BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR), HANNOVER

Seismic Investigations at the Ninetyeast Ridge Observatory Using SONNE and JOIDES RESOLUTION During ODP-Leg 179

SINUS

BMBF-Forschungsvorhaben 03G0131B

BGR-Begleitantrag zum BMBF-Forschungsvorhaben SINUS (Erzeugung der seismischen Signale und 3D-Bearbeitung)

Abschlussbericht



1. Sachbearbeiter:Dr. Chr. Bönnemann, Dr. Chr. Reichert (Projektleiter)2. Auftraggeber:Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung
und Technologie (FV 03G0131B)3. Datum:Juli 20004. Archiv-Nr.:0.120.2165. Tgb.-Nr.:11.045/00

Berichtsblatt

1. ISBN or ISSN	2. Berichtsart Endbericht	
3a. Titel des Berichts		
SINUS: Seismic Investigations at the N	linetyeast Ridge Observatory	
BGR-Begleitantrag: Erzeugung der sei	smischen Signale und 3D-Bearbeitung	g
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n))	ite in	5. Abschlußdatum des Vorhabens
Bonnemann, Christian; Reichert, Chris	lian	31.12.1999
4b Autoren der Publikation (Name \/orname(n))		6. Veröffentlichungsdatum Juli 2000
		7. Form der Publikation
8 Durchführende Institution(en) (Name Adresse)		
BGR		9. Ber.Nr. Durchführende Institution 0120216
Bundesanstalt für Geowisse	enschaften und Rohstoffe	10. Förderkennzeichen *)
Stilleweg 2		03G0131B
30655 Hannover		11a. Seitenzahl Bericht
Postfach 51 01 53		52
30631 Hannover		11b. Seitenzahl Publikation
13 Fördernde Institution (Name Adresse)		12. Literaturangaben
13. Forderide institution (Name, Adresse)		13
Bundesministerium für Bild	ung, Wissenschaft,	14. Tabellen
Forschung und Technologie	(BMBF)	
53170 Bonn		15. Abbildungen
		43
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	1: 2000	
BEO/BIVIBF, ROSTOCK-Warnemunde, Ju	11 2000	
18. Kurzfassung		
Innerhalb eines Verbundvorhabens mit	GEOMAR (Hauptantragsteller) zum S	SINUS-Projekt (Seismic Investigations
BGR mit zwei Teilaufgaben beteiligt:	sing Sonne and Joides Resoluti	ON during ODP Leg 179) hat sich die
1. Anregung der seismischen Impul	se, die für die verschiedenen Experi	mente auf der SONNE-Fahrt SO-131
2. Bearbeitung des auf SO-131	des Airgun-Arrays der BGR inkl. des b akquirierten dreidimensionalen refra	enotigten Fachpersonals. Iktionsseismischen Datensatzes zur
Bestimmung des Geschwind	igkeitsfeldes im Nahbereich e	eines künftigen seismologischen
Meeresbodenobservatoriums.	der Forschungsfahrt SINUS (SO-1	31) erfolgreich durchgeführt (Elueh
Reichert & Scientific Crew, 1998). Zu	2. wurden die erforderlichen Vorbe	earbeitungen des umfangreichen 3D-
refraktionsseismischen Datensatzes	vorgenommen. Wegen der Größe	des Datensatzes wurde ein semi-
automatisches Verfahren entwickelt, mit dem alle Ersteinsätze auf über 200.000 seismischen Spuren des 3D- Datensatzes schnell bestimmt und in SEG-Y und ASCII-Format abgespeichert werden konnten. Damit wurde ein		
Ausgangsprodukt bereitgestellt, an das unmittelbar anknüpfend ein 3D-refraktionstomographisches Modell mit		
gebräuchlichen Methoden erstellt werden kann. Zur schnelleren Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten wurde die CMP-Methode der Refraktionsseismik mit dem τ-n-Verfahren verknünft. Hierfür waren methodische		
Entwicklungen erforderlich. Aus Stützstellendaten wurde ein erstes räumliches, aus drei Grenzflächen sowie dem		
Meeresboden bestehendes Geschwindigkeits-/Tiefen-Modell entwickelt, das als Startmodell für die Tomographie		
Imagedatensatzes nach reflexionsseismischen Verfahren nicht realisierbar.		
19. Schlagwörter 3D marin-refraktionsseismische Daten Ninetveast Ridge Observatory ION Methodenentwicklung 3D		
Geschwindigkeits-/Tiefen-Modell		
20. Verlag		21. Preis

^{*)} Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

	2. Type of Penert		
	ISSN 2. Type of Report Final Report		
^{3a. Report Title} Sinus: Seismic Investigations at the Ninetyeast Ridge Observatory Using SONNE and JOIDES RESOLUTION During ODP Leg 179. BGR-Begleitantrag: Erzeugung der seismischen Signale und 3D-Bearbeitung			
3b. Title of Publication	0	5	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Na Bönnemann, Christian; Reichert, Chris	^{ame(s))} ttian	5. End of Project 31.12.1999	
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First	st Name(s))	6. Publication Date July 2000	
, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,		7. Form of Publication Final Report	
8. Performing Organization(s) (Name, Address)		9. Originator´s Report No. 0120216	
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Stilleweg 2 30655 Hannover Postfach 51 01 53 30631 Hannover		10. Reference No. 03G0131B	
		11a. No. of Pages Report 52	
		11b. No. of Pages Publication	
13. Sponsoring Agency (Name, Address)		12. No. of References 13	
Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)		14. No. of Tables	
53170 Bonn		15. No. of Figures 43	
16. Supplementary Notes			
17. Presented at (Title, Place, Date) BEO/BMBF, Rostock-Warnemünde, July 2000			
 Abstract BGR took part in the marine-geoscientific project SINUS (Seismic Investigations at the Ninetyeast Ridge Observatory using SONNE and JOIDES RESOLUTION during ODP Leg 179) that was conducted by GEOMAR. The concomitant sub-project of BGR focussed on two tasks: Generation of the seismic source pulses required for the various experiments during SONNE cruise SO-131 by means of the tuned BGR airgun array operated by the appropriate specialist team. Processing of the 3D seismic refraction data set acquired during SO-131 to define the seismic velocity field in 			
Task 1. was successfully completed during SONNE cruise SINUS (SO-131) (Flueh, Reichert & Scientific Crew, 1998). Regarding task 2. in a first step the necessary pre-processing of the comprehensive 3D seismic refraction data set was carried out. Due to its large volume a semi-automatic method was developed enabling quick definition of all first breaks for the more than 200.000 seismic traces, and storage in SEG-Y and ASCII format. Thus a product was provided enabling immediately subsequent 3D-seismic refraction tomographic modelling by available methods. For quicker determination of seismic velocities the CMP method for seismic refraction data was combined with the τ -p-method requiring methodical development. Selected good quality data were used to establish an initial 3D velocity/depth model incorporating three boundaries plus the sea floor that can be used as starting model for tomographic evaluation. Since the field lay-out was optimized for the seismic refraction method a 3D image data set according to the seismic reflection method could not be established.			
3D marine-seismic refraction data, Ninetyeast Ridge Observarory, ION, method development, 3D velocity/depth model			
20. Publisher		21. Price	

Inhalt

	Seite
Inhalt	I
Zusammenfassung	II
Summary	III
Verzeichnis der Abbildungen	IV

1	Einleitung	1
1.1	Tektonischer Rahmen, Geologie und Bathymetrie	2
1.2	Zielsetzung im Rahmen des Begleitantrages	3
2	Datenakquisition	5
3	Geometrie, Binning und Sortierung	7
4	Reflexionsseismische Bearbeitung	15
4.1	Grundlagen	16
4.2	Anwendung auf die Daten	18
5	Refraktionsseismische Bearbeitung	20
5.1	τ-p-Transformation zur Übersicht	20
5.1.1	Auswerung in profilsortierten Daten	21
5.1.2	τ -p-Auswertung in Bin-sortierten Daten	25
5.2	3D-Auswertung durch Picken der Ersteinsätze im x-t-Bereich	41
6	Schlussbetrachtung und Ausblick	49
7	Literatur	51
	Danksagung	51

Zusammenfassung

Innerhalb eines Verbundvorhabens mit GEOMAR (Hauptantragsteller) zum SINUS-Projekt (**S**eismic Investigations at the **N**inetyeast Ridge Observatory **u**sing **S**ONNE and JOIDES RESOLUTION during ODP Leg 179) hat sich die BGR mit zwei Teilaufgaben beteiligt:

- Anregung der seismischen Impulse, die f
 ür die verschiedenen Experimente auf der SONNE-Fahrt SO-131 erforderlich waren, durch Einsatz des Airgun-Arrays der BGR und des zu dessen Betrieb ben
 ötigten Fachpersonals.
- 2. Bearbeitung des auf SO-131 akquirierten dreidimensionalen refraktionsseismischen Datensatzes zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes im Nahbereich eines künftigen seismologischen Meeresbodenobservatoriums.

Die Arbeiten zu 1. wurden während der Forschungsfahrt SINUS (SO-131) erfolgreich durchgeführt (Flueh, Reichert & Scientific Crew, 1998). Zu 2. wurden die erforderlichen Vorbearbeitungen des umfangreichen 3D-refraktionsseismischen Datensatzes vorgenommen. Wegen der Größe des Datensatzes wurde ein semi-automatisches Verfahren entwickelt, mit dem alle Ersteinsätze auf über 200.000 seismischen Spuren des 3D-Datensatzes schnell bestimmt und in SEG-Y und ASCII-Format abgespeichert werden konnten. Damit wurde ein Ausgangsprodukt bereitgestellt, an das unmittelbar anknüpfend ein 3D-refraktionstomographisches Modell mit gebräuchlichen Methoden erstellt werden kann. Zur schnelleren Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten wurde die CMP-Methode der Refraktionsseismik mit dem τ -p-Verfahren verknüpft. Hierfür waren methodische Entwicklungen erforderlich. Aus Stützstellendaten wurde ein erstes räumliches, aus drei Grenzflächen bestehendes Geschwindigkeits-/Tiefen-Modell entwickelt, das als Startmodell für die Tomographie dienen kann. Aufgrund der für die Refraktionsseismik optimierten Messgeometrie war die Erstellung eines Imagedatensatzes nach reflexionsseismischen Verfahren nicht realisierbar.

