969, Levshin et al. 1972) berechnet. Die Anwendung der Gruppengeschwindigkeit trägt der Tatsache Rechnung, dass die mit dem Phasengeschwindigkeitsspektrum auftretenden, ärgerlichen Verschmierungen (Pederson et al., 2003) vermieden werden können. Zudem werden keine interpretativen Schritte wie bei der Bestimmung von Dispersionskurven sondern die tatsächliche Dispersion und die Verteilung der unterschiedlichen Moden berücksichtigt.

Das generelle Schema der FVS-Methode wird in Fig. 3.26 dargestellt.

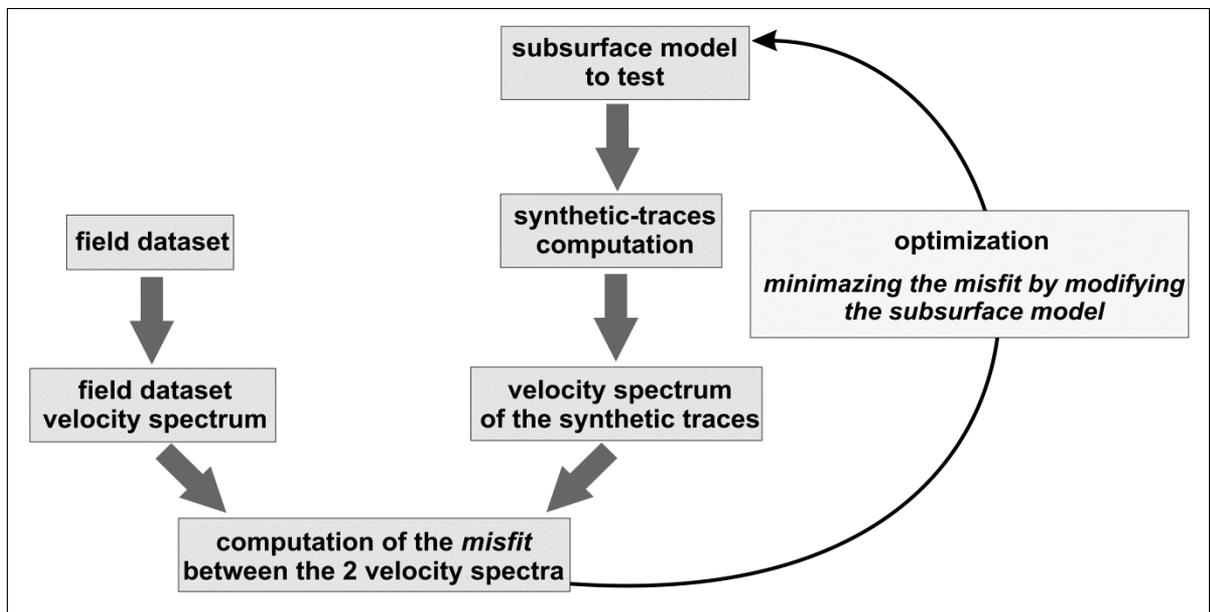


Fig. 3.26 Schematischer Ablauf des Full-Velocity-Spectrum-Inversionsverfahren (Dal Moro, 2012; Dal Moro, 2013).

