

SBAT: Bestimmung eines Wellengeschwindigkeitsprofils

Standort: Standort Starkbebenstation SBAT, Basel Stadt

Seismische Station: SM SBAT

Methode: Arraymessungen, Inversion kombiniert mit H/V

Datum: Dezember 2004

Messung durch: Hans-Balder Havenith

Auswertung durch: Donat Fäh, Hans-Balder Havenith

Geologische Daten: Erich Fäh (Bohrkataster BS /BL)

Dokumente: SASW Messungen durch Bureau de Recherche Geologique et Miniere (BRGM), Kontakt: Agathe Roulle

Seismische Messungen durch Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben Hannover (GGA), Kontakt: Ulrich Polom

Files und Daten: /mercalli/project/interreg3/Array_measurement/SBAT

Mächtigkeit (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Kommentar / Geologie
10	< 1350	250-400	Aufschüttungen / Deckschicht unregelmässig
10-15	> 1350 ab 17m Tiefe	400-500	Niederterrassenschotter (Kies, Sand) , z.T. verkittet und mit Nagelfluhbildung, im Grundwasser. Dichte: 1850 g/cm ³
Ca. 20	1500-2500	400-500	Melettaschichten (Härteklasse 1) verwittert Dichte: 2000 g/cm ³
Ca. 20	1600-2500	450-550	Melettaschichten (Härteklasse 1) verwittert Dichte: 2000 g/cm ³
Ca. 40	1800-2500	550-700	Melettaschichten (Härteklasse 1)
100	1900-2500	700-900	Melettaschichten (Härteklasse 1)
200	3400 ^B (3200-3600)	2000 ^B (1800-2000)	Geophysikalischer Fels, Sannoisien. Die lithologische Schicht innerhalb des Sannoisien ist entweder ein Kalkkonglomerat oder ein harter Kalkstein. Beide besitzen die Härteklasse 4. Dichte: 2350 g/cm ³
	4000 ^B (3600-4500)	2350 ^B (2150-2650)	Dichte: 2550 g/cm ³

Tabelle: Vorgeschlagenes vereinfachtes Geschwindigkeitsmodell am Standort SBAT. Aufgrund der gemessenen Geschwindigkeiten entspricht der Standort einer Bodenklasse C nach SIA261. ^BDie Geschwindigkeiten in den tiefsten Schichten wurden mit Hilfe von Bohrlochmessungen am Standort Otterbach erhalten (GPI, 2001).

Geologie

Die obersten Schichten bestehen aus den Niederterrassenschottern des Rheins, welche hier eine Mächtigkeit zwischen 20 bis 25 Metern besitzen. Die Niederterrassenschotter weisen wechselnde Schichtungen mit unterschiedlichen Korngrössen auf. Die Schotter können sandig oder sandfrei sein, besitzen Einschaltungen von Sandlinsen und Bändern und können zu Nagelfluhbänken

verkitten. Im unteren Teil, in dem die Schotter zum Fels übergehen, nimmt der Lehmanteil zu und kann z.T. die Schotter ganz ersetzen. Ebenfalls dienen Niederterrassenschotter als Grundwasserspeicher.

Unter den Schottern befinden sich die Meletta Schichten. Es sind dies graublau, glimmerführende Tone, welche mergelige Sandlagen besitzen. Die Härteklassierung der Meletta Schichten beträgt 1. Diese Klassierung, welche im Interreg Projekt eingeführt wurde, kann Werte zwischen 1 (weiches Gestein, wie z.B. Ton) und 5 (sehr hartes Gestein wie z.B. Granit) annehmen.

Das Schichtverzeichnis ist im Appendix A gegeben.

Der Grundwasserspiegel liegt bei 253 m ü.M., in 17m Tiefe.

Referenz: Bohrkataster BS /BL

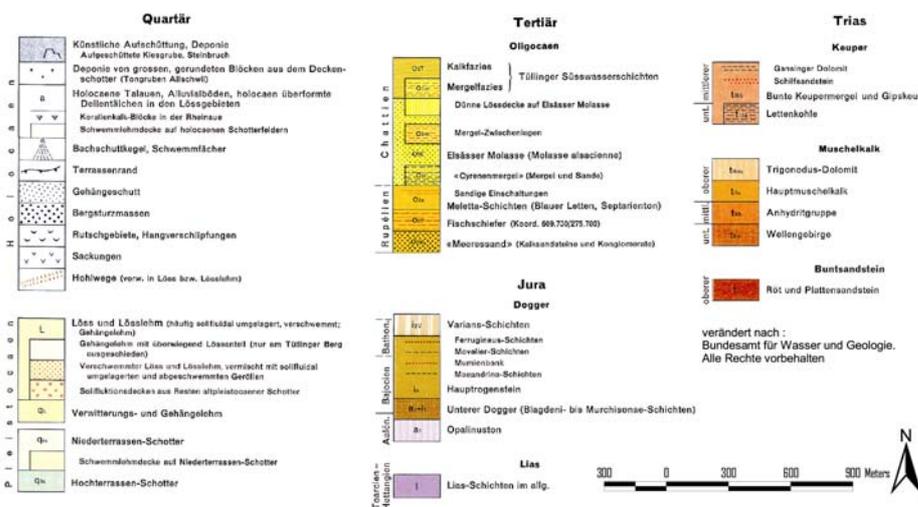
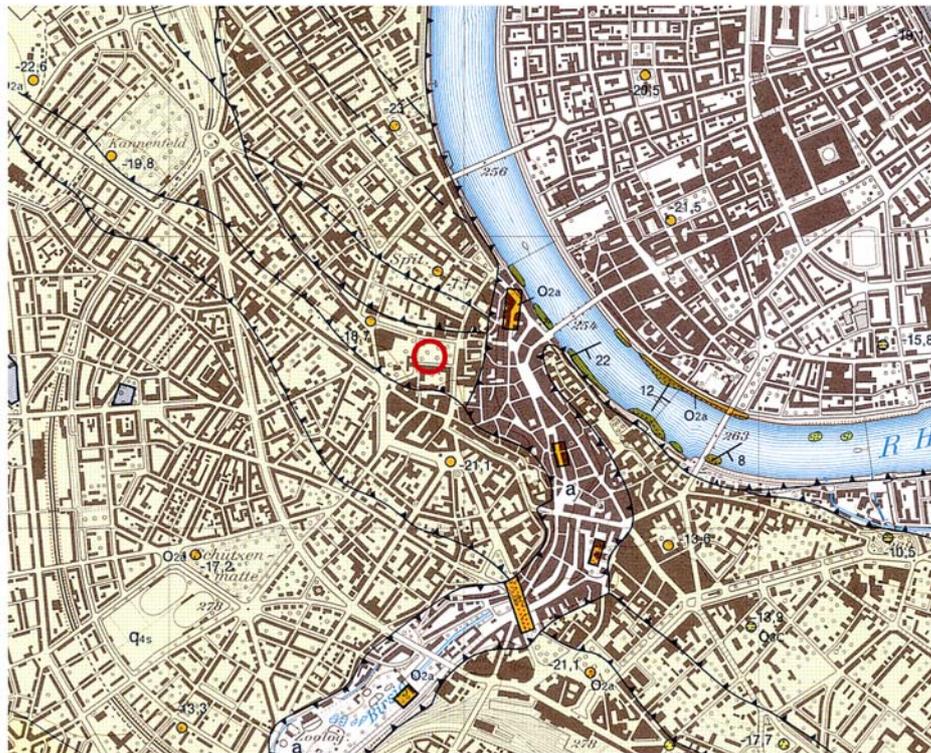


Abbildung 1. Oberflächengeologie bei der Station SBAT.

Messungen der Eigenfrequenz der Lockersediment-Ablagerungen

Abbildung 2 zeigt die Lage des Arrays bei der Station SBAT. Ein H/V Spektrum an der zentralen Station des Arrays ist in Abbildung 3 gezeigt, und ist verglichen mit dem H/V Spektrum gemessen bei der Starkbebenstation SBAT. Die Übereinstimmung der H/V Kurven bei der Fundamentalfrequenz (1 Hz) ist sehr gut. Oberhalb von 5Hz sind die H/V Kurven unterschiedlich. Die im Arrayzentrum gemessene Kurve weist ein zweites Maximum bei ca. 15Hz auf. Dieses kann mit grosser Wahrscheinlichkeit auf eine wenig mächtige, sehr locker gelagerte Schicht beim Petersplatz zurückgeführt werden. Diese Schicht ist bei der Starkbebenstation (im Innern der Tropenhauses) nicht vorhanden.

