

Verbesserung einer Kreuzkorrelationsanalyse mit ungünstiger Quellverteilung durch Slant Stack und Migrationsanalyse

Tobias Horstmann, Karlsruhe & Thomas Forbriger, Schiltach

Einleitung

In unserer Arbeit haben wir das seismische Hintergrundsignal mit einer interferometrischen Analyse ausgewertet.

Als Voraussetzung, um das seismische Hintergrundrauschen interferometrisch untersuchen zu können, muss der Datensatz eine räumliche Kohärenz aufweisen. Durch das Kreuzkorrelieren des Hintergrundsignals, aufgenommen an zwei Empfängern, entstehen dann Wellengruppen im Kreuzkorrelogramm.

Wie theoretische Arbeiten schon gezeigt haben (e.g. LOBKIS & WEAVER 2001, SNIEDER 2004), können diese Wellengruppen unter der Bedingung, dass eine räumlich isotrope Quellverteilung und eine gleichmäßige Quellstärke vorliegen, als Impulsantwort des Untergrundes aufgefasst werden.

Nicht alle Datensätze genügen jedoch diesen Voraussetzungen und auch in der im Folgenden vorgestellten Arbeit sind diese nicht erfüllt und eine Interpretation der Wellengruppen ist nicht ohne Weiteres möglich.

Es werden daher zwei Ansätze vorgestellt, um trotzdem aus diesen Kreuzkorrelogrammen Informationen gewinnen zu können. Zuerst wird eine Punktquelle mit Hilfe einer Migrationsanalyse lokalisiert und deren zeitliche Aktivität abgebildet. Mit Hilfe eines Slant Stacks werden im daran anschließenden Abschnitt Dispersionskurven aus den Kreuzkorrelogrammen gewonnen, die im letzten Abschnitt zu einem einfachen Untergrundmodell invertiert werden können.

Verwendeter Datensatz

Für diese Arbeit standen die Daten des **Urban-Seismology(URS)**-Projektes zur Verfügung. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 461

„Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen“ wurde dazu ein seismologischer Datensatz im Großraum Bukarest (Rumänien) aufgezeichnet.

Das URS-Projekt wurde von der Universität Karlsruhe (TH) in Zusammenarbeit mit dem „National Institute of Earth Physics (NIEP) of Romania“ von Oktober 2003 bis August 2004 durchgeführt. An 34 Standorten im Stadtgebiet von Bukarest und Umgebung wurden Breitbandseismometer (RITTER et al. 2005) des mobilen **Karlsruher Breitband-Arrays (KABBA)** betrieben.

Während des Projektes zeichneten die Seismometer mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz kontinuierlich auf. Die Stationsverteilung ist in Abbildung 1 dargestellt.

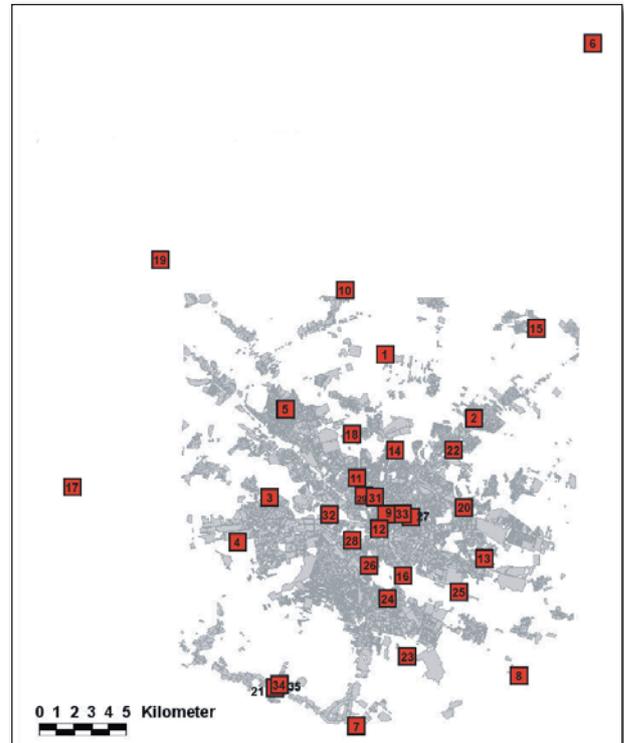


Abb. 1: Darstellung der Stationsverteilung des URS-Netzes in Stadtgebiet und Umgebung von Bukarest (grau).

Kreuzkorrelationen distanzabhängig dargestellt Normalisation: none_NC-sw
 Zeitraum ca. 02-Nov-2003 00:00:00 bis 16-Jun-2004 23:59:59
 Frequenzband: 0.6 – 1Hz Number of Stacks: ca 1408 Zeitfensterlänge: 7200s