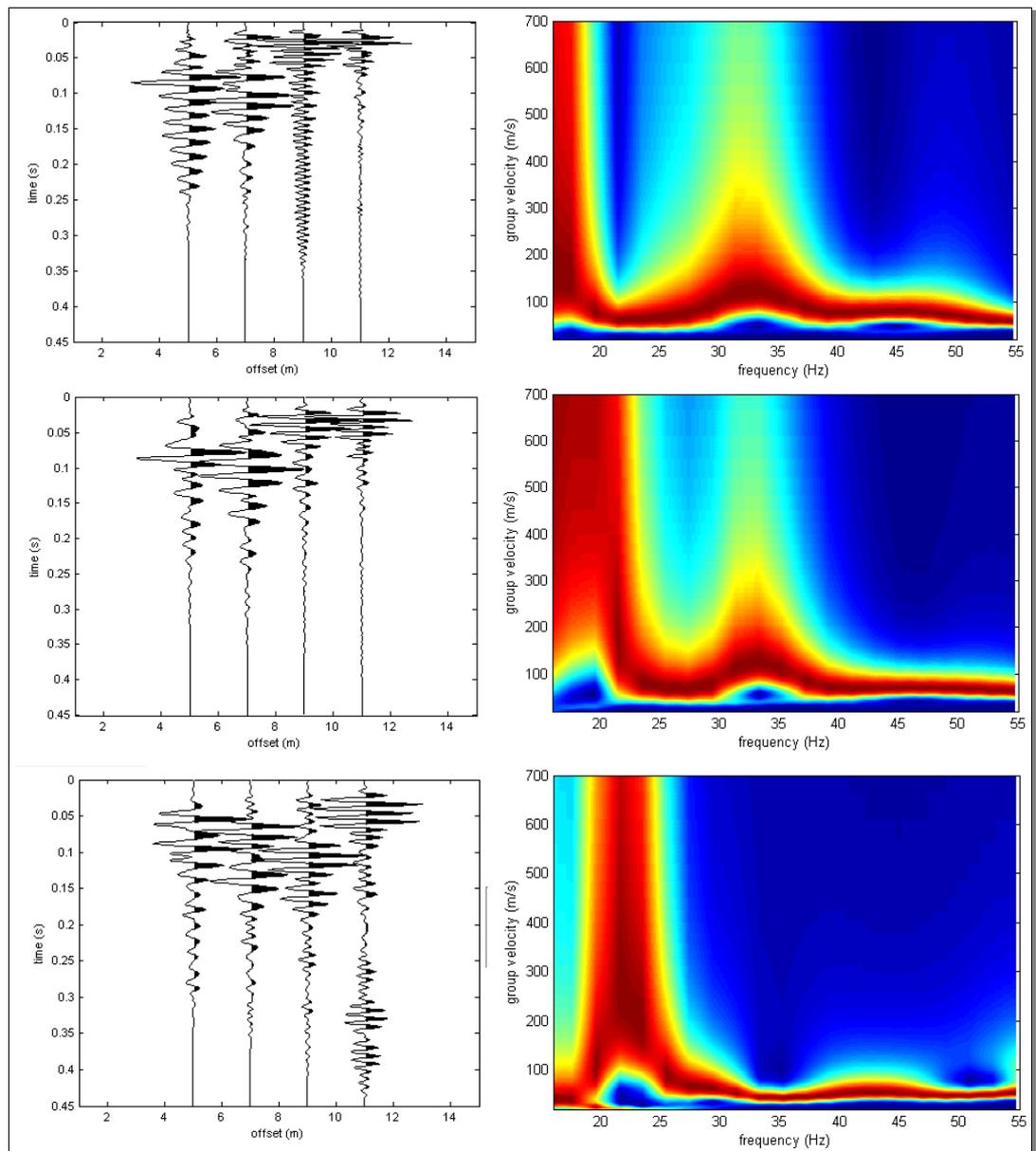


Fig. 3.27 Seismische Spuren aus dem Nahbereich (links) der drei Komponenten ZVF (oben), RVF (Mittel), THF (unten) und ihre entsprechenden Gruppengeschwindigkeitsspektren (rechts). Für die Geschwindigkeitsspektren wurde jeweils nur die 2. Spur (7 m Offset) verwendet. Zu beachten ist insbesondere das abrupte Abbrechen der Oberflächenwellen nach der zweiten (Rayleigh) resp. dritten Spur (Love). Diese Beobachtung legt den Schluss nahe, dass die Lockergesteinsbedeckung des Felsens rasch auskeilt.

Die Inversion des Full-Velocity-Spectrum (Fig. 3.28) verwendet einen genetischen Algorithmus. Durch die beschränkten Offset der verwendeten Spuren (7 m) ist auch die Erkundungstiefe des Modells auf ungefähr 4 bis 6 m eingeschränkt – was aufgrund der sehr geringen Felstiefe (ca. 2 m) aber weiter nicht negativ ins Gewicht fällt.

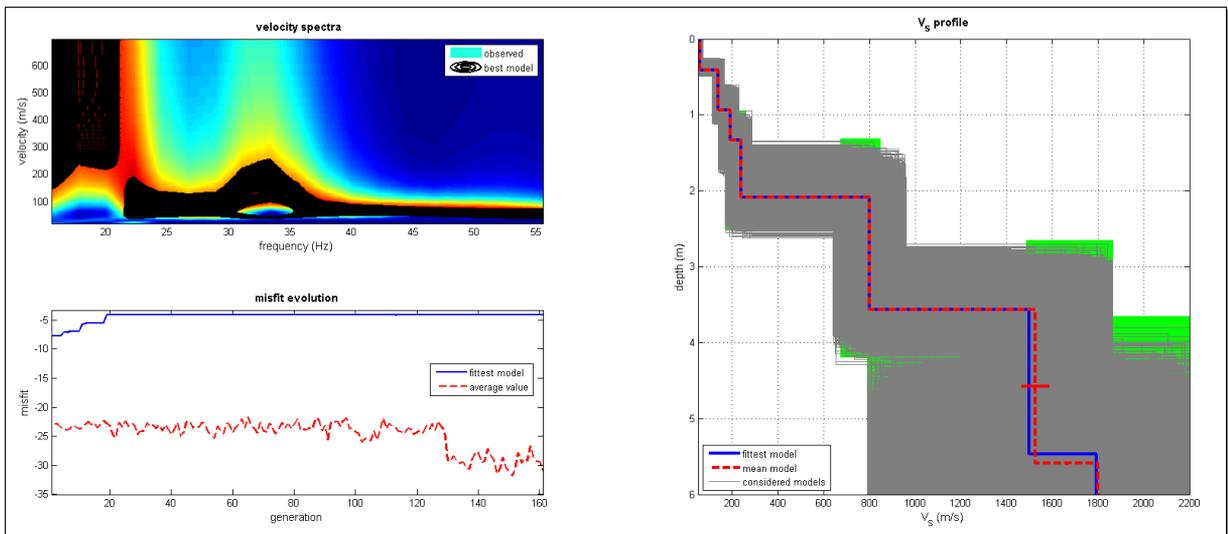


Fig. 3.28 Ergebnis der FVS-(FullVelocitySpectrum)-Inversion der Rayleighwelle:
 links oben: Im Hintergrund farbcodiert das Gruppengeschwindigkeitsspektrum der Felddaten und darüber mit schwarz gezeichneten Konturlinien das Gruppengeschwindigkeitsspektrum der synthetisierten Daten.
 rechts: das V_s -Geschwindigkeitsmodell (rot: mittleres Modell, blau: bestpassendes Modell, grau: alle berechnete Modelle und grün: Suchbereich)
 links unten: Veränderung des prozentualen Fehlers in Abhängigkeit der Modellgeneration.

e) Messlinie 13SBUB-2, Südende

Bei der Betrachtung der Aufzeichnungen mit Quellpunkt am südlichen Ende des Profils 13SBUB-2 fallen sofort die energiereicheren, zu den weichen Schichten gehörenden langsamen Geschwindigkeiten der Oberflächenwellen im schussnahen Bereich bis etwa 30 m Distanz auf (siehe Fig. 3.29). Für die weiteren Analysen (FVS-Inversion der Phasengeschwindigkeit) wurde daher nur der Offset-Bereich von 5 bis 47 m verwendet. Auch wurden nur die RVF und THF-Komponenten ausgewertet. Dabei ist zu beobachten, dass tiefere Schichten grundsätzlich eine schlechtere Qualität aufzuweisen scheinen (=geringere V_s).

