

Numerische Studie zur seismischen Analyse von Kompaktierungszone am FINO3 Monopile

D. Wilken, S. Wölz, C. Müller, W. Rabbel

Institut für Geowissenschaften, Abt. Geophysik, Christian-Albrechts-Universität Kiel

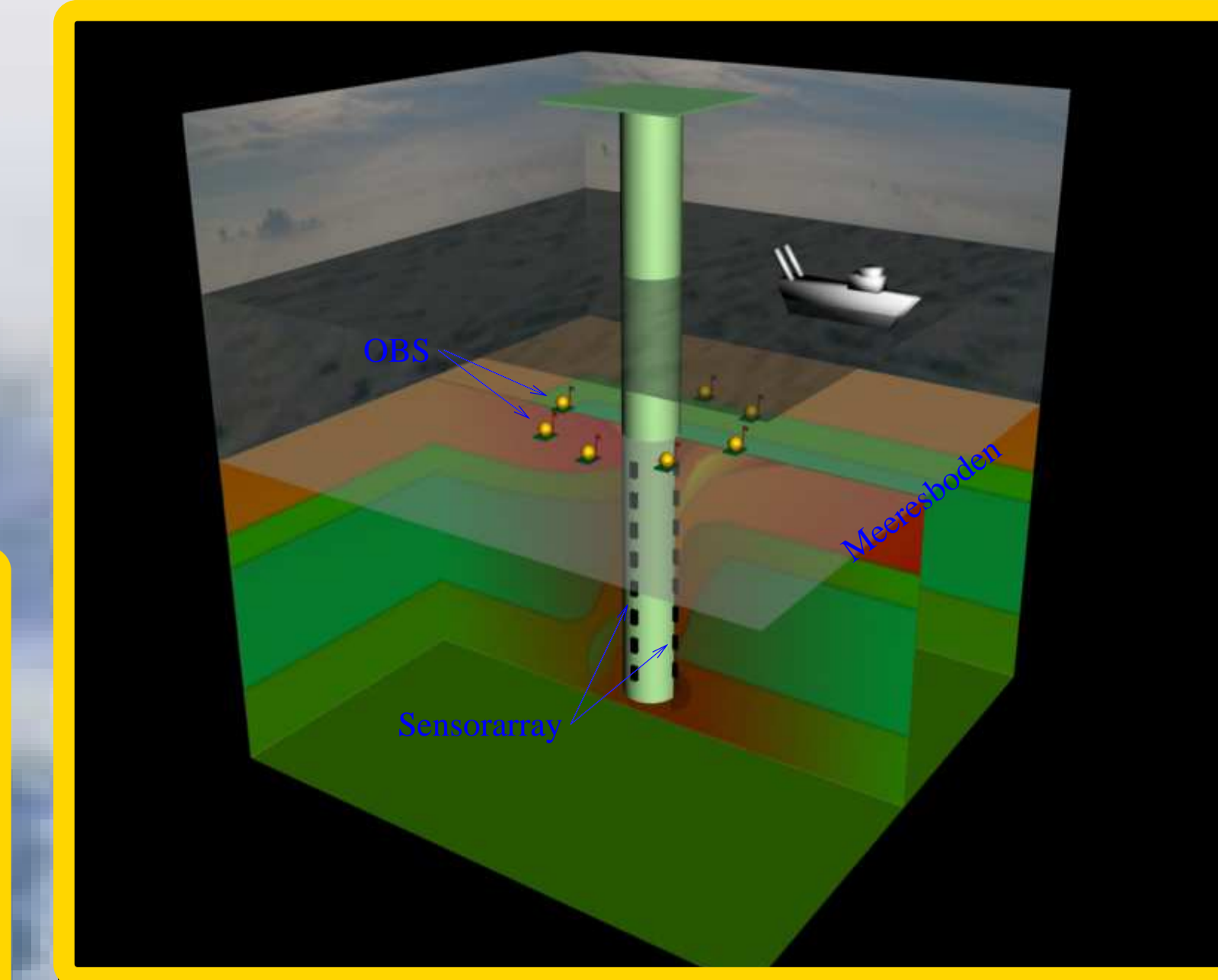


Abb. 1 Schema zu Geometrie des Messaufbaus am FINO3 Monopile.

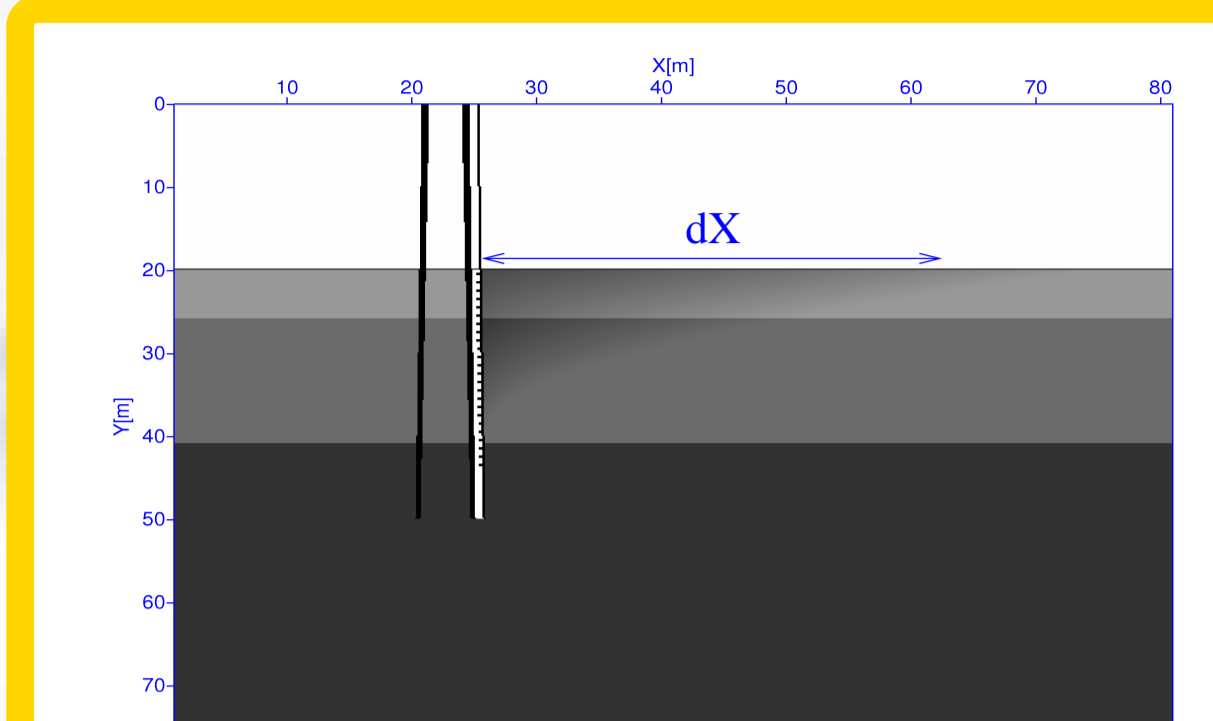


Abb. 2 2D Schema zu Modellgeometrie. Monopile und Hydrophonicarray sowie eine quadratische Kompaktierungszone der lateralen Ausdehnung dX.