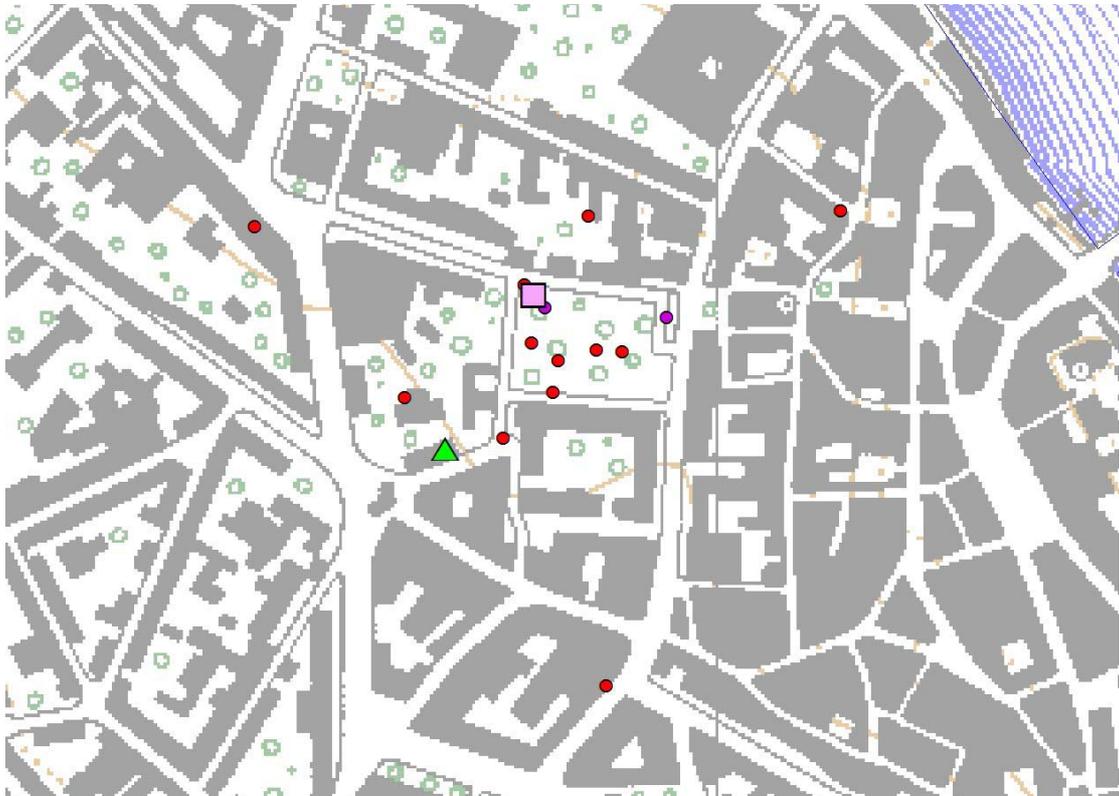


Abbildung 2. Angewandte Arraygeometrie beim Standort SBAT (rote Punkte). Zwischen den violetten Punkten wurde ein seismisches Profil durch das Leibniz Institut für angewandte Geowissenschaften in Hannover (GGA) gemessen, der BRGM verwendete die SASW Methode (rosa Quadrat). Radius des äusseren Dreiecks: 250m (wegen Defektes fielen die zwei westlichen Stationen aus). Die Starkbebenstation SBAT ist als grünes Dreieck gezeigt.

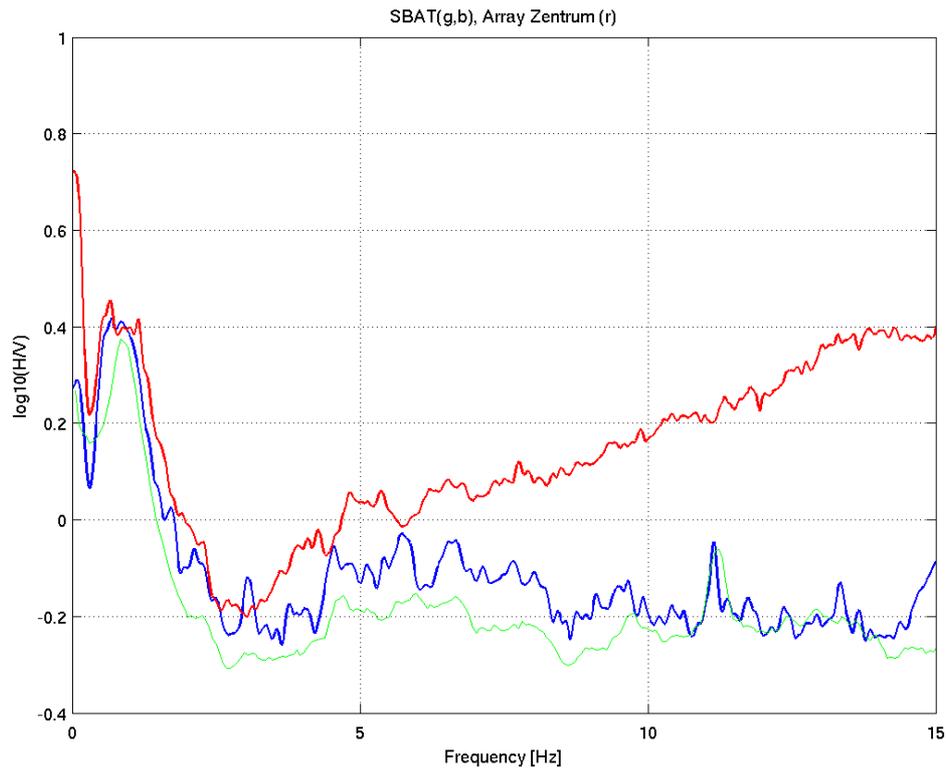
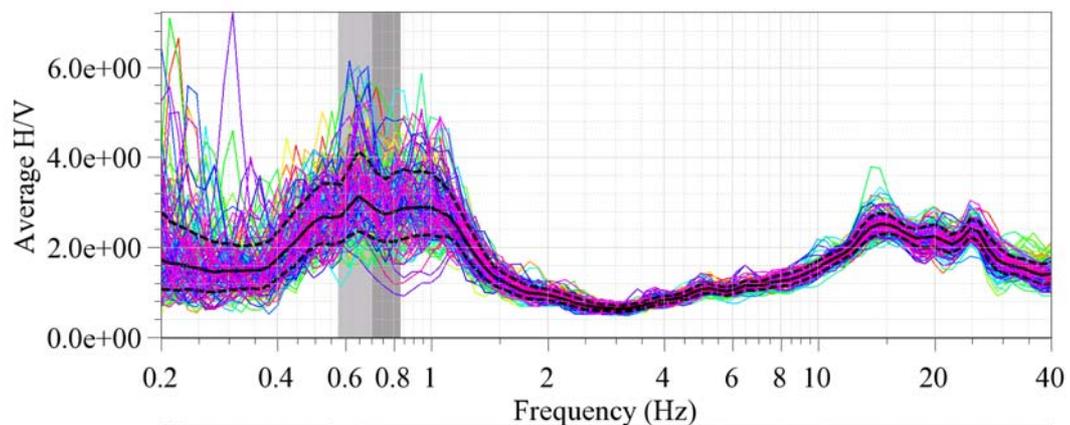


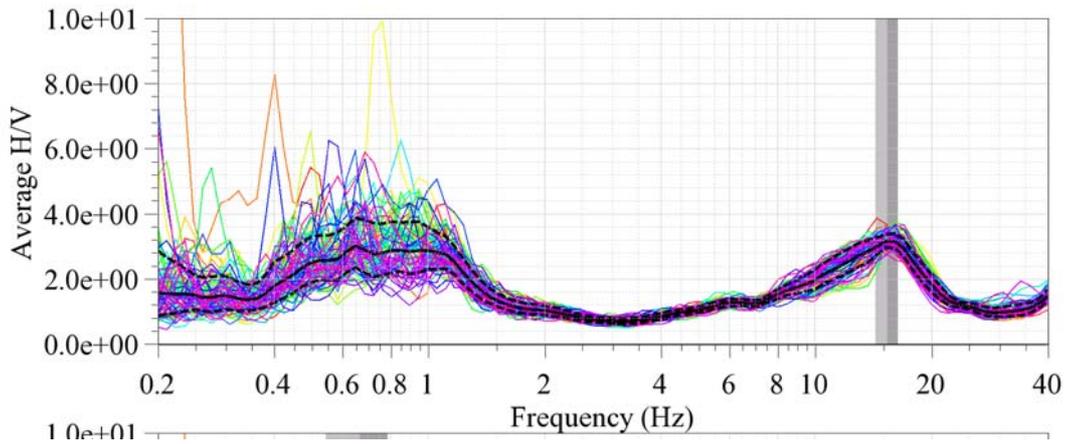
Abbildung 3. Resultat der H/V Polarisationsanalyse bei der Station SBAT (blau: klassische Methode; grün: Frequenz-Zeit Analyse), und im Arrayzentrum (rot: klassische Methode).

Diese Stabilität der H/V Kurven bei der Fundamentalfrequenz in der Umgebung der Station SBAT wird durch die H/V Analyse an verschiedenen Stationen im Array bestätigt (Abbildung 4) : die Fundamentalfrequenz und die Amplitude des H/V Peaks innerhalb des Arrays sind relativ konstant, zwischen 0.5-1 Hz bzw. 2-4. Das zweite H/V Maximum variiert von Station zu Station und zeigt die Variabilität der lockeren Oberflächenschicht.