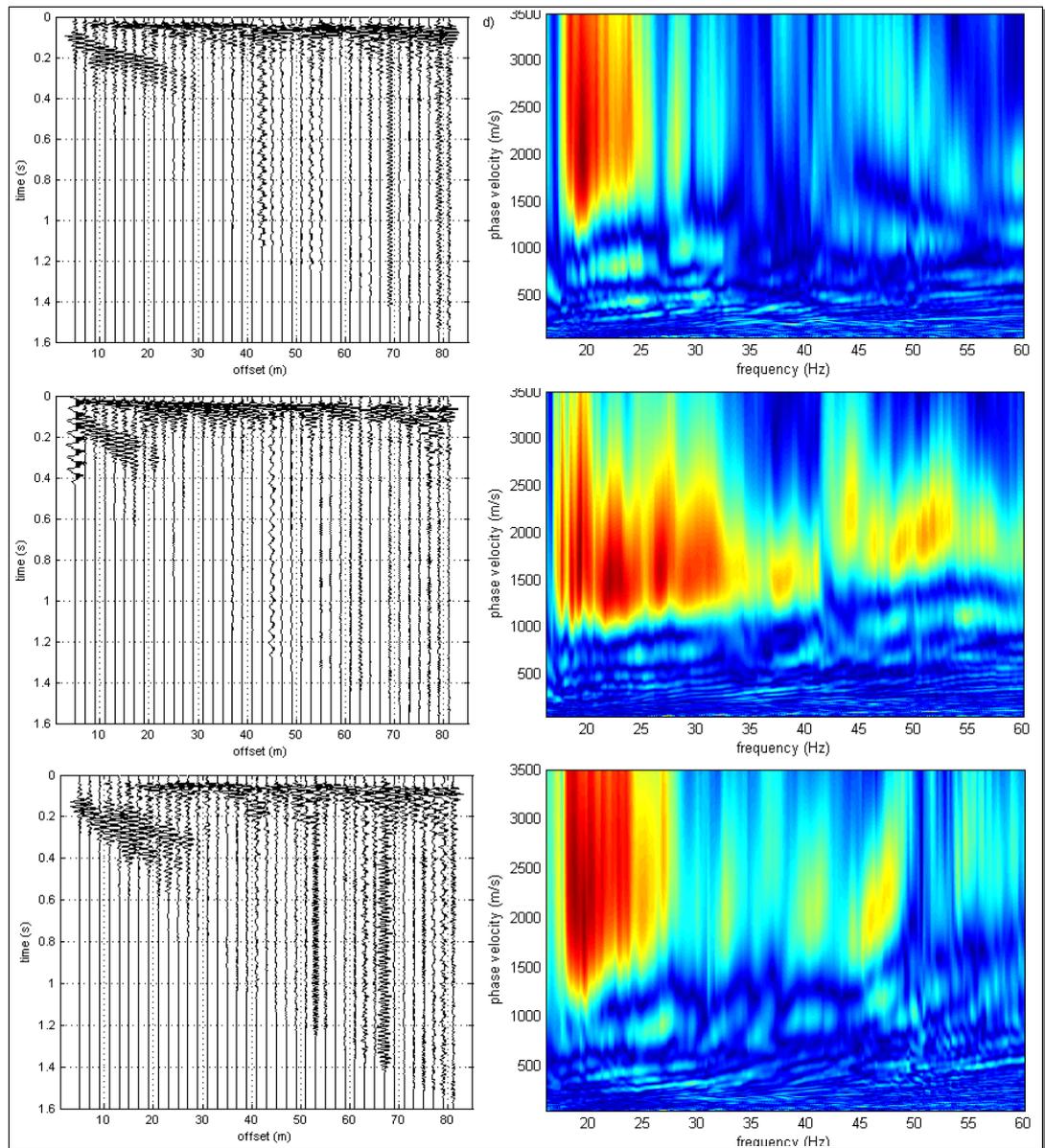


Fig. 3.29 Seismische Aufzeichnungen (links) und entsprechende Phasenspektren (rechts) 13SBUB-2, Quelle am südlichen Profilende:
 oben: vertikale Anregung und Empfänger, Rayleigh-Welle
 mitte: vertikale Anregung und radiale Empfänger, Rayleigh-Welle
 unten: transversale Anregung und Empfänger, Love-Welle.