Zusammenfassung

Das Projekt FINOSEIS befasst sich mit der Vor- und Nacherkundung des Baugrundes von Offshore-Bauwerken mit reflexionsseismischen und tomographischen Methoden zur Quantifizierung des Gefahrenpotentials infolge von Strukturveränderungen im Boden. Zur Auflösung solcher Veränderungen wie Kompaktierungszone durch Umweltmechanische Belastungen am Gründungspfehl der Bauwerke, sollen verschiedene seismische Methoden an der Forschungsplattform FINO3 zum Einsatz kommen. Es werden Phasenlaufzeit-tomographien des nahen Pfehlumfeldes, eine Untersuchung der am Bauwerk laufenden Wellen, sowie hochauflösende reflexionsseismische Methoden durchgeführt. Hierzu werden in definiertem Abstand um den Pfehl Ozean-Boden-Seismometer (OBS) ausgebracht und am Pfehl mehrere Stahlhalbrohre mit eingelassenen Hydrophonketten angebracht (siehe Anordnung in **Abb. 1**). Als Voruntersuchung und Studie zu diesen Methoden wurde ein numerisches Experiment in Form von 2-D Finite Differenzen Modellierungen durchgeführt. Physikalische Modellparameter wurden den Ergebnissen einer in situ Voruntersuchung im Mai 2006 entnommen. Es wurden unterschiedlich vereinfachte Geometrien (**Abb. 5**) von Kompaktierungsbereichen in die Modelle eingefügt und mit variierten Parametern bezüglich Ausdehnung und Grad der Kompaktierung untersucht. Die Auswertung der Phasenlaufzeiten von Oberflächen-/Scholtebenen und Kompressionswellen ergibt hilfreiche Abschätzungen für die Grenzen der Sichtbarkeit solcher Kompaktierungszone bezüglich der Methoden des FINOSEIS-Konzeptes.

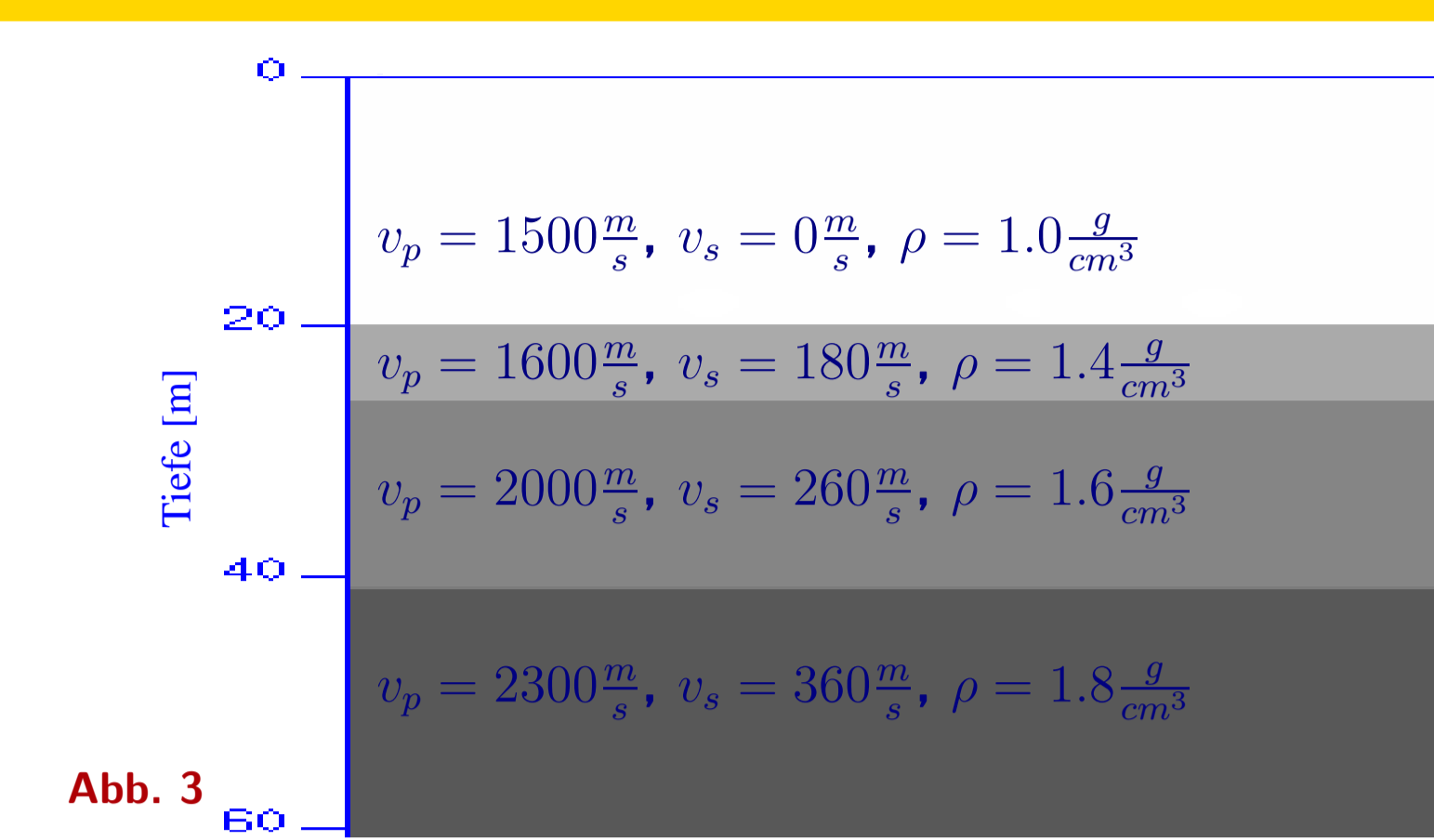


Abb. 3

Zielsetzung

Mittels Phasenlaufzeit-tomographie sollen künftig die Änderungen der Scherwellengeschwindigkeitsverteilung im nahen Pfehlumfeld der FINO3, resultierend aus mechanischen Belastungen am Pfehl, beobachtet werden. Hierzu ist es wichtig abzuschätzen, in welcher Größenordnung sich Phasenlaufzeitunterschiede durch eventuelle Kompaktierungen und analog Auflockerungen bewegen. Im Rahmen dieser Studie wurden Finite Differenzen Modellrechnungen (Bohlen 2001) ohne Kompaktierungszone mit Rechnungen für eine solche Zone verschiedener Ausdehnung verglichen, um Phasenlaufzeitunterschiede von Scholtebenen und Kompressionswellen zu bestimmen.

Parameterwahl

Die Wahl der physikalischen Parameter der Modellierungen

(**Abb. 3**) richtet sich nach den Ergebnissen einer in-situ Messung vom Mai 2006. Die Messfahrt beinhaltet seismische Voruntersuchungen im Bereich des zukünftigen Standortes von FINO3. Die Inversion von Dispersionsverhalten registrierter Scholtebenen ergab eine 2D Scherwellengeschwindigkeits-Tiefenverteilung auf drei Profilen. Für das Startmodell der Inversion wurden aus den Ergebnissen einer hochauflösenden Reflexionsseismik die Schichtmächtigkeiten abgeschätzt.

Die Wahl der Parameter des Geschwindigkeits- und Dichtegradienten der Kompaktierungszone beruht in erster Linie auf einer Arbeit von Wiemann & Lesny (2004), welche die Veränderung des Korngerüsts des einen Monopile umgebenden Sediments resultierend aus einer äusseren Horizontalbelastung des Pfehls mittels 3-D FEM Modellierungen untersucht haben. Die Beispiele dieser Studie ermöglichten eine Abschätzung der Veränderung der Porosität innerhalb einer Kompaktierungszone.

