



J. HAUSCHILD, T. GINDLER, D. RISTOW  
A. BERHORST, C. BÖNNEMANN, K. HINZ

**DFG-Forschungsprojekt  
„Krustensplitter“**

**3D-Makro-Geschwindigkeitsbestimmungen und  
3D-Tiefenmigration des seismischen  
3D-Costa-Rica-Datensatzes**

**GEOMAR**  
Forschungszentrum  
für marine Geowissenschaften  
der Christian-Albrechts-Universität  
zu Kiel

**KIEL 1999**  
**GEOMAR REPORT 91**

**GEOMAR**  
Research Center  
for Marine Geosciences  
Christian Albrechts University  
in Kiel

Redaktion dieses Reports:  
Gerhard Haass

Editor of this issue:  
Gerhard Haass

**GEOMAR REPORT**  
ISSN 0936 - 5788

**GEOMAR REPORT**  
ISSN 0936 - 5788

**GEOMAR**  
Forschungszentrum  
für marine Geowissenschaften  
Wischhofstr. 1-3  
D - 24148 Kiel  
Tel. (0431) 600-2555, 600-2505

**GEOMAR**  
Research Center  
for Marine Geosciences  
Wischhofstr. 1-3  
D - 24148 Kiel  
Tel. (49) 431 / 600-2555, 600-2505

# Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Angaben zum Projekt	4
2	Summary	5
2.1	Kurzfassung	6
3	Arbeits- und Ergebnisbericht	7
3.1	Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projektes	7
3.2	Entwicklung der durchgeführten Arbeiten	8
3.2.1	Inputdaten	8
3.2.2	Aufbau des Makrogeschwindigkeitsfeldes B für die 3D- Poststack-Tiefenmigration	11
3.2.2.1	Die Sirius 3D-Crossline-Migration	13
3.2.2.2	Anwendung der Crossline-Migration (First Pass)	16
3.2.2.3	Die 2D-Kirchhoff-Prestack-Tiefenmigration und Fokussierungsanalyse (Second Pass)	37
3.2.3	Der Sirius 3D-Velocity-Modelbuilder	48
3.3	Darstellung der Ergebnisse	49
3.3.1	Vergleich der Makrogeschwindigkeitsfelder A und B	49
3.3.2	Die 3D-Poststack-Tiefenmigration (One Pass)	50
3.3.3	Die 3D-Prestack-Tiefenmigration (Two Pass)	76
3.3.4	Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse	81
4	Ausblick	83
5	Danksagungen	84
6	Literaturverzeichnis	85

# 1 Allgemeine Angaben zum Projekt

## Thema des Gemeinschaftsprojektes

Dreidimensionale Detailabbildungen prominenter reflexionsseismischer Strukturen am aktiven Kontinentalrand vor Costa Rica.

## Antragsteller

Prof. Dr. Karl Hinz, Hannover  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
*gemeinsam mit:*  
Prof. Dr. Dietrich Ristow, Kiel  
GEOMAR

## Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

Förderungszeitraum insgesamt vom 01.07.1996 bis 31.12.1998.

*Erste Projektphase:* vom 01.07.1996 bis 30.06.1997, dargestellt im Zwischenbericht vom Februar 1997.

*Zweite Projektphase:* vom 01.07.1997 bis 31.12.1998.

Berichtszeitraum: Zweite Projektphase vom 01.07.1997 bis 31.12.1998.

## Arbeitsprogramm

Das Gesamtarbeitsprogramm bestand aus drei Teilen:

1. Aufstellung eines 3D-Makro-Geschwindigkeitsfeldes.
2. Tiefenmigration des Costa-Rica-3D Datensatzes unter Einbeziehung des 3D-Makro-Geschwindigkeitsfeldes.
3. Räumliche Erfassung der Reflektoren und Erstellung eines tektonischen 3D-Strukturmodells.

## Inhalt dieses Reports

Die Ergebnisse zu den Punkten 1 und 2 des Arbeitsprogramms sind im wesentlichen von Mitarbeitern des GEOMAR-Forschungszentrum unter Mitwirkung von BGR-Mitarbeitern erarbeitet worden und werden in diesem GEOMAR-Report dargestellt.

## 2 Summary

For the 3D-marine seismic data reflection set (area 15 km x 30 km), received in 1992 by BGR on the active east Pacific continental margin, it was possible to derive a detailed 3D-velocity model (macro-model B) during the second project phase, thanks to a special 3D-prestack-migration technique (two-pass procedure). By this two-pass process the prestack 3D-seismic data will be first migrated on some selected 2D-profiles by using a partial 3D-time-migration in crossline direction. The results are prestack data on 2D-lines in inline direction, showing an elimination of the 3D-side-effects. By application of a 2D-prestack-migration process and a 2D-focusing analysis 2D-depth sections and 2D-macro-velocity fields are derived for some single 2D-lines. Both represent a vertical view through the 3D-depth model respectively through the 3D-macro-velocity field. Such a two-pass-migration technique was successfully applied on the 3D-Costa-Rica data set. The single 2D-macro-velocity fields were subsequently area-interpolated and smoothed. Finally they produced the requested 3D-macro-velocity field B. Contrary to the macro-velocity field A, produced during the first project phase and generated from stacked velocities, this 3D-macro-velocity field B shows an improved lateral and vertical resolution, better precision especially for deep structures and evident relations to geology.

The 3D-macro-velocity model B was successively used as input for a 3D-poststack depth migration (one pass). The migration process we used was the finite-differences (FD) migration technique (Ristow and Rühl, 1997). The resulting 3D-depth migration and the new generated macro-velocity field B presented a substantial resolution improvement of the geological detailed structures. Compared with the macro-velocity-field A the improvement was in particular very evident for larger depths.

Nevertheless, a comparison of the migration results between the single inlines after the 3D-poststack-migration with the macro-velocity field B and the respectively depth-migrated inlines of the 3D-prestack-migration (two-pass) – actually a secondary product during the derivation of the 3D-macro-velocity field B – showed the 3D-prestack-migration process (two pass) versus the 3D-poststack-depth-migration in some depth areas a further improvement in resolution for geological structures. Due to the extremely high computing time the results of the 3D-prestack-depth migration yield only for some inline-directions but these can improve the interpretation results of the whole 3D-data volume after the 3D-poststack-migration.

## 2.1 Kurzfassung

Für die im Jahre 1992 von der BGR am aktiven ostpazifischen Kontinentalrand gemessenen marinen 3D-reflexionsseismischen Daten (Fläche 15 km x 30 km) wurde in der zweiten Projektphase ein detailliertes 3D-Geschwindigkeitsmodell (Makro-Modell B) mit Hilfe eines speziellen 3D-Prestack-Migrationsverfahren (Two Pass Verfahren) abgeleitet. Bei diesem Two Pass Verfahren werden die ungestapelten 3D-Seismik-Daten zunächst durch eine partielle 3D-Migration in Crossline-Richtung auf einige ausgewählte 2D-Profile migriert. Man erhält damit ungestapelte 2D-Daten auf 2D-Linien in Inline-Richtung, bei denen die 3D-Effekte (Seiteneffekte) eliminiert sind. Durch ein 2D-Prestack-Migrationsverfahren einschließlich einer Fokussierungsanalyse werden 2D-Tiefensektionen und 2D-Makro-Geschwindigkeitsfelder für die einzelnen 2D-Linien abgeleitet. Beide stellen einen vertikalen Schnitt durch das 3D-Tiefenmodell bzw. durch das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld dar. Eine solche Two Pass-Migration wurde erfolgreich auf den 3D-Costa-Rica-Datensatz angewandt. Die einzelnen 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder wurden anschließend flächenhaft interpoliert und geglättet, wodurch sich schließlich das gewünschte 3D-Makro-Geschwindigkeitsfeld B ergab. Dieses 3D-Makro-Geschwindigkeitsfeld B zeigt, im Gegensatz zum aus Stapelgeschwindigkeiten abgeleiteten Makrogeschwindigkeitsfeld A aus der ersten Projektphase, eine verbesserte laterale und vertikale Auflösung, bessere Genauigkeit -besonders für größere Tiefen- und deutliche Relationen zur Geologie.