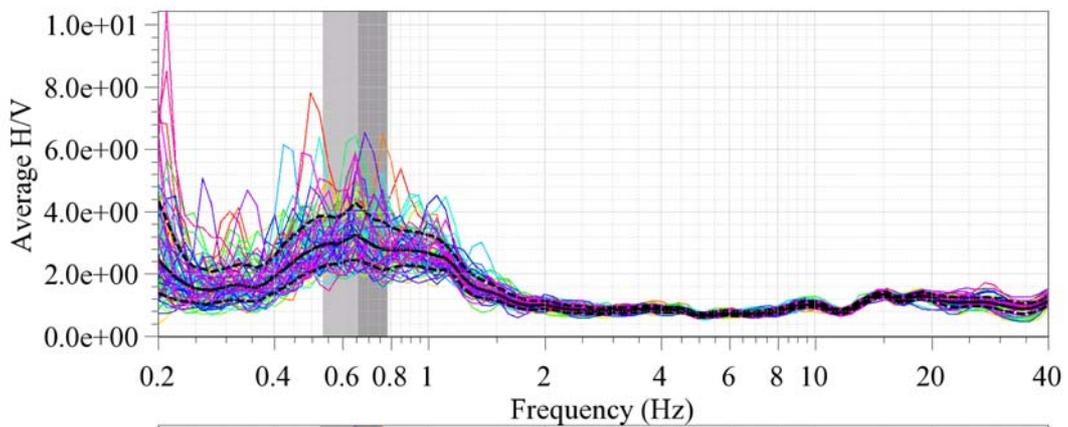
Array-Zentrum 1



Array-Zentrum 2



Station Ecke Nord-Ost



Station Ecke Süd-Ost

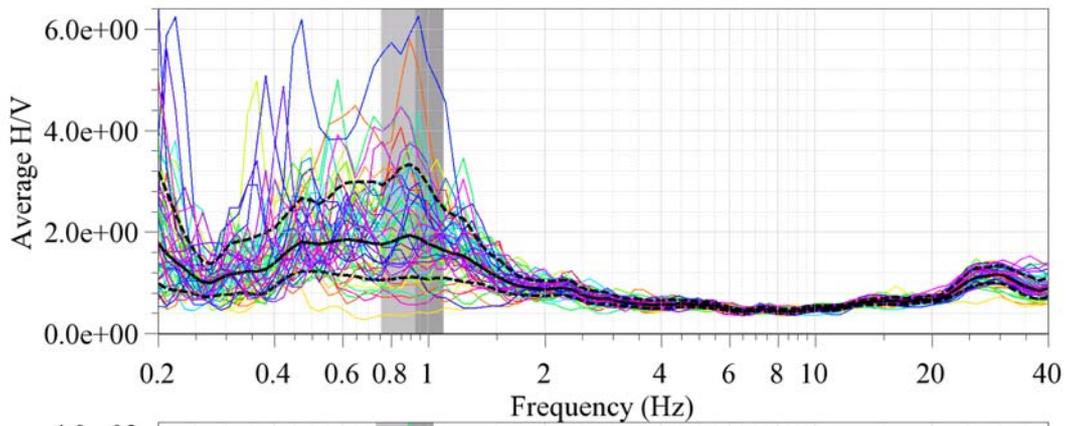


Abbildung 4. Resultat der H/V Polarisationsanalyse der Stationen im Array SBAT.

Inversion mit Einstationsmethode

Nicht ausgeführt.

Arraymessung

Die Dispersionskurven wurden durch die Maxima im Frequenz-Wellenzahl-Spektrum definiert; die Phasengeschwindigkeit nimmt allerdings nicht stetig mit zunehmender Frequenz zu, sondern weist leichte Schwankungen auf. Die Resultate der vier Konfigurationen wurden zu einer kombinierten Dispersionskurve zusammengefügt (Abbildung 5). Die Resultate der F-K Analyse für die Arraykonfigurationen sind in Appendix B gegeben.

Wenn die gemessene Dispersionskurve alleine invertiert wird, ergibt sich als Lösung das Modell in Abbildung 6. Die alleinige Inversion der Dispersionskurven erlaubt keine Bestimmung der Mächtigkeit der Lockersedimente. Dies wird durch eine kombinierte Inversion der Phasengeschwindigkeit und der H/V Kurve verbessert.

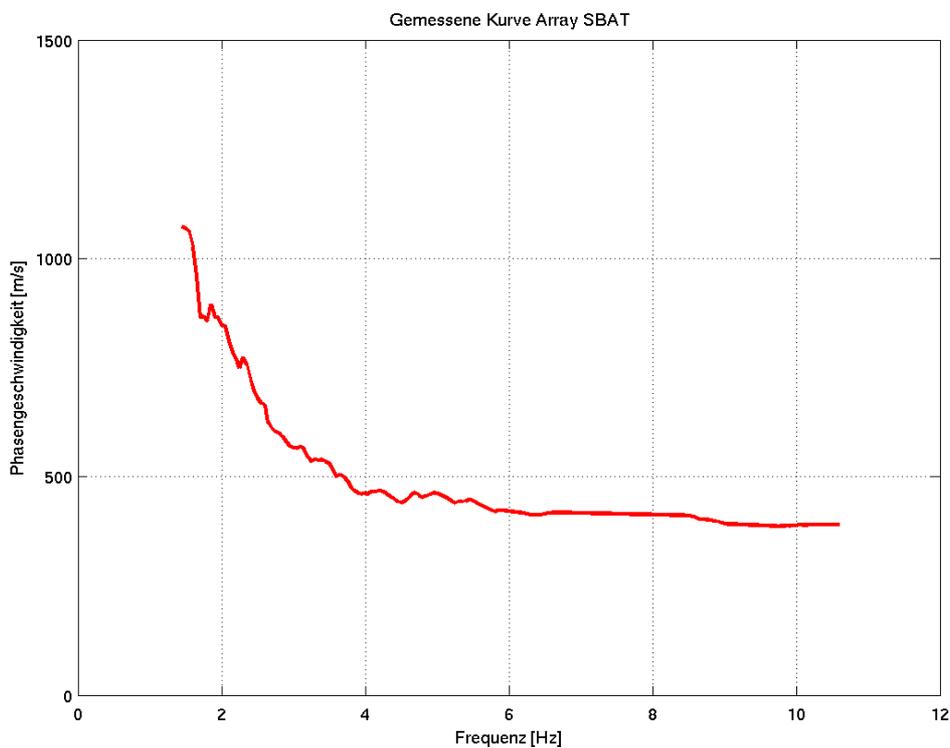


Abbildung 5. Gemessene Dispersionskurve. Es wurden hier nur die vertikalen Komponenten des Arrays analysiert.

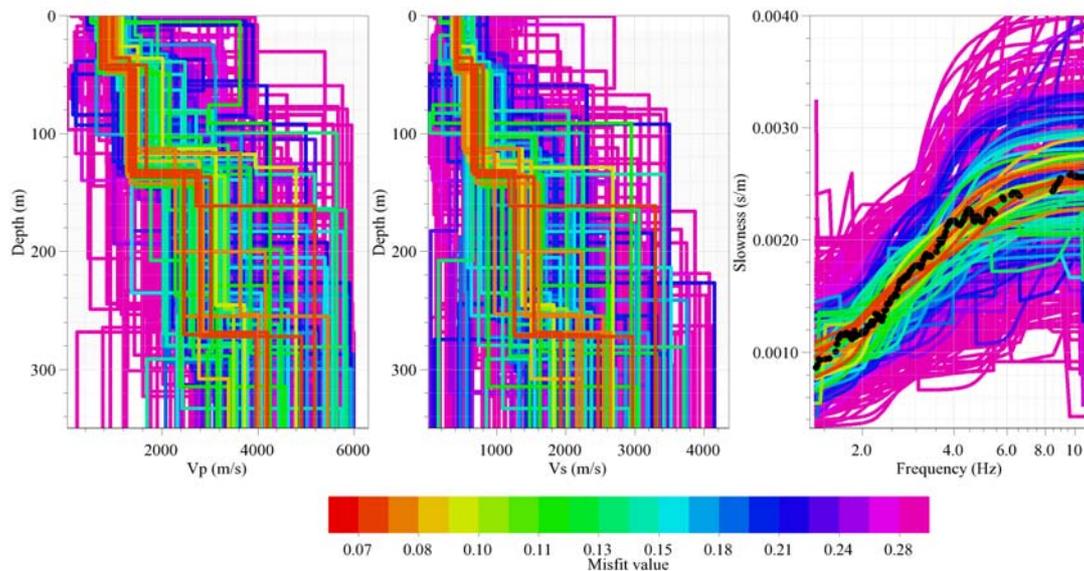


Abbildung 6. Gemessene Dispersionskurven und daraus invertierte Modelle bei Station SBAT. Die roten Bereiche zeigen die am besten passenden Modelle, wenn nur mit Hilfe der Dispersionskurve invertiert wird. Es wurde ein Modell mit vier Schichten angenommen. Für diese Analyse wurde die Software CAP und SESARRAY verwendet, welche innerhalb des SESAME Projekts entwickelt wurde (Ohrnberger, 2004; Wathlet, 2005).