Für die Rechnungen wurde zunächst $\Delta\Phi = 0.08$ als Änderung der Porosität innerhalb der Kompaktierungszone angenommen. Aus $\Delta\Phi$ wurde die Dichteänderung berechnet, sowie die Gesamtänderung der Scher- und Kompressionswellengeschwindigkeit ($\Delta v_p = 57 \frac{m}{s}$, $\Delta v_s = 40 \frac{m}{s}$) mittels empirischer Zusammenhänge abgeschätzt

(Prasad, Meissner 1992; Schön 1983). In den Modellen wurde dann ein entsprechender linearer Gradient in den Größen v_p , v_s und ρ für alle drei Schichten implementiert.

Um die Genauigkeit und das Verhalten von F-D modellierten Oberflächenwellen für diese Studie zu prüfen, wurde ein Vergleich mit Rechnungen aus MEIFSK (Wang 1999) für das gleiche, einfache 1D Modell des Sediments (**Abb. 3**) vorgenommen. **Abb. 4** zeigt als Ergebnis das aus MEIFSK erhaltene Frequenz - Langsamkeitsspektrum der Scholtebene und das Spektrum einer 2-D elastischen F-D Modellierung (blaue Kurve). Die Abbildung zeigt eine gute Übereinstimmung der Kinematik der Scholtebene. Die Sensitivität der Welle mit der Tiefe für unterschiedliche Frequenzen und die daraus resultierende Dispersion lassen also eine Untersuchung der Phasenlaufzeit und eine anschließende Zuordnung der Geschwindigkeiten mit der Tiefe zu.

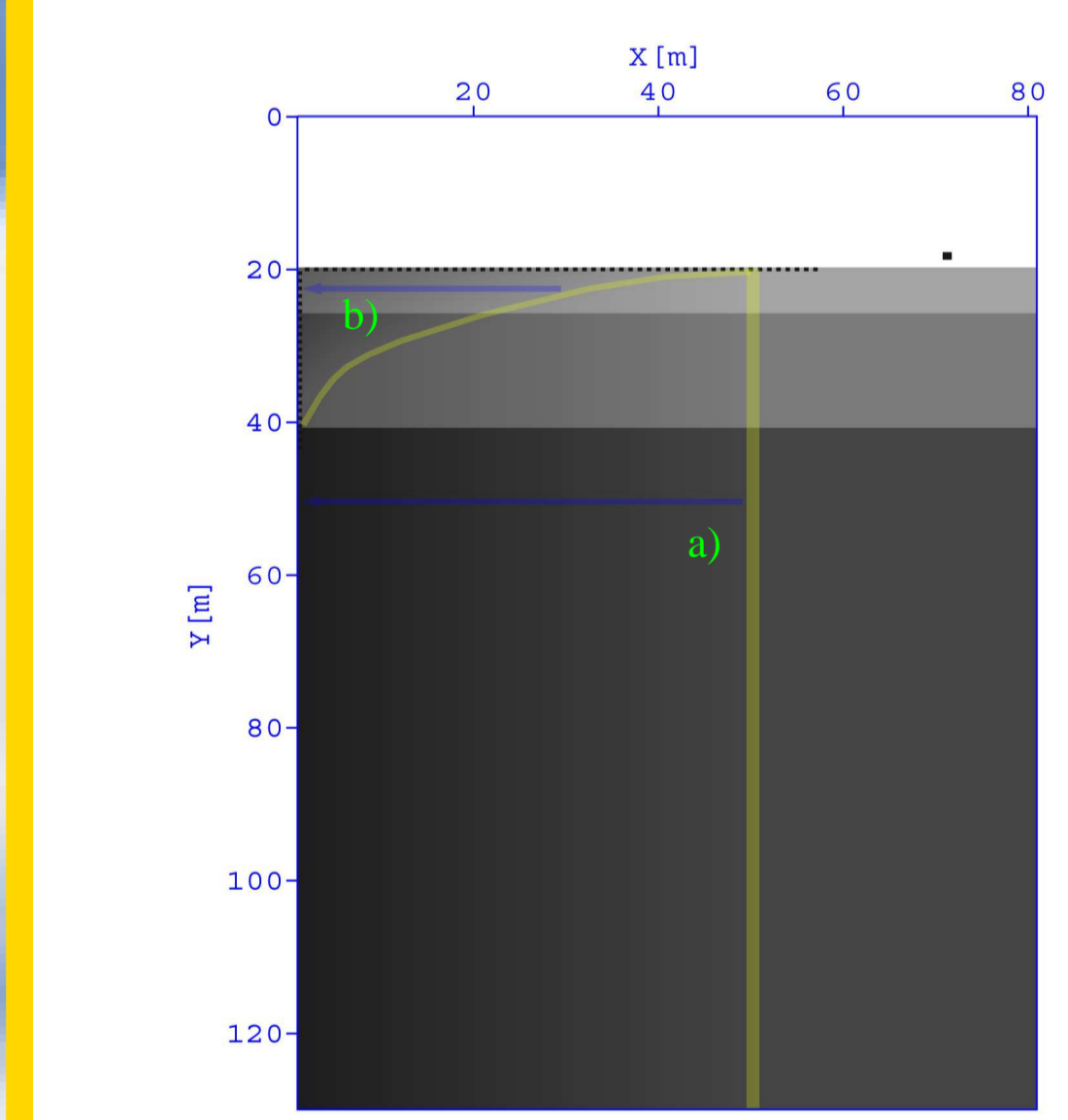


Abb. 5 Modellgeometrien der vereinfachten Kompaktierungszone, Sensor- und Quellpositionen