Das 3D-Makro-Geschwindigkeitsmodell B diente dann als Eingang für eine 3D-Poststack-Tiefenmigration (One Pass). Als Migrationsverfahren verwendeten wir die Finite-Differenzen (FD) Migration (Ristow und Rühl, 1997). Die 3D-Tiefenmigration mit dem neu erstellten Makrogeschwindigkeitsfeld B lieferte schließlich eine wesentlich verbesserte Auflösung der geologischen Detailstrukturen, besonders für größere Tiefen zeigte sich die Verbesserung gegenüber dem Makrogeschwindigkeitsfeld A.

Ein Vergleich der Migrationsergebnisse zwischen einzelnen Inlines nach der 3D-Poststack-Migration mit dem Makrogeschwindigkeitsfeld B und den entsprechenden tiefenmigrierten Inlines der 3D-Prestack-Migration (Two Pass), die eigentlich als Nebenprodukt bei der Ableitung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes entstanden sind, hat jedoch gezeigt, daß das 3D-Prestack-Migrationsverfahren (Two Pass) in bestimmten Tiefenbereichen gegenüber der 3D-Poststack-Tiefenmigration eine weitere Verbesserung der Auflösung für die geologischen Strukturen liefern kann. Die Ergebnisse der 3D-Prestack-Tiefenmigration liegen wegen des sehr großen Rechenzeitaufwandes nur für einige Inline-Richtungen vor und sollen die Interpretationsergebnisse des gesamten 3D-Datenvolumens nach der 3D-Poststack-Migration verbessern.

## 3 Arbeits- und Ergebnisbericht

### 3.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projektes

Auf der SONNE-Fahrt SO81/1 & 2 im Jahre 1992 wurde am aktiven ostpazifischen Kontinentalrand vor Costa Rica eine keilförmige Struktureinheit (CRT = Costa-Rica-Terrane) mit zweidimensionalen vielkanalseismischen Messungen erfaßt, die im gesamten Untersuchungsgebiet, d.h. küstenparallel auf einer Länge von 200 km, nachgewiesen werden konnte. Sie weist hohe seismische Geschwindigkeiten sowie hohe Gesteinsdichtewerte auf und wird als ozeanisches Krustenmaterial interpretiert, das u.U. mit dem ophiolitischen Nicoya-Komplex in Zusammenhang stehen könnte. Diese Vermutung wird durch die erhaltenen Ergebnisse von ODP-Bohrung Leg 170, Site 1042, erhärtet, die in Streichrichtung etwas nordwestlich unseres Untersuchungsgebietes niedergebracht wurde. Der kräftige Reflektor an der Oberkante des Costa-Rica-Terranes wurde dabei in einer Tiefe zwischen etwa 310 und 360 m erbohrt. Hier wurden zementierte Brekzien angetroffen, die verschiedenartige Klastika enthalten, u.a. roten Hornstein und alteriertes ultramafisches Gestein. Ähnliche Befunde in mehreren Untersuchungsgebieten an aktiven Kontinentalrändern des Pazifik deuten darauf hin, daß es sich hierbei nicht nur um eine singuläre Erscheinung handelt, sondern daß das Studium dieser Strukturen wahrscheinlich Rückschlüsse auf ein grundlegendes Verhalten ozeanischer Kruste bei Subduktion unter bestimmten und offenbar häufig erfüllten Umständen erlaubt.

Ebenfalls im Jahre 1992 führte die BGR in demselben Meßgebiet eine 3D-reflexionsseismische Untersuchung durch, die eine Fläche von etwa 15 km x 30 km überdeckt (Abb. 1a und 1b). Damit wurden räumlich sechs Hauptreflektoren an der Subduktionszone erfaßt, die die in der oberen Platte kleinräumige und komplizierte Tektonik flächenhaft widerspiegeln. Zu einem Teil wird diese sicherlich durch die Morphologie der unterfahrenden Platte verursacht (Cocos-Rücken, Anhäufung von Seebergen). Trotz des großen Informationszuwachses durch die 3D-Daten und die verbesserte Auflösung konnten wichtige Fragen bisher nicht vollständig beantwortet werden, da die angewendete 3D-Standard-Datenbearbeitung einschließlich einer 3D-Poststack-Zeitmigration aufgrund der Kompliziertheit der Strukturen an ihre Grenzen stieß.

Durch Anwenden einer 3D-Poststack-Tiefenmigration auf den 3D-Datensatz vor Costa Rica wird die benötigte Auflösung der Detailstrukturen erwartet. Entscheidend für den Erfolg dieser 3D-Poststack-Tiefenmigration ist die Qualität des verwendeten Makrogeschwindigkeitsfeldes. Ein erstes vorläufiges Makrogeschwindigkeitsfeld A hatte schon in der ersten Projektphase gezeigt, daß die dreidimensionale Erfassung der komplexen Struktur im Untergrund eine große Herausforderung darstellt. Die bis dahin durchgeführten 3D-Migrationen zeigten noch viele Unvollkommenheiten und konnten noch keine Grundlage für eine detaillierte Interpretation sein. Der Grund dafür lag in dem sehr ungenauen 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld A und in der vergleichsweise einfachen Methode der 3D-Poststack-Zeitmigration.

Um den Informationsgehalt der 3D-Daten in der zweiten Projektphase optimal auszunutzen, wurde bei Anwendung eines 3D-Prestack-Tiefenmigrationsverfahrens (Two Pass) auf ausgewählte Vertikalschnitte (Inlines) des 3D-Datenblockes ein detaillierteres 3D-Makrogeschwindigkeitsmodell B abgeleitet. Dieses Modell diente dann als Eingang für eine 3D-Poststack-Tiefenmigration, von der die benötigte Auflösung der Detailstrukturen erwartet wurde.

## 3.2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten

Im Abschnitt 3.2.1 wird zunächst der Eingangsdatensatz, der für die Herleitung des genauen und detaillierten Makrogeschwindigkeitsfeldes B verwendet wurde, beschrieben. Die Erstellung eines ersten Makrogeschwindigkeitsfeldes A, welches mathematisch aus Stapelgeschwindigkeiten hergeleitet wurde, ist in der ersten Projektphase durchgeführt worden und kann im Zwischenbericht (1997) nachgelesen werden. Dieses Makrogeschwindigkeitsfeld A ist relativ ungenau, basiert nicht auf geologischen Gegebenheiten und kann für die geforderten Ziele nur bedingt genutzt werden. Die Herleitung des wesentlich genaueren und detaillierten Makrogeschwindigkeitsfeldes B, welches die geologischen Gegebenheiten berücksichtigt, sowie die dabei aufgetretenen Probleme werden in den Abschnitten 3.2.1 - 3.2.3 beschrieben.

### 3.2.1 Inputdaten

Der Ausgangsdatensatz umfaßte ungestapelte Daten auf 154 Inlines. Die Meßanordnung bestand aus 2 Streamern mit jeweils 3000 m Länge und 1 Airgun Array (Abb. 2). Sie war so gewählt, daß die Inlines einen nominellen Abstand von 100 m zueinander haben. Das Aufzeichnungsintervall betrug 4 ms bei einer Aufzeichnungslänge von 13 s.

Das Preprozessing der zur Verfügung stehenden Daten hat die Prakla-Seismos GmbH im Jahr 1993 vorgenommen. Es erfolgte eine Zuordnung der 3D-Daten in Bins mit einer Größe von 25 x 100 m. Für die Geometrieordnung gingen neben den Schußpunkt- und Hydrophonkoordinaten auch die kontrollierten Navigationsdaten ein. In Inline-Richtung wurde eine Spursummutation vorgenommen. Durch die Summation von 2 Spuren im Shotgather reduzierte sich das Datenvolumen von 240 Spuren auf 120 Spuren pro Schuß. Als Folge davon vergrößerte sich der CDP-Abstand auf den Inlines von 12.5 m auf 25 m bei einer CDP-Anzahl von 1300. Der Abstand der 154 Inlines beträgt in Crossline-Richtung 100 m. Weiterhin kam ein Ausgleich der sphärischen Divergenz und eine Vorhersage-Dekonvolution zur Anwendung.