Summary

BGR took part in the marine-geoscientific project SINUS (Seismic Investigations at the Ninetyeast Ridge Observatory using SONNE and JOIDES RESOLUTION during ODP Leg 179) that was conducted by GEOMAR. The concomitant sub-project of BGR focussed on two tasks:

- Generation of the seismic source pulses required for the various experiments during SONNE cruise SO-131 by means of the tuned BGR airgun array operated by the appropriate specialist team.
- Processing of the 3D seismic refraction data set acquired during SO-131 to define the seismic velocity field in the surroundings of the future seismological sea bottom observatory.

Task 1. was successfully completed during SONNE cruise SINUS (SO-131) (Flueh, Reichert & Scientific Crew, 1998). Regarding task 2. in a first step the necessary preprocessing of the comprehensive 3D seismic refraction data set was carried out. Due to its large volume a semi-automatic method was developed enabling quick definition of all first breaks for the more than 200.000 seismic traces, and storage in SEG-Y and ASCII format. Thus a product was provided enabling immediately subsequent 3D-seismic refraction tomographic modelling by available methods. For quicker determination of seismic velocities the CMP method for seismic refraction data was combined with the τ -p-method requiring methodical development. Selected good quality data were used to establish an initial 3D velocity/depth model incorporating three boundaries plus the sea floor that can be used as starting model for tomographic evaluation. Since the field lay-out was optimized for the seismic refraction method a 3D image data set according to the seismic reflection method could not be established.

Verzeichnis der Abbildungen

		Seite
Abb.2.1	Schuss- und OBH-Positionen des SINUS-3D-Refraktionsexperiments.	6
Abb. 3.1	Farbcodierte Darstellung der Schussprofile in UTM- Koordinaten, die auch allen weiteren Abbildungen zugrunde liegen.	10
Abb. 3.2	Ausschnitt aus den Seismogrammen von OBH 38 vor der Ge- ometriekorrektur. Die grüne Linie zeigt die auf Grundlage der Geometrie modellierten Laufzeiten der direkten Welle.	10
Abb. 3.3	Ausschnitt aus den Seismogrammen von OBH 38 nach der Ge- ometriekorrektur. Die grüne Linie zeigt die auf Grundlage der Geometrie modellierten Laufzeiten der direkten Welle.	11
Abb. 3.4	Ausschnitt aus Seismogrammen von OBH 62. Die grüne Linie zeigt die auf Grundlage der Geometrie modellierten Laufzeiten der direkten Welle.	11
Abb. 3.5	Mittenpunkte für Schuss-Empfängerabstände zwischen 0 und 12 km.	12
Abb. 3.6	Mittenpunkte für Schuss-Empfängerabstände zwischen 12 und 24 km.	12
Abb. 3.7	Mittenpunkte für Schuss-Empfängerabstände zwischen 24 und 36 km.	13
Abb. 3.8	Überdeckung bei der Bin-Kantenlänge 100 m. Die Farbskala am rechten Rand gibt die Überdeckung an.	13
Abb. 3.9	Überdeckung bei der Bin-Kantenlänge 250 m. Die Farbskala am rechten Rand gibt die Überdeckung an.	14
Abb. 3.10	Überdeckung bei der Bin-Kantenlänge 1000 m. Die Farbskala am rechten Rand gibt die Überdeckung an.	14
Abb. 4.1	Geometrische Kenngrößen für die Herleitung der Reflexions- laufzeitkurve. (x: Abstand Schuss – Empfänger, d: Wassertiefe; z: Tiefenintervall Meeresboden – Target).	15
Abb. 4.2	Reflexionsseismische Auswertung an den OBH-Lokationen 62 bis 66.	19
Abb. 5.1	Registrierung von Schussprofil 21 durch OBH 38	22
Abb. 5.2	τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.1.	22
Abb. 5.3	Registrierung von Schussprofil 7 durch OBH 72	23
Abb. 5.4	τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.3.	23

BGR 0.120.216

		Seite
Abb. 5.5	Registrierung von Schussprofil 7 durch OBH 62	24
Abb. 5.6	τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.5.	24
Abb. 5.7	Unsicherheitsbereich bei der τ -p-Transformation	26
Abb. 5.8	Bin 481, <u>nicht</u> -entfernungstreue Abspielung. Die Offset- Bereiche sind 0-3 und 8-15,5 km.	31
Abb. 5.9	τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.8. Die Strahlparame- terachsen sind mit der Scheingeschwindigkeit beschriftet. Die unteren Enden der farbigen Linien kennzeichnen die gepickten Scheingeschwindigkeiten und Strahlparameter.	31
Abb. 5.10	Bin 2588, <u>nicht</u> -entfernungstreue Abspielung. Die Offset- Bereiche sind 0-2, 12-12,5 und 14-18 km.	32
Abb. 5.11	τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.10. Die Strahlparameterachsen sind mit der Scheingeschwindigkeit beschriftet.	32
Abb. 5.12	Bin 3095, <u>nicht</u> -entfernungstreue Abspielung. Die Offset- Bereiche sind 0-4,4 und 6-13 km.	33
Abb. 5.13	τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.12. Die Strahlparame- terachsen sind mit der Scheingeschwindigkeit beschriftet. Die unteren Enden der farbigen Linien kennzeichnen die gepickten Scheingeschwindigkeiten und Strahlparameter.	33
Abb. 5.14	Tiefenplan des Meeresbodens, berechnet aus den Wassertiefen an den Bins für die τ -p-Analyse.	34
Abb. 5.15	Tiefenplan für die Unterkante der obersten Schicht, berechnet aus der τ -p-Analyse der Bins. Die Tiefen liegen zwischen 3,3 und 4 km.	35
Abb. 5.16	Tiefenplan für die Unterkante der mittleren Schicht, berechnet aus der τ -p-Analyse der Bins. Die Tiefen liegen zwischen 5,4 und 5,9 km.	36
Abb. 5.17	Tiefenplan für die Unterkante der untersten Schicht, berechnet aus der τ -p-Analyse der Bins. Die Tiefen liegen zwischen 14 und 18 km.	37
Abb. 5.18	Geschwindigkeiten für den obersten Refraktor, berechnet aus der τ-p-Analyse der Bins. Die Geschwindigkeiten liegen zwi- schen 2,4 und 2,5 km/s.	38
Abb. 5.19	Geschwindigkeiten für den mittleren Refraktor, berechnet aus der τ-p-Analyse der Bins. Die Geschwindigkeiten liegen zwi- schen 4 und 4,5 km/s.	39

BGR 0.120.216

Seite

Abb. 5.20	Geschwindigkeiten für den untersten Refraktor, berechnet aus der τ-p-Analyse der Bins. Die Geschwindigkeiten liegen zwi- schen 5 und 6,5 km/s.	40
Abb. 5.21	Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 69, Schussprofil 14.	44
Abb. 5.22	Daten von Abb. 5.21 nach AGC, Bandpass-Filterung und dy- namischer Signal-Rauschfilterung.	44
Abb. 5.23	Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 83, Schussprofil 15. Die grünen Linien kennzeichnen den Arbeits- bereich des automatischen Pickers, die rote Linie zeigt die Er- gebnisse.	45
Abb. 5.24	Gepickte Laufzeiten von Abb. 5.23 nach Median-Despiking (rote Linie).	45
Abb. 5.25	Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 71, Schussprofil 7. Die blaue Linie zeigt die Ergebnisse des auto- matischen Pickers.	46
Abb. 5.26	Gepickte Laufzeiten von Abb. 5.25 nach Median-Despiking und manueller Nachbearbeitung (rote Linie). Die dünne rote Linie kennzeichnet Picks, die herausgenommen wurden.	46
Abb. 5.27	Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 73, Schussprofil 21. Die grünen Linien kennzeichnen den Arbeits- bereich des automatischen Pickers. Die blaue Linie zeigt die Ergebnisse.	47
Abb. 5.28	Gepickte Laufzeiten von Abb. 5.27 nach manueller Nachbear- beitung im linken Teil.	47
Abb. 5.29	Laufzeiten von Abb. 5.28 nach Median-Despiking (rote Linie).	48
Abb. 5.30	Farbcodierte Darstellung aller gepickten Laufzeiten als Funktion der Mittenpunktkoordinate zwischen Schuss und Empfänger.	48

1 Einleitung

Vom 4. Mai bis 16. Juni 1998 wurde die SONNE-Fahrt SO-131 SINUS durchgeführt (Flueh, Reichert & Shipboard Scientific Party, 1998), um Struktur und Aufbau des Ninetyeast Ridge und der benachbarten ozeanischen Becken zu untersuchen. SI-NUS steht für Seismic Investigations at the Ninetyeast Ridge Using Sonne and JOI-DES RESOLUTION during ODP Leg 179. Dieses Projekt verfolgt ein technisches und ein wissenschaftliches Hauptziel. Das technische Ziel beinhaltet die Erkundung der Krusten- und Mantelstruktur sowie des seismischen Geschwindigkeitsfeldes in der Umgebung des geplanten Ninetyeast Ridge Observatory (NERO). Hier soll eines von mehreren weltweit geplanten submarinen seismologischen Observatorien eingerichtet werden. Mit solchen "GOBOs" (Geophysical Ocean Bottom Observatories) soll das globale Netz der Beobachtungsstationen, das im Bereich der Ozeane nur über äußerst wenige Stützstellen verfügt, im Rahmen des ION (International Ocean Network) verdichtet werden. An ODP-Site 1107 wurde im Rahmen von ODP-Leg 179 mit einem entsprechend hergerichteten Bohrloch am Ninetyeast Ridge die Voraussetzung zur Einrichtung einer solchen automatischen seismologischen Breitbandstation geschaffen. Die im Rahmen von SINUS mit SONNE-Fahrt SO-131 vermessenen räumlichen Strukturen und das seismische Geschwindigkeitsfeld werden dazu dienen, die lokalen Einflüsse auf die Laufzeit und die Wellenform der künftig registrierten Erdbebenereignisse zu erfassen und zu kompensieren.

Das zweite wissenschaftliche Ziel besteht in der Untersuchung des Aufbaus des Ninetyeast Ridges, der allgemein als Spur des Kerguelen-Hotspots angesehen wird, sowie dessen Stellung zu seinen benachbarten ozeanischen Einheiten (Flueh, Reichert & Shipboard Scientific Party, 1998).