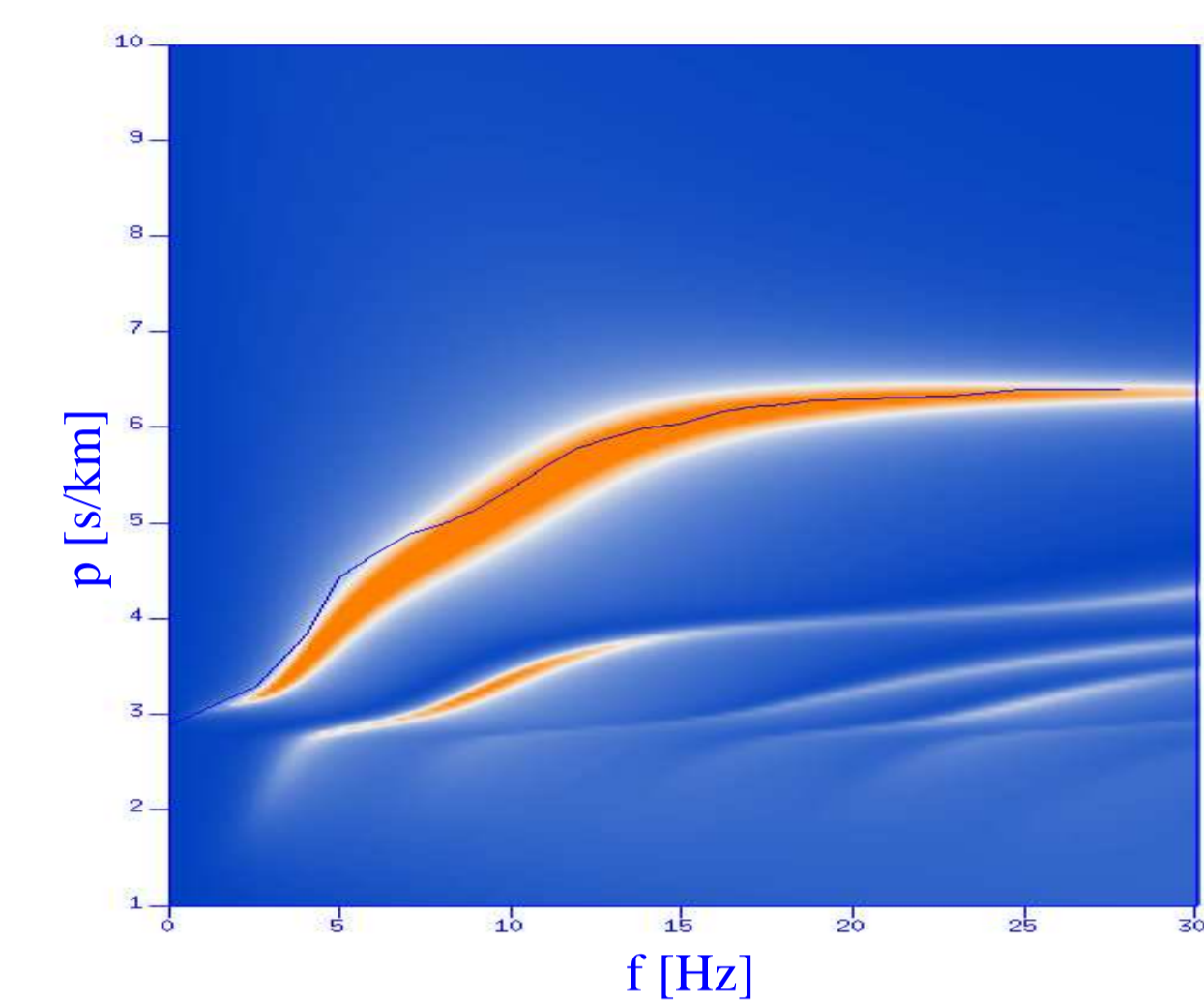


Abb. 4 Phasenlangsamkeits-Frequenzspektrum aus MEIFSK. Blaue Kurve: Phasenlangsamkeits-Frequenzspektrum der FD-Modellierung.

Modellrechnungen

Es wurden nun 2-D elastische F-D Modellierungen des Wellenfeldes mit den in **Abb. 5** dargestellten Modellen durchgeführt. Die Modelle beinhalten vereinfachte Geometrien von Kompaktierungszone, einer zum Pfehl parallelen Kompaktierung (a) und einer quadratisch interpolierten Kompaktierungszone (b). Letztere hat eine vertikale Ausdehnung von 20m, entsprechend einer ungefähren Gründungstiefe des Pfehls von FINO3 von 25m bis 30m. Diese vereinfachten Modelle enthalten keinen Gründungspfehl und das Wellenfeld wird am Rand der Kompaktierungszone absorbiert. Es wurde eine Punktquelle 2m über dem Meeresboden in einem Abstand von 70m vom linken Rand der Modelle, welcher dem Pfehl entspricht, eingefügt. Die dominante Frequenz des von der Quelle ausgesandten Ricker Wavelets beträgt $f_c = 25Hz$ entsprechend der im Mai 2006 eingesetzten Airgun. Am linken Rand der Modelle befinden sich ab 0.5m unterhalb des Meeresbodens in einem Tiefenabstand von 1.1m 24 Sensoren, entsprechend einer Sensorkette am Pfehl. Die laterale Ausdehnung der Kompaktierungszone wurde jeweils auf 15m, 20m, 25m und 50m gesetzt.

Modellierung der Scholtebene

Abb. 6 zeigt einen Snapshot der Wellenfeldmodellierung mit einer sich ausbreitenden Scholtebene. **Abb. 8** zeigt eine vertikale Seismogrammsequenz der Sensorkette für das Modell ohne Kompaktierungsbereich. Die gelben Linien bezeichnen die Schichtgrenzen des Modells und die verdunkelten Bereiche die Einsätze der Oberflächenwelle in den verschiedenen Tiefen. In **Abb. 7** sind solche Sektionen für den Fall ohne Kompaktierungszone und mit jeweils einer 15m und einer 50m Zone aufgezeigt. Die so erkennbaren Phasenlaufzeitunterschiede sind in **Abb. 10** aufgetragen und bewegen sich je nach Ausdehnung der Zone und Schicht im Bereich von einigen Millisekunden bis zu einigen zehn Millisekunden für die Kompaktierungszone von 50m Ausdehnung.

Laufzeitmodellierung der P-Wellen

Für eine genaue Betrachtung der Laufzeitunterschiede der Kompressionswellen wurden F-D Laufzeitmodellierungen (Hole & Zelt 1995) vorgenommen. Hierbei wurden nur die extremen Fälle mit 50m lateraler Ausdehnung für parallele und quadratische Zone betrachtet. Die Laufzeitunterschiede sind in **Abb. 9** dargestellt. Der Laufzeitunterschied zwischen ungestörtem Sediment und kompaktiertem liegt hier im Bereich von einigen zehntel Millisekunden.

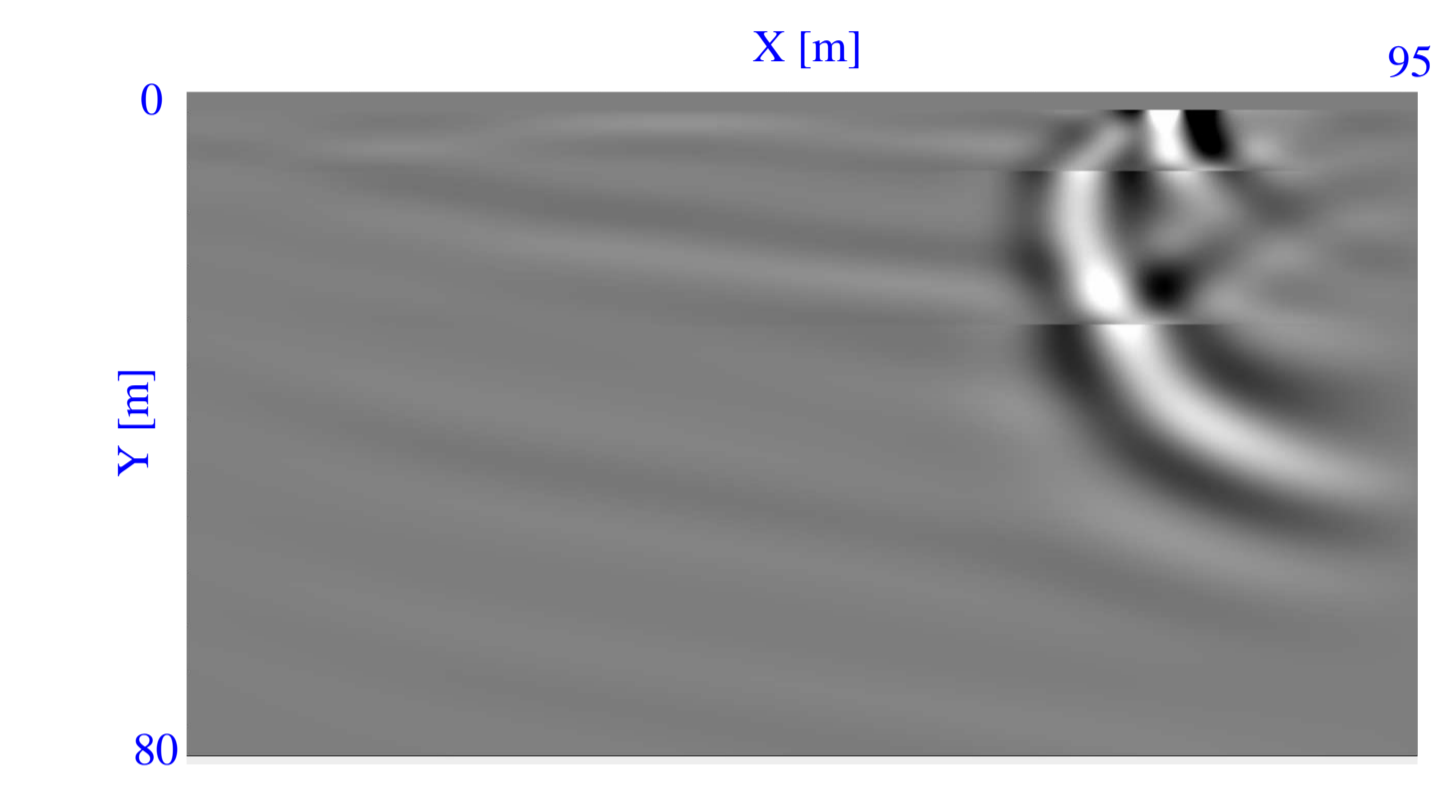


Abb. 6 Screenshot einer Modellierung. Das Bild zeigt den Scheranteil (Rotation) des Wellenfeldes