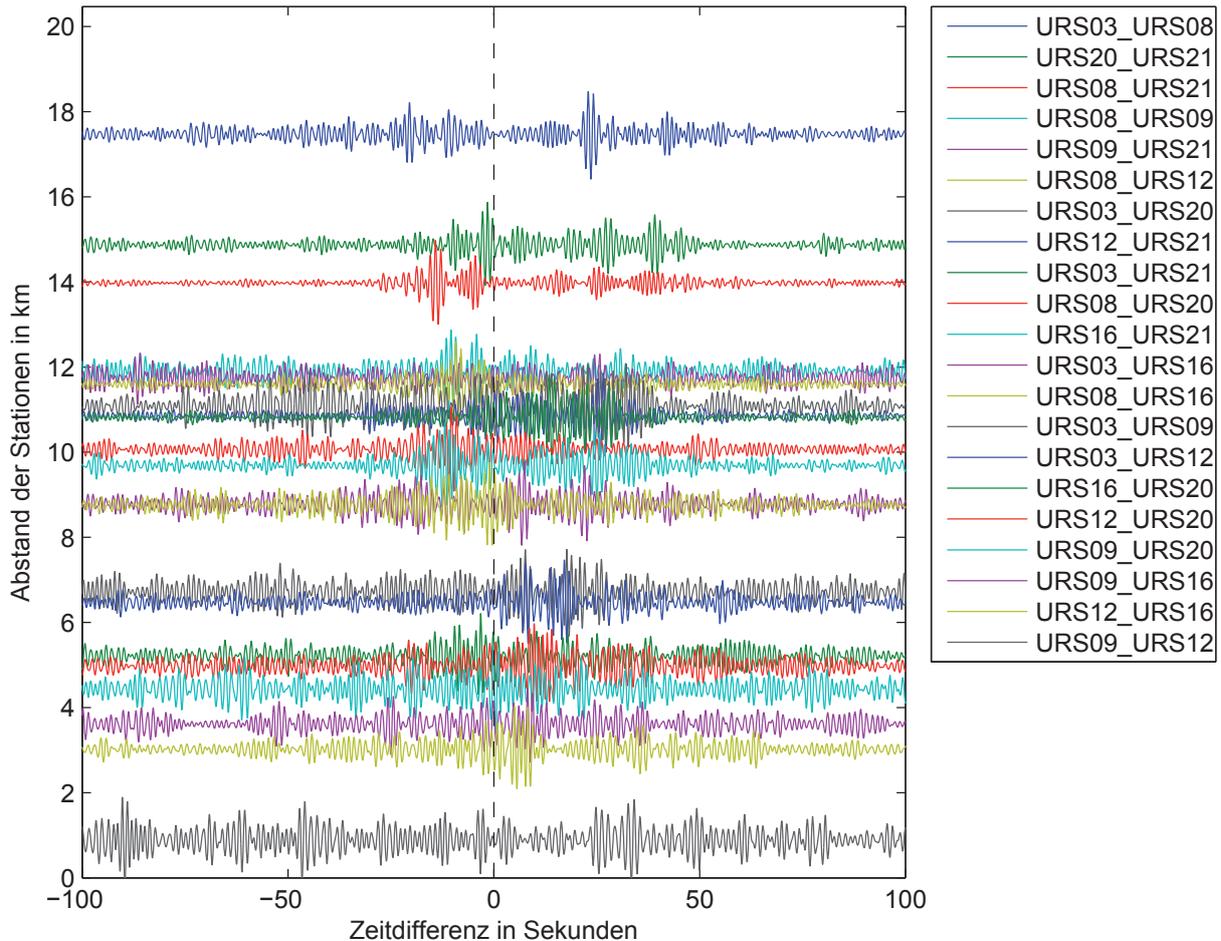


Abb. 2: Kreuzkorrelogramme in Abhängigkeit ihres Stationsabstandes aufgetragen. Die Reihenfolge der Legende stimmt mit den Kreuzkorrelogrammen überein. Die Daten wurden zwischen 0.6 und 1 Hz Bandpass gefiltert und auf ihr Maximum normiert.

Kreuzkorrelogramme des URS-Datensatzes

In Abbildung 2 sind die gestapelten Kreuzkorrelogramme im Frequenzband zwischen 0.6 Hz und 1 Hz distanzabhängig aufgetragen. Auf die Kreuzkorrelogramme wurde im Frequenzbereich ein „spectral whitening“ (BENSEN et al. 2007) und im Zeitbereich eine Noise-Klassifikation (GROOS & RITTER 2009, HORSTMANN 2010) angewendet, die ungeeignete Zeitfenster vor der Stapelung verwirft.

Auf der X-Achse ist die Zeitdifferenz aufgetragen. Der Bereich mit positiven Zeitdifferenzen wird als positiver „Lag“ und die andere Seite als negativer „Lag“ bezeichnet.

Für eine Interpretation als Impulsantwort des Untergrundes würde man die Wellengruppen an einer Position in den Kreuzkorrelogrammen erwarten, die in einer annähernd linearen Beziehung zum Stationsabstand steht. Sie müssten sich daher entlang einer schrägen Linie anordnen, die einer Wellenausbreitung zwischen den zwei Stationen entspricht.

Im Falle eines diffusen Ausgangswellenfeldes würde man zudem symmetrische Kreuzkorrelogramme erwarten, die Wellengruppen müssten sowohl im negativen wie auch im positiven „Lag“ an der gleichen Stelle zu beobachten sein.

In der Abbildung 2 ist beides nicht der Fall. Es sind einzelne Wellengruppen in den Kreuzkorrelogrammen erkennbar, die sich meistens nur in einem „Lag“ ausbilden.

Auch die Anordnung der Wellengruppen steht in keinem linearen Zusammenhang zum Stationsabstand, weshalb die Wellengruppen nicht im Sinne einer sich ausbreitenden Welle interpretiert werden können.

Die Beobachtung zeigt, dass zwar das Wellenfeld eine gewisse räumliche Kohärenz besitzt, es aber nicht ausreichend isotrop ist. Auf der Suche nach einer adäquaten Beschreibung des Wellenfeldes nehmen wir ein von einer Punktquelle dominier-tes Wellenfeld an.

Diese Annahme wird dadurch bestätigt, dass durch die Migrationsanalyse im nächsten Abschnitt eine Punktquelle lokalisiert und ihre zeitliche Aktivität abgebildet werden kann.

Die gleichen Messdaten interpretieren wir noch mit Hilfe eines „Slant Stacks“. Dabei werden die diffusen Anteile des seismischen Hintergrundsignals durch Stapelung konstruktiv überlagert, während sich die zunächst dominanten Signale der Punktquelle destruktiv überlagern. Dadurch wird eine wesentliche Verbesserung des Signal-Stör-Verhältnisses erreicht. Schließlich können Dispersionskurven abgelesen werden.

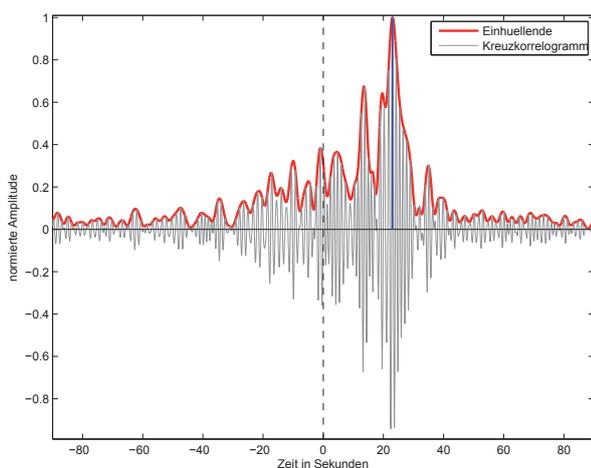


Abb. 3: Migrationsanalyse: In rot ist die auf 1 normierte Einhüllende des in grau gezeichneten Kreuzkorrelogramms zweier Seismogramme dargestellt. Die blaue vertikale Linie gibt die Position des Maximums an.

Lokalisierung der Punktquelle durch Migrationsanalyse

Die Idee hinter der Migrationsanalyse ist einfach: Für eine hypothetische Punktquelle an einem Ort \vec{x} werden die Laufzeiten für eine bestimmte Ausbreitungsgeschwindigkeit v zu den einzelnen Stationen berechnet. Die Zeitdifferenz zwischen den Ankunftszeiten an zwei Stationen ergibt die Position, an der das Signal in dem Kreuzkorrelogramm der beiden Stationen erscheinen würde.