Kombinierte Inversion mit Hilfe der Phasengeschwindigkeit und Elliptizität

Die Ergebnisse der kombinierten Inversion sind in Abbildung 7 und 8 gezeigt (Inversion nach Fäh et al., 2001, 2003). Die Inversionen erfolgten mit unterschiedlicher Gewichtung der Dispersionskurve und H/V Kurve in den verschiedenen Frequenzbereichen. Die Anpassung an die gemessenen Kurven ist in Abbildung 7 gezeigt. Dabei werden folgende Strukturen unterschieden:

- a) Rote Kurven: Berücksichtigung der gemessenen Phasengeschwindigkeit; Berücksichtigung der hochfrequenten Flanke der H/V Kurve. Berücksichtigung der Fundamentalfrequenz.
- b) Grüne Kurven: Berücksichtigung der gemessenen Phasengeschwindigkeit; Berücksichtigung der beiden Flanken der H/V Kurve.

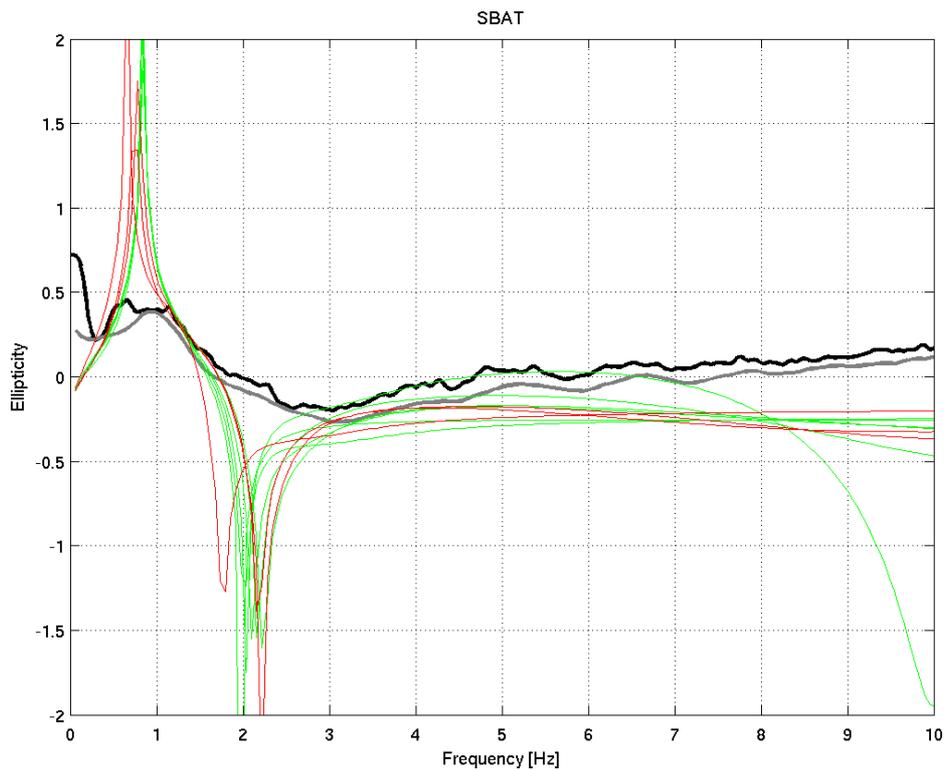
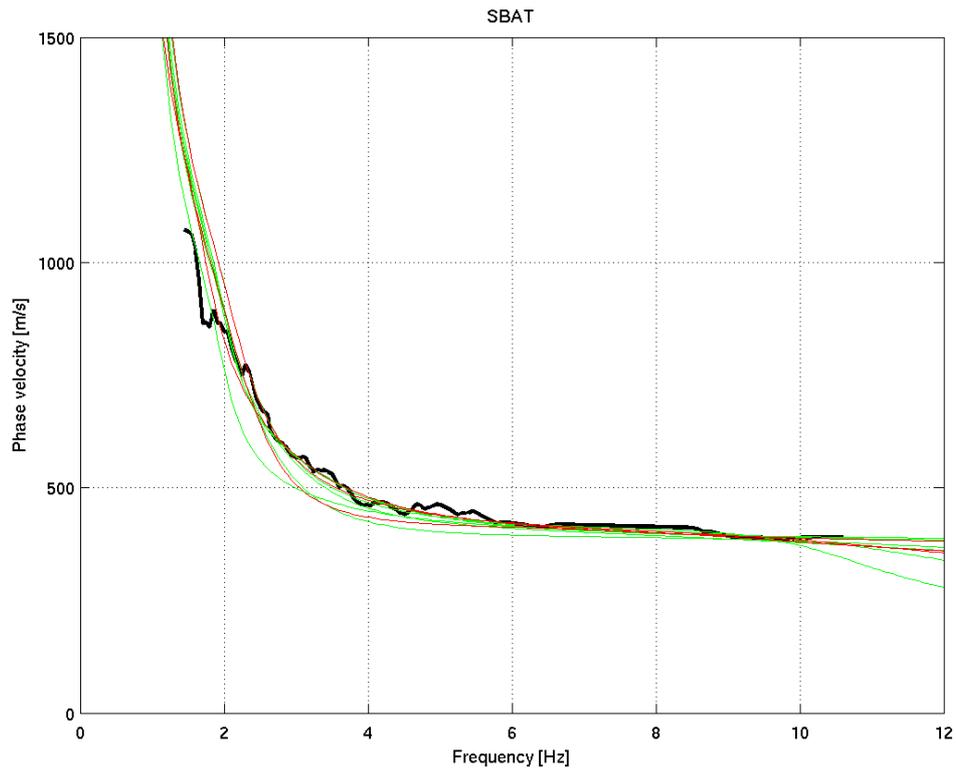


Abbildung 7. Anpassung der Phasengeschwindigkeit (oben) an die gemessenen Werte und der Elliptizität (unten) der Rayleighwellen an das H/V Spektrum am Standort SBAT. Für diese Analyse wurde ein genetischer Algorithmus verwendet (Fäh et al., 2003).