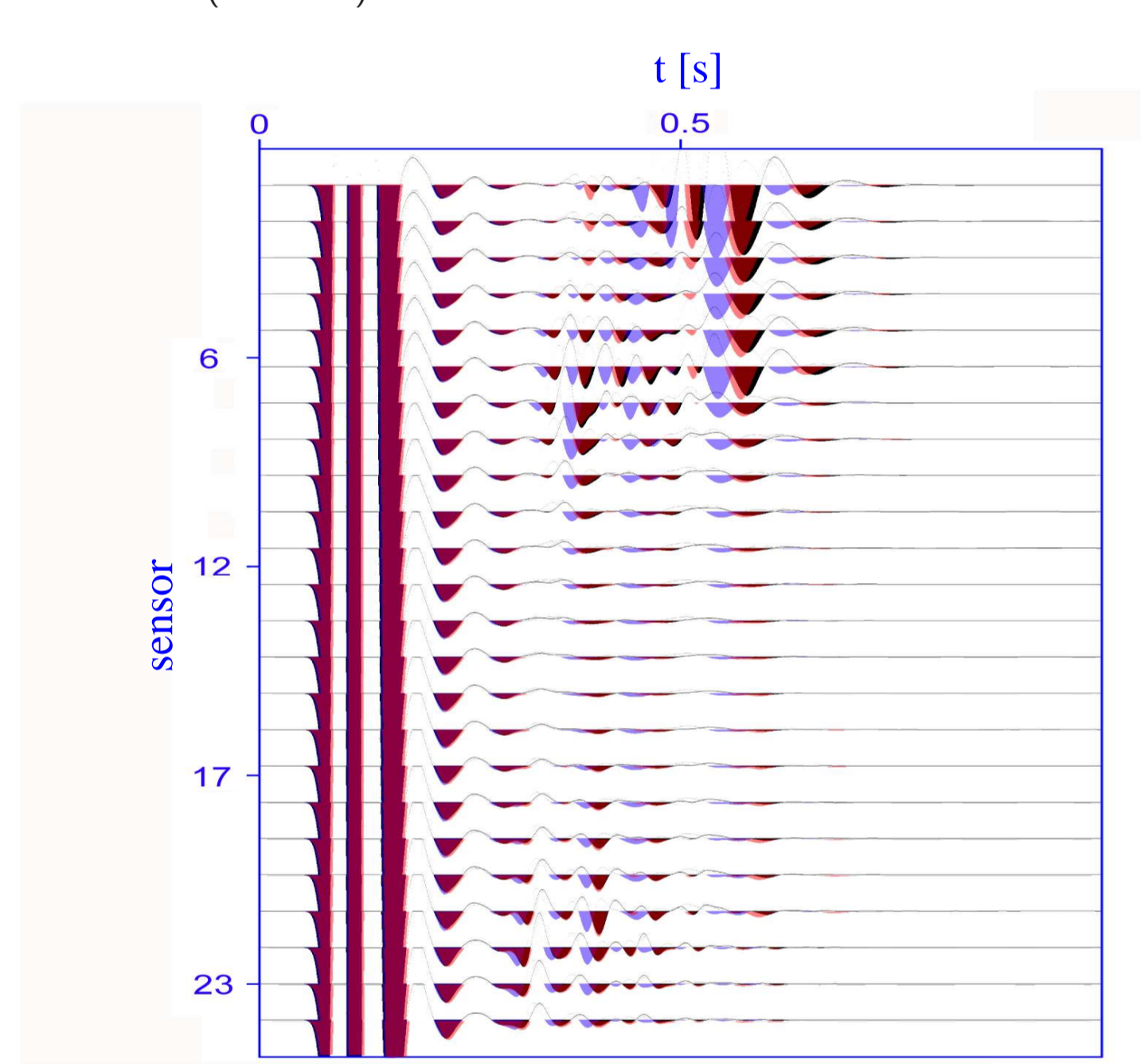


Abb. 7

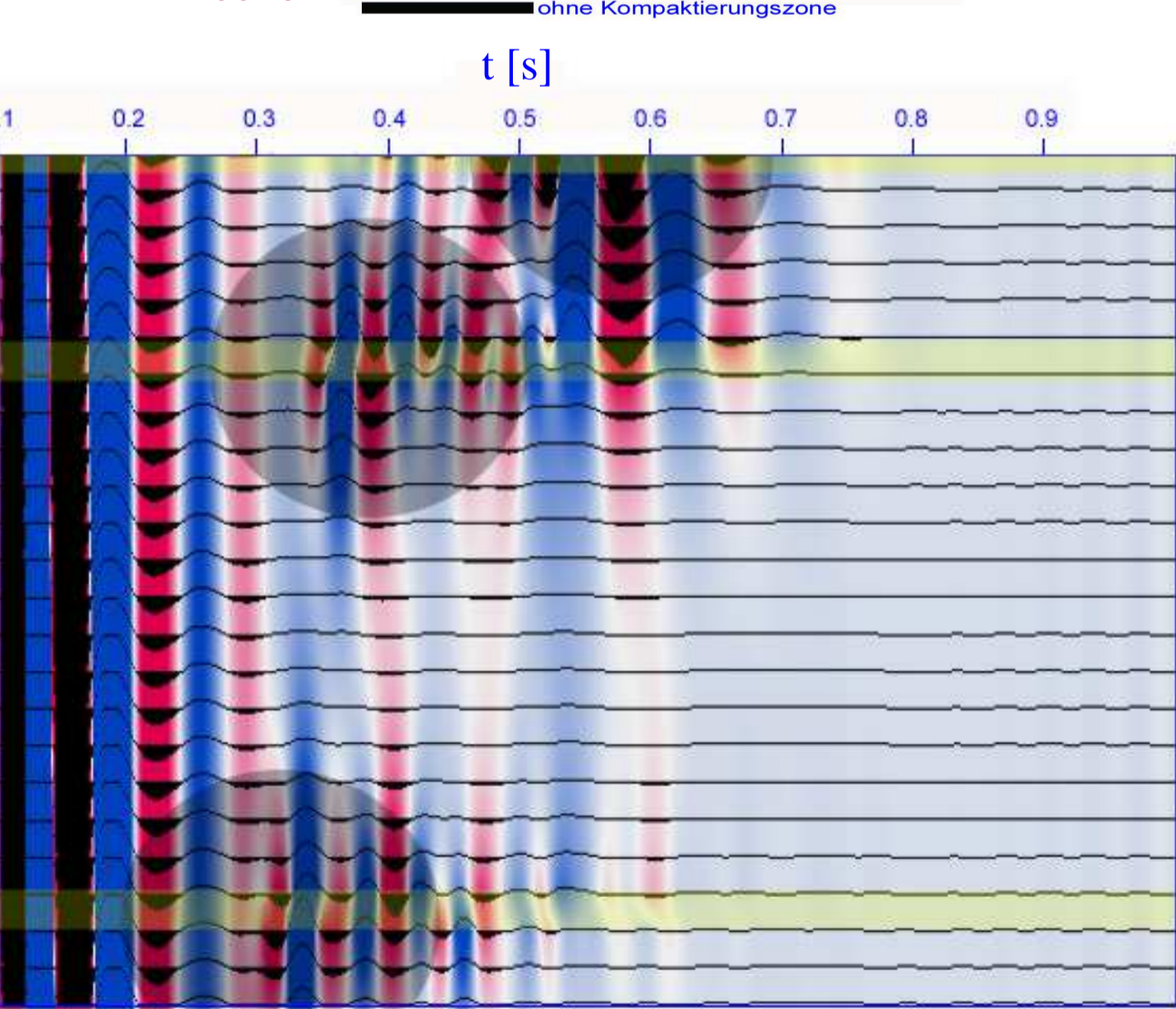


Abb. 8 Seismogrammsequenz des vertikalen Sensorarrays

Resultierende Abschätzungen

Bei einer in situ Messung am Pfehl würde eine Quelle (Boomer/Airgun) von einem Schiff aus eingesetzt. Es lassen sich für diesen Fall einfache Abschätzungen der Statikfehler machen. Die laterale Positionierung der Quelle ist mittels DGPS auf einige cm genau durchführbar. Die viel geringere vertikale Auflösung des GPS führt dazu, dass Laufzeitmessungen durch den Seegang verfälscht werden. Bei Wellenhöhen von nur einem Meter führt dies zu Laufzeitunterschieden im Bereich von einigen zehntel Millisekunden. Liesse sich gewährleisten, dass sich die Quelle immer an gleicher Position (lateral) befindet, so könnte über Mittelung der Ergebnisse mehrerer Schüsse der Seegangseffekt korrigiert werden. Es bleibt jedoch fraglich, ob eine Veränderung der Kompaktierungszone mit Kompressionswellendurchschallung messbar ist, da die hier betrachteten Effekte bereits den extremen Änderungen in einer 50m-Zone entsprechen. Die Phasenlaufzeitunterschiede der Scholtebene liegen, aufgrund der grösseren relativen Änderung von v_s , im Bereich einiger Millisekunden und sollten daher messbar sein. Für die Zonen kleinerer Ausdehnung als $\approx 20m$ wird eine Auswertung jedoch aufgrund von Statikfehlern und der niederfrequenten Signale