Summiert man die Amplituden der Kreuzkorrelogramme der echten Daten an den für die hypothetische Punktquelle berechneten Zeitpunkten, ergibt sich ein Maß für die Ähnlichkeit der Daten und einer hypothetischen Punktquelle am Ort \vec{x} mit Ausbreitungsgeschwindigkeit v .

Im Folgenden nennen wir deshalb den berechneten Wert Semblancewert, übersetzt Ähnlichkeitswert.

Dazu wird, wie in Abbildung 3 gezeigt, für jede Kreuzkorrelierte ihre Einhüllende berechnet. Anschließend wird sie auf den Wert 1 normiert. Der Semblancewert für den Ort \vec{x} entspricht nun der Summe der Amplitudenwerte an den jeweils berechneten Zeitpunkten aller Kreuzkorrelierten.

In einer Formel ausgedrückt, ergibt sich die Semblancefunktion Σ als

$$S(\vec{x}) = \sum_{l,k} h_{l,k}(T_{l,k}(\vec{x}))$$

wobei $h_{l,k}(t)$ die auf Maximalamplitude 1 normierte Hüllkurve des Kreuzkorrelogramms der Stationen l und k ist. $T_{l,k}(\vec{x})$ ist der erwartete Zeitpunkt des Signals im Kreuzkorrelogramm für eine Quelle am Ort \vec{x} und ergibt sich aus

$$T_{l,k}(\vec{x}) = \frac{|\vec{x}_l - \vec{x}|}{v} - \frac{|\vec{x}_k - \vec{x}|}{v}$$

Bei der Berechnung der Hüllkurve wurde zusätzlich eine Glättungsfunktion mit einer Fensterbreite von 150 Stützstellen (entspricht 1,5 s) angewendet.

Migrationsanalyse mit 34 Stationspaaren
 Zeit ca.02-Nov-2003 00:00:00 bis 08-Jun-2004 23:59:59 velocity = 0.36 km/s
 Frequenzband: 0.6Hz – 1Hz Einhuellende normiert auf 1, d.h. max. Semblancewert = 34

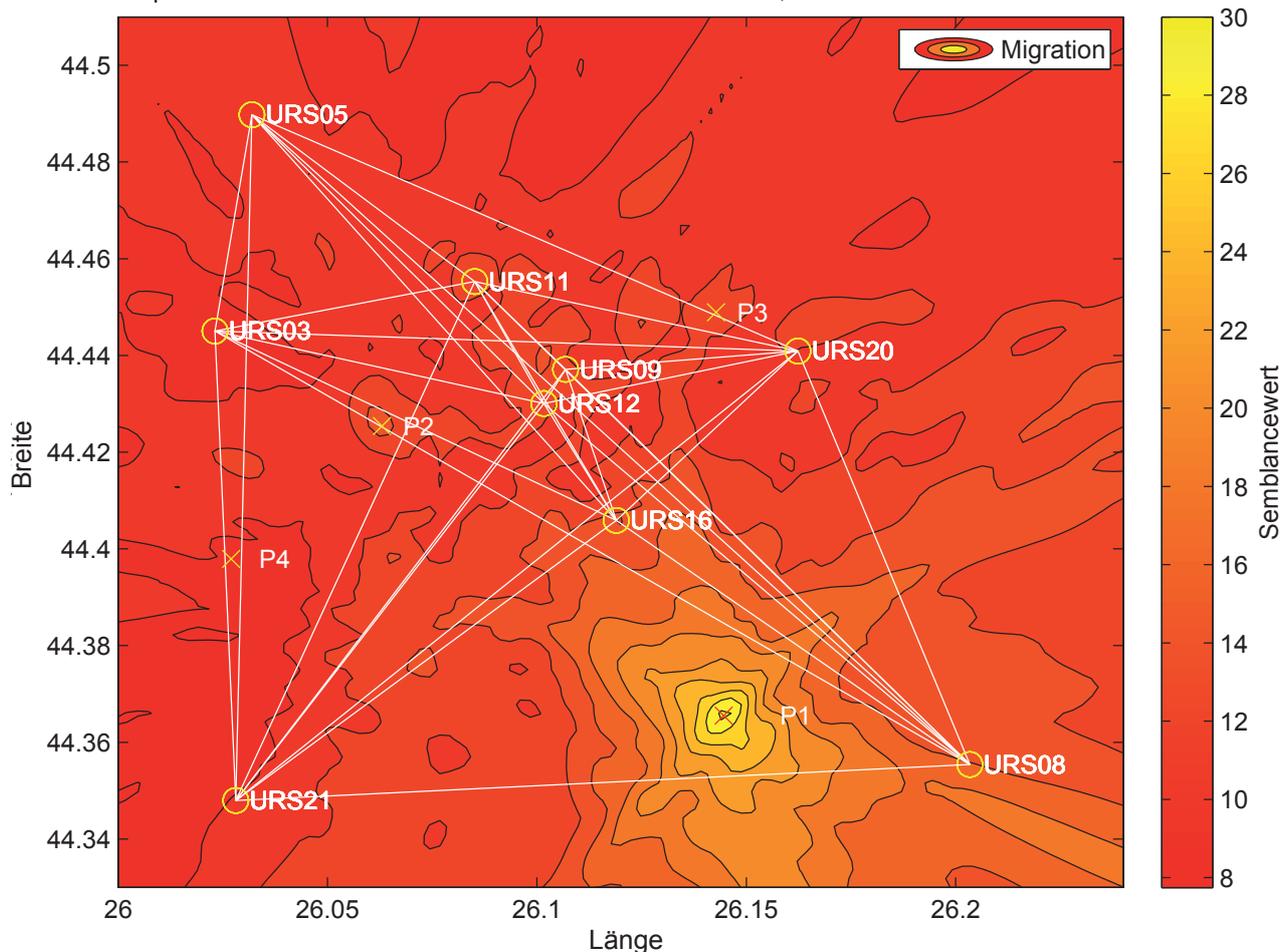


Abb. 4: Ergebnis der Migrationsanalyse: Punkt P1 markiert die Position des größten Semblancewertes. Der hohe Wert von 30 an dieser Stelle zeigt, dass die dominanten Wellengruppen in nahezu allen Kreuzkorrelogrammen durch eine Punktquelle an diesem Ort erklärt werden können.