Die Arbeiten zu 1. wurden während der Forschungsfahrt SINUS (SO-131) erfolgreich durchgeführt (Flueh, Reichert & Shipboard Scientific Party, 1998). Die Arbeiten und Resultate zu 2. sind Gegenstand des vorliegenden Abschlussberichts.

Während der Forschungsfahrt SINUS (SO-131) wurde ein Vielzahl von geophysikalischen Messungen durchgeführt, darunter ein refraktionsseismische 3D-Vermessung. Für diese Messung wurden 24 OBHs (**O**cean **B**ottom **H**ydrophones) auf dem Meeresboden versenkt und auf einer Vielzahl von kreisförmigen, sich kreuzenden und diagonalen Trajektorien angeschossen. Im Zentrum der Messfläche befindet sich die Bohrung 1107 von ODP Leg179, in der das geplante seismologische Observatorium NERO installiert werden soll. Die Arbeiten und Ergebnisse von ODP-Leg 179 sind in Shipboard Scientific Party (1999) beschrieben.

Innerhalb eines Verbundvorhabens mit GEOMAR (Hauptantragsteller) hat sich die BGR in zwei Bereichen beteiligt:

- Anregung der seismischen Impulse, die f
 ür die verschiedenen Experimente auf der SONNE-Fahrt SO-131 erforderlich waren, durch Einsatz des Airgun-Arrays der BGR und des zu dessen Betrieb ben
 ötigten Fachpersonals.
- 2. Bearbeitung des auf SO-131 akquirierten dreidimensionalen refraktionsseismischen Datensatzes zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes im Nahbereich des künftigen seismologischen Meeresbodenobservatoriums.

1.1 Tektonischer Rahmen, Geologie und Bathymetrie

Für die Installation einer der weltweit geplanten International Ocean Network (ION) Stationen wurde u.a. der Ninetyeast-Rücken (NER) ausgewählt. Der NER ist ein im wesentlichen aseismischer Rücken, der sich etwa 5000 km weit von 30° Süd bis in den Golf von Bengalen erstreckt, wo er unter dem Bengalfächer verschwindet. Er erhebt sich bis zu etwa 2000 m über das benachbarte Indische Becken, wobei seine Breite zwischen 100 und 200 km variiert. Im Bereich der ausgewählten ION-Station "NERO" steigt er von West nach Ost sanft bis zur Rückenachse an. Wenig östlich davon wird er von einer steilen Stufe, die in das Wharton-Becken mit einem Versatz von mehr als 2500 m abfällt, abgeschnitten. Altersdatierungen weisen darauf hin, dass das Alter des NER von ungefähr 38 Ma an seinem südlichen Ende auf 80-82 Ma bei Site 758 östlich von Sri Lanka bei ca. 7° Nord zunimmt. Seine Entstehung ist eng mit der Offnungsgeschichte des Indiks verknüpft. Geochemische und Isotopen-Untersuchungen scheinen zu bestätigen, dass wenigsten sein südlicher Teil durch exzessiven Vulkanismus am Rand der Indischen Platte entstanden ist. Dies ist auch in Übereinstimmung mit marin-magnetischen Daten. Allgemein wird heutzutage angenommen, dass der NER die Spur eines Hotspots repräsentiert, die die Rajmahal Trapp-Basalte in Indien und Bangladesh mit dem Kerguelen Hotspot verbindet.

Die Lokation NERO befindet sich ziemlich zentral im Indischen Ozean, wordurch eine große Lücke in den seismologischen Beobachtungsstationen verkleinert werden soll. Für die exakte Position waren die Resultate der Site 757 von ODP-Leg 121 ausschlaggebend. Die Sites 757 B und 757 C befinden sich in etwa 200 m Entfernung von Site 1107, das während Leg 179 gebohrt wurde. Die Bohrergebnisse von 757 B und 757 C lieferten eine sedimentäre Sequenz von etwa 210 m unter dem Meeresboden an (Shipboard Scientic Party, 1989). Sie geht von Nannofossil- und im obersten Bereich auch Foraminiferen-haltigen Tiefseeschlämme in kalkige Tiefseeschlämme über, wobei zuunterst eine dünne Lage kalkiger Kreide angetroffen wurde. Bis 370 m unter dem Meeresboden folgen vulkanische Aschen und Tuffe, die ozeanisches basaltisches Basement überlagern. Bei Site 1107 wurde der massive Bereich des Basements bei 404 m angetroffen und bis zu einer Endteufe von 494 m durchbohrt.

Die Bathymetrie im Bereich der geplanten NERO-Station wurde während der Forschungsfahrt SINUS (SO-131) auf einer Fläche von ca. 50 km x 50 km mit dem HYDROSWEEP-Verfahren vermessen (Flueh, Reichert & Shipboard Scientific Party, 1998). Die NERO-Station befindet sich im Mittelpunkt dieser Fläche auf einer kleinen Erhöhung in einer Wassertiefe von 1659 m. Die Erhöhung hat eine elliptische Gestalt mit einer Längsausdehnung von ca. 30 km in NW-SE-Richtung. Die kleine Achse hat eine ungefähre Ausdehnung von 20 km. Sie geht im NE in einen kleinen Rücken mit steilen Flanken über. Ihre Flanken sind generell flach bis auf die östliche Seite, wo steile Kliffs mit Versätzen von etwa 40 m angetroffen werden. Die Kliffs wiederum werden von ostwärts gerichteten Canyons durchschnitten. Bemerkenswert ist das Auftreten von einigen nadelartigen steilen Strukturen, die bis 180 m hoch sind und einen Durchmesser von 200 – 300 m haben, deren Natur noch nicht geklärt ist, bei denen es sich aber um Reste spät-aktiver Vulkanschlote handeln könnte.

1.2 Zielsetzung im Rahmen des Begleitantrages

Der refraktionsseismische 3D-Datensatz stellt in der vorliegenden Form ein Novum dar. Folglich gibt es auch noch keine Standard-Auswerteverfahren. In der Reflexionsseismik sind 3D-Vermessungen inzwischen zur Routine geworden, für die Bearbeitung und Interpretation stehen zahlreiche Verfahren und Programmpakete zur Verfügung. Deshalb besteht hier das Ziel darin, die methodischen Grundlagen für die Bearbeitung und Auswertung der refraktionsseismischen 3D-Daten zu schaffen. Wenn möglich, soll dabei auf das Instrumentarium der 3D-Reflexionsseismik zurückgegriffen werden.

Hierbei sind einige grundsätzliche Schwierigkeiten zu überwinden: Im Unterschied zur Reflexionsseismik ist die Anzahl von Schüssen und Empfängern sehr unterschiedlich. Nur 24 OBHs stehen über 200 000 seismische Quellpositionen gegenüber. Dieses Missverhältnis hat Konsequenzen für die Anwendung von Sortieralgorithmen wie der CMP-Sortierung.

Die Auswerteverfahren der Refraktionsseismik sind wiederum für 2D-Daten ausgelegt. Dies betrifft insbesondere die Interpretation durch Anpassung von modellierten und gemessen Daten, die das wichtigste Verfahren darstellt. Für den 3D-Fall ist dieser Weg kaum gangbar. Inversionsverfahren verlangen die Festlegung von Laufzeiten in den über 200 000 seismischen Spuren. Dies ist von Hand ein zu grosser Aufwand. Erschwerend kommt hinzu, dass jede OBH-Station die Einsätze von allen Schusstrajektorien registriert hat.

Deshalb ist die oben beschriebene Zielsetzung in drei Teilziele aufgeteilt worden:

- Eine effiziente Sortierung der Daten. Dies beinhaltet das Anbringen der Geometrie, die Zuordnung der OBH-Registrierungen zu den Schussprofilen mit nachfolgender Aufteilung und die Sortierung nach Mittenpunkten.
- 2. Bereitstellung eines Verfahrens, um aus dem umfangreichen 3D-Datensatz einen schnellen Überblick über die Geschwindigkeiten der Refraktoren zu gewinnen.
- Aufbau einer Prozedur, die die Ersteinsätze semiautomatisch mit einem vertretbaren Aufwand festlegt. Zusammen mit den Geometrieinformationen wird auf diese Weise ein Datensatz bereitgestellt, der beispielsweise mit 3D-Refraktions-Tomographie-Verfahren ausgewertet werden kann.

2 Datenakquistion

Eine ausführliche Darstellung zur Datenakquisition des 3D-Refraktionsseismik-Experiments findet sich im Fahrtbericht (Flueh, Reichert & Shipboard Scientific Party, 1998). Hier sollen nur in kurzer Form die wichtigsten Aspekte dargestellt werden. Innerhalb des Messgebietes sollte ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 55 km seismisch erfasst werden. Im Zentrum befinden sich die Bohrungen 757 und 1107 (ODP-Leg 179, Shipboard Scientific Party, 1999), die Lokation des geplanten Tiefenobservatoriums NERO. Es wurden 24 OBHs versenkt, die von insgesamt 32 Schussprofilen aus angeschossen wurden (Abb. 2.1). Die Profile liegen parallel zu den Seiten des Quadrates, sowie diagonal und kreisförmig mit der Bohrlokation im Zentrum. Das Layout wurde so geplant, dass einzelne Untergrundelemente von möglichst viel seismischen Strahlen unter einer Vielzahl von Winkeln erfasst werden, um so u.a. die Voraussetzungen für eine tomographische Auswertung zu schaffen.

Dies Schussfolge betrug bis auf weitere Ausnahmen 60 s. Bei einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa 5 Knoten resultierte somit ein mittlerer Schussabstand von ungefähr 150 m. Insgesamt wurden 10109 Schüsse abgetan, die jeweils von allen OBH-Stationen registriert wurden. Der Gesamtdatensatz hat dadurch einen Umfang von 242.616 Spuren. Der maximale Schuss-OBH-Abstand beträgt 80 km. **BGR** 0.120.216



Abbildung 2.1: Schuss- und OBH-Positionen des SINUS-3D-Refraktionsseismik-Experiments.