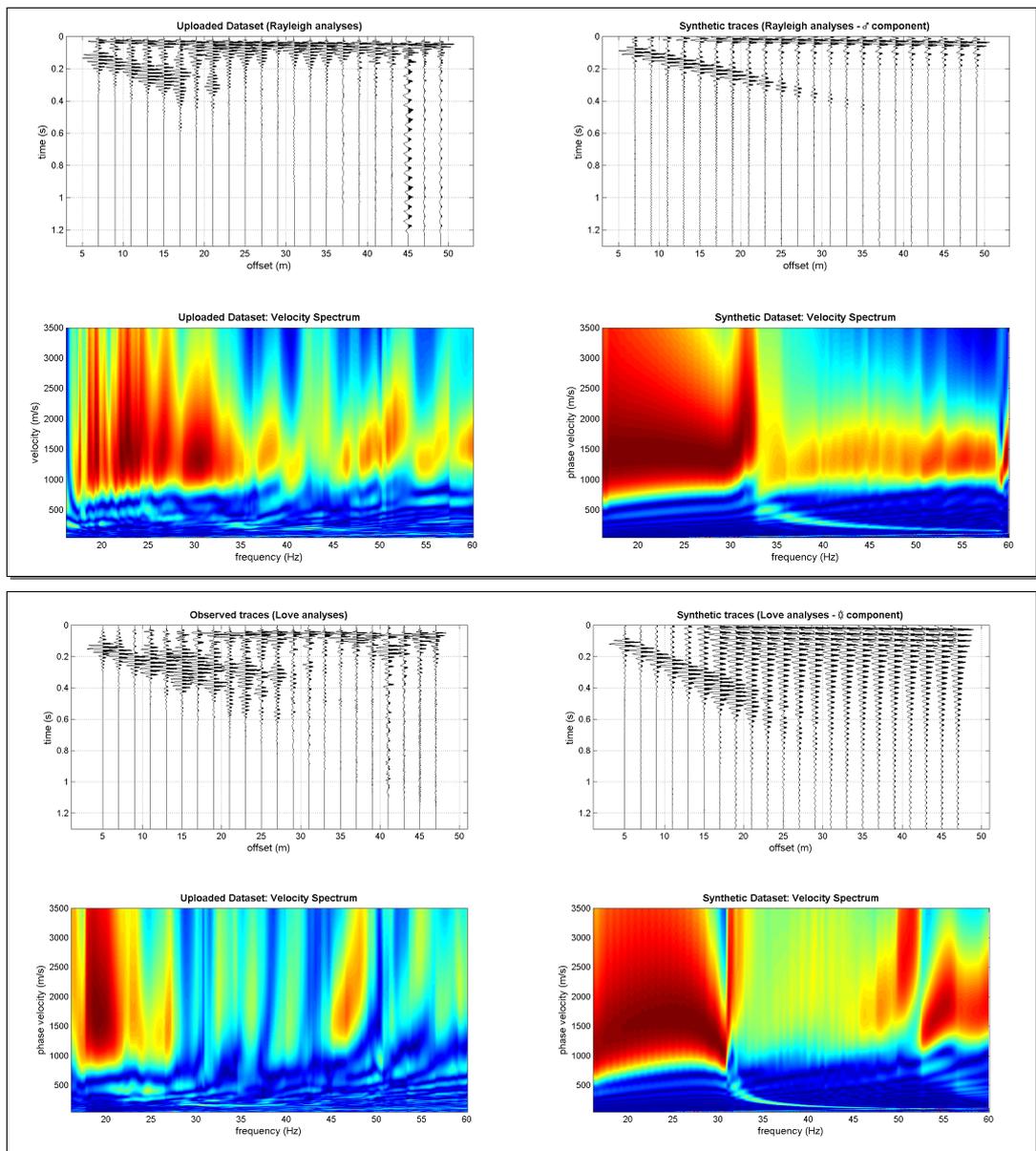


Fig. 3.30 Ergebnisse der FVS-Inversion (Phasengeschwindigkeit) der seismischen Spuren im Offsetbereich von 5 bis 47 m, links der Felddaten, rechts der synthetischen Seismogramme. Oben: Rayleigh-Welle (ZVF), unten: Love-Welle (THF).

In der Folge wurden der Offset-Bereich bis etwa 20 m weiter unter die Lupe genommen. Mittels FVS-Inversion der Gruppengeschwindigkeit (18 m Offset) konnte das V_s -Modell weiter verbessert werden (Fig. 3.31).

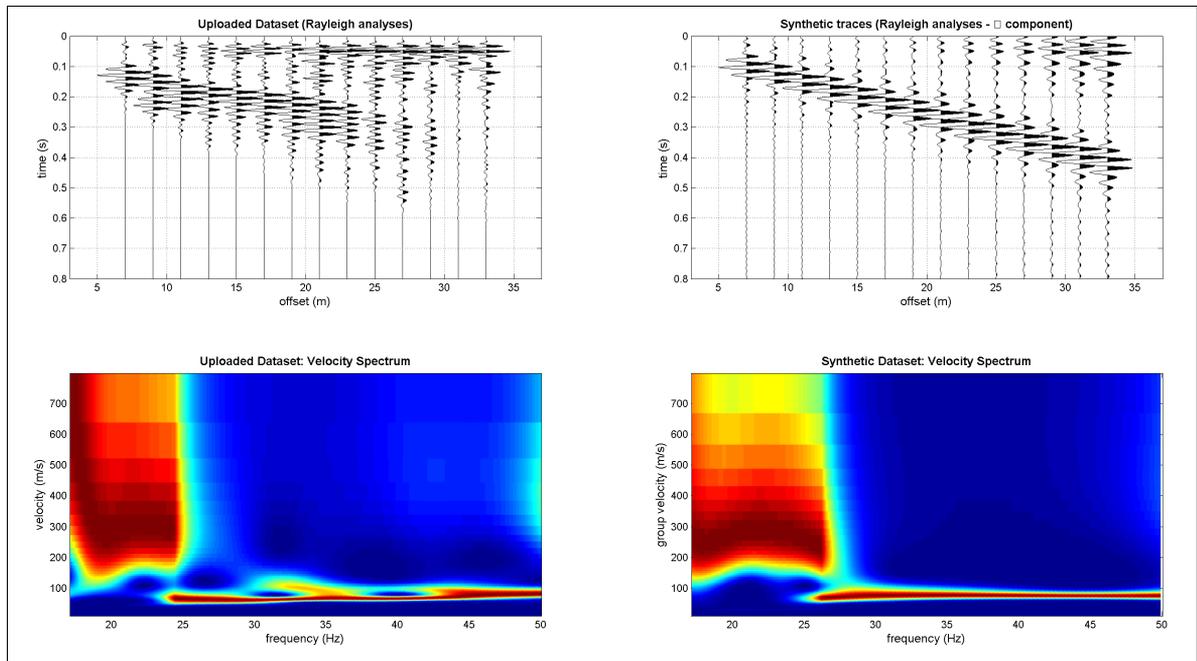


Fig. 3.31 Gruppengeschwindigkeitsspektren der Felddaten (links) und der synthetischen Daten (rechts). Die Übereinstimmung ist sehr überzeugend.