schwer, wenn man zusätzlich bedenkt, dass die Änderung der Kompaktierung und der damit verbundenen Änderung der seismischen Parameter sich womöglich in noch kleineren Bereichen bewegt. Eine Scholtebenenphasenlaufzeit-tomographie (Kugler et al. 2007) sollte für diese Laufzeitunterschiede sensitiv sein und eine Änderung der mittleren Scherwellengeschwindigkeitstiefenverteilung ergeben. In **Abb. 11** sind die Ergebnisse einer einfachen Bestimmung der mittleren Scherwellengeschwindigkeiten für den Bereich der Kompaktierungszone aus den F-D Seismogrammen aufgezeigt. Für die verschiedenen Kompaktierungszone zeigt sich eine klare mittlere Änderung der Scherwellengeschwindigkeit von $\approx 20 \frac{m}{s}$ um den Pfehl. In einem zweiten Vergleich von zusätzlichen Rechnungen mit $\Delta\Phi = 0.04$ zu einer Kompaktierung mit $\Delta\Phi = 0.08$ wurde die mittlere Geschwindigkeitsänderung im Bereich der Zone untersucht (**Abb. 11**). Die ermittelte mittlere Geschwindigkeitsänderung beträgt im Bereich der grössten Ausdehnung der Zone $\approx 10 \frac{m}{s}$, entsprechend einer absoluten Änderung des Gradienten von $20 \frac{m}{s}$ auf $40 \frac{m}{s}$.

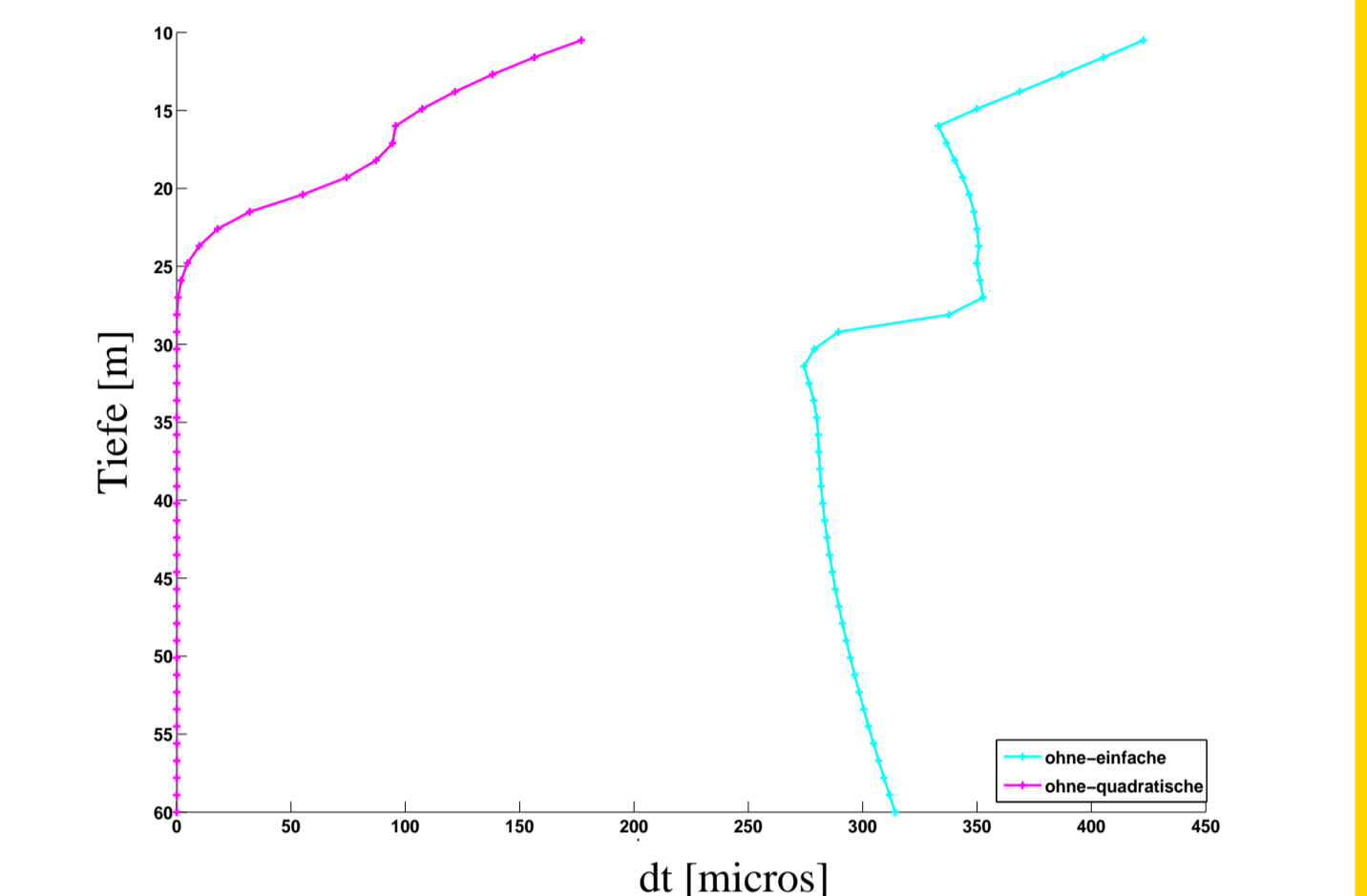


Abb. 9 Laufzeitdifferenzen der Kompressionswelle in Abhängigkeit von der Tiefe zum Modell ohne Kompaktierungszone vom Modell mit paralleler Zone (hellblau) und dem Modell mit quadratischer Zone (dunkelblau)