3 Geometrie, Binning und Sortierung

In den OBH-Registrierungen sind alle Daten hintereinander gespeichert. In dieser Form ist noch keinerlei Auswertung möglich. Als erster Schritt ist die Anbringung der Geometrie notwendig, d.h. den gemessenen seismischen Spuren müssen die Koordinaten der jeweiligen OBH-Station und der Schussposition zugeordnet werden. Für diesen Zweck wurden die in den Navigationsdateien erfassten geographischen Koordinaten in UTM-Koordinaten transformiert und den Daten zugeordnet. UTM-Koordinaten sind rechtwinklig und bieten daher Vorteile bei der weiteren Bearbeitung, da geometrische Parameter wie Abstand und Azimut direkt aus den Koordinaten berechnet werden können. Weiterhin sind rechtwinklige Koordinaten die Voraussetzung für die Bearbeitung in seismischen Processingsystemen. Abb. 3.1 zeigt farbig codiert die einzelnen Schussprofile in den UTM-Koordinaten.

Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen in Wasser, die als bekannt vorausgesetzt wird, den Schuss- und OBH-Koordinaten und der Wassertiefe an den OBH-Lokationen wurde ein Kontrollinstrument für die richtige Anbringung der Geometrie erstellt. Die genannten Informationen reichen aus, um die Laufzeit der direkt gelaufenen Welle zu berechnen. Die auf den OBH-Daten standardmäßig an-

gebrachte Laufzeitreduktion ($t_{red} = t - \frac{x}{v_{red}}$, $v_{red} = 6$ km/s) wurde rückgängig gemacht.

Abb. 3.2 zeigt einen Ausschnitt der von OBH 38 registrierten Seismogramme und macht zugleich deutlich, dass in der Ursprungssortierung die Daten aller Schussprofile hintereinander weg geschrieben sind. Der Ersteinsatz in den Seismogrammsektionen und die modellierten Ersteinsatzzeiten zeigen noch erhebliche Abweichungen, erst Korrekturen in der Zuordnung der Geometrie verbessern die Anpassung (Abb. 3.3). Die Mehrzahl der Daten zeigte sofort eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Ersteinsatzzeiten (Abb. 3.4).

Die weitere Sortierung richtet sich nach der Zielsetzung der Auswertung. Der erste hier verfolgte Weg ist die Sortierung nach gemeinsamen Mittenpunkten, die in der Reflexionsseismik der entscheidende Schritt vor der Stapelung ist. Ausgangsmaterial sind die von den jeweiligen OBH-Stationen registrierten Seismogramm-Sektionen. Zu jeder Spur sind nach Anbringung der Geometrie die Schuss- und die OBH-Koordinaten bekannt. Daraus wird der Mittenpunkt zwischen den beiden Lokationen berechnet. Am Anfang steht die Frage, welche Schuss-Empfänger-Abstände (Offsets) welchen Mittenpunkten zugeordnet werden können, wobei hier die Mittenpunkt-Sortierung auf Offsets bis 36 km beschränkt wurde, um nicht zu entfernte Schuss-Empfänger-Paare dem jeweiligen Mittenpunkt zuzuordnen. Die Analyse erfolgte in Offset-Abschnitten von jeweils 12 km Länge. Die Abbildungen (3.5) bis (3.7) zeigen, dass an einzelnen Mittenpunkt-Koordinaten immer nur bestimmte Offsetbereiche präsent sind. Das Bild für den Bereich von 0 bis 12 km (Abb. 3.5) wird durch die Geometrie des Profilverlaufs dominiert.

Die Mittenpunkt-Koordinaten sind alle unterschiedlich. Um als Grundlage einer Sortierung zu dienen, würde jeder Koordinate im Extremfall nur eine einzelne Spur zugeordnet, was für eine Auswertung nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund werden vor der Ausführung der Sortierung sogenannte Bins festgelegt. Bins sind Flächenelemente, in denen eine Anzahl von Spuren zusammengefasst wird, und zwar alle Spuren, deren Mittenkoordinaten in den jeweiligen Bin fallen. Im Allgemeinen haben die Bins die Form eines Quadrates, die Bingröße wird über die Seitenlänge gesteuert.

Die Wahl der Bingröße wird von zwei gegensätzlichen Forderungen bestimmt:

- Eine große laterale Auflösung erfordert möglichst kleine Bins.
- Eine ausreichende Anzahl von seismischen Spuren (Überdeckung), wie sie notwendig ist für die Anwendung von Verfahren zur Bestimmung von Parametern wie der Geschwindigkeit, erfordert wiederum möglichst große Bins.

Eine Entscheidung bezüglich der Bingröße kann nur auf der Grundlage von Überdeckungstests erfolgen. Bei diesen Tests wird die Kantenlänge der Bins variert, hier wurden 100 m, 250 m und 1000 m Kantenlänge verglichen (Abb. 3.8 bis 3.10). Die Ergebnisse für 100 m und 250 m Kantenlänge zeigen wenig Unterschiede, in beiden Fällen ist insbesondere im Randbereich die Überdeckung mit Werten unter 15 zu gering. Auch im Zentralbereich dominieren Überdeckungen unter 30. Erst die Steigerung auf 1000 m Kantenlänge gewährleistet Überdeckungen, die von 50 bis in die Größenordnung 200 reichen. Diese Bingröße liegt der weiteren Bearbeitung zugrunde und stellt dann eine Untergrenze dar, da durch Zusammenfassung benachbarter Bins ohne großen Aufwand immer auch größere Bins erstellt werden können.

Als zweite Sortiervariante, die die Anbringung der Geometrie voraussetzt, werden die OBH-Registrierungen in Bestandteile zerlegt, die den einzelnen Schussprofilen entsprechen. Aus der Anzahl der OBH-Lokationen und Schussprofile, die zu multiplizieren sind, ergeben sich so insgesamt ca. 500 Sektionen, die Grundlage für die Aus-



wertung in den Abschnitten 5.1.1 und 5.2 sind. Dort finden sich auch Datenbeispiele der profilsortierten Daten (z.B. Abb. 5.1 und 5.21).

BGR 0.120.216



Abbildung 3.1: Farbcodierte Darstellung der Schussprofile in UTM-Koordinaten, die auch allen weiteren Abbildungen zugrundeliegen.



Abbildung 3.2: Ausschnitt aus den Seismogrammen von OBH 38 vor der Geometriekorrektur. Die grüne Linie zeigt die auf Grundlage der Geometrie modellierten Laufzeiten der direkten Welle.



Abbildung 3.3: Ausschnitt aus den Seismogrammen von OBH 38 nach der Geometriekorrektur. Die grüne Linie zeigt die auf Grundlage der Geometrie modellierten Laufzeiten der direkten Welle.



Abbildung 3.4: Ausschnitt aus den Seismogrammen von OBH 62. Die grüne Linie zeigt die auf Grundlage der Geometrie modellierten Laufzeiten der direkten Welle.

BGR 0.120.216



Abbildung 3.5: Mittenpunkte für Schuss-Empfängerabstände zwischen 0 und 12 km.

Abbildung 3.6: Mittenpunkte für Schuss-Empfängerabstände zwischen 12 und 24 km

Abbildung 3.7: Mittenpunkte für Schuss-Empfängerabstände zwischen 24 und 36 km

Abbildung 3.8: Überdeckung bei der Bin-Kantenlänge 100 m. Die Farbskala am rechten Rand gibt die Überdeckung an.

Abbildung 3.9: Überdeckung bei der Bin-Kantenlänge 250 m. Die Farbskala am rechten Rand gibt die Überdeckung an.

Abbildung 3.10: Überdeckung bei der Bin-Kantenlänge 1000 m. Die Farbskala am rechten Rand gibt die Überdeckung an.

4 Reflexionsseismische Bearbeitung

Bei der reflexionsseismischen Bearbeitung wird vorausgesetzt, dass sich die Laufzeitkurve von Reflexionsereignissen, die durch die OBH-Stationen registriert werden, näherungsweise durch Hyperbeln beschreiben lässt. Dies würde die Nutzung aller Bearbeitungsmöglichkeiten der Steilwinkelseismik eröffnen, wie Geschwindigkeitsanalysen, dynamische Korrektur und Stapelung

Abbildung 4.1: Geometrische Kenngrössen für die Herleitung der Reflexionslaufzeitkurve. (x – Abstand Schuss – Empfänger, d – Wassertiefe, z – Tiefenintervall Meeresboden – Target).

4.1 Grundlagen

Zur Herleitung der Laufzeitkurve wird ein einfaches Modell mit horizontalen Schichtgrenzen angenommen (Abbildung 4.1). Das OBH steht dabei auf dem Meeresboden, die Quelle befindet sich an Wasseroberfläche. Analog zur Herleitung der Laufzeithyperbel der CMP-Methode wird eine einzige Geschwindigkeit *v* unterstellt, die einen Mittelwert (RMS) aus den Schichtgeschwindigkeiten darstellt. Damit entfällt auch die Strahlbrechung. Der Gesamtlaufweg *s* wird mit der Spiegelpunktmethode (Abb. 4.1) zu

$$s^{2} = x^{2} + (d + 2z)^{2}$$
(4.1)

berechnet. Die Laufzeit ist:

$$t^{2} = \frac{(d+2z)^{2}}{v^{2}} + \frac{x^{2}}{v^{2}} = t_{0}^{2} + \frac{x^{2}}{v^{2}}.$$
(4.2)

Dies ist die Gleichung einer Reflexionshyperbel. Die hier enthaltene t_0 -Zeit kann auf $t_{0,RS}$, die t_0 -Zeit der oberflächengestützten Reflexionsseismik umgerechnet werden, indem die Laufzeit im Wasser auf die Zweiweglaufzeit erweitert wird. Hierzu wird die als bekannt vorausgesetzte Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser (v_w) verwendet:

$$t_{0,RS} = t_0 + \frac{d}{v_w}.$$
 (4.3)

Auch die RMS-Geschwindigkeit ändert sich im Vergleich zur Standard-Seismik aufgrund der nur einmal durchlaufen Wassersäule:

$$v^{2}t = v_{W}^{2} \frac{t_{w}}{2} + V_{S}^{2} t_{S}$$
(4.4)

mit t_w – Zweiweglaufzeit durch die Wassersäule und t_s – Zweiweglaufzeit durch den Ozeanboden. In der Standard-Reflexionsseismik ist die RMS-Geschwindigkeit v_w :

$$v_{RS}^{2}\left(t+\frac{t_{w}}{2}\right) = v_{W}^{2}t_{W} + v_{S}^{2}t_{w} = v^{2}t + v_{w}^{2}\frac{t_{w}}{2}.$$
(4.5)

Damit lässt sich die RMS-Geschwindigkeit der Reflexionsseismik aus der RMS-Geschwindigkeit der OBH-Seismik bestimmen:

$$v_{RS}^{2} = \frac{v^{2}t + v_{W}^{2} \frac{t_{w}}{2}}{t + \frac{t_{w}}{2}}.$$
(4.6)

Mit $t_w/2 = d/v_w$ kann die Laufzeit durch die Wassersäule aus der bekannten OBH-Tiefe berechnet werden. Mit den Gleichungen (4.3) und (4.6) kann so das RMS-Geschwindigkeits- t_0 -Zeit-Feld der OBH-Seismik in die für die Oberflächen-Reflexionsseismik gebräuchlichen Größen transformiert werden. Damit sind die OBH-Daten für die Bearbeitung in Geschwindigkeits-Tools aus seismischen Standard-Paketen geeignet.