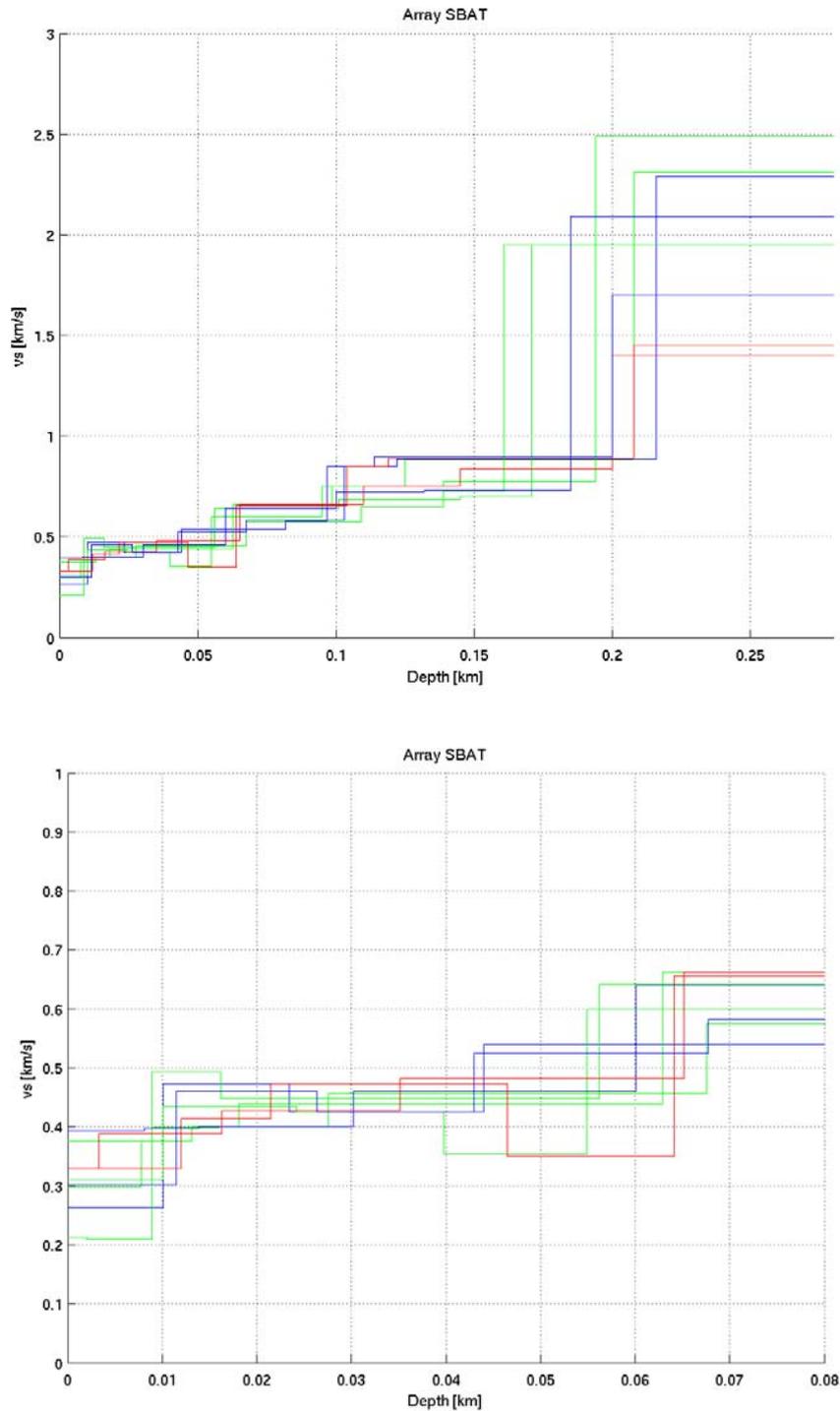


Abbildung 8. Invertierte S-Wellenprofile. Die blauen Strukturen entsprechen den bevorzugten Modellen, da die Gesamtmächtigkeit ungefähr mit dem geologischen Bild übereinstimmt.

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Inversion gezeigt. Die bevorzugten Modelle (blau) ergeben an der Oberfläche eine Schicht von ca. 10m Mächtigkeit mit einer mittleren S-Wellengeschwindigkeit von 250-400 m/s. Diese erste Schicht ist jedoch aufgrund der limitierten Phasengeschwindigkeitswerte gegen hohe Frequenzen nicht gesichert. Das zweite Maximum im H/V Spektrum deutet auf eine Oberflächenschicht mit tiefen S-Wellengeschwindigkeiten hin. Die zweite Schicht wird durch Niederterrassenschotter ausgemacht, bestehend aus Kies und Sand, welche z.T. zu

Nagelfluhbänken verkittet sind. Die Mächtigkeit ist ca. 10-15m und die mittlere S-Wellengeschwindigkeiten liegt im Bereich 400-500m/s. Der Grundwasserspiegel liegt in ca. 17m Tiefe. Im Tiefenbereich von ca. 25 m ist der geologische Fels erreicht (Melettaschichten, Härteklasse 1). Die ersten 20m der Melettaschicht sind verwittert; die Geschwindigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe zu. In den ersten 20m der Melettaschicht liegt die mittlere S-Wellengeschwindigkeit im Bereich 400-500m/s. In den folgenden 20m steigt die mittlere Geschwindigkeit auf 450-550m/s. Zwischen 60m und ca. 100m Tiefe bleibt die Geschwindigkeit konstant und erreicht mittlere Werte von 550 bis 700m/s. In grösseren Tiefen ab ca. 100m steigt die mittlere S-Wellengeschwindigkeit auf 700-900m/s. In ca. 200m Tiefe wird der kompakte Fels erreicht. Die S-Wellengeschwindigkeiten können nicht mehr gut aufgelöst werden. Drei der gefundenen Strukturen sind im Appendix C gegeben (blaue Kurven in Abbildung 8).

Andere Messungen am Standort oder in ähnlichen Strukturen

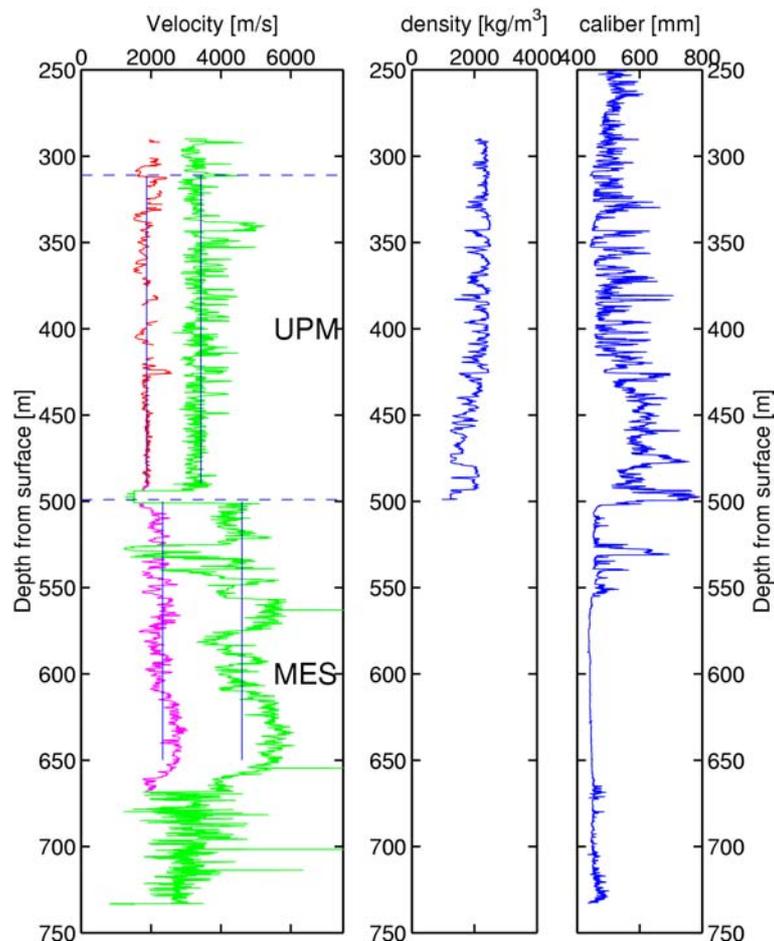


Abbildung 9. Im Bohrloch der Geothermie-Bohrung Otterbach wurden in einem Tiefenbereich zwischen 300 und 650m Sonic-Log-Messungen durchgeführt (GPI, 2001). Die gezeigten tieferen Werte sind S-Wellengeschwindigkeiten, die höheren P-Wellengeschwindigkeiten. Vertikale Linien zeigen mittlere Werte (GPI, 2001).

Vergleich der Arrayresultate mit den seismischen Messungen (GGA) und den SASW Messungen (BRGM)

Ungefähr am selben Standort wurden Messungen durch das BRGM mit der SASW-Methode, und durch das GGA mit S-Wellen Reflexions- und Refraktionsseismik durchgeführt. Die Messstandorte sind in Abbildung 2 gezeigt. Dabei wurden mögliche Modelle für den Standort bestimmt. Ein Vergleich der verschiedenen invertierten Strukturen ist in Abbildung 10 gezeigt. Die Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen SASW und Arraymessungen. Die mittleren S-Wellengeschwindigkeiten sind innerhalb der Messfehler vergleichbar. Die dargestellten Geschwindigkeitsinversionen sind mit grosser Wahrscheinlichkeit Artefakte der verwendeten Methoden. Eine Ursache könnten die relativ grossen Schwankungen der Dispersionkurven sein. Die Geschwindigkeitswerte welche mit der Seismik gefunden wurden liegen im oberen Bereich der Arraymessungen. Innerhalb der möglichen Messfehler sind die Resultate auch in diesem Fall vergleichbar.

Der Vergleich der Array-Messungen mit den SASW Messungen des BRGM (Abbildung 11a) beim Petersplatz (s. Lokalisierung in Abbildung 2) zeigt, dass diese Messungen komplementär sind (Array Messungen geben Information über die Dispersion im niedrigen Frequenzbereich, die SASW im höheren Frequenzbereich). Ausserdem stimmen die Resultate bei der Überschneidung (10Hz – 400 m/s) gut überein. Ein mögliches Modell, das diese kombinierte Dispersionskurve erklären kann, ist in Abbildung 11b gegeben. Es zeigt, dass die langsame Deckschicht nur wenig mächtig ist.