Ergebnisse der Migrationsanalyse

In Abbildung 4 ist das Ergebnis der Migrationsanalyse für eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von $v = 0,36$ km/s dargestellt. Auf der X-Achse ist die Länge von 26.00° bis 26.24° Ost und auf der Y-Achse die Breite von 44.33° bis 44.51° Nord aufgetragen. Die kleinen weißen Kreise markieren die URS-Stationen, die weißen Linien verbinden Stationen, aus deren Seismogrammen Kreuzkorrelogramme berechnet wurden. In Graustufen kodiert ist der Semblancewert, der auch als Konturdiagramm dargestellt ist.

Tatsächlich gibt es genau einen Punkt, der einen hohen Semblancewert von 30 aufweist. Durch die Verwendung von 34 Stationspaaren liegt der maximal erreichbare Wert bei 34. Der

hohe Wert von 30 beim Punkt P1 zeigt, dass die dominanten Wellengruppen in nahezu allen Kreuzkorrelogrammen durch eine Punktquelle an diesem Ort erklärt werden können.

Zeitliche Auflösung der Punktquellenaktivität

Eine Lokalisierung der Punktquelle ist auch mit Zeitausschnitten aus den Messdaten von nur zwei Minuten Dauer möglich.

In Abbildung 5 ist als Beispiel das Ergebnis der Migrationsanalyse für den Zeitraum am 28. März 2008 zwischen 1:34 Uhr und 1:36 Uhr abgebildet. Das gut sichtbare Maximum beim Punkt P1 zeigt, dass die Quelle in diesem kurzen Zeitraum aktiv gewesen sein muss.

Semblance Analyse von 34 Stationspaaren
 Zeit ca.28-Mar-2004 01:34:00 bis 28-Mar-2004 01:35:59 velocity = 0.36 km/s
 Frequenzband: 0.6Hz - 1Hz Einhuellende normiert auf 1, d.h. max Semblancewert = 34

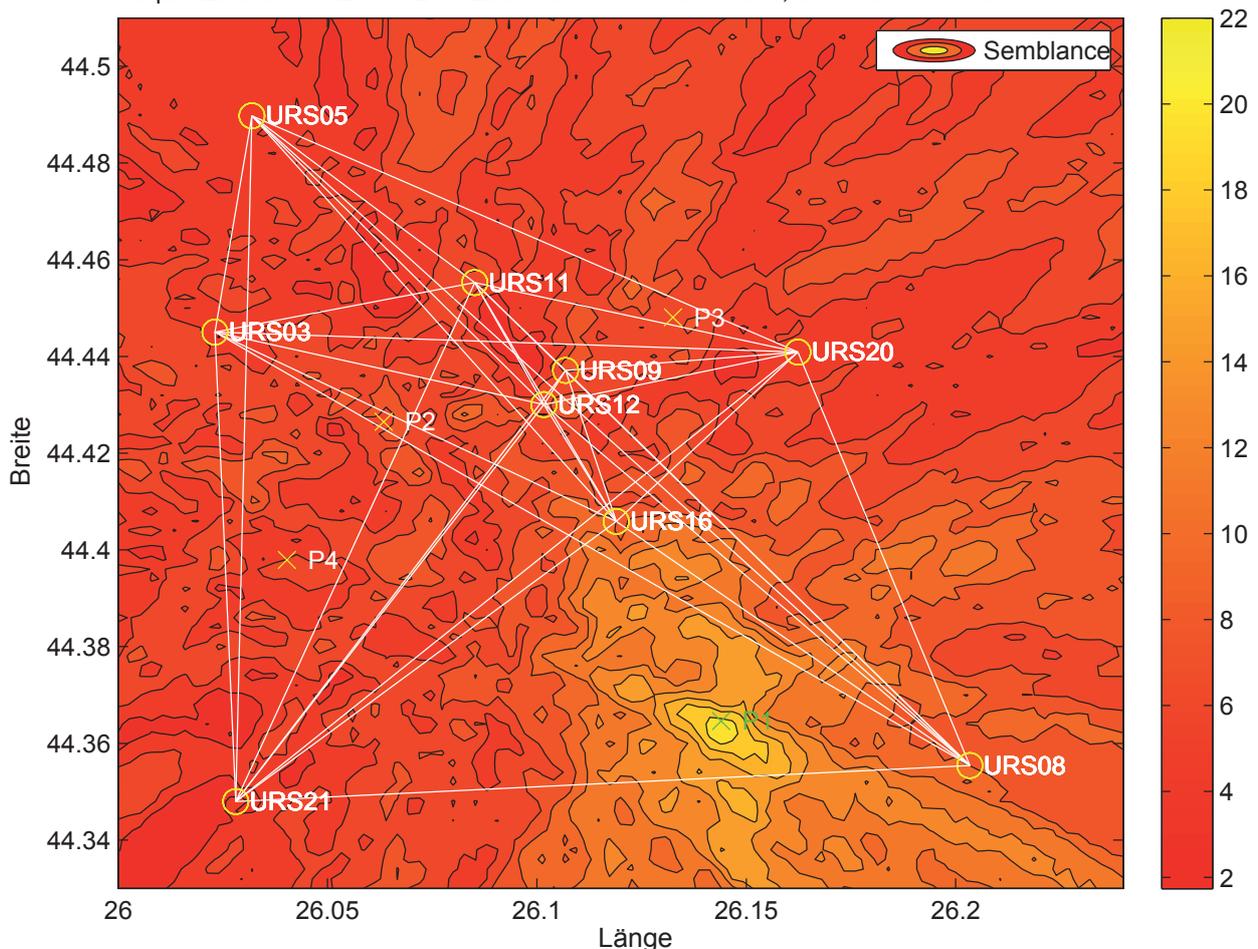


Abb. 5: Ergebnis der Migrationsanalyse basierend auf einer 2 Minuten langen Ausgangszeitreihe vom 28. März 2004 zwischen 1:34 und 1:36 Uhr. Die Punktquelle am Ort P1 ist in diesem Zeitraum aktiv und lokalisierbar.

Durch die Analyse einer ganzen Abfolge von Zeitausschnitten kann so die zeitlich variable Aktivität der Quelle abgebildet werden.

Berechnung von Dispersionskurven mit Hilfe eines Slant Stacks

Die in Abbildung 2 sichtbaren dominanten Wellengruppen konnten im vorigen Abschnitt einer Punktquelle zugeordnet werden, die das seismische Hintergrundsignal dominiert. Es ist aber zu erwarten, dass auch diffuse Anteile in dem Hintergrundsignal enthalten sind, die in den Kreuzkorrelogrammen Wellengruppen mit wesentlich geringerer Amplitude ausbilden. Diese Wellengruppen können als Impulsantwort des Untergrundes interpretiert werden.