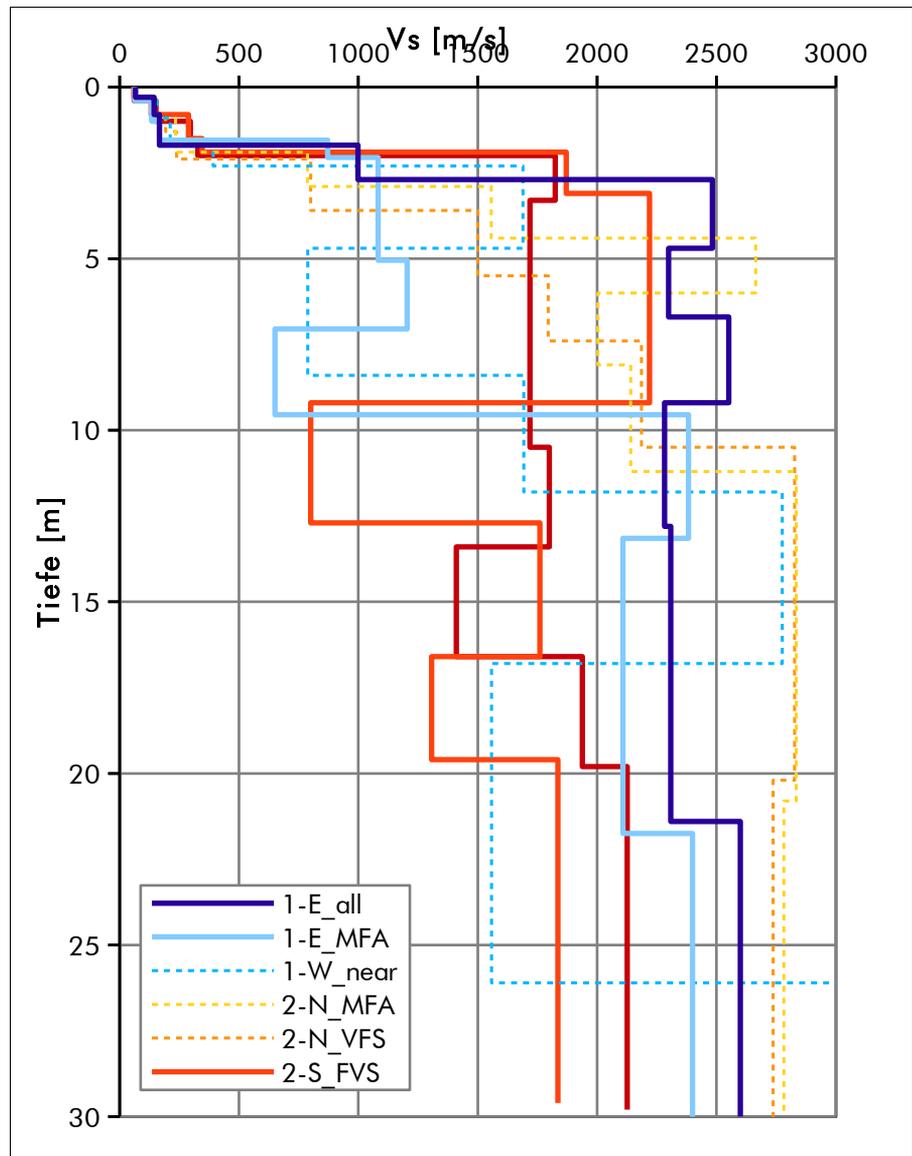


Fig. 3.32 Geschwindigkeitsmodelle V_s der unterschiedlichen Auswertungen von den beiden Messlinien 13SBUB-1 (blaue Funktionen) resp. 13SBUB-2 (rote Funktionen).

1-E_all: Vorwärtsmodellierung, Profil 13SBUB-1, Ostende, gesamter Offsetbereich

1-E_MFA: Vorwärtsmodellierung MFA, Profil 13SBUB-1 naher Offsetbereich

1-W_near: Auswertung der schussnahen Spuren mittels Vorwärtsmodellierung

2-N_MFA: Vorwärtsmodellierung MFA Profil 13SBUB-2, Nordende, naher Offsetbereich

2-N_VFS: FVS-Inversion, Profil 13SBUB-2, Nordende, naher Offsetbereich

2-S_FVS: FVS-Inversion, Profil 13SBUB-2, Südende, mittlere Offsetbereich

2-S_MFA: Vorwärtsmodellierung MFA, Profil 13SBUB-2, Südenden, naher Offsetbereich.

f) Bewertung der Ergebnisse

Die vorliegende Situation ist sehr variabel bezüglich der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Scherwellen, vermutlich wesentlich komplexer als es die Ergebnisse Refraktionstomographie nahe legen würden.

Gerereell liegt die Felsoberfläche im Osten und im Norden der Messlinien un- tiefer als im Süden und im Westen. Das Festgestein scheint Geschwindigkeitsin- versionen aufzuweisen, die sich unter anderem in den komplexen Geschwindigkeits- spektren widerspiegeln. Nur sehr aufwendige Analysen mit Vorwärtsmodellierung vermögen diese Komplexität aufzulösen.

3.2.6 ESAC-Analysen

Testeshalber wurde auch eine ESAC-Studie durchgeführt (siehe Fig. 3.33). Es zeigte sich aber rasch, dass die Messdaten aufgrund der sehr seichten Felsoberfläche nicht auszuwerten sind. Dies ist auf den Mangel an Energie der Oberflächenwellen zurückzuführen.