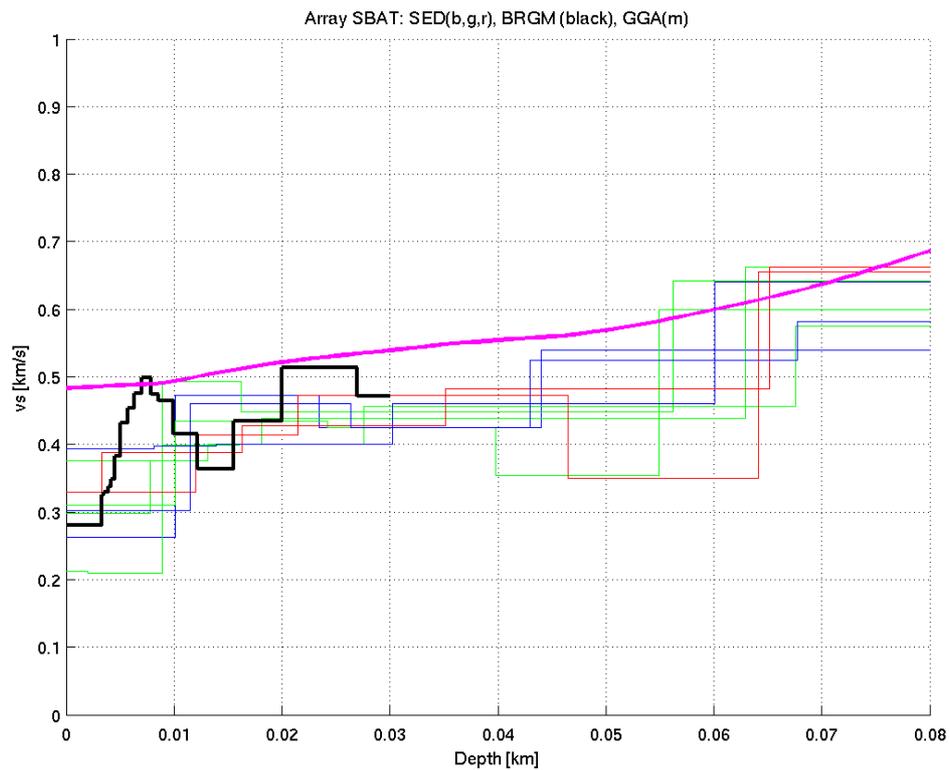
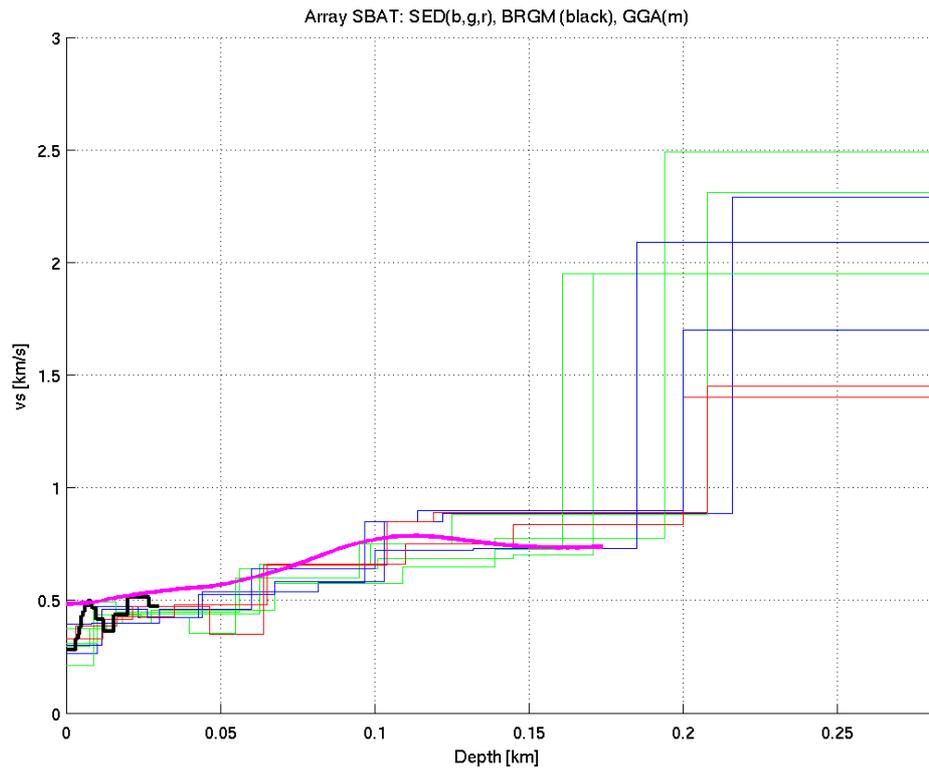


Abbildung 10. Vergleich der Strukturen, welche mit Hilfe der Arraymessungen (blau, rot, grün), der SASW Methode (Schwarz) und seismischen Messungen gewonnen wurden (violett).

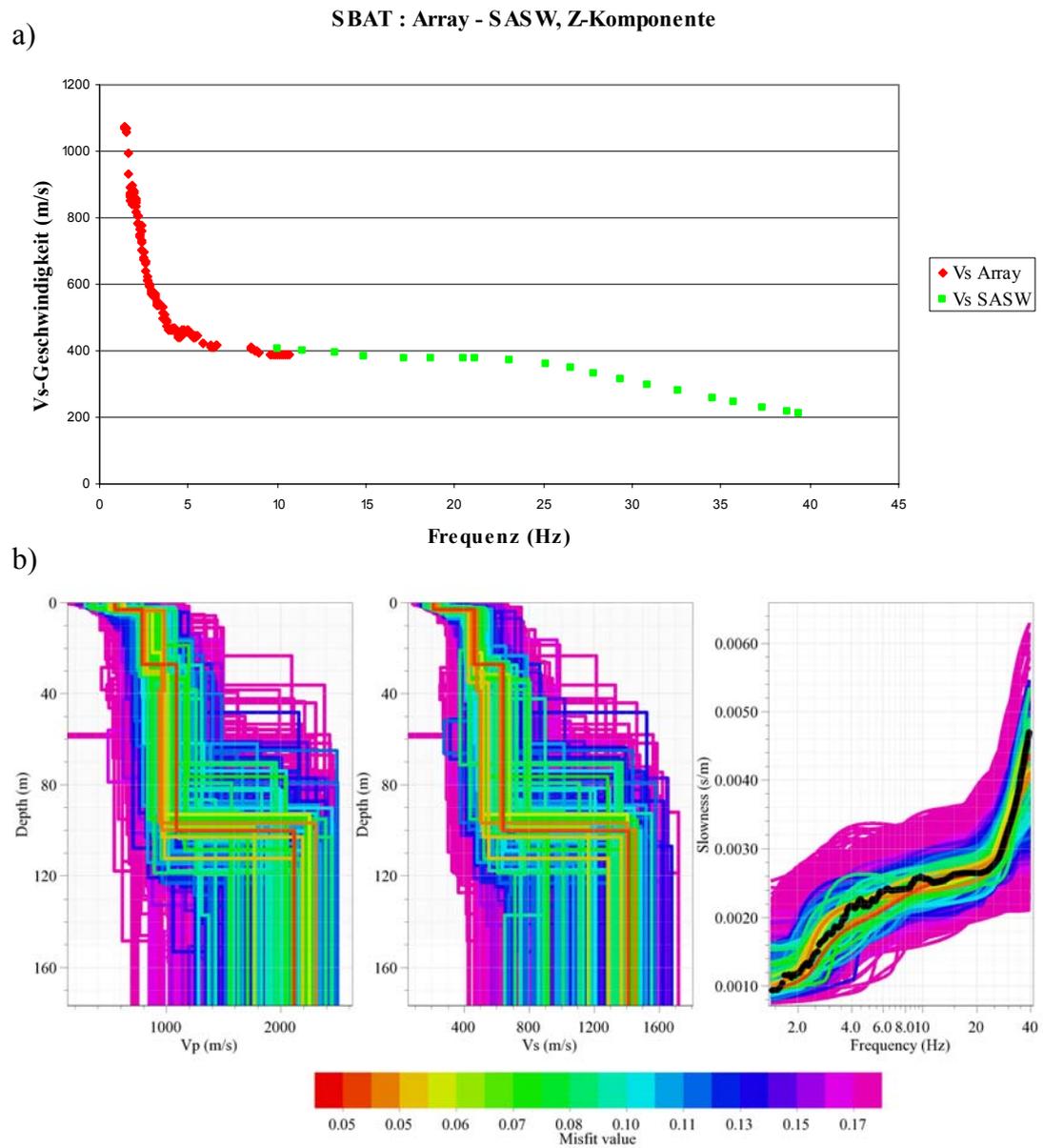


Abbildung 11. Vergleich der Arraymessung mit der SASW Messung (a) und Resultat der Inversion mit der kombinierten Dispersionskurve (b).