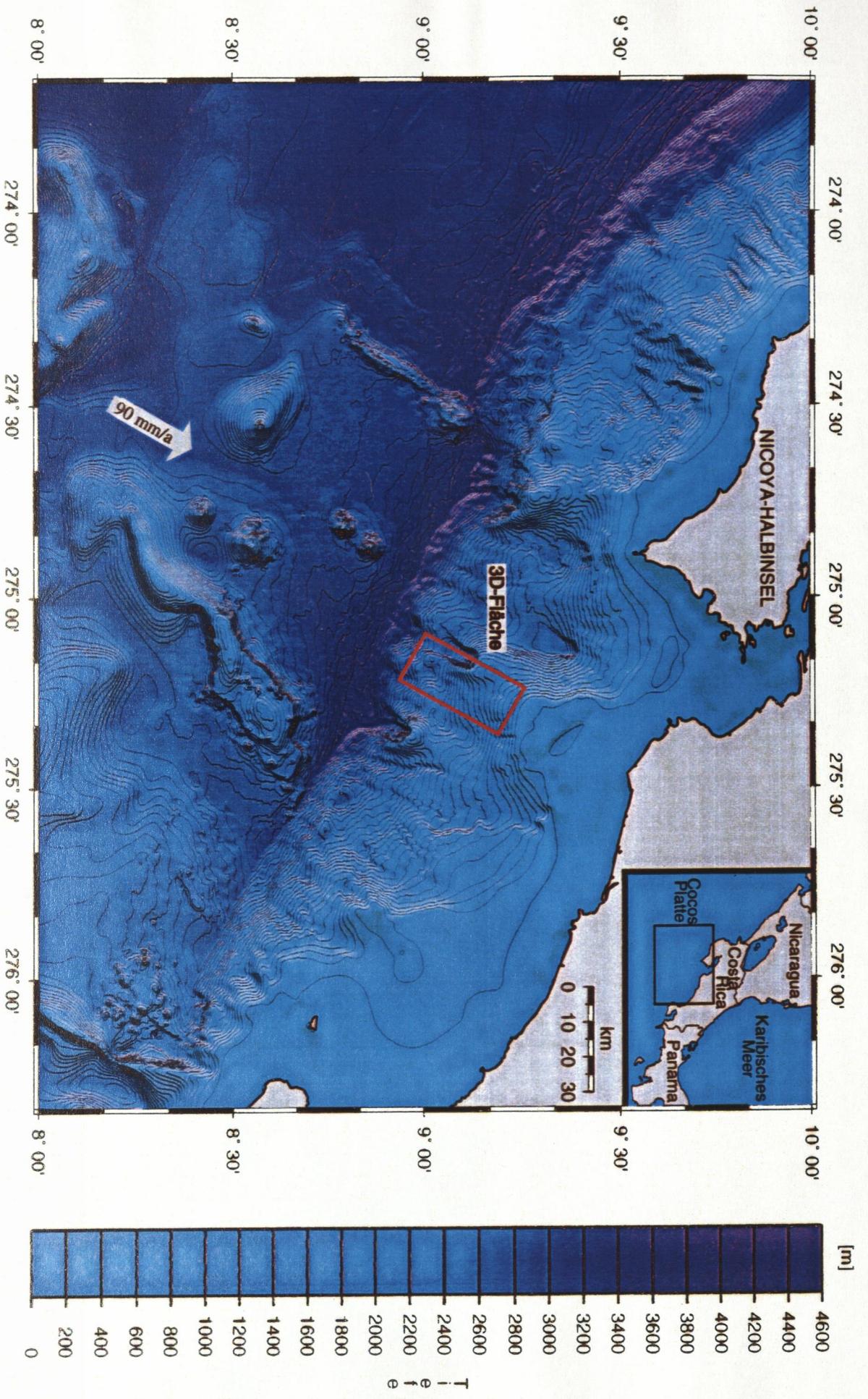
Der bei GEOMAR zur Verfügung stehende 3D-Datensatz zur Ableitung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B war aufgrund des Speicherplatzes und zur besseren Handhabung auf eine Spurlänge von 8 s beschränkt. Dies führte bei einer Abtastrate von 4 ms zu einer Anzahl von 2000 Samples pro Spur. Damit umfaßte der Datensatz dennoch den für die Zielsetzung notwendigen Tiefenbereich. Der Umfang dieses 3D-Prestack-Datensatzes verteilt sich auf 16 Exabyte-Bänder mit einer Gesamtgröße von über 52 Gigabyte.

Im Vergleich zu den Poststack-Daten, die für die abschließende 3D-Poststack-Tiefenmigration verwendet wurden, ist die unterschiedliche Anzahl der Inlines und deren Numerierung für die Prestack-Daten bzw. die Poststack-Daten zu beachten: Die Prestack-Daten haben im Gegensatz zu den Poststack-Daten, die in Crossline-Richtung einen Abstand von 50 m nach Interpolation haben, nur 154 anstatt 309 Inlines mit einem Abstand von 100 m. Die Inline-Numerierung der Prestack-Daten geht deshalb von Inline 115-268, die der Poststack-Daten von Inline 230-538. Dieser Zusammenhang der unterschiedlichen Numerierung der Poststack- bzw. Prestack-Daten wird in Tabelle 1 gezeigt.

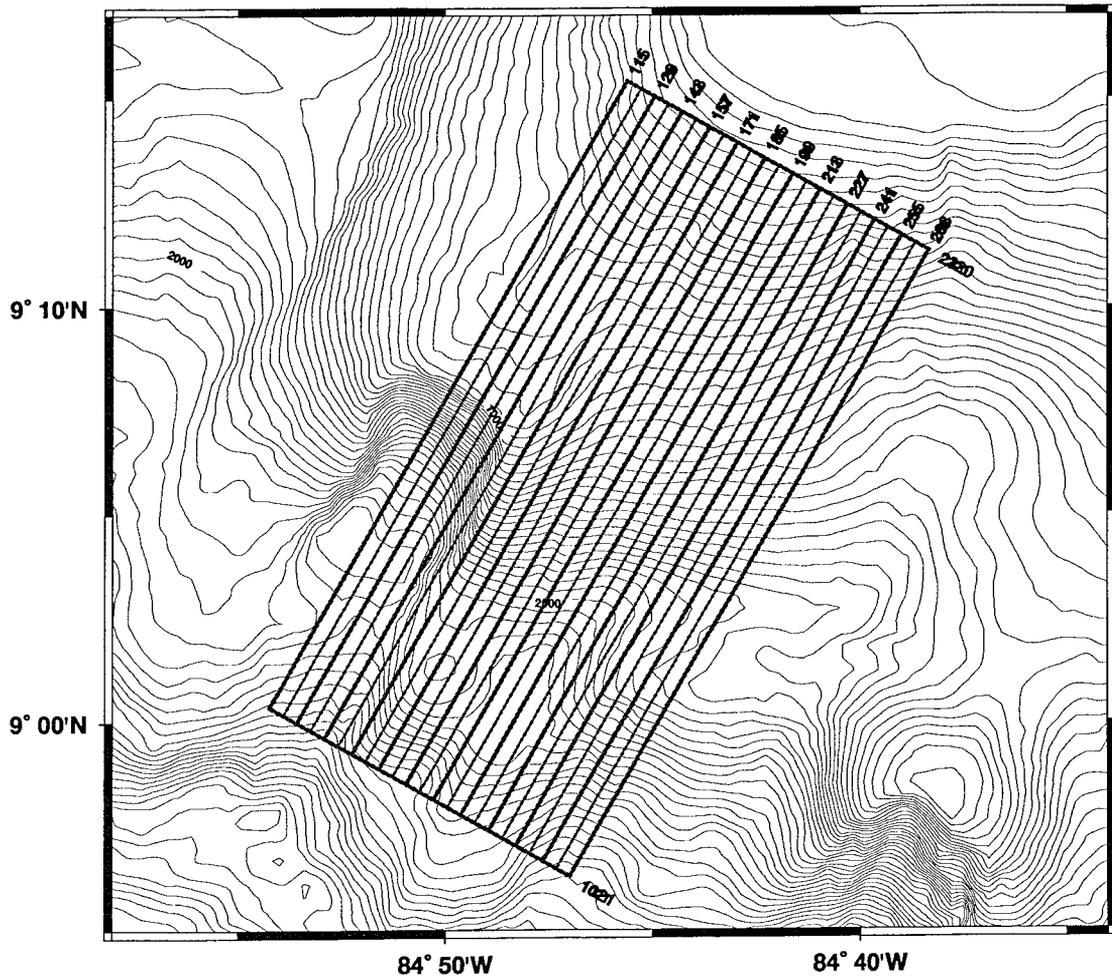
	<i>Poststack-Daten</i>	<i>Prestack-Daten</i>
Inline-Numerierung (minimal-maximal)	230 - 538	115 - 268
Abstand zwischen benachbarten Inlines [m]	50	100
CDP-Numerierung innerhalb einer Inline (minimal - maximal)	1021 - 2320	1021 - 2320

Tabelle 1: Beschreibung der unterschiedlichen Inline-Numerierung von Prestack- und Poststack-Daten.