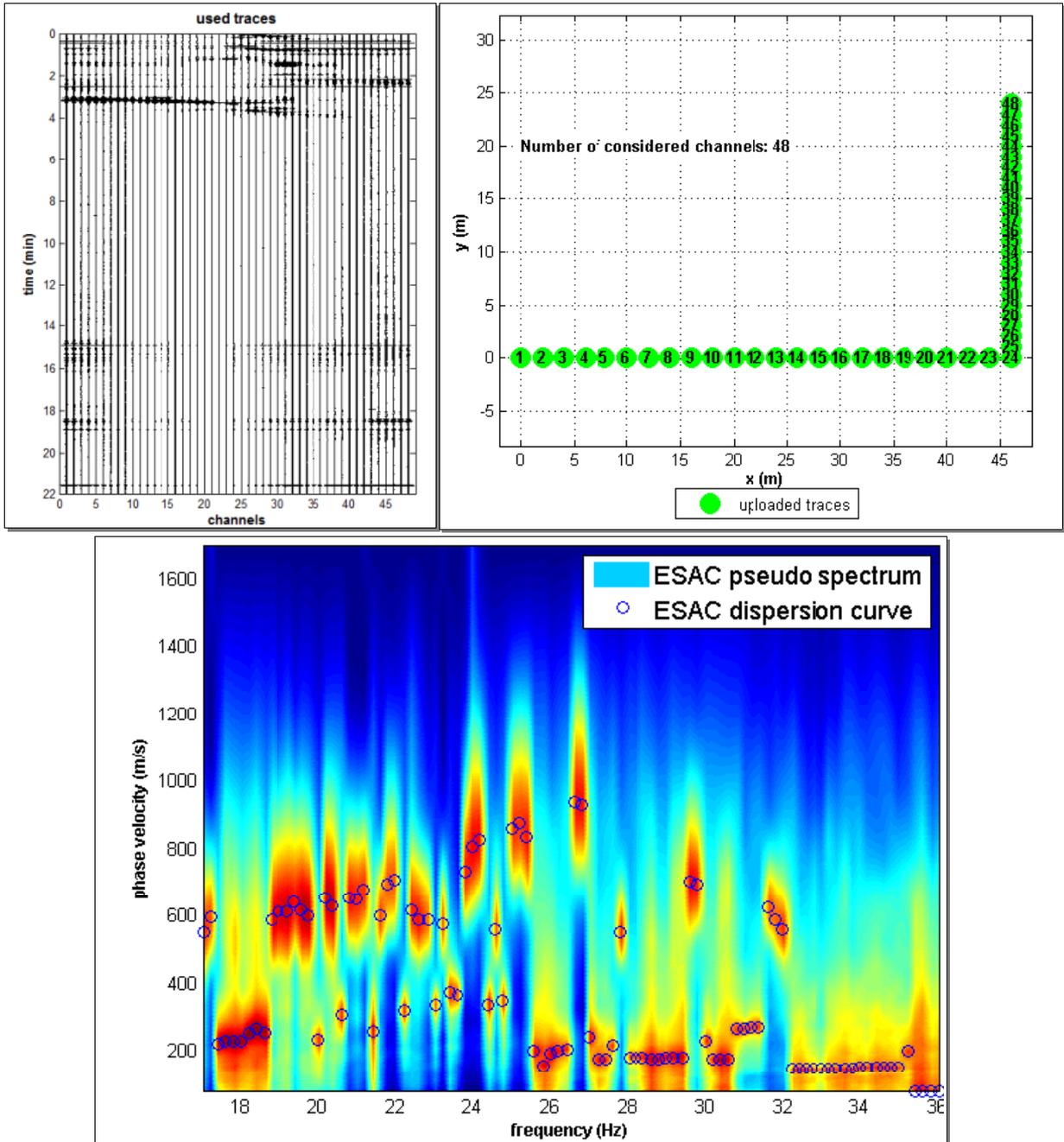


Fig. 3.33 oben links: 48 Seismogramme der beiden Äste der ESAC-Messung.
oben rechts: Channel-Map
unten: Phasengeschwindigkeitsspektrum der ESAC-Messung.

3.2.7 Bestimmung des Q_s -Faktor

Aus der Dämpfung der ersten 7 seismischen Spuren der Messlinie 13SBUB-2 mit Quellpunkt am südlichen Ende wurde der Q_s -Faktor (scherwellenseismischer Qualitätsfaktor) bestimmt. Die Bearbeitung der Daten folgte dabei den Vorschlägen von Tonn (1991), White (1992) und Xia et al. (2002). Das Ergebnis ist in Fig. 3.34 abgebildet. Die Werte scheinen mindestens für das Lockergestein verlässlich zu sein.