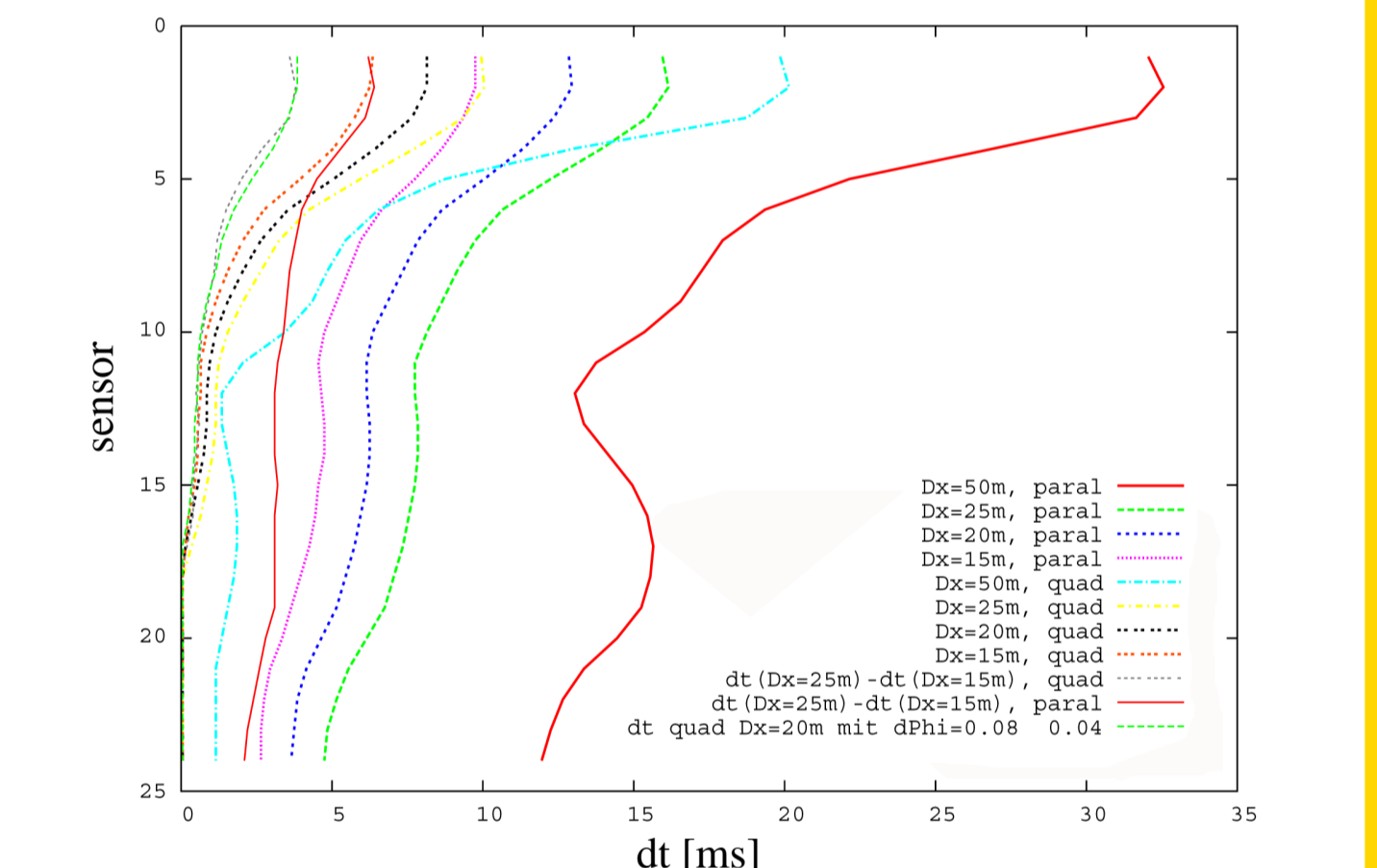


Abb. 10 Laufzeitdifferenzen der Scholtebenen in Abhängigkeit von der Tiefe zum Modell ohne Kompaktierungszone vom Modell mit paralleler Zone und dem Modell mit quadratischer Zone (jeweils mit verschiedenen lateralen Ausdehnungen)