Das Messgebiet ist durch große Wassertiefen, relative geringe Sedimentmächtigkeiten und kristalline Kruste, die hohe Geschwindigkeiten aufweist, gekennzeichnet. Dies führt dazu, dass die refraktierte Welle, die an der Grenzfläche zwischen den Sedimenten und der kristallinen Kruste entlang läuft, schon in kleinen Entfernungsbereichen auftritt. Aufgrund ihrer hohen Amplituden sind in diesem Entfernungsbereich die reflektierten Wellen nicht mehr auswertbar.

Zur Berechnung der Überholentfernung wird zunächst der horizontale Laufweganteil x_i innerhalb einer Schicht *i* mit der Mächtigkeit z_i und Ausbreitungsgeschwindigkeit v_i betrachtet, in der ein Strahl unter dem Inzidenzwinkel φ_i einfällt:

$$x_i = z_i \tan \varphi_i. \tag{4.7}$$

Der Strahlparameter $p = \sin \varphi_i / v_i$ ist, horizontale Lagerung vorausgesetzt, für alle Schichten gleich. Unter Verwendung von trigonometrischen Umformungen wird Gleichung (4.7) zu:

$$x_{i} = \frac{z_{i} p v_{i}}{\sqrt{1 - p^{2} v_{i}^{2}}}.$$
(4.8)

Das Modell, auf das Gleichung (4.8) angewendet wird, besteht aus drei Schichten:

Bezeichung	Mächtigkeit	Geschwindigkeit
Wasser	d	V _W
Sediment	Z _S	V _S
Kristallin	Halbraum	V _R

An der Schichtgrenze zwischen Sediment und Kristallin beträgt der Inzidenzwinkel φ = 90°, damit ist der Strahlparameter für die refraktierte Welle $p = 1/v_R$. Unter Berücksichtigung des nur einfachen Laufweges durch Wasser (Abb. 4.1) ist somit die Entfernung *x*, in der die refraktierte Welle von der Schichtgrenze Sediment und Kristallin auftritt:

$$x = \frac{d}{\sqrt{\frac{v_W^2}{v_R^2} - 1}} + \frac{2z_s}{\sqrt{\frac{v_R^2}{v_s^2} - 1}}.$$
(4.9)

Für Abschätzungen reicht es aus, eine Geschwindigkeit v_1 anzunehmen, die einen Mischwert aus v_W und v_S darstellen. Damit vereinfacht sich (4.9) zu:

$$x \approx \frac{d + 2z_s}{\sqrt{\frac{v_1^2}{v_R^2} - 1}}.$$
(4.10)

4.2 Anwendung auf die Daten

Bevor Reflexionen untersucht werden können, muss durch Anwendung von Gleichung (4.9) die Überholentfernung der refraktierten Welle bestimmt werden, um den Offset-Bereich für die Analyse zu bestimmen. Das Einsetzen der für das Analysegebiet charakteristischen Parameter d = 1700m, $v_W = 1500$ m/s, $z_S = 500$ m, $v_S = 1800$ m/s, $v_R = 4500$ m/s ergibt für die Überholentfernung einen Wert von ca. 1000m, d.h. nur bis zu diesen Offsets können Reflexionen ausgewertet werden. In diesem Entfernungsbereich liegen in den Bin-sortierten Daten keine Spuren vor, deshalb müssen Bins ausgewertet werden, die sich an OBH-Lokationen befinden. Abb. 4.2 zeigt derartige Bins.

Der erste Schritt zur Geschwindigkeitsauswertung der Reflexionshyperbeln in Abb. 4.2 ist die Prüfung, ob die Analyse der direkt gelaufenen Welle nach der Hyperbelgleichung (4.2) Wassergeschwindigkeit ergibt. In den vorliegenden Daten fanden sich Geschwindigkeiten im Bereich von 1200m/s, die somit unrealistisch niedrig sind. Eine erste Überlegung betrifft einen seitlichen Versatz der OBH-Position, da bei der Versenkung immer eine laterale Drift in der Größenordnung von einigen hundert Metern möglich ist. Mit *h* als angenommenem seitlichen Versatz wird Gleichung (4.2) auf die geometrische Situation einer Raumdiagonalen erweitert:

$$t^{2} = \frac{d^{2} + h^{2} + x^{2}}{v^{2}} = \frac{d^{2} + h^{2}}{v^{2}} + \frac{x^{2}}{v^{2}} = t_{0}^{2} + \frac{x^{2}}{v^{2}}.$$
(4.11)

Durch einen seitlichen Versatz vergrößert sich folglich nur die t_0 -Zeit, aber nicht die Geschwindigkeit, die aus der Hyperbelkrümmung bestimmt wird. Dies kann also nicht die Ursache für die zu niedrigen Geschwindigkeiten sein.

Die Frage nach der Ursache bleibt an dieser Stelle erst einmal offen, da aufgrund der unzureichenden Signalqualität neben der direkten Welle praktisch keine reflektierte Phasen erkennbar sind. Hinzu kommt der sehr geringe maximale Offset. Im folgenden Kapitel wird die Auswertung auf refraktierte Wellen konzentriert.

Abbildung 4.2: Reflexionsseismische Auswertung an den OBH-Lokationen 62 bis 66.

5 Refraktionsseismische Bearbeitung

Die Daten des 3D-Experiments sind durch die langen Offsets und die im Verhältnis zur Stationsdichte hohe Schussdichte für refraktionsseismische Auswertungen wesentlich geeigneter als für die Anwendung von Verfahren aus der Reflexionsseismik. Das vorige Kapitel hat gezeigt, dass reflexionsseismische Analysen allenfalls an ausgewählten Punkten direkt an OBH-Lokationen möglich sind. Deshalb liegt auch hier der Schwerpunkt der Auswerteverfahren auf der Refraktionsseismik.

In einem 3D-refraktionsseismischen Datensatz wie dem vorliegenden ist eine Auswertung nicht unmittelbar möglich, die Datenmenge ist einfach zu groß. Dies gilt insbesondere für Auswerteverfahren, die auf dem Picken von Laufzeitkurven basieren. Aus diesen Grund wurde hier ein zweifacher Weg zur Auswertung gegangen:

- 1 Bereitstellung einer Verfahrensweise für einen schnellen Überblick über die Daten. Hierbei soll die Geschwindigkeit der Refraktoren bestimmt werden.
- 2 Auswertung der Ersteinsätze in allen gemessenen Spuren, um einen Datensatz zu generieren, der eine 3D-Auswertung der Geschwindigkeiten und Tiefen ermöglicht. Diese weitere Auswertung ist allerdings nicht mehr Inhalt des vorliegenden Berichtes.

5.1 *τ-p*-Transformation zur Übersicht

Für das einfache Modell einer ebenen Schichtgrenze mit v_R als Refraktor-Geschwindigkeit und τ als Interceptzeit kann die Laufzeitkurve t(x) der refraktierten Welle als Funktion der Schuss-Empfänger-Entfernung *x* durch die einfache Formel

$$t(x) = \tau_{CMP} + \frac{x}{v_R}$$
(5.1)

beschrieben werden. Mit $p_R = 1/v_R$ als Strahlparameter der refraktierten Welle wird Gleichung (5.1) zu:

$$t(x) = \tau + xp_R. \tag{5.2}$$

Gleichung (5.2) ist diejenige Gleichung, die für die τ -*p*-Transformation den Zusammenhang der Zeitbereichsvariablen *t* und *x* mit den Transformationsvariaben τ und *p* beschreibt (Gerver & Markushevich, 1966). Im Falle der einfachen Laufzeitkurve von Gleichung (5.1) reichen die beiden Parameter τ und p_R aus, um die Laufzeitkurve vollständig zu beschreiben. Im Falle von komplizierteren Laufzeitkurven ist auch das τ -p-Transformationsergebnis eine komplexere Funktion.

5.1.1 Auswertung in profilsortierten Daten

In diesem Arbeitschritt besteht die Zielsetzung darin, ein Werkzeug für einen schnellen Überblick über die Daten zu gewinnen, das es ermöglicht, seismische Phasen, Geschwindigkeiten und Interceptzeiten zu identifizieren und vorläufig auszuwerten und auch einfache Untergrundmodelle für horizontale Schichtung zu erstellen. Die Anwendung erfolgt auf profilsortierte Daten, bei denen sich die OBH-Station auf dem Profil befindet. Nur dann sind die Voraussetzungen für eine zweidimensionale refraktionsseismische Auswertung erfüllt. Da die τ -p-Transformation angewendet wird, ist es wichtig, dass die Daten nicht laufzeitreduziert sind. Nur so ist es möglich, aus dem Kehrwert des Strahlparameters direkt die Geschwindigkeit einer refraktierten Welle abzulesen. Um diese Ablesung noch weiter zu vereinfachen, wird im folgenden die Strahlparameterachse mit 1/p beschriftet, d.h. mit der Scheingeschwindigkeit.

Das erste Beispiel (Abb. 5.1) zeigt einen Ausschnitt aus der Registrierung von OBH 38, in dem sowohl die direkt gelaufene Welle als auch die refraktierte Welle deutlich erkennbar sind. In der τ -p-Transformation (Abb. 5.2), berechnet durch Slant-Stacking, bildet sich die direkte Welle, die in Abb. 5.1 durch eine hyperbelförmige Laufzeitkurve charakterisiert ist, auf die charakteristische Ellipse ab, die für die Interceptzeit τ =0 s den Wert 1/p = 1500 m/s annimmt. Bei τ =1.5 s schließt sich an die Ellipse das Transformationsergebnis der refraktierten Wellen an, das bis τ =2.5 s einen Geschwindigkeitsbereich von ca. 3700 m/s bis 7500 m/s abdeckt.