Für den zweiten Ansatz wird deshalb ein Slant Stack gewählt, der das Signal-Stör-Verhältnis zwischen diesen Wellengruppen und den unerwünschten Wellengruppen der Punktquelle verbessern soll.

Der Slant Stack entspricht einer $\tau - p$ -Transformation, die wiederum ein Spezialfall der Radon-Transformation ist.

Das Verfahren zum Berechnen der Dispersionskurve aus einem aufgezeichneten Wellenfeld wurde beispielsweise von McMECHAN & YEDLIN (1981) beschrieben und angewendet. Dabei wird zuerst ein Slant Stack berechnet, der durch die Formel

$$\bar{u}(p, \tau) = \sum_{k,l} u_{k,l}(\tau - p\Delta x_{k,l})$$

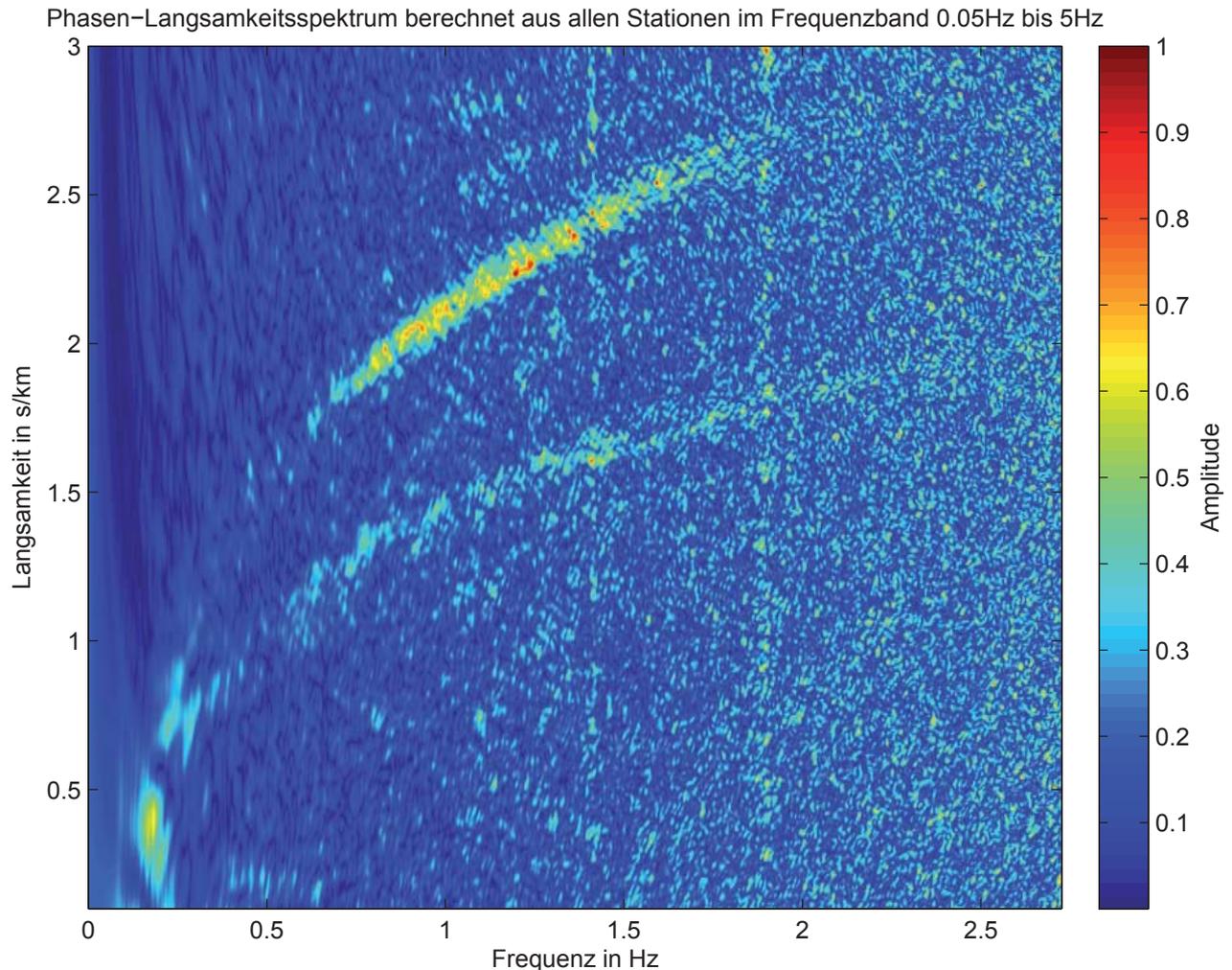


Abb. 6: Ergebnis des Slant Stacks berechnet aus Kreuzkorrelogrammen aller Stationspaare des URS-Datensatzes. Die Kreuzkorrelogramme wurden für den Monat März berechnet.

ausgedrückt werden kann. Dabei wird das Wellenfeld $u_{k,l}$ in die $\tau - p$ -Ebene transformiert, wobei $u_{k,l}$ das Kreuzkorrelogramm der Stationen k und l mit Abstand Δx_{kl} ist und mit p die Langsamkeit und mit τ die Interzeptzeit bezeichnet wird.

Dabei werden die Wellengruppen, die sich aufgrund des diffusen Anteils im seismischen Hintergrundsignal ausbilden und mit p ausbreiten, konstruktiv verstärkt, während sich die dominanten Signale der Punktquelle nicht verstärken.

Anschließend wird das Wellenfeld in der $\tau - p$ -Ebene mit Hilfe einer eindimensionalen Fouriertransformation bezüglich τ in den Frequenz-Phasenlangsamkeits-Bereich ($\omega - p$ -Ebene) überführt. In dieser Darstellung lässt sich anhand der großen Amplituden der

Oberflächenwellen die Dispersionkurve für verschiedene Moden ablesen.

Um das Signal-Stör-Verhältnis entscheidend zu verbessern, werden möglichst viele Kreuzkorrelogramme benötigt. Es werden daher alle verfügbaren Stationspaare des URS-Netzes für diese Analyse benutzt.