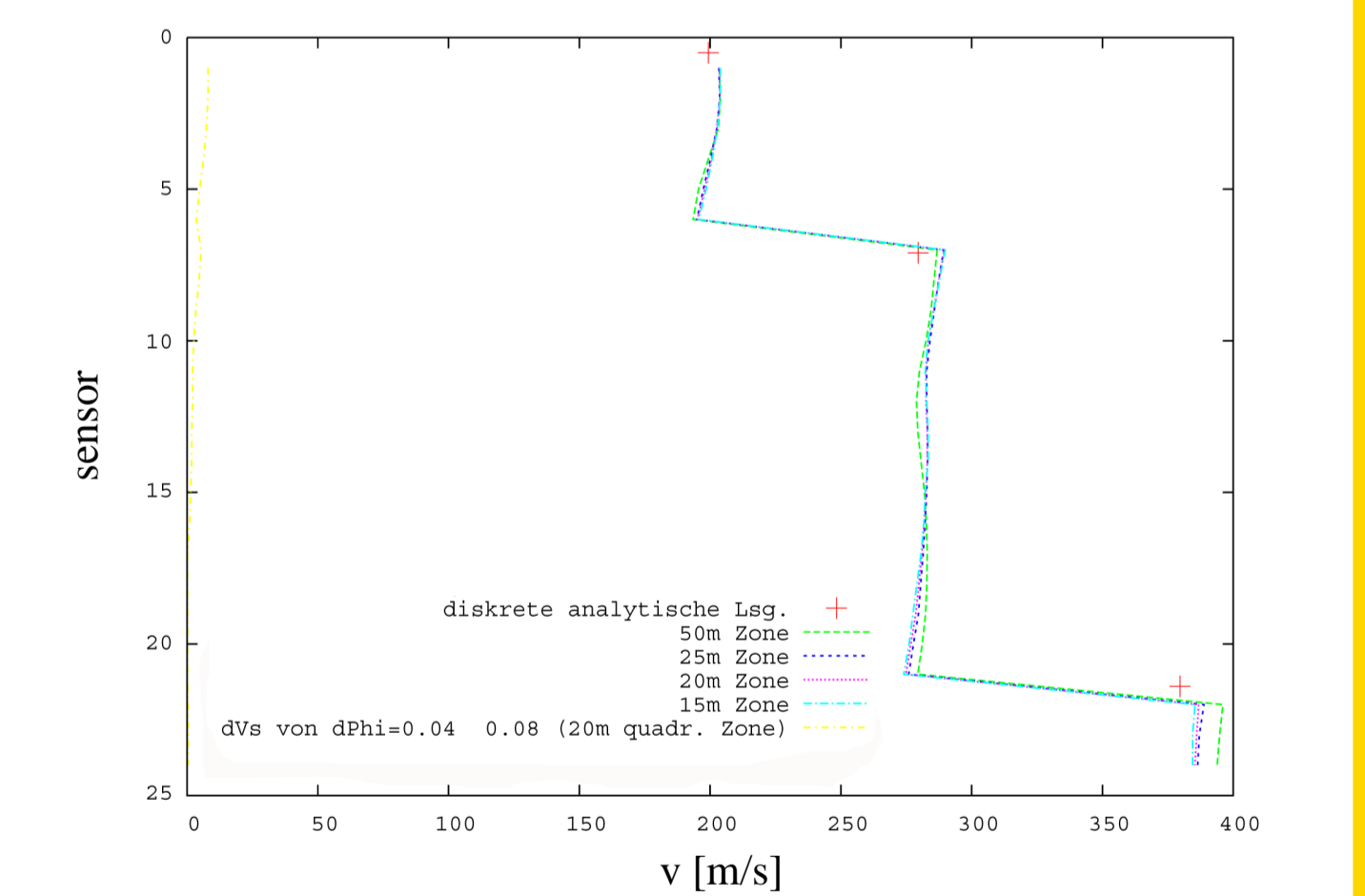
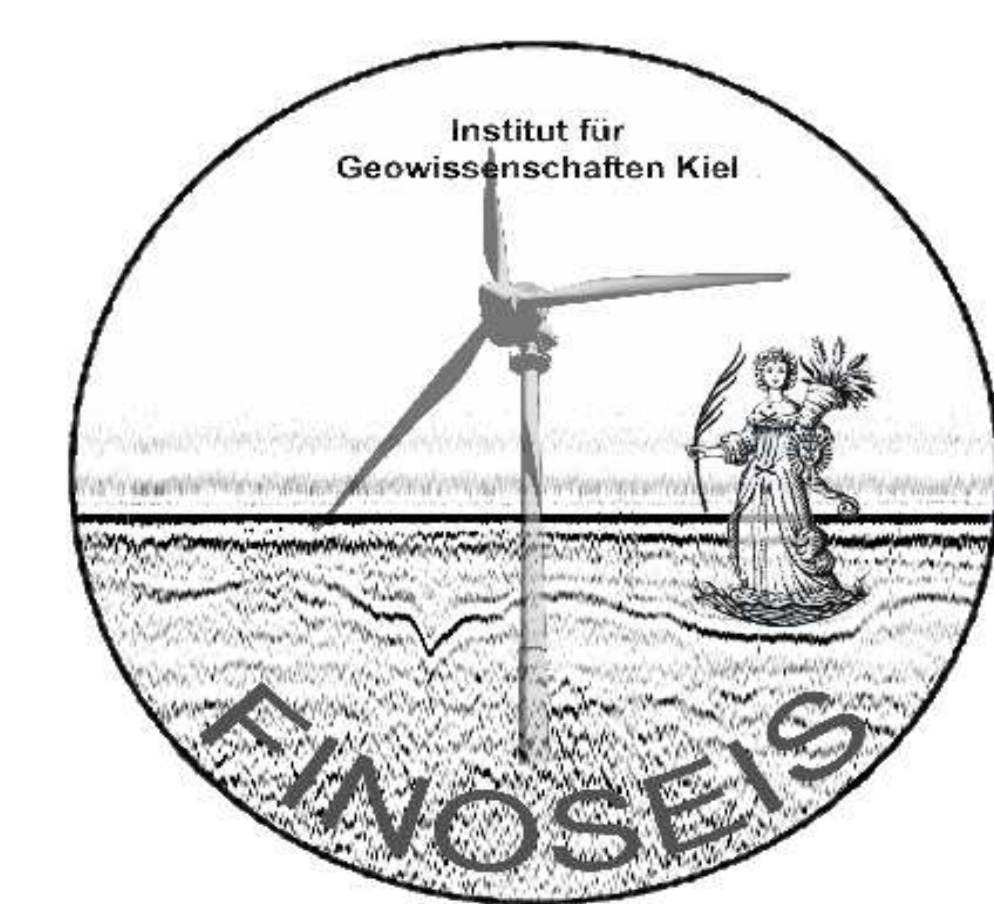


Abb. 11 Mittlere Scherwellengeschwindigkeiten im Bereich der Kompaktierungszone; berechnet aus den Laufzeitdifferenzen der Scholtebene

Ausblick und Diskussion

Durch eine tomographische Untersuchung des Umfeldes von Offshore-Monopiles mit Scholtebenen ergibt sich allenfalls eine Tiefenverteilung der mittleren Scherwellengeschwindigkeiten. Aussagen über die Struktur der Zone lassen sich nur mit eventuellen Ergebnissen aus einer hochauflösenden Seismik treffen. Die Modellgradienten der Modellierungen dieser Studie sind exemplarisch gewählt worden, da die tatsächliche Beschaffenheit von Kompaktierungs- und Auflockerungszone an Monopiles in der Nordsee weitestgehend unbekannt ist. Sie vermitteln allerdings Informationen über die Größenordnung eventueller Laufzeiteffekte, helfen aber vor allem durch die erhaltenen Seismogramme beim Verständnis der Messproblematik. Die Modellierungen des Wellenfeldes und einfache Abschätzungen der Phasenlaufzeitunterschiede von Scholtebenen und Kompressionswellen geben so aufschlussreiche Informationen über die Möglichkeiten und Dimensionierung von zukünftigen in situ Messungen. Es zeigt sich, dass Sensoren und Quellen der in situ Messungen entsprechend der geringen Laufzeitunterschiede sehr genau positioniert werden müssen. Dies wird über ein DGPS-System an der FINO3 und mittels eigens konstruierter OBS geschehen. Die OBS ermöglichen ein hochfrequentes Abtasten (bis 30kHz) und können mit Hilfe der Boomerquelle genau positioniert werden. Desweiteren lassen Modellierungen mit integriertem Pfehl und Stahlhalbrohren auf die Entstehung von Stoneylewellen schließen, die eine Dispersion aufgrund des umgebenden Sediments aufweisen können. Weitere Untersuchungen zu diesem Effekt sind geplant.



LITERATUR

Bohlen T., 2001, Parallel 3-D viskoelastische finite difference seismic modelling, *Computers & Geosciences* 28(8), 887-899
 Bohlen T., Saenger E.H. 2006, Accuracy of heterogenous staggered-grid finite-difference modelling of Rayleigh waves, *Geophysics*(71),109-115
 Prasad M., Meissner R. 1992, Attenuation mechanisms in sands: Laboratory versus theoretical (Biot) data, *Geophysics* (57),710-719
 Wiemann J., Lesny K., Richwien W. 2004, Evaluation of Pile Diameter Effects on Soil-Pile Stiffness, Dokumentation der 7th German Wind Energy Conference DEWEK, Wilhelmshaven, 2004
 Kugler S., Bohlen T., Forbriger T., Bussat S., Klein G. 2007, Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments, *Geophysical Journal International*(168)(2),551-570
 Wang R. 1999, A simple orthonormalization method for stable and efficient computations of Green's functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(3), 733-741
 Hole J.A., Zelt B.C. 1995, 3-D finite difference reflection traveltime, *Geophysical Journal International*(121),427-434
 Schön J. 1983, *Petrophysik*, Akademie-Verlag, Berlin

Speziellen Dank an das BMU, KERN Regionalprogramm 2000, Land Schleswig-Holstein, sowie Daniel Köhn für stete Unterstützung bei FD-Problemen und an Jan-Hendrik Palic.