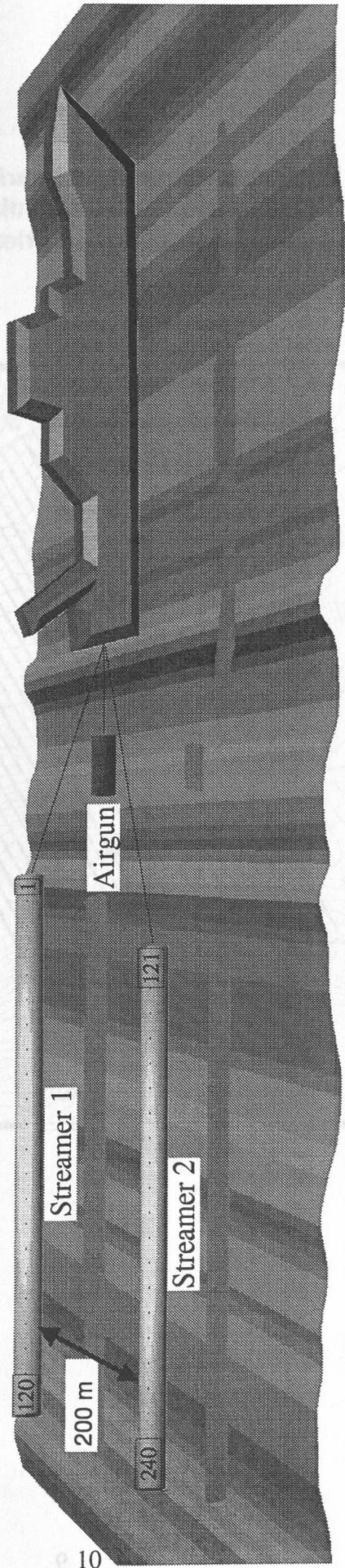
Abb. 1a: Bathymetrische Karte mit dem Gebiet der 3D-reflexionsseismischen Untersuchung



**Abb. 1b : Profildarstellung des bearbeiteten 3D-Meßgebietes. Eingezeichnet sind die Inlines, die im Laufe dieses Projektes crossline-migriert wurden.**



**Abb. 2:** Darstellung der Meßanordnung. Die seismischen Daten wurden nach der Doppelstreamermethode gemessen, d.h. die Meßanordnung bestand aus 2 Streamern und 1 Airgun Array. Für jede "Sail-Line" ergaben sich mit dieser Kombination jeweils 2 Untergrundlinien (CMP-Lines) mit einem Abstand von 100 m.

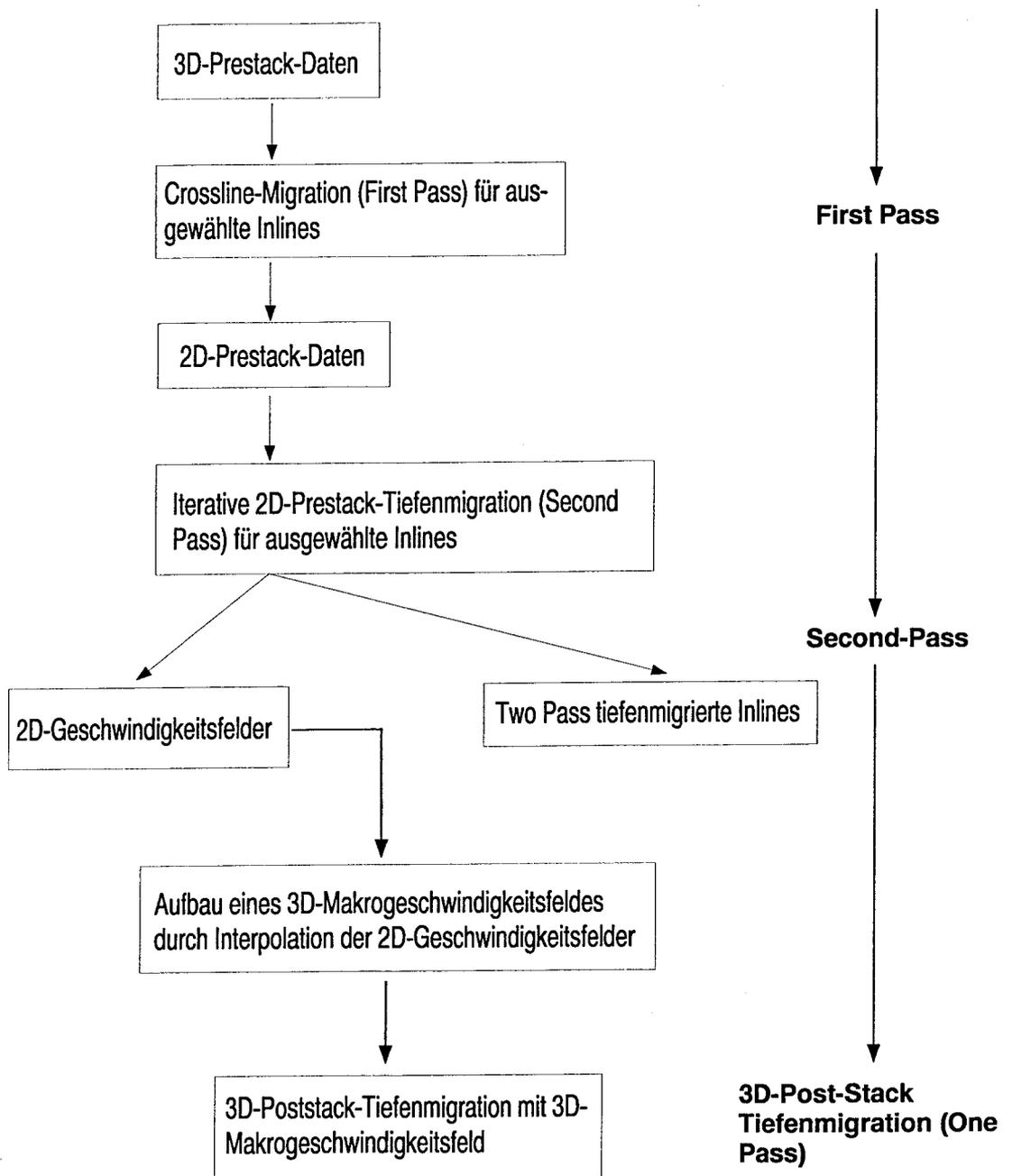


### 3.2.2 Aufbau des Makrogeschwindigkeitsfeldes B für die 3D-Poststack-Tiefenmigration

Im Gegensatz zum groben 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld A, bei dem als Eingabedaten Stapelgeschwindigkeiten zugrunde gelegt wurden (siehe Zwischenbericht, 1997), wurde das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B aus Prestack-Daten mit Hilfe einer 3D-Prestack-Tiefenmigration (Two Pass) und einer Fokussierungsanalyse abgeleitet. Dabei basiert das Makrogeschwindigkeitsfeld B im Gegensatz zum Makrogeschwindigkeitsfeld A weniger auf einfachen mathematischen Annahmen, als vielmehr auf einer geologischen Interpretation und ist von Einflüssen frei, die durch 3D-Seiteneffekte hervorgerufen werden.

Für die Erzeugung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B stand uns das Softwarepaket Sirius 3D der Firma GXT, Houston (USA) zur Verfügung. Das Sirius 3D-Programm ist im Wesentlichen ein Two Pass Verfahren.