Das Ergebnis des Slant Stacks ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Grafik zeigt das Phasen-Langsamkeitsspektrum des URS-Datensatzes berechnet aus Kreuzkorrelogrammen, die ein Frequenzband von 0,05 Hz bis 5 Hz enthielten. Über die X-Achse ist die Frequenz von 0 Hz bis 2,7 Hz und über die Y-Achse die Langsamkeit von 0 s/km bis 3 s/km aufgetragen. In Graustufen kodiert ist die Amplitude, wobei helle Graustufen einen hohen Anteil an sich konstruktiv überlagernden Wellen bedeutet. Der Slant Stack

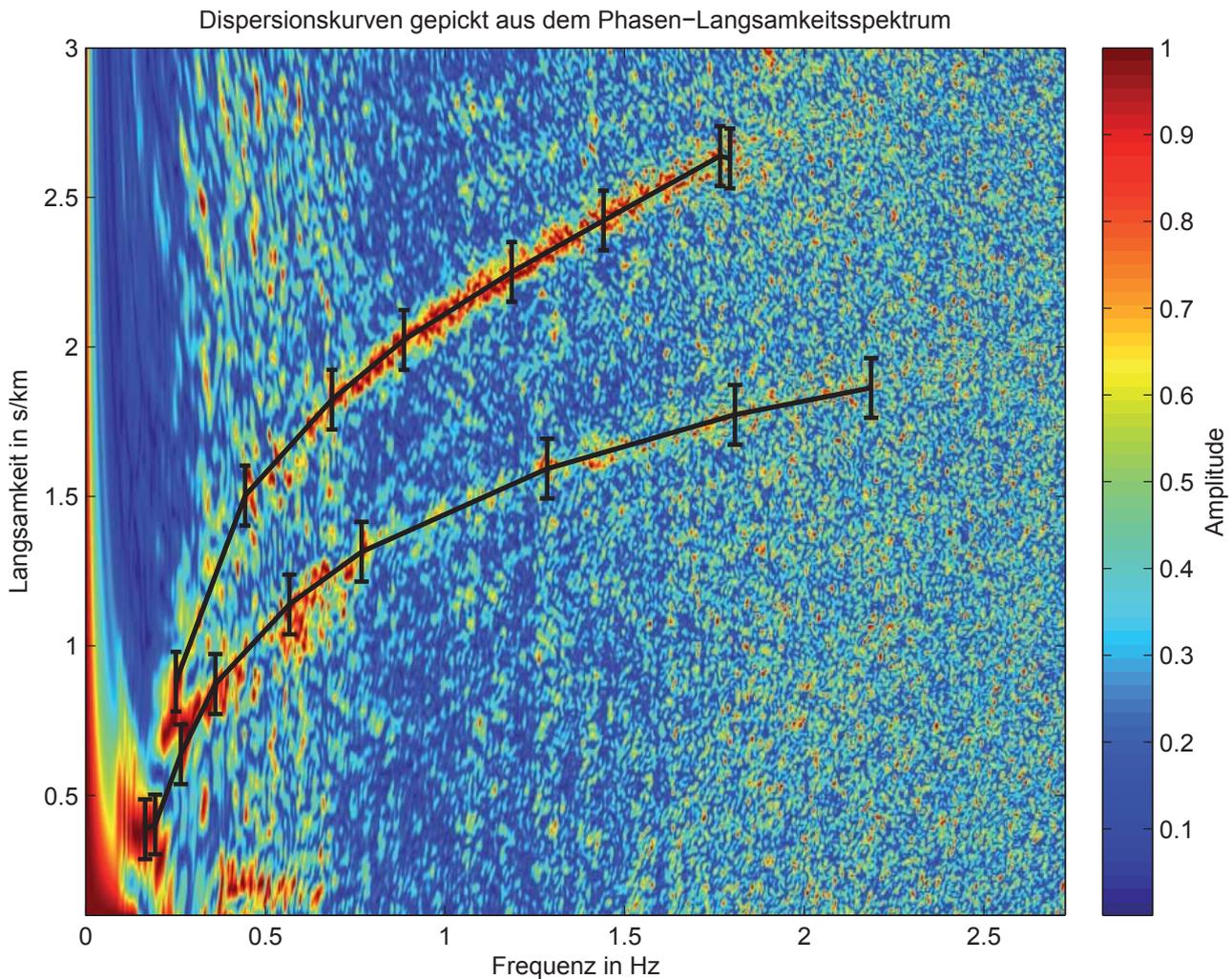


Abb. 7: Slant Stack berechnet aus Kreuzkorrelogrammen aller Stationspaare des URS-Datensatzes. Die Amplituden sind für jede Frequenz auf ihr Maximum normiert. Schwarz eingezeichnet sind die abgelesenen Dispersionskurven für die Inversion. Mit Fehlerbalken markiert sind die gepickten Punkte, die zur Fundamentalmode (obere Kurve) und 1. höheren Mode (untere Kurve) verbunden sind.

wurde für eine horizontale Langsamkeit p von 0,1 s/km bis 3 s/km in Schritten von 0,0025 s/km berechnet.

Die Oberflächenwellen heben sich durch große Amplituden heraus. Die Dispersionskurven sind in einem Bereich von 0,1 Hz bis fast 2,5 Hz sichtbar, wobei neben der Fundamentalmode (obere Kurve) auch die 1. höhere Mode (untere Kurve) erkennbar ist. Die fundamentale Mode ist sehr deutlich und mit großen Amplituden in einem Frequenzbereich von 0,6 Hz bis 1,6 Hz abgebildet.

Abbildung 7 zeigt noch einmal das Phasenlangsamkeits-Frequenzspektrum aus Abbildung 6, jedoch sind zur besseren Sichtbarkeit der Dispersionskurven die Amplituden für jede

Frequenz auf ihr Maximum normiert worden. Schwarz eingezeichnet sind die abgelesenen Dispersionskurven für die Inversion. Mit Fehlerbalken markiert sind die gepickten Punkte, die zur Fundamentalmode (obere Kurve) und 1. höheren Mode (untere Kurve) verbunden sind. Diese Dispersionskurven sind Grundlage für die Inversion im nächsten Abschnitt.

Inversion der Dispersionskurven zu einem Untergrundmodell

Für die Inversion wurde ein „neighbourhood algorithm“ verwendet, der eine globale Suche im Parameterraum durchführt. Dieser wurde von WATHELET (2008) beschrieben und im Programm

Dinver implementiert, das im GEOPSY-Paket enthalten ist (www.geopsy.org).

Unterhalb von Bukarest liegt eine nach Norden mächtiger werdende Sedimentschicht, die in der Inversion durch einen Sprung in den seismischen Geschwindigkeiten sichtbar werden sollte. Als Inversionsmodell wurde eine Schicht mit potentieller Geschwindigkeitszunahme über einem homogenen Halbraum gewählt.

Die verwendeten Inversionsparameter sind in Tabelle 1 gezeigt.