Das zweite Beispiel (Abb. 5.3) behandelt den Fall eines kurzen Refraktionsevents, das sich im τ -*p*-Bereich (Abb. 5.4) auf ein kurzes Geradenteilstück abbildet. Eine mathematische Diskussion der Abbildungen von kurzen Geradenstücken findet sich im nächsten Abschnitt. Das letzte Beispiel (Abb. 5.5 und 5.6) zeigt schließlich, wie im τ *p*-Bereich in kompakter Form ein großer Bereich von refraktierten Phasen erfasst werden kann, die Parameter erfassen den Bereich von τ =1.5 s bei 3300 m/s bis τ =3.5 s bei 8000 m/s, also bis zur Unterkruste.

Abbildung 5.1: Registrierung von Schussprofil 21 durch OBH 38

Abbildung 5.2: τ -*p*-Transformation der Daten von Abb. 5.1.

Abbildung 5.3: Registrierung von Schussprofil 7 durch OBH 72

Abbildung 5.4: τ -*p*-Transformation der Daten von Abb. 5.3.

Abbildung 5.5: Registrierung von Schussprofil 9 durch OBH 62

Abbildung 5.6: τ -*p*-Transformation der Daten von Abb. 5.5.

5.1.2 *τ-p*-Auswertung in Bin-sortierten Daten

Der Analyse-Ansatz im vorherigen Abschnitt stellte eine reine 2D-Analyse dar. Der erste Schritt in Richtung 3D-Auswertung analysiert die Daten in den Bins, nachdem wie in Kapitel 3 besprochen die entsprechende Sortierung stattgefunden hat. Um eine ausreichende Anzahl von seismischen Spuren und einen ausreichenden Offsetbereich abdecken zu können, müssen die Bins ausreichend groß sein, wie auch schon in Kapitel 3 diskutiert wurde. Zur Auswertung kann die CMP-Methode der Refraktionsseismik (Gebrande & Miller, 1985) verwendet werden. In CMP- bzw. Binsortierten refraktionsseismischen Daten kann für den Zwei-Schicht-Fall die Laufzeitkurve t(x) einer refraktierten Welle als Funktion des Schuss-Empfänger-Abstands x durch

$$t(x) = \tau_{CMP} + \frac{x}{v_{CMP}}$$
(5.3)

beschrieben werden. Bei nicht zu großen Neigungen kann v_{CMP} als Geschwindigkeit des Refraktors angenommen werden und aus τ_{CMP} kann aus der Interceptzeit-Formel die Mächtigkeit des Hangenden berechnet werden. Der Vorteil der CMP-Technik besteht darin, dass die Strahlen im Bereich des CMPs bzw. Bins ausgewertet werden. Allerdings werden Neigungseinflüsse unterdrückt; es kann gezeigt werden, dass die CMP-Technik der Mittelung der Laufzeitkurven von Schuss und Gegenschuss entspricht (Gebrande & Miller, 1985). Im 3D-Fall wird zusätzlich noch über alle Azimute gemittelt. Für die Zielsetzung einer schnellen Übersicht sind diese Nachteile aber nicht entscheidend. Hier wird angenommen, dass die CMP-Geschwindigkeit gleich der Refraktorgeschwindigkeit ist: $v_{CMP} = v_R$.

In den Bin-sortierten Gathern wird der Refraktor im allgemeinen nur in einem beschränkten Offset-Bereich erfasst. Die Bestimmung der für die Refraktionsseismik wichtigen Parameter Geschwindigkeit und Interceptzeit ist dadurch mit einer Unsicherheit verbunden, die sich leicht veranschaulichen lässt (Abb. 5.7). Die beiden Parameter werden durch Steigung und Achsenabschnitt der Geraden, die durch das Event gelegt werden können, ermittelt. Die Offsetbeschränkung und die zeitliche Ausdehnung der seismischen Signale führen dazu, dass sich ein ganzes Bündel von Geraden durch das seismische Event legen lässt.

Abbildung 5.7: Unsicherheitsbereich bei der *t-p*-Transformation eines

Im Folgenden soll abgeschätzt werden, wie sich diese Unsicherheiten auf die Transformation in den τ -*p*-Bereich auswirken. Es wird angenommen, dass das Reflexionsevent durch die Interceptzeit τ_0 und die Steigung p_0 charakerisiert wird, die Laufzeitkurve ist somit $t = \tau_A + p_A x$. Betrachtet wird nun der Mittenpunkt C des Reflexionsevents mit den Koordinaten (x_C , t_C), dass in *x*-Richtung die Länge $2\Delta x$ eine *t*-Richtung die Breite $2\Delta t$ besitzt. Zur rechnerischen Vereinfachung wird unterstellt, dass alle Geraden des Bündels durch A führen. Als ein Grenzfall sollen Interceptzeit und Strahlparameter derjenigen Geraden berechnet werden, die durch die Punkte C und A führt. Die Geradengleichung kann aus den Koordinaten für A und C bestimmt werden, mit

$$t_c = \tau_A + p_A x_C , \ x_C \tag{5.4}$$

und

$$t_A = \tau_A + p_A(x_C - \Delta x) + \Delta t , \ x_A = x_C - \Delta x.$$
(5.5)

Der Strahlparameter p_A zur Geraden berechnet sich nach einigen Umformungen zu:

$$p_A = \frac{t_A - t_C}{x_A - x_C} = p_C - \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$
(5.6)

Die Interceptzeit τ_A kann ebenso aus den Koordinaten für A und C abgeleitet werden:

$$\tau_A = \frac{x_C t_A - x_A t_C}{\Delta x} = \tau_C + x_C \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$
(5.7)

Für die Gerade durch die Punkte B und C berechnen sich die Parameter ganz analog zu:

$$p_B = p_C + \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{5.8}$$

und

$$\tau_B = \tau_C - x_C \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$
(5.9)

Die beiden Geraden durch A und C bzw. B und C stellen Extremfälle dar. Dazwischen liegt unter Annahme, dass alle Geraden durch den Zentralpunkt C führen, der gesamte Werteraum für τ und p, der gemäß der Gleichungen (5.6) bis (5.9) ein Geradenteilstück aufspannt. Der Unsicherheitsbereich ist in beide Richtungen gleich groß, so dass das gesuchte Wertepaar (τ_c , p_c) aus dem Mittelwert der beiden Endstücke bestimmt werden durch $\tau_c = (\tau_A + \tau_B)/2$ und $p_c = (p_A + p_B)/2$. Hieraus ergeben sich auch die möglichen Auswertestrategien für den τ -*p*-Bereich:

- Picken der Extrema an den Enden der Geraden und Bildung der Mittelwerte.
- Picken in der Mitte des τ -p-Geradenstücks.
- Picken im Amplitudenmaxim des τ-p-Events, falls eines der Endstücke des Events nicht klar identifizierbar ist.

Abb. 5.8 zeigt die Daten eines der Analyse-Bins. Charakteristisch für die Binsortierten Daten sind große Lücken in der Offset-Abdeckung (vergl. Abb. 3.4 – 3.6). Um die Datendichte in den einzelnen Offset-Bereichen zu erhöhen, wurden jeweils 9 Bins der Kantenlänge 1 km zu einem großen Bin der Kantenlänge 3 km zusammengefasst. Um die Analyse auf die Bereiche um die Bins zu fokussieren, wurden nur Offsets bis 36 km in die Sortierung und Analyse einbezogen.

Das Resultat der τ -p-Transformation (Abb. 5.9) zeigt die oben diskutierten τ -p-Events in Form von Geradenstücken, in den drei Geschwindigkeits-Interceptzeit-Picks bei 2.4, 4.2 und 5.4 km/s möglich sind. Da sich τ -p--Events an den Enden teilweise überlagern, kann das Picken nicht durch Mittelwertbildung, sondern nur durch Bestimmung des Amplitudenmaximums erfolgen. Die Abb. 5.10 und 5.11 stellen den Fall eines für die Analyse unzureichenden Bins dar. Die refraktierte Welle ist nur in einem 500 m langen Refraktorteilstücke bei ca. 12 km Offset in den Daten präsent (Abb. 5.10). Für eine sichere Bestimmung der Parameter ist dies nicht ausreichend. Nach der τ -p-Transformation (Abb. 5.11) wirkt sich dies durch ein Streifenmuster aus, das den gesamten Werteraum einnimmt; Picks von τ -p-Paaren sind nicht mehr möglich.

Das dritte Beispiel (Abb. 5.12 und 5.13) zeigt einen Bin, in dem nur ein einziger Pick möglich war. Die refraktierte Welle ist durch den Offset-Bereich 7 – 13 km ausreichend gut definiert. Da in diesem Entfernungsbereich aber nur ein Refraktionshorizont auftritt, werden auch keine Phasen von langsameren Refraktoren erfasst.

Insgesamt waren 23 Bins für die Analyse geeignet. In Abb. 5.12 ist an diesen Lokationen aus den Wassertiefen durch Interpolation die Tiefe des Meeresbodens berechnet worden. Da in den Bins immer die Beiträge aus allen Offset-Bereichen erfasst und so auch gemittelt wurden, wurde der Auswertung ein sehr einfaches Modell mit ebenen Schichtgrenzen zugrunde gelegt (z.B. Berckhemer, 1990). Die Resultate der Schichten werden durch Interpolation in die Fläche gebracht. Abb. 5.12 – 5.17 zeigen die Tiefenpläne für die drei beobachteten Grenzflächen. Die zugehörigen Refraktorgeschwindigkeiten werden in Abb. 5.18 – 5.20 dargestellt.

Als Vergleichsmöglichkeit kann die 2D-Auswertung von Profil 13 (Flueh, Reichert & Shipboard Scientific Party, 1998), das das Messgebiet diagonal von NW nach SE durchquert (Abb. 3.1), herangezogen. Für die Auswertung wurden dort zwei Ansätze verwendet:

- 1. Vorwärtsmodellierung und Vergleich mit den gemessenen Laufzeiten.
- 2. 2D-Refraktionstomographie mit den Ersteinsätzen der refraktierten Wellen.