Zunächst wird im 1. Schritt (First Pass oder Crossline-Migration) auf alle 3D-seismischen Prestack-Daten in Crossline-Richtung eine partielle Zeitmigration für einige vorher ausgewählte Inlines durchgeführt. Nach der Crossline-Migration liegen in Inline-Richtung 2D-Prestack-Daten vor, die frei von 3D-Seiteneffekten sind (Abb. 3, oberer Teil). Im 2. Schritt (Second Pass) werden diese 2D-Prestack-Daten in Inline-Richtung nach CMP-Punkten und Offsets sortiert und wie normale 2D-Prestack-Daten behandelt. Es wird dann eine iterative 2D-Prestack-Tiefenmigrationsanalyse mit einer 2D-Fokussierungsanalyse auf diese Daten angewandt, so daß am Ende mehrere parallele 2D-Tiefen-Sektionen in Inline-Richtung mit den zugehörigen 2D-Makrogeschwindigkeitsfeldern vorliegen (Abb. 3 mittlerer Teil). Diese Sektionen stellen jeweils einen vertikalen Schnitt durch das 3D-tiefenmigrierte Datenvolumen und durch das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B dar. Zum Verdichten der 2D-Geschwindigkeitsfelder aus den vorher ausgewählten Inlines und zum Aufbau des gesamten 3D-Makrofeldes wird dann zwischen diesen 2D-Geschwindigkeitsfeldern mit Hilfe des *Sirius 3D-Modelbuilder* interpoliert. Mit einer abschließenden 3D-Geschwindigkeitsglättung wird dann das auf geologisch interpretierter Basis beruhende Makrogeschwindigkeitsfeld B für die 3D-Poststack-Tiefenmigration erzeugt (Abb. 3 unterer Teil).



**Abb. 3:** Herleitung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes B zur Durchführung einer 3D-Poststack-Tiefenmigration. Im ersten Schritt (First Pass) werden aus den 3D-Prestack-Daten durch die Crossline-Migration die 3D-Seiteneffekte eliminiert. Im 2. Schritt (Second Pass) werden die 2D-Prestack Daten einer iterativen 2D-Prestack-Tiefenmigrationsanalyse unterzogen. Das Ergebnis sind 2D-Tiefensektionen mit den zugehörigen 2D-Geschwindigkeitsfeldern, die jeweils einen vertikalen Schnitt durch das 3D-Datenvolumen bzw. 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld darstellen. Durch Interpolation zwischen den 2D-Geschwindigkeitsfeldern entsteht das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B mit dem die 3D-Poststack-Daten tiefenmigriert werden.

### 3.2.2.1 Die Sirius 3D-Crossline-Migration

Im folgenden wird kurz das Prinzip der Crossline-Migration, die in der Sirius 3D-Software verwendet wird, dargestellt. Außerdem werden die wichtigsten Parameter zur Durchführung der Crossline-Migration diskutiert und beschrieben.

Als Eingangsdaten für die Crossline-Migration dient der gesamte 3D-Prestack-Datensatz. Jede 3D-Prestack-Inputspur wird dabei mit einem Kirchhoff-Zeitmigrationsverfahren crossline-migriert. Neben dem 3D-Datensatz benötigt das hier verwendete Verfahren ein 3D-RMS-Geschwindigkeitsfeld als Input. Der Migrationsalgorithmus berücksichtigt dabei sowohl vertikale als auch laterale Geschwindigkeitsvariationen des RMS-Feldes. Das 3D-RMS-Feld stand uns noch aus der ersten Projektphase zur Verfügung.

*Das Prinzip des Migrationsverfahrens kann wie folgt beschrieben werden:*

Gegeben ist im 3D-Fall ein Schuß-Empfänger-Paar und ein gemessenes Sample zum Zeitpunkt  $t$ .  $S$  ist der Schußpunkt,  $R$  der Empfängerpunkt und  $M$  der CMP-Punkt (Abb. 4). Die geologische Struktur, die diesem gemessenen Wert entspricht, ist durch ein Ellipsoid mit  $S$  und  $R$  als Brennpunkte gegeben. Ein vertikaler Schnitt durch dieses Ellipsoid parallel zur Verbindungslinie  $S$  und  $R$  ist durch eine Ellipse mit den neuen Brennpunkten  $S'$  und  $R'$  gegeben. Der Abstand  $S'-R'$ , der neue CMP-Mittelpunkt  $M'$  und die neue Zeit  $t'$  für das gemessene und jetzt crossline-migrierte Sample werden nun berechnet (Abb. 4). Die Koordinaten  $S'$ ,  $R'$  und die migrierte Zeit  $t'$  werden dabei für jedes Inputsample  $t$  der jeweiligen Inputspur berechnet und zwar für jede vorher ausgewählte Inline. Bei diesem Verfahren werden die crossline-migrierten 2D-Prestack-Daten entsprechend ihrem Offset in Common Reflection Point (CRP)-Gather sortiert und können anschließend für 2D-Geschwindigkeitsanalysen und 2D-Tiefenmigrationen benutzt werden.

Im Sirius-Crossline-Migrationsmodul kann der Benutzer einige wenige Parameter einstellen. Da diese im nächsten Kapitel u.a. für Testzwecke zur Durchführung einer möglichst optimalen Crossline-Migration ihre Anwendung finden, sollen sie hier kurz in ihrer Funktion beschrieben werden:

#### Pre-Prozessing-Parameter:

Hier können die Inputdaten u.a. mit einem Frequenzfilter (z.B. Bandpass) vorprozessiert werden.

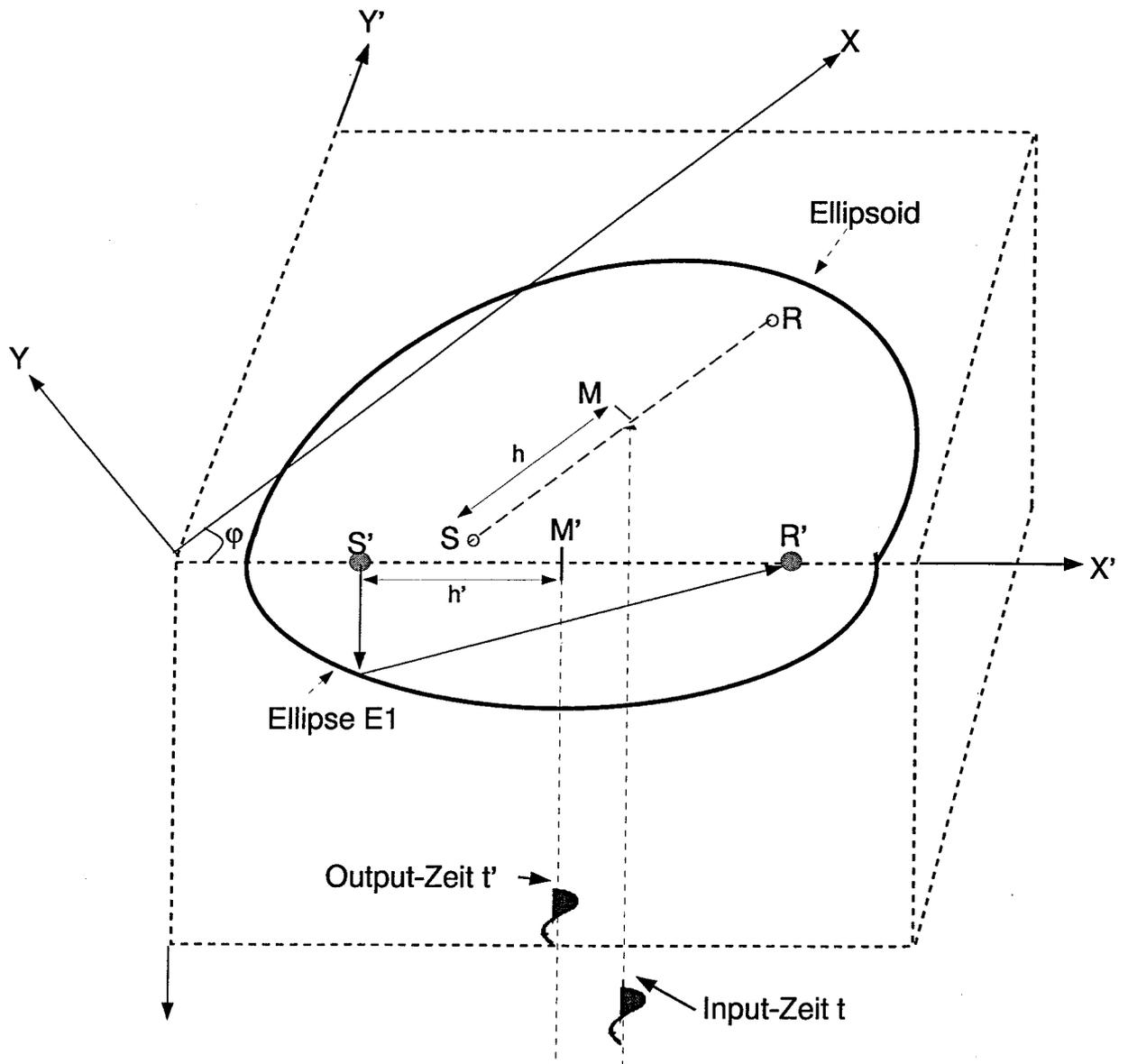
#### Inline-Imaging-Parameter:

Hier wird der CDP-Bereich und der CDP-Abstand der crossline-migrierten Daten in Inline-Richtung und das Output-Offset-Binning (nach der Crossline-Migration) mit kleinstem, größtem Offset und dem Inkrement zwischen benachbarten Spuren für jedes CRP-Gather eingestellt. Die Spurlänge der Outputdaten und das zeitliche Samplingintervall werden hier außerdem festgelegt. Das zeitliche Outputsamplingintervall darf dabei größer sein als das Inputsamplingintervall. Dies ist wichtig, um eventuell bei der Crossline-Migration die Rechenzeit zu reduzieren.