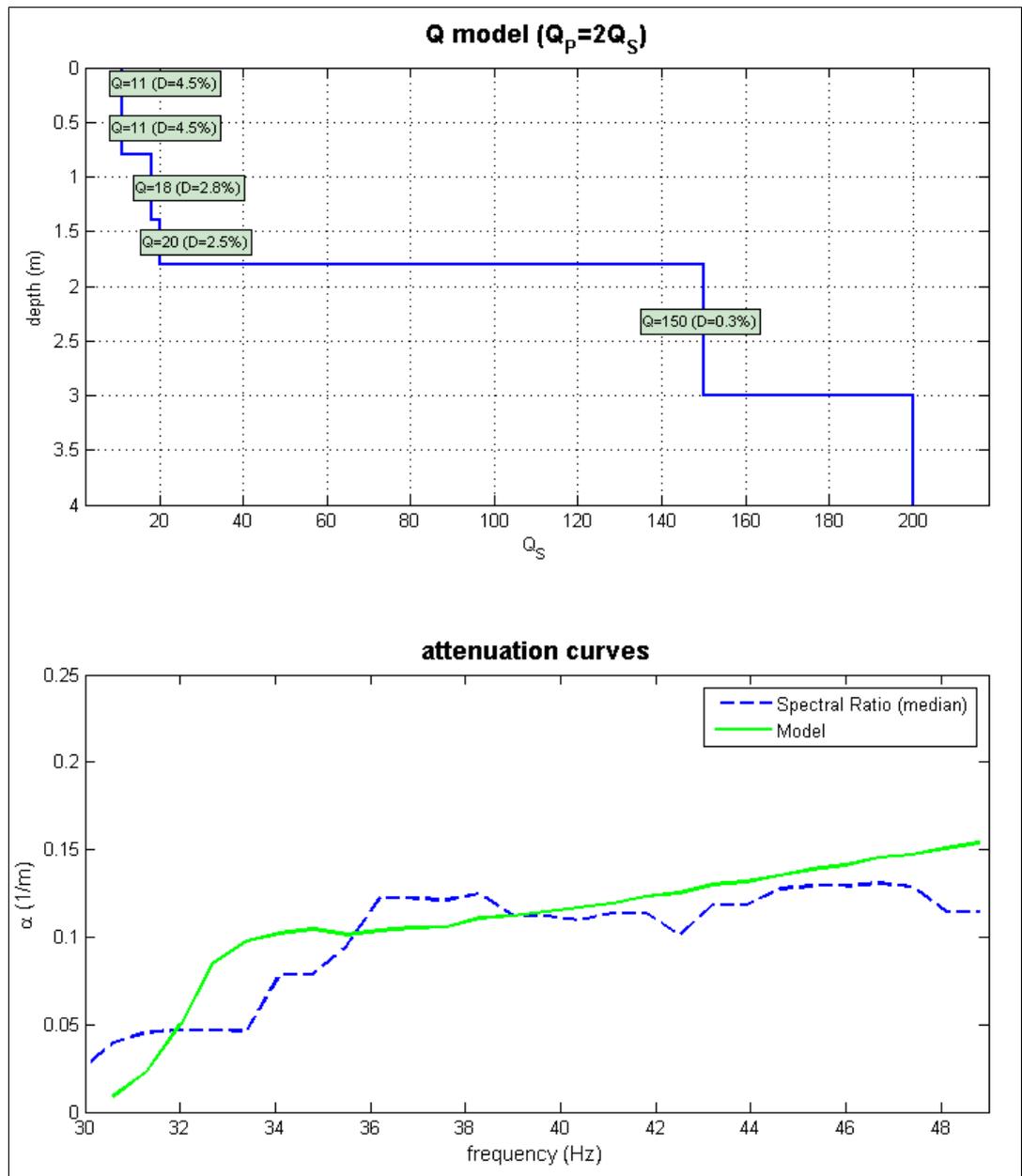


Fig. 3.34 *Resultate der Bestimmung des schwerwellenseismischen Qualitätsfaktors Q_s .
Oben: berechnetes Q_s -Modell;
unten: Dämpfungskurve.*

4 Zusammenfassung und Bewertung der Untersuchung

- ▶▶ Für die SSMnet Erdbebenbeobachtungsstation SBUB beim Berghaus Malbun, Buchserberg, Gemeinde Buchs SG, wurden mittels oberflächenseismischen Messungen die Verteilung der seismischen Scherwellengeschwindigkeit V_s bestimmt.
- ▶▶ Zwei oberflächenseismische, lineare Arrays wurden sowohl mit Horizontal- als auch Vertikal-Quelle und -Aufnehmern bemessen.
- ▶▶ Aus den Felddaten wurden refraktionstomographische Kompressions- und Scherwellen-Geschwindigkeitsektionen mittels Tauchwellentomographie berechnet.
- ▶▶ Mittels verschiedener Vorwärtsmodellierungen und Inversionsverfahren wurden die Oberflächenwellen hinsichtlich eindimensionaler V_s -Geschwindigkeitsmodelle ausgewertet.
- ▶▶ Die Felsoberfläche ist sehr seicht in weniger als 5 m Tiefe zu erwarten, oft in weniger als 2 m. Das Festgestein weist mit grosser Wahrscheinlichkeit eine sehr unregelmässige Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten auf. Es ist auch mit Geschwindigkeitsinversionen zu rechnen.
- ▶▶ Durch die grosse Bandbreite der Messdaten ist eine gewisse Verlässlichkeit der Ergebnisse gegeben. Die grosse Heterogenität der oberflächennächsten Schichten sowohl in lateraler als auch vertikaler Ausdehnung erschweren die Genauigkeit der Messwerte allerdings.
- ▶▶ Aus einer Datenaufzeichnung wurden auch der Q_s -Faktor im Lockergestein bestimmt.
- ▶▶ Eine Zusammenfassung der berechneten Geschwindigkeitsfunktion ist in Fig. 4.1 (nächste Seite) abgebildet.