Für Refraktor 1 zeigen Geschwindigkeiten und Tiefen überall ähnliche Werte, in allen Fällen zeigt die Struktur im Zentrum eine Hochlage. Auch bei Refraktor 2 sind die Tiefenlagen ähnlich, die Geschwindigkeiten aus der Bin-Analyse sind allerdings niedriger. Ähnlich ist der Vergleich für Refraktor 3: Die Tiefen liegen in einer vergleichbaren Größenordnung während die Geschwindigkeiten wieder kleiner sind.

Die Ergebnisse dürfen nur als sehr vorläufige Übersichtsauswertung angesehen werden. Es wurde ein Weg gesucht, aus diesem sehr umfangreichen 3D-Datensatz mit nicht zu großem Aufwand ein erstes Geschwindigkeits-Tiefen-Modell zu erstellen. Entsprechend ist eine derartige Auswertung mit einer Reihe von Einschränkungen versehen:

- Es erfolgt Mittelung über alle Azimute, weshalb ein Modell mit ebenen Schichtgrenzen zugrundegelegt wird.
- Es wird nur ein mittlerer Tiefenbereich erfasst, da der maximale Offset auf 36 km beschränkt ist.
- Die refraktierten Wellen können aufgrund der großen Offset-Lücken in den Binsortierten Daten teilweise in nur sehr kleinen Offset-Bereichen ausgewertet werden.
- Aufgrund der eingeschränkten Anzahl von Analyse-Bins wirken sich beim Aufbau des 3D-Modells auch Interpolationseffekte aus.

Die ermittelten Geschwindigkeiten und Tiefen liegen bezüglich ihrer Unsicherheiten zwischen den Invervallgeschwindigkeiten, die in der 3D-Refllexionsseismik aus Stapelgeschwindigkeiten abgeleitet werden und Geschwindigkeiten aus einer refraktionsseismischen 2D-Auswertung über den gesamten Offset-Bereich. Dennoch sind die hier erzielten Ergebnisse für einen ersten Überblick über das 3D-Geschwindigkeitsfeld, der mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand realisierbar ist, verwendbar.

Ausgangsbasis für den Aufbau eines detaillierten 3D-Geschwindigkeits-Tiefen-Modells kann nur das Festlegen der Laufzeiten der refraktierten Wellen einschließlich aller Geometrie-Informationen sein. Die Bereitstellung einer Methodik, die dies in dem sehr umfangreichen 3D-Datensatz ermöglicht, ist Inhalt des nächsten Abschnitts.

Abbildung 5.8: Bin 481, <u>nicht</u> entfernungstreue Abspielung. Die Offsetbereiche sind 0 -3. und 8 -13.5 km.

Abbildung 5.9: τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.8. Die Strahlparameterachse ist mit der Scheingeschwindigkeit beschriftet. Die unteren Enden der farbigen Linien kennzeichnen die gepickten Scheingeschwindigkeiten und Strahlparameter.

Abbildung 5.10: Bin 2588, <u>nicht</u> entfernungstreue Abspielung. Die Offsetbereiche sind 0 –2, 12 - 12.5 und 14 - 18 km.

Abbildung 5.11: τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.10. Die Strahlparameterachse ist mit der Scheingeschwindigkeit beschriftet.

Abbildung 5.12: Bin 3095, <u>nicht</u> entfernungstreue Abspielung. Die Offsetbereiche sind 0 - 4.4 und 6 - 13 km.

Abbildung 5.13: τ -p-Transformation der Daten von Abb. 5.12.

Seabottom

Abbildung 5.14: Tiefenplan des Meeresbodens, berechnet aus den Wassertiefen an den Bins für die τ -*p*-Analyse.

Refraktor 1

Abbildung 5.15: Tiefenplan für die Unterkante der obersten Schicht, berechnet aus der *t-p*-Analyse der Bins. Die Tiefen liegen zwischen 3.3 und 4 km.

Refraktor 2

Abbildung 5.16: Tiefenplan für die Unterkante der mittleren Schicht, berechnet aus der *t-p*-Analyse der Bins. Die Tiefen liegen zwischen 5.4 und 5.9 km.

Abbildung 5.17: Tiefenplan für die Unterkante der untersten Schicht, berechnet aus der τ -*p*-Analyse der Bins. Die Tiefen liegen zwischen 14 und 18 km.

Abbildung 5.18: Geschwindigkeiten für den obersten Refraktor, berechnet aus der τ -p-Analyse der Bins. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen 2.4 und 2.5 km/s.

Refraktor 2

Abbildung 5.19: Geschwindigkeiten für den mittleren Refraktor, berechnet aus der τ -*p*-Analyse der Bins. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen 4 und 4.5 km/s.

Abbildung 5.20: Geschwindigkeiten für den untersten Refraktor, berechnet aus der τ -*p*-Analyse der Bins. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen 5 und 6.5 km/s.

5.2 3D-Auswertung durch Picken der Ersteinsätze im *x-t*-Bereich

Die Ergebnisse in Abschnitt 5.1 haben gezeigt, dass unter den Gegebenheiten der Refraktionsseismik für eine detaillierte Auswertung kein Weg an einem Picken der Phasen der refraktierten Wellen vorbei, und zwar über den gesamten Offset-Bereich. Hierbei besteht die Zielsetzung darin, für einen sehr umfangreichen 3D-Datensatz einen methodischen Ansatz zu finden, der es ermöglicht, in den über 200000 Spuren, verteilt auf ca. 500 Profile, die Laufzeiten der refraktierten Wellen einschließlich der Lageinformationen der Schuss- und OBH-Position zu finden. Um auch tiefere Refraktoren zu erfassen, soll der ganze Offset-Bereich bis 90 km, der in den Daten enthalten ist, mit erfasst werden. Die Pickprozedur sollte zumindest teilweise automatisch ablaufen, da sonst der Bearbeitungsaufwand zu groß wäre. Deshalb wird sich das Picken auch auf Phasen beschränken, die in den jeweiligen Entfernungsbereichen als Ersteinsatz auftreten.

Die erste Voraussetzung, die Sortierung der Daten nach einzelnen Schussprofilen, ist in Kapitel 3 geschaffen worden, indem es jetzt ca. 500 Datensätze gibt, die sich auf jeweils eine OBH-Station und ein Schussprofil beziehen und mit allen Geometrieinformationen versehen sind. Im Gegensatz zu den τ -p-Auswertungen von Abschnitt 5.1 wird diesmal die Laufzeitreduktion mit 6 km/s an den Daten angebracht. Damit sind refraktierte Wellen, die sich mit dieser Geschwindigkeit ausbreiten, als horizontale Einsätze abgebildet. Auch die anderen refraktierten Wellen, die Geschwindigkeiten darunter und darüber einnehmen, weisen nach der Laufzeitreduktion erheblich geringere Neigungen auf. Dies erleichtert sowohl die Anwendung von Filterverfahren als auch die Automatisierung des Pickens.

Die Prozedur für die Auswertung der Ersteinsätze der refraktierten Wellen soll im Folgenden anhand von Datenbeispielen erläutert werden. Abb. 5.21 zeigt die Registrierung eines Schussprofils durch OBH 68. Da sich das OBH innerhalb des Schussprofils befindet, ist die direkt gelaufene Welle im Zentralbereich als Ersteinsatz zu finden mit Amplituden, die im Vergleich zur refraktierten Welle wesentlich größer sind. Als erster Schritt kommt deshalb eine automatische Verstärkungsfunktion (AGC) mit einer Fensterlänge von 800 ms zur Anwendung, um die Amplituden in eine ähnliche Größenordnung zu bringen. Anschließend folgt ein minimalphasiges Bandpassfilter (2/5 – 25/35 Hz), das auf Spektrum des Nutzsignals abgestimmt ist.

Der entscheidende nächste Schritt besteht in der Anwendung des sogenannten dynamischen Signal-Rausch-Filters (Canales, 1984, Gulunay & Necati, 1986). Hierbei wird im Fourier-Bereich eine Gewichtsfunktion W(f), die eine Funktion der Frequenz *f* ist, aus den Transformierten des Signals (*S*(*f*)) und des Störanteils (*N*(*f*)) berechnet:

$$W(f) = \frac{S(f)^2}{S(f)^2 + N(f)^2}.$$
(5.10)

Dort wo Signale präsent sind, wird die Spur mit 1 gewichtet, in Bereichen mit geringem Signal-Rausch-Verhältnis wird die Gewichtsfunktion sehr klein und der Störanteil dementsprechend unterdrückt. Das Filter arbeitet im Frequenz-Offset-Bereich (*fx*-Bereich), und zwar für jede Frequenzkomponente separat in *x*-Richtung. Ähnlich wie bei der *f-x*-Dekonvolution werden vorzugsweise Events mit linearem Charakter verstärkt. Das Ergebnis bis zur Anwendung der dynamischen Signal-Rauschfilterung (Abb. 5.22) weist im Vergleich zu den ungefilterten Daten von Abb. 5.21 eine deutliche Verstärkung der refraktierten Wellen auf.

In den so aufbereiteten Daten soll nun im nächsten Schritt die refraktierte Welle automatisch gepickt werden. Der automatische Picker wendet ein Schwellwert-Kriterium an und wirkt innerhalb eines vorgegebenen Zeit-Offset-Fensters (Abb. 5.23). In diesem Beispiel wird die refraktierte Welle auch nach der dynamischen Signal-Rausch-Filterung amplitudenschwach wiedergegeben, deshalb ist das Pickergebnis mit starken Fluktuationen belegt. Hier schafft ein Despiking-Operator Abhilfe (Bednar, 1983), der den Medianwert zur Erkennung von Ausreißern verwendet.

Im zweiten Beispiel (Abb. 5.25) fluktuieren die Picks im rechten Teil der Seismogramm-Sektion sehr stark, aber auch der deutliche Refraktionseinsatz im linken Teil der Daten benötigt eine Nachbearbeitung durch den Median-Despiker (Abb. 5.26). In diesem Beispiel ist als letzter Schritt eine Nachbearbeitung per Hand erforderlich, um die direkt gelaufene Welle in den Picks festzulegen. In Abb. 5.23 ist das OBH so weit vom Schussprofil entfernt, dass die refraktierte Welle im gesamten Profil als Ersteinsatz auftritt.