Referenzen

- Bitterli-Brunner, P. et al.: Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt 1067, Arlesheim, mit Erläuterungen. Schweizerische geologische Kommission, Bern, 1984.
- Fäh, D., Rüttener, E., Noack, T. and Kruspan, P., 1997. Microzonation of the city of Basel. *Journal of Seismology*, 1, 87-102.
- Fäh, D., Noack, T. und Kruspan, P., 1997. Bewertung des geologischen Untergrundes der Region Basel Stadt auf die seismische Erschütterungsfähigkeit. In: D. Mayer-Rosa et al. (Ed.), *Erdbebengefährdung und Mikrozonierung in der Schweiz*, VdF, Schlussbericht NFP31, 55-67.
- Fäh, D., Kind, F. and D. Giardini, 2001. A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophysical Journal Int.*, 145, 535- 549.
- Fäh, D., Kind, F., Giardini, D., 2003. Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects. *Journal of Seismology*, 7, 449-467.
- GPI Basel, 2001. Bohrloch Otterbach II. Geologisch-Paläontologisches Institut (GPI) der Universität Basel, unveröffentlichte Daten.
- Gürler, B. et al.: *Geologie der Umgebung von Basel, mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme*. 1987, 43pp, Bern.
- Kind, F., 2002. *Development of Microzonation Methods: Application to Basle, Switzerland*. PhD Thesis Nr. 14548, ETH Zuerich.
- Kind, F., Fäh, D., Giardini, D., 2004. Array measurements of S-wave velocities from ambient vibrations. *Geophysical Journal Int.*, 160, 114-126.
- Noack, T., Kruspan, T., Fäh, D. and Rüttener, E., 1997. Seismic microzonation of the city of Basel (Switzerland) based on geological and geotechnical data and numerical simulations. *Ecloga Geol. Helv.*, 90, 433-448.
- Ohrnberger M., 2004. User manual for software package CAP - a continuous array processing toolkit for ambient vibration array analysis. SESAME report D18.06, 83pp (<http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr>).
- Wathelet, M., 2005. *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*. Liège University (Belgium), 177 pages.

Appendix A: Schichtverzeichnis aus Bohrlochinformationen

Schichtverzeichnis

Strongmotion Station SBAT

Koordinaten: 610777 / 267519
 Höhe über Meer: 270m
 Grundwasserstand: 253m. ü. M

----- Bohrung BS-2.Z.501 -----

Quartär

Pleist.	0.00 bis 0.95	Verwitterter Boden / Humus mit Geröllen
	0.95 bis 7.80	Niederterrassenschotter / Schotter mit wenig Sand, Sand gegen unten zunehmend
	7.80 bis 9.60	Niederterrassenschotter / Sandlage mit zahlreichen Geröllen
	9.60 bis 12.10	Niederterrassenschotter / Schotter mit sehr wenig Sand
	12.10 bis 14.20	Niederterrassenschotter / Sand mit feinen Geröllen
	14.20 bis 20.55	Niederterrassenschotter / Sand mit Geröllen vermischt
	20.55 bis 20.90	Meletta Schichten / Ton sehr wenig angewittert
	20.90 bis 22.20	Meletta Schichten / grauer, dichter, Ton mit Sandknötchen
	22.20 bis 24.45	Meletta Schichten / reiner dichter grauer Ton
	24.45 bis 34.65	Meletta Schichten / grauer, dichter Ton mit sandigen, glimmerhaltigen Knötchen oder feinen Lagen und Linsen

----- Bohrtiefe -----

Tertiär

Oligo.	259.00	Top Sannoisien Streifige Mergel / Konglomerate, Kalksteine und sandige Mergel (Lage gemäss korrigiertem 3D Modell Region Basel)
--------	--------	--

Kreide

nicht vorhanden

Jura

Malm

Dogger

Top Lias 869.00 Wechsellagerungen von grauen, teils sandigen, spätigen, oft knolligen Kalken; z.T. schiefrige Mergel bis Tone
(Lage gemäss korrigiertem 3D Modell Region Basel)

Trias

Keuper

Muschelk.

Top Bundsst. 1242.00 fein- bis grobkörniger Sandstein
(Lage gemäss korrigiertem 3D Modell Region Basel)

Appendix B: F-K Analyse für die Arraykonfigurationen

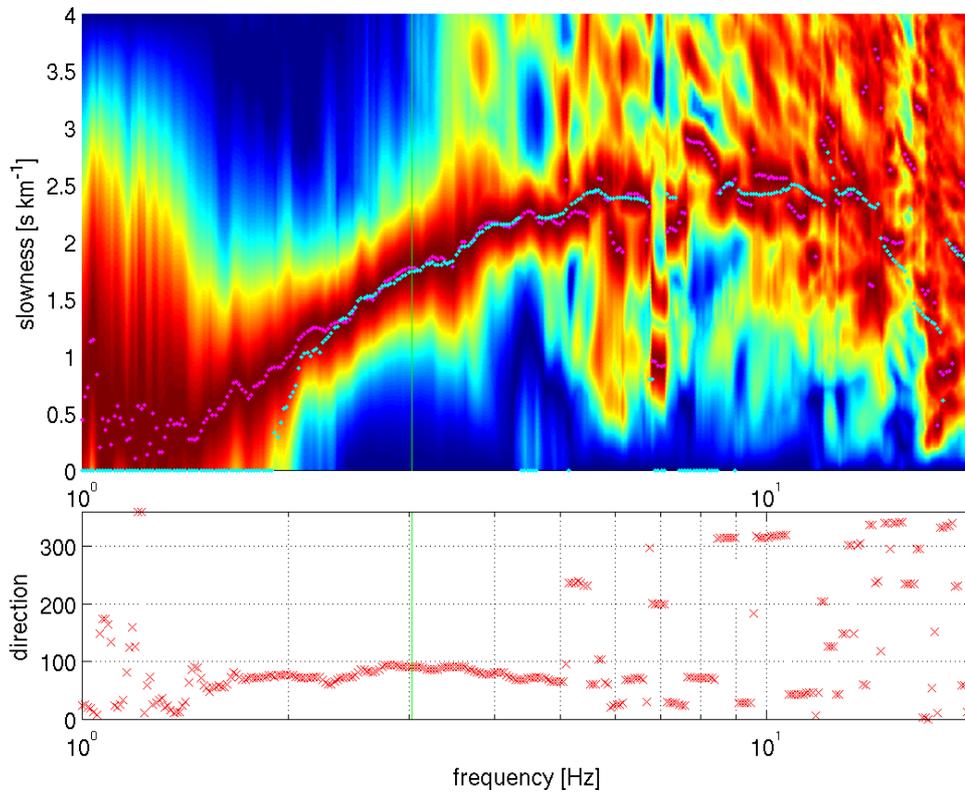
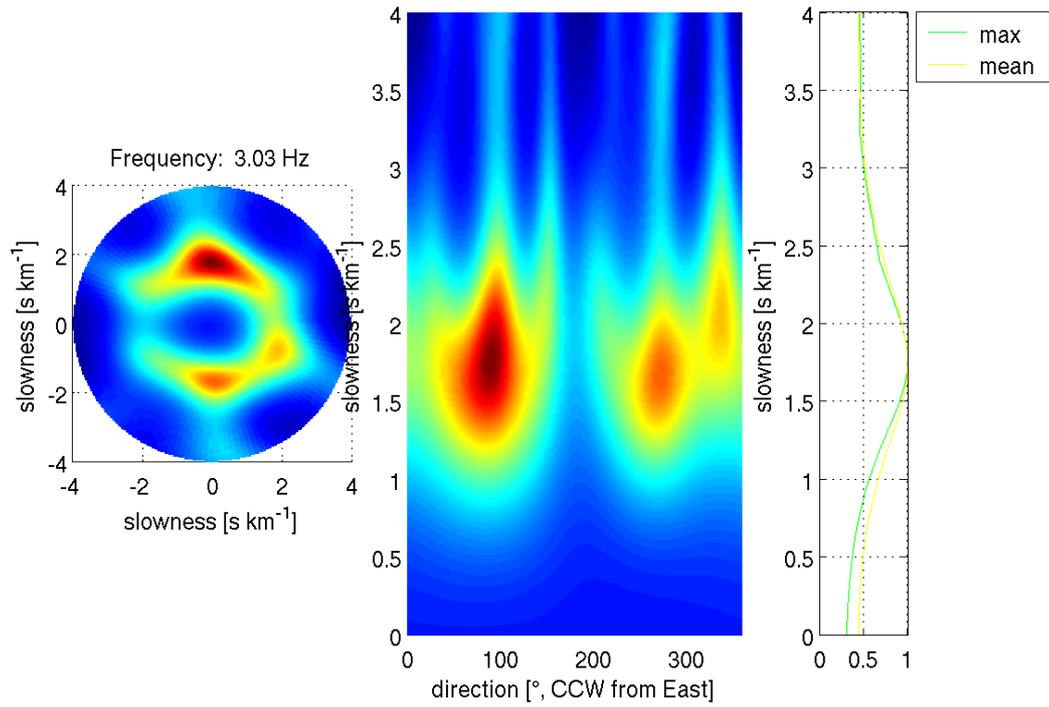


Abbildung B.1. : F-K Analyse und Dispersionskurve für Dreiecke mit 30 -70 m Radius.