Amlikon, 12. Juli 2013



Lorenz Keller
dipl. Natw. ETHZ, Geophysiker

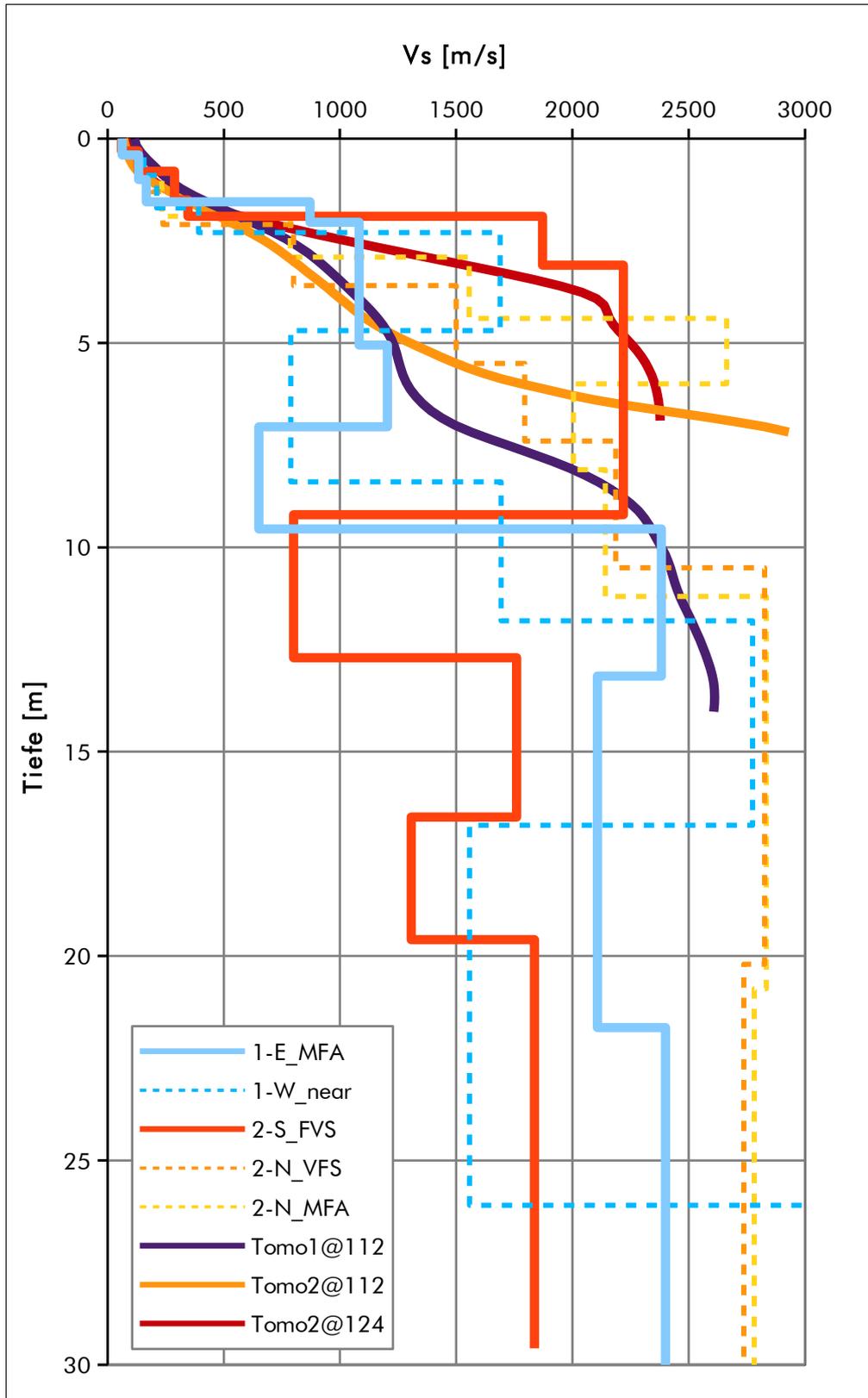


Fig. 4.1 Übersicht über die ermittelten Scherwellengeschwindigkeiten am Standort Buchserberg.

5 Referenzen

- Dal Moro G. (2012): **Onde di Superficie in Geofisica Applicata – acquisizione ed analisi secondo le tecniche MASW e HVSR**, pp. 191, ISBN 978-8857901169, *Dario Flaccovio Editore (in Italian)*
- Dal Moro G. and Marques Moura R.M. (2013): **Multi-component Acquisition and Joint Analysis of Surface Waves: some Issues and Two Case Studies**, submitted to *J. Appl. Geophysics*.
- Dziewonski, A., Bloch, S., Landisman, M. (1969): **A technique for the analysis of transient seismic signals**. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 59, p. 427-444.
- Gebrande, H., Miller, H. (1985): **Refraktionsseismik**. in: *Angewandte Geowissenschaften II, Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in Geowissenschaften*, edited by F. Bender, p. 226-260, F. Enke Verlag, Stuttgart.
- Gebrande, H. (1986): **CMP-Refraktionsseismik**. In: *Seismik auf neuen Wegen*, edited by L. Dreses, p. 191-205, Dt. Vereinigung d. Erdölgeol. u. Erdöling., Celle.
- Herrmann, R. B. (2002): **Computer Programs in Seismology – an overview of synthetic seismogram computation**, *Saint Louis Univ.*, pp. 183.
- Levshin, A.L., Pisarenko, V., Pogerbinsky, G. (1972): **On a frequency-time analysis of oscillations**, *Annales Geophys.*, vol. 28, p. 211-218.
- Luo Y., Xia J., Xu Y. & Zeng C. (2011): **Analysis of group-velocity dispersion of high-frequency Rayleigh waves for near-surface applications**, *J. Appl. Geophysics*, vol. 74, p. 157-165.
- Nakamura, Y., (1989). **A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface**. *QR of RTRI*, vol. 30(1), p. 25-33.
- Park, C.B., Miller, R.D., J. Xia. (1999): **Multi-channel analysis of surface waves (MASW)**. *Geophysics*, vol. 63(3), p. 800-808.
- Pedersen H. A., Mars J. I., Amblard P.O. (2003): **Improving surface-wave group velocity measurements by energy reassignment**, *Geophysics*, vol. 68, p. 677–684.
- Schuster, G.T., Quintus-bosz, A., (1993): **Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory**. *Geophysics*, vol. 58(9), p. 1314-1323.
- Winkelmann, R.A. (1998): **Entwicklung und Anwendung eines Wellenfeldverfahrens zur Auswertung von CMP-sortierten Refraktionseinsätzen**, Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- SESAME European Research Project (2004): **Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation**, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf
- Tonn R. (1991): **The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: a comparison of different computational methods**, *Geophys. Prosp.*, vol. 39, p. 1-27.
- White R.E., (1992): **The accuracy of estimating Q from seismic data**, *Geophysics*, vol. 57, p. 1508-1511.
- Xia, J., R.D. Miller, and C.B. Park (1999): **Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave**. *Geophysics*, vol. 94, p. 691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., and Ivanov, J., (2000): **Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the Multichannel Analysis of Surface Wave technique**. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*, Washington D.C, February 20-24, p. 1197-1206.
- Xia J., Miller R.D., Park C.B., Tian G. (2002): **Determining Q of near-surface materials from Rayleigh waves**. *J. Appl. Geophysics*, vol. 51, p. 121-129.