Schicht 0	Suchbereich
$V_{s0,top}$	50 m/s - 800 m/s
$V_{s0,bottom}$	400 m/s - 5000 m/s
$V_{p0,top}$	100 m/s - 2000 m/s
$V_{p0,bottom}$	700 m/s - 8000 m/s
ρ_0	2250 kg/m ³
Mächtigkeit	500 m - 4500 m
Schicht 1	
V_{s1}	2000 m/s - 6000 m/s
V_{p1}	4000 m/s - 11000 m/s
ρ_1	2450 kg/m ³
ν Poissonzahl	0,2 - 0,5

Tab. 1: Inversionsparameter für ein Modell mit einer Schicht über einem homogenen Halbraum.

Wir vergleichen unsere Ergebnisse mit SÈBE et al. (2009), die aus regionalen Erdbeben gewonnene Lovewellen bis zu einer Frequenz von 0,29 Hz invertiert haben. Durch den starken Trade-off zwischen der Tiefe der Schichtgrenze und der oberflächennahen Geschwindigkeit wurde die Tiefe der Schichtgrenze von SÈBE et al. (2009) als A-priori-Information der Inversion hinzugefügt. Aufgrund der abkippenden Schichtgrenze wurde das Messgebiet in ein Süd-, Nord- und ein Zentrumsprofil unterteilt.

Die hier vorgestellte Analyse sollte aufgrund der im Vergleich zum Datensatz von SÈBE et al. (2009) wesentlich höheren Frequenzen in den Dispersionskurven einen Beitrag im oberfläch-

chennahen Bereich liefern und das Modell ergänzen. Eine Überschneidung der Modelle wird in einer mittleren Tiefe erwartet.

In Abbildung 8 ist das in der Inversion bestimmte Scherwellenuntergrundmodell für die in Abbildung 6 gezeigten Dispersionskurven zu sehen. Gezeigt sind alle Modelle, die einen „Misfit“ kleiner als 1 aufweisen. In Graustufen kodiert ist der „Misfit“ des jeweiligen Modells. Das beste Modell weist einen mit Weiß gekennzeichneten „Misfit“ von 0,19 auf. Die V_s -Werte und der Verlauf sind plausibel. Die nicht gezeigten V_p -Modelle zeigen einen ähnlichen Verlauf, die Kompressionswellengeschwindigkeiten können aber nicht so gut bestimmt werden.

In der Abbildung 9 sind die zu den gefundenen Untergrundmodellen berechneten Dispersionskurven gezeigt. Auch hier ist der „Misfit“ der einzelnen Modelle in Graustufen kodiert.

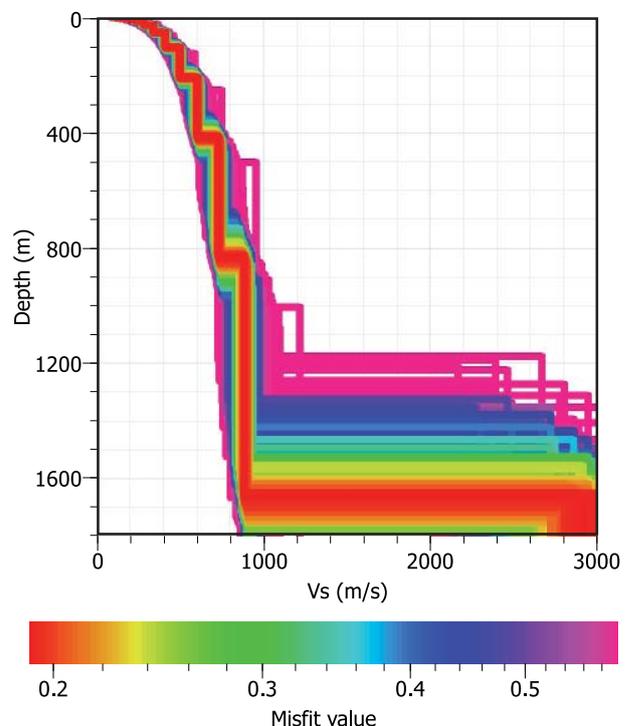


Abb. 8: Untergrundmodelle für potentielle Geschwindigkeitszunahme in der oberen Schicht. Inversionsergebnis für die in Abbildung 6 gezeigten Dispersionskurven. In Graustufen kodiert ist der „Misfit“ der einzelnen Modelle.