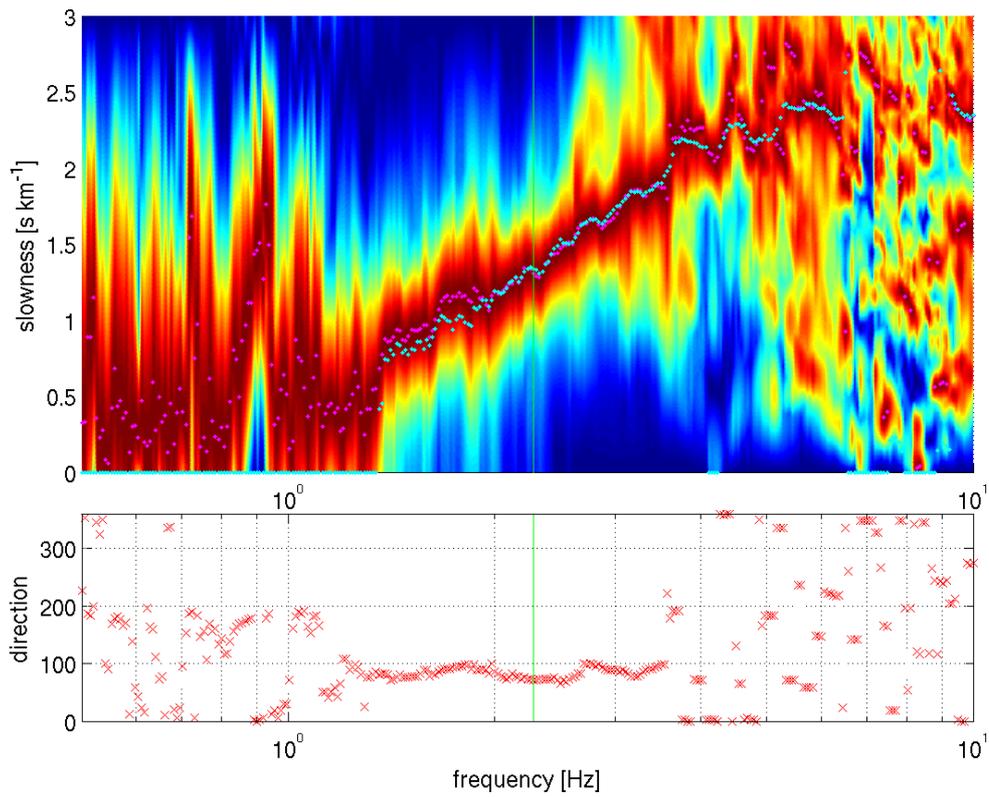
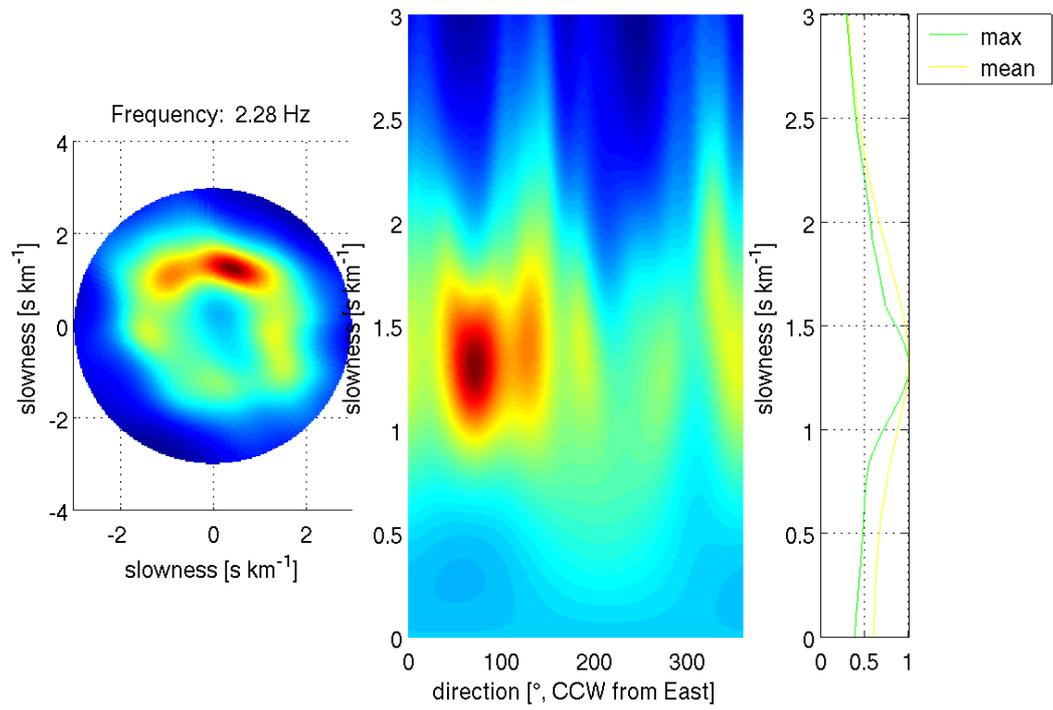


Abbildung B.2. : F-K Analyse und Dispersionskurve für Dreiecke mit 70-250 m Radius (2 westlichen Stationen fehlen).

Appendix C: Mögliche Strukturen am Standort SBAT

Die hier gegebenen Strukturen entsprechen blauen Strukturen in Abbildung 8.

Struktur Nr.1

THICKNESS	DENSITY	P-WAVE VELOCITY	P-WAVE ATTENUATION	S-WAVE VELOCITY	S-WAVE ATTENUATION
THKNES (I)	RHO (I)	A1 (I)	A2 (I)	B1 (I)	B2 (I)
0.10123E-01	0.18000E+01	0.13000E+01	0.38462E-02	0.26337E+00	0.37969E-01
0.13252E-01	0.19000E+01	0.16995E+01	0.29420E-02	0.47283E+00	0.21149E-01
0.20627E-01	0.19000E+01	0.17977E+01	0.27813E-02	0.42500E+00	0.23530E-01
0.37642E-01	0.20000E+01	0.34999E+01	0.14286E-02	0.54032E+00	0.18507E-01
0.15213E-01	0.22000E+01	0.36987E+01	0.13518E-02	0.58104E+00	0.17211E-01
0.24996E-01	0.22000E+01	0.38980E+01	0.12827E-02	0.84982E+00	0.11767E-01
0.94372E-01	0.23000E+01	0.44000E+01	0.11364E-02	0.88729E+00	0.11270E-01
0.19997E+00	0.23000E+01	0.44995E+01	0.66674E-03	0.22889E+01	0.43689E-02
	0.23000E+01	0.46500E+01	0.64516E-03	0.24000E+01	0.41666E-02

Struktur Nr.6

THICKNESS	DENSITY	P-WAVE VELOCITY	P-WAVE ATTENUATION	S-WAVE VELOCITY	S-WAVE ATTENUATION
THKNES (I)	RHO (I)	A1 (I)	A2 (I)	B1 (I)	B2 (I)
0.81748E-02	0.18000E+01	0.12995E+01	0.38477E-02	0.39351E+00	0.25412E-01
0.56778E-02	0.19000E+01	0.16999E+01	0.29413E-02	0.39744E+00	0.25161E-01
0.16304E-01	0.19000E+01	0.17940E+01	0.27871E-02	0.39989E+00	0.25007E-01
0.29980E-01	0.20000E+01	0.24488E+01	0.20418E-02	0.46001E+00	0.21739E-01
0.40034E-01	0.22000E+01	0.25994E+01	0.19235E-02	0.64063E+00	0.15610E-01
0.31798E-01	0.22000E+01	0.27493E+01	0.18187E-02	0.72426E+00	0.13807E-01
0.53252E-01	0.23000E+01	0.43051E+01	0.11614E-02	0.73220E+00	0.13658E-01
0.19986E+00	0.23000E+01	0.44988E+01	0.66685E-03	0.20874E+01	0.47906E-02
	0.23000E+01	0.46493E+01	0.64525E-03	0.21902E+01	0.45657E-02

Struktur Nr.8

THICKNESS	DENSITY	P-WAVE VELOCITY	P-WAVE ATTENUATION	S-WAVE VELOCITY	S-WAVE ATTENUATION
THKNES (I)	RHO (I)	A1 (I)	A2 (I)	B1 (I)	B2 (I)
0.11523E-01	0.18000E+01	0.12997E+01	0.38472E-02	0.30242E+00	0.33067E-01
0.14913E-01	0.19000E+01	0.14507E+01	0.34466E-02	0.46139E+00	0.21673E-01
0.16579E-01	0.19000E+01	0.17999E+01	0.27779E-02	0.42480E+00	0.23541E-01
0.24652E-01	0.20000E+01	0.34987E+01	0.14291E-02	0.52501E+00	0.19047E-01
0.35647E-01	0.22000E+01	0.36978E+01	0.13522E-02	0.58155E+00	0.17195E-01
0.10533E-01	0.22000E+01	0.37253E+01	0.13422E-02	0.84945E+00	0.11772E-01
0.85923E-01	0.23000E+01	0.43972E+01	0.11371E-02	0.89983E+00	0.11113E-01
0.17693E+00	0.23000E+01	0.44961E+01	0.66724E-03	0.17001E+01	0.58820E-02
	0.23000E+01	0.46219E+01	0.64909E-03	0.25414E+01	0.39349E-02