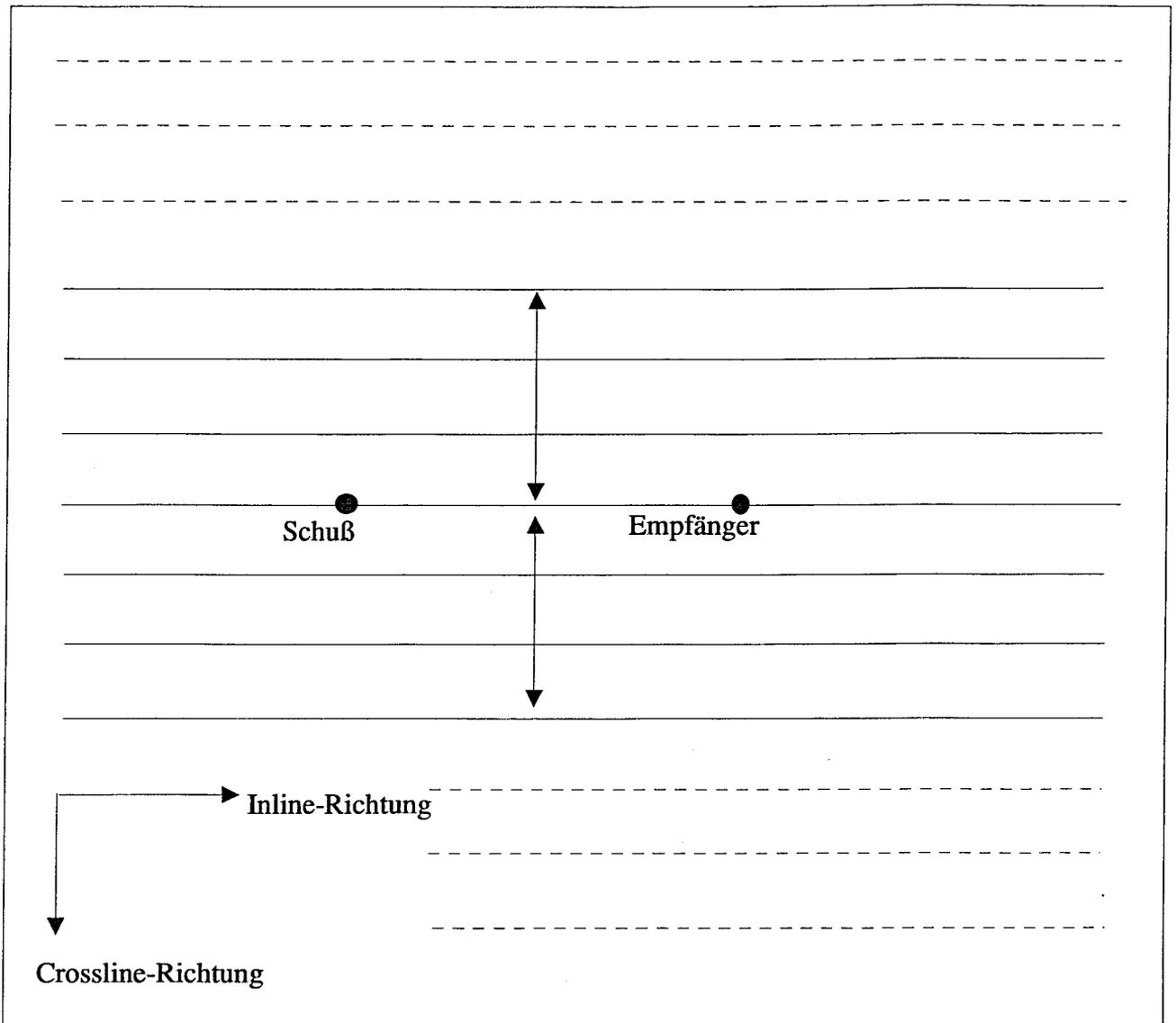
#### Migrations-Parameter:

Wichtig ist hier die Einstellung für die Migrationsapertur, welche den Einfluß des Migrationsoperators in Crossline-Richtung festlegt (Abb. 5). Innerhalb dieses Apertur-Bereiches wird die zum Schuß ( $S$ ) und Empfänger ( $R$ ) gehörende Inputspur für vorher ausgewählte Inlines crossline-migriert. Mit dem einstellbaren Migrationswinkel wird der maximale Migrationswinkel für den Crossline-Migrationsoperator festgelegt.

Abb. 4 : Prinzipbild der verwendeten 3D-Prestack-Migration (Two-Pass) nach Devaux und Gardner, 1996. Eine gemessene 3D-Amplitude mit der Zeit  $t$  wird in eine 2D-Amplitude mit der Zeit  $t'$  transformiert. Die Zeit  $t'$  liegt entlang einer 2D-Ellipse, die einem vertikalen Schnitt entlang der ausgewählten Inline durch das 3D-Ellipsoid entspricht.



- $x, y$  - rechtwinkliges Koordinatensystem
- $x', y'$  - um den Winkel  $\varphi$  gedrehtes rechtwinkliges Koordinatensystem
- $S, R$  - Schuss- und Empfängerposition (parallel zur  $x$ -Achse)
- $M$  - Mittelpunkt von  $S$  und  $R$
- $h$  - halber Abstand  $SR$
- $t$  - gemessene Laufzeit von  $S$  nach  $R$
- $S', R'$  - neue Schuss- und Empfängerposition entlang der Ellipse  $E1$  (entlang der  $x'$ -Achse = 2D-Inline-Richtung)
- $M'$  - Mittelpunkt von  $S'$  und  $R'$
- $h'$  - halber Abstand  $S'R'$
- $t'$  - Laufzeit von  $S'$  nach  $R'$



**Abb. 5:** Größe des Migrationsoperators für ein Schuß-Empfänger Paar. Die beiden Pfeile kennzeichnen den maximalen Bereich, in dem der Migrationsoperator wirken kann.

### 3.2.2.2 Anwendung der Crossline-Migration (First Pass)

Als Inputdaten für die Crossline Migration dienten die 3D-Prestack-Daten, wie diese in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wurden. Zunächst wird das für die Crossline-Migration verwendete RMS-Modell (Abschnitt: a) beschrieben, bevor dann die Einstellung und Festlegung der verschiedenen Parameter, die für die Crossline-Migration wichtig sind, diskutiert werden. Wir führten dazu verschiedene Versuche mit dem Crossline-Migrationsmodul des Sirius 3D-Programmes durch, bis die geeignetsten Parameter feststanden (Abschnitt: b). Bei diesen Untersuchungen trat ein Aliasing-Problem auf, welches hauptsächlich durch einen zu großen Abstand der Inputdaten in Crossline-Richtung bedingt war. Nach der Untersuchung und Bestimmung aller relevanten Parameter konnten wir den Einfluß des Aliasing weitgehend unterdrücken. Die Meeresbodenmultiple, die in den Prestack-Daten vorhanden ist, stellte uns vor ein weiteres Problem (Abschnitt: c), das wir jedoch effizient lösen konnten (Abschnitt: e). Die Durchführung der Crossline-Migration auf den gesamten 3D-Prestack-Datensatz für 12 ausgewählte Inlines verlief dann schließlich, nach Klärung der oben genannten Probleme, weitgehend reibungslos und ergab gute Ergebnisse (Abschnitt: d).

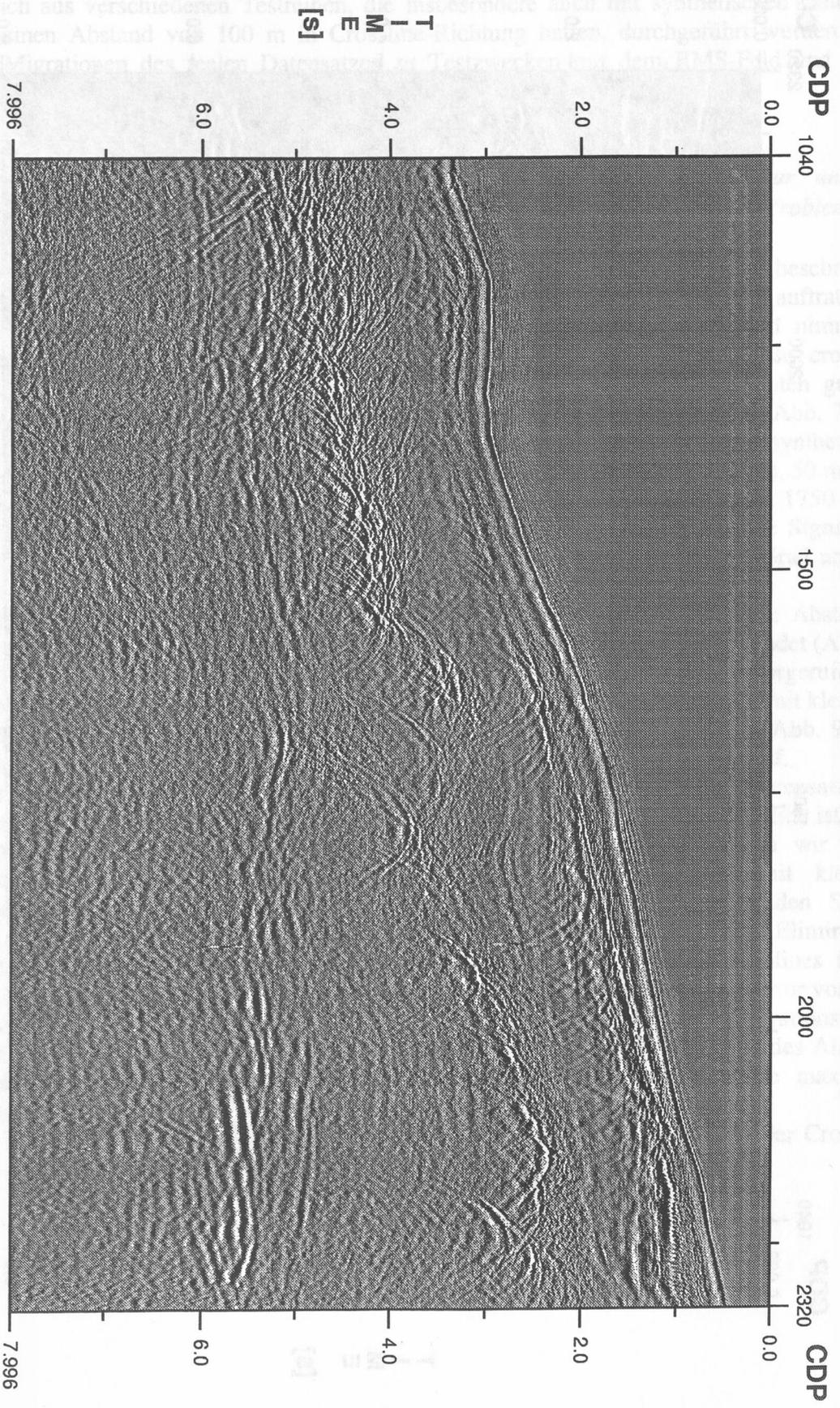
#### a) Das RMS-Modell

Bei der Crossline-Migration (First Pass) wird auf die 3D-Prestack Inputdaten in Crossline-Richtung eine partielle Zeit-Migration angewandt. Anschließend liegen in der dazu senkrechten Richtung (Inline-Richtung) nur noch 2D-Daten, sortiert nach CRP-Gathern, vor, die wie normale 2D-Prestack-Daten behandelt werden können. Zur Durchführung dieser Zeitmigration (Crossline-Migration) benötigt man ein 3D-RMS-Geschwindigkeitsmodell. Ein solches 3D-RMS-Modell stand uns noch aus der ersten Projektphase zur Verfügung und basiert auf einer Stapelgeschwindigkeitsanalyse, die sowohl in Inline- als auch in Crossline-Richtung alle 500 m durchgeführt wurde (Geco-Prakla, 1993). Beim Importieren dieses 3D-RMS-Feldes interpoliert das Sirius 3D-Programm die fehlenden CDPs in Crossline- und Inline-Richtung automatisch entsprechend den Dimensionierungen des 3D-Prestack-Datensatzes (siehe Tabelle 1), so daß für sämtliche CDPx- bzw. CDPy-Positionen RMS-Geschwindigkeiten vorhanden waren.

#### b) Bestimmung der Migrationsparameter und das Aliasing-Problem

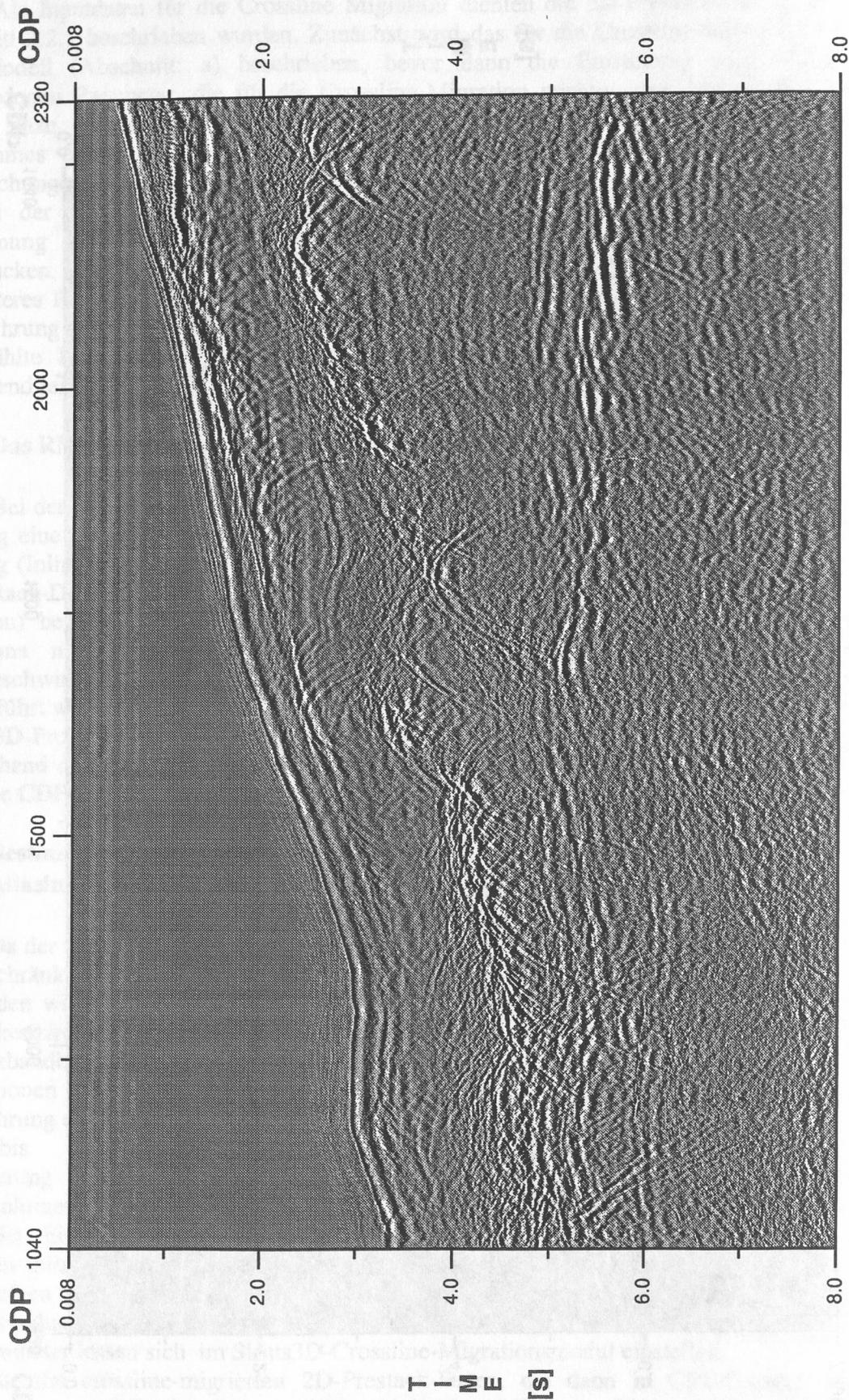
Da der uns zur Verfügung stehende Arbeitsspeicher für die Crossline-Migration auf ca. 650 MB beschränkt war, und da die Daten zusätzlich mit einem 60 Hz Störsignal überlagert waren, entschieden wir uns, für die Crossline-Migration nur Frequenzen bis 60 Hz zu berücksichtigen. Diese Grenzfrequenz ermöglicht uns, wie experimentell festgestellt wurde, eine ausreichende Frequenzbandbreite zur Ableitung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B, ohne daß dabei wichtige Informationen herausgefiltert wurden. Wir setzten daher einen Bandpassfilter vor der Durchführung der Crossline-Migration (siehe Abschnitt 3.2.2.1) mit einem Durchgangsbereich von 3/5 Hz bis 40/60 Hz ein. Für die Daten bedeutet eine Nyquistfrequenz von 62.5 Hz eine Vergrößerung des Samplingintervall von 4 ms auf 8 ms. Dadurch verringerte sich das Gesamtvolumen des Inputdatensatzes für den Prozeß der Crossline-Migration von ca. 52 GB auf ca. 26 GB. Ein Vergleich zwischen der Stapelung mit RMS-Geschwindigkeiten der crossline-migrierten Inline 199 mit 4 ms Samplingintervall und damit einer Nyquist-Frequenz von 125 Hz und derselben Stapelung der crossline-migrierten Inline 199 mit 8 ms Samplingintervall bzw. einer Nyquist-Frequenz von 62.5 Hz zeigte keine wesentlichen Veränderungen (Abb. 6a und 6b). Alle diese Parameter lassen sich im Sirius3D-Crossline-Migrationsmodul einstellen.

Für die crossline-migrierten 2D-Prestack-Daten, die dann in CRP-Gathern vorliegen, wählten wir einen Offsetbereich mit einem minimalen Offset von 200 m aufsteigend mit einem Inkrement von 150 m bis zum maximalen Offset von 3200 m. Damit ergab sich für jedes CRP-



**Abb. 6a : Stapelsektion (mit RMS-Geschwindigkeiten) der crossline-migrierten Inline 199 mit 4 ms Samplingintervall**

**Abb. 6b : Stapelsektion (mit RMS-Geschwindigkeiten) der crossline-migrierten Inline  
199 mit 8 ms Samplingintervall**



Gather nach der Crossline-Migration eine Spuranzahl von 21.

Für die Migrationsapertur (siehe unten) wählten wir schließlich eine Größe von 6400 m, für den Migrationswinkel legten wir einen maximalen Winkel von 30 Grad fest. Diese Parameter ergaben sich aus verschiedenen Testreihen, die insbesondere auch mit synthetischen Daten, die ebenfalls einen Abstand von 100 m in Crossline-Richtung hatten, durchgeführt wurden. Erste Crossline-Migrationen des realen Datensatzes zu Testzwecken mit dem RMS-Feld und diesen Parameter-Einstellungen zeigten gute Ergebnisse für die ausgewählte Test-Inlines.

#### *Durchführung der Testreihen zur Festlegung der benötigten Migrationsapertur und des Migrationswinkels bei der Crossline-Migration unter Berücksichtigung des Aliasing-Problems:*

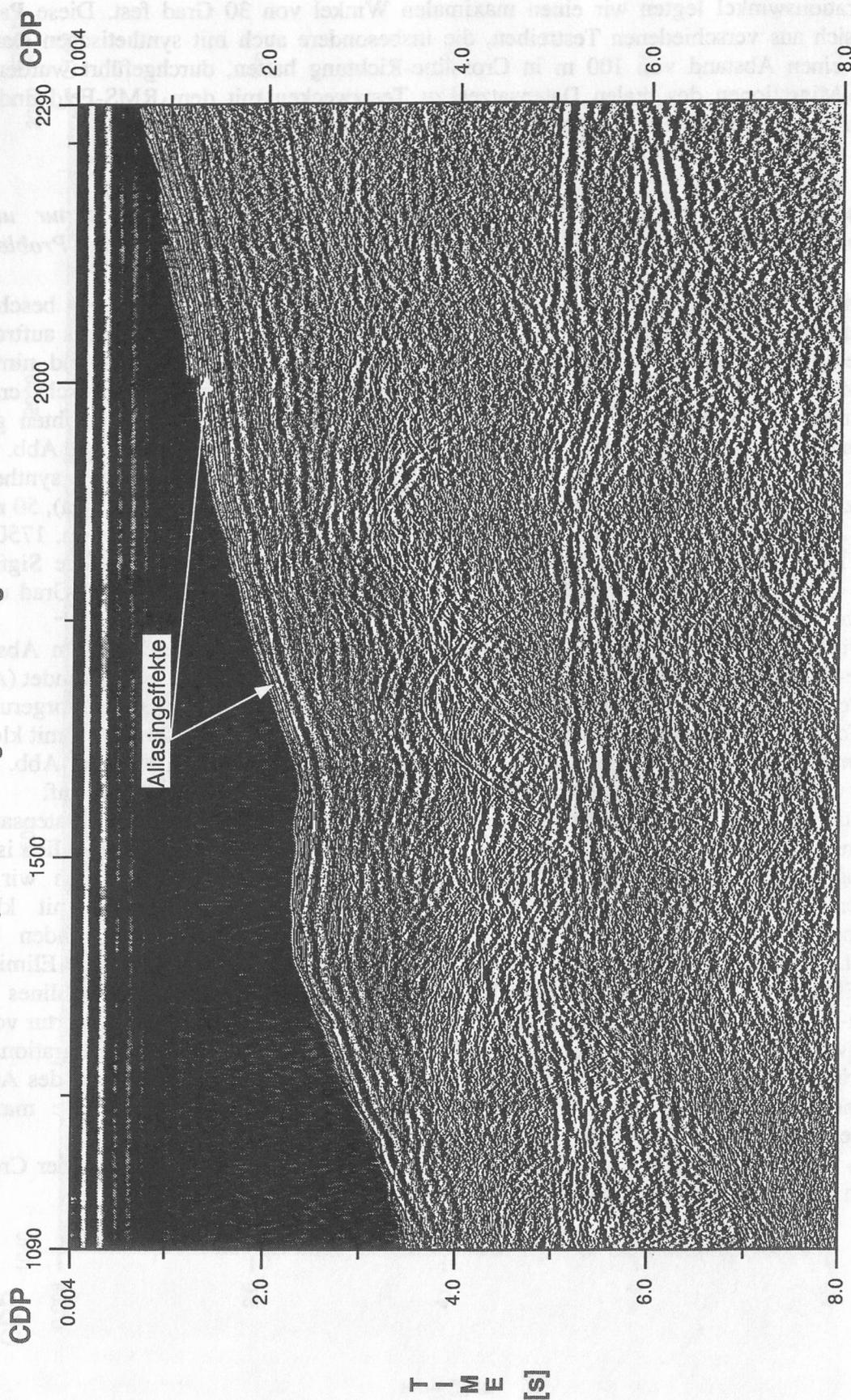
Die crossline-migrierten Sektionen zeigten zunächst bei weniger stark beschränkten Parametern ein Streifenmuster, welches hauptsächlich im Bereich des Meeresbodens auftrat (Abb. 7). Dieses Muster tritt am stärksten im Bereich geringerer Wassertiefen auf und nimmt mit zunehmender Wassertiefe ab. Die Sedimenteinheiten sind im Vergleich zur nicht crossline-migrierten Sektion (Abb