Das letzte Beispiel zeigt Daten, deren Signalqualität in weiten Bereichen des Einsatzes der refraktierten Welle unzureichend ist für den Einsatz des automatischen Pickers (Abb. 5.27), so dass zuerst manuell gepickt werden muss (5.28). Die Nachbe-

arbeitung des automatisch gepickten Teils im rechten Teil der Abbildung übernimmt wieder der Median-Despiker (Abb. 5.29).

Eine Möglichkeit, alle gepickten Laufzeiten in einem Diagramm darzustellen, wird in Abb. 5.30 aufgezeigt. Dort werden die (weiterhin um 6 km/s reduzierten) Zeiten am Ort des Mittenpunkts zwischen der Schuss- und der OBH-Lokation dargestellt.

Abbildung 5.21: Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 69, Schussprofil 14.

Abbildung 5.22: Daten von Abb. 5.21 nach AGC, Bandpass-Filterung und dynamischer Signal-Rauschfilterung.

Abbildung 5.23: Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 83, Schussprofil 15. Die grünen Linien kennzeichnen den Arbeitsbereich des automatischen Pickers, die rote Linie zeigt die Ergebnisse.

Abbildung 5.24: Gepickte Laufzeiten von Abb. 5.23 nach Median-Despiking (rote Linie).

Abbildung 5.25: Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 71, Schussprofil 7, die blaue Linie zeigt die Ergebnisse des automatischen Pickens.

Abbildung 5.26: Gepickte Laufzeiten von Abb. 5.25 nach Median-Despiking und manueller Nachbearbeitung (rote Linie). Die dünne rote Linie kennzeichnet Picks, die herausgenommen wurden.

Abbildung 5.27: Mit v = 6 km/s reduzierte Darstellung der Daten von OBH 73, Schussprofil 21. Die grünen Linien kennzeichnen den Arbeitsbereich des automatischen Pickers, die blaue Linie zeigt die Ergebnisse.

Abbildung 5.28: Gepickte Laufzeiten von Abb. 5.27 nach manueller Nachbearbeitung im linken Teil.

Abbildung 5.29: Laufzeiten von Abb. 5.28 nach Median-Despiking (rote Linie).

Abbildung 5.30: Farbcodierte Darstellung aller gepickten Laufzeiten als Funktion der Mittenpunktkoordinate zwischen Schuss und Empfänger.

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die ursprüngliche Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens lag darin, den 3D-Refraktionsdaten des SINUS-Experiments ein dreidimensionales Abbild des Untergrunds unter der Messfläche zu erstellen. Der am Anfang geplante Ansatz, in Analogie zur Reflexionsseismik auch in den OBH-Registrierungen nach der Bin-Sortierungen Reflexionen auszuwerten und durch dynamische Korrektur und Stapelung in Lotzeitsektionen zu transformieren, die dann an einer 3D-Auswertestation weiter bearbeitet werden können, erwies sich als nicht realisierbar. Die für die Refraktionsseismik optimierte Quell-Empfänger-Konfiguration bedingte bei der Reflexionssauswertung, dass die für die Bearbeitung notwendigen mittenpunktnahen Offsetbereiche nur selten mit Spuren belegt sind. An den wenigen Bin-Lokationen, die diese Bedingung erfüllen, ist wiederum die Kohärenz der Reflexionen unzureichend. Außerdem zeigten sich teilweise unrealistisch kleine Geschwindigkeiten für die direkt durch das Wasser gelaufenen Wellen. Hier besteht noch Untersuchungsbedarf, weil gerade für die Wiedergabe der Feinstruktur in den Sedimenten die Reflexionsmethode besonders geeignet ist, auch wenn die Auswertung auf lokale Untersuchungen an den OBH-Lokationen beschränkt bleiben muss.

Im weiteren Verlauf der Bearbeitung stellte sich aber schnell heraus, dass der Aufwand für das Anbringen der Geometrie, das Sortieren und das Picken der relevanten seismischen Phasen viel höher ist, als bei der Konzeption und Durchführung des Experiments vorhergesehen werden konnte. Aus diesem Grund wurde dem Forschungsvorhaben eine neue Zielsetzung gegeben, die in dem vorgegebenen Zeitrahmen realisierbar ist: Schaffung der methodischen Voraussetzungen für die Auswertung eines derartigen Experiments, Bereitstellung einer Reihe von Werkzeugen für die übersichtsweise Auswertung der Daten und einer Methode für das Picken der refraktierten Wellen in über 200 000 Spuren, um schließlich einen Datensatz bereitzustellen, der alle Picks einschließlich der Geometrie umfasst und so direkt in den Aufbau detaillierter 3D-Modelle mit existierenden Methoden münden kann.

Bei einem so umfangreichen Datensatz wie den SINUS-3D-Daten ist die τ -*p*-Transformation sehr geeignet, einen schnellen Überblick über die Geschwindigkeiten und Intercept-Zeiten von Refraktoren zu gewinnen, da beides direkt aus den transformierten Daten abgelesen werden kann. In den profilsortierten Daten stellt diese Technik einen reinen 2D-Ansatz dar, der erfordert, dass sich die OBH-Lokation auf dem Schussprofil befindet.

Als ein erster Weg zur 3D-Auswertung wurden die seismischen Spuren geeigneter Bins in den *τ-p*-Bereich transformiert und dort analysiert. Diese Methodik erlaubt den schnellen Aufbau eines dreidimensionalen Geschwindigkeits-Tiefen-Modells, das aufgrund gewisser Einschränkungen (azimutale Mittelung, Offsetbegrenzung, Modell horizontaler Schichten) größere Unsicherheiten aufweist als die 2D-Refraktions-Auswertung. Dennoch sind die Ergebnisse geeignet für einen ersten Überblick und können in ein Startmodell für weitere Auswertungen einfließen. Durch Nutzung der gepickten Laufzeiten von Abschnitt 5.2 bieten sich Ansätze für Weiterentwicklungen. Es ist zu untersuchen, ob statt der Daten die Picks in Bins sortiert und ausgewertet werden können, wobei auch größere Offsets einbezogen werden können. Aus den gepickten Laufzeiten können durch Regressionsanalyse in ausgewählten Offsetbereichen Scheingeschwindigkeiten und Refraktorlaufzeit bestimmt werden. Da auch die Geometrie in den Laufzeitdaten enthalten ist, können die Analysen für verschiedene Azimutbereiche einzeln durchgeführt werden. Erste Versuche, die auf einer Standard-Tabellenkalkulation beruhen, wurden bereits durchgeführt.

Im Rahmen der allgemeinen Zielsetzung des SINUS-Experiments, die Struktur von Kruste und oberen Mantel im Bereich des Messgebietes zu erkunden, wurden wichtige Zwischenziele erreicht. Neben dem Aufbau von Übersichtsmodellen wurde mit dem Picken sämtlicher Ersteinsätze der refraktierten Wellen einschließlich der Schuss- und Empfängerlokationen in rechtwinkligen Koordinaten der Weg für den Aufbau detaillierter Geschwindigkeits-Tiefen-Modelle bereitet. Die Laufzeitpicks können zur Auswertung mit synthetischen Laufzeiten aus 3D-Modellierungsprogrammen abgeglichen werden. Vor allem eröffnet sich der Weg zum Einsatz von 3D-Inversionsverfahren wie der 3D-Refraktionstomographie (Hojka, 1998, Zelt & Barton, 1998). Die Ergebnisse der Bin-orientierten τ -*p*-Auswertung können zum Aufbau des Startmodells für die Inversion beitragen. Im Rahmen von weiterführenden Arbeiten können so die benötigten detaillierten Untergrundsmodelle relativ rasch aufgebaut werden.

Das wichtigste Ergebnis ist die Bereitstellung einer Methodik, semiautomatisch Ersteinsätze von refraktierten Wellen aus großen Mengen refraktionsseismischer Daten zu bestimmen. Erreicht wird dies durch den Einsatz von Filterverfahren zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses, automatische Picken und Nachbearbeitung der Ergebnisse durch Mediantechniken und manuelle Eingriffe. Die Prozedur kann sowohl auf zukünftige 3D-refraktionsseismische Datensätze als auch auf die Daten umfangreicher 2D-Vermessungen angewendet werden.

7 Literatur

- Bednar, J. B., 1983, Applications of median filtering to deconvolution pulse estimation and statistical editing of seismic data: Geophysics, **48**, 1598-1610.
- Berckhemer, H., 1990, Grundlagen der Geophysik. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt
- Canales, L. L., 1984, Random noise reduction: Annual Meeting Abstracts, Society of Exploration Geophysicists.
- Flueh, E., Reichert, C., & Shipboard Scientific Party, 1998, SINUS Seismic investigations at the Ninety East Ridge Observatory using Sonne and Joides resolution during ODP leg 179, GEOMAR Report 72.
- Gebrande, H. & Miller, H., 1985, Refraktionsseismik, in: Bender, F., ed., Angewandte Geowissenschaften, Band II, Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften.
- Gerver, M. & Markushevich, V. 1966: Determination of seismic wave velocity from the travel-time curve: Geophys. J. R. astr. Soc., **11**, 165-173.
- Hojka, A., 1998, Zweidimensionale und dreidimensionale refraktionsseismische Untersuchungen an der chilenischen Subduktionszone bei 32°S, issertati , Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Gulunay, N., 1986, Fx decon and complex Wiener prediction filter: Annual Meeting Abstracts, Society of Exploration Geophysicists.
- Schultz, P.S. & Claerbout, J.F. 1978, Velocity estimation and downward continuation by wavefront synthesis: Geophysics, **43**, 691-714.
- Sclater, J.G. & Fisher, R.L., 1974, The evoelution of the east central Indian ocean with emphasis on the tectonic setting of the Ninetyeast Ridge: Geol. Soc. Am. Bull., 85, 683-702.
- Shipboard Scientific Party, 1989, Site 757 *In* Peirce, J., Weissel, J., et al., *Proc. ODP, Init. Repts.*, **121**: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 305-358.
- Shipboard Scientific Party, 1999, Leg 179 Summary. In Pettigrew, T.L., Casey, J.F., Miller, D.J., et al., Proc. ODP, Init. Repts., 179: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1–26.
- Zelt, C.A. & Barton, P.J. 1998: Three-dimensional seismic refraction tomography: J. Geophys. Res., **103**, 7187-7210.

Danksagung

Für die Finanzierung des Projektes durch das BMBF unter Förderkennzeichen 03G0131B sei an dieser Stelle gedankt.