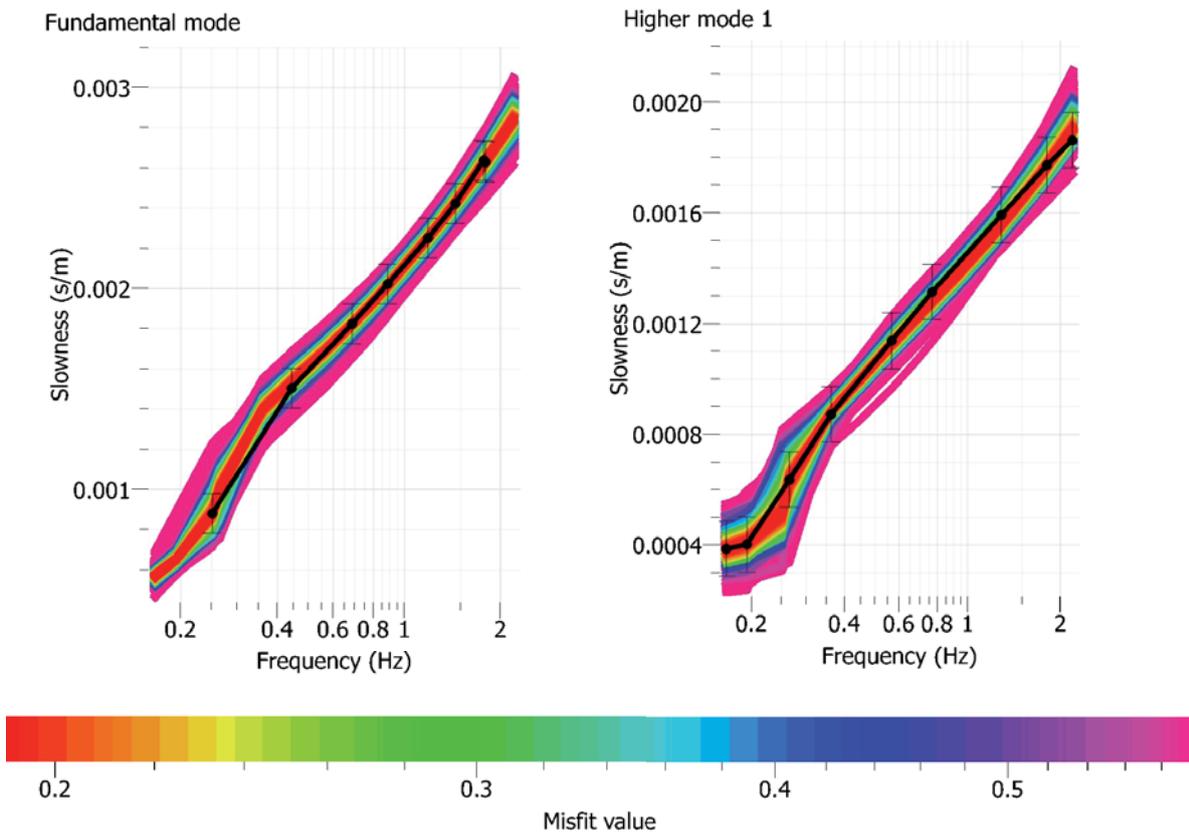


Abb. 9: Dispersionskurven der Ergebnismodelle aus Abbildung 8. In Graustufen kodiert ist der „Misfit“ der einzelnen Modelle. Die gepickten Dispersionskurven sind schwarz eingezeichnet.

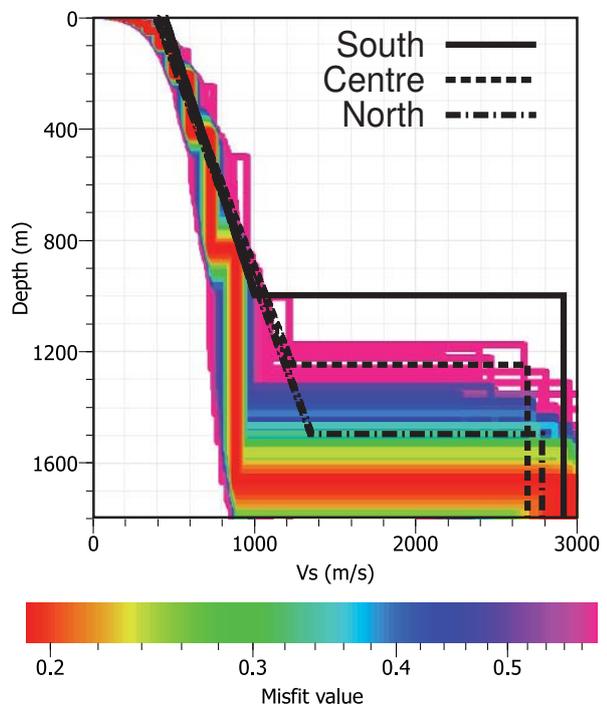


Abb. 10: Vergleich der Inversionsergebnisse mit denen von SÈBE et al. (2009).

Die besten Modelle in weißer Farbe decken sich gut mit den in schwarz eingezeichneten gepickten Dispersionskurven.

Als Ergebnis der Inversion muss eine potentielle Geschwindigkeitszunahme für die obere Schicht angenommen werden, die in der Abbildung 8 durch eine Stufenfunktion angenähert wird. Ein linearer Geschwindigkeitsgradient wie bei SÈBE et al. (2009) konnte die gepickten Dispersionskurven nicht so gut erklären und führte zu einem größeren „Misfit“.

Ein Vergleich der Modelle mit den Ergebnissen von SÈBE et al. (2009) ist in Abbildung 10 zu sehen. Im Bereich bis 400 m Tiefe widerspricht unser Modell mit der potentiellen Geschwindigkeitszunahme dem bestehenden Modell. Die beiden Ergebnisse überschneiden sich bei einer mittleren Tiefe von ca. 400 m. In dieser Tiefe sind beide Verfahren sensitiv und bestätigen sich gegenseitig. Ab 400 m Tiefe liefern die Modelle wieder unterschiedliche Geschwindigkeiten, wobei aufgrund der höheren Sensitivität die Ergebnisse von SÈBE et al. (2009)

vorzuziehen sind. Die in dieser Arbeit gewonnenen Informationen schließen damit eine Lücke in den vorhandenen Modellen für die Struktur in den ersten 400 m unter Bukarest.

Zusammenfassung

Aufgrund des nicht isotropen seismischen Hintergrundsignals, das im Stadtgebiet von Bukarest aufgezeichnet wurde, können die Wellengruppen in den Kreuzkorrelogrammen nicht als Impulsantwort des Untergrundes interpretiert werden.

Die dominanten Wellengruppen konnten aber mit Hilfe einer Migrationsanalyse einer Punktquelle im Stadtgebiet zugeordnet werden. Die extrem kurze Länge der Ausgangszeitreihen, die zum Lokalisieren der Punktquelle in der Migrationsanalyse benötigt werden, ermöglicht eine Abbildung ihrer zeitlichen Variationen.

Mit Hilfe eines Slant Stacks konnten die Wellengruppen in den Kreuzkorrelogrammen, die auf dem diffusen Anteil im seismischen Hintergrundsignal basieren, durch Stapelung verstärkt werden, während die dominanten Wellengruppen der Punktquelle in der Stapelung nicht verstärkt wurden. Auf diese Weise konnten das Signal-Stör-Verhältnis wesentlich verbessert und Dispersionskurven gewonnen werden. Diese konnten zu einem einfachen Untergrundmodell invertiert werden, das eine Lücke in den vorhandenen Modellen für die Struktur in den ersten 400 m unter Bukarest schließt.

Literaturverzeichnis

- BENSEN, G., RITZWOLLER, M., BARMIN, M., LEVSHIN, A., LIN, F., MOSCHETTI, M., SHAPIRO, N. & YANG, Y. (2007): Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broadband surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239–1260.
- GROOS, J. C. & J. R. R. RITTER (2009): Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. *Geophysical Journal International*, 179(2), 1213–1231.
- HORSTMANN, T. (2010): Interferometrische Analyse seismischer Hintergrundsignale. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- LOBKIS, O. & WEAVER, R. (2001): On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110, 3011.
- MCMECHAN, G. & YEDLIN, M. (1981): Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46(6), 869–874.
- RITTER, J., BALAN, S., BONJER, K., DIEHL, T., FORBRIGER, T., MARMUREANU, G., WENZEL, F. & WIRTH, W. (2005): Broadband urban seismology in the Bucharest metropolitan area. *Seismological Research Letters*, 76(5), 574.
- SÈBE, O., FORBRIGER, T. & RITTER, J. (2009): The shear wave velocity underneath Bucharest city, Romania, from the analysis of Love waves. *Geophysical Journal International*, 176(3), 965–979.
- SNIEDER, R. (2004): Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69(4), 46610.
- WATHELET, M. (2008): An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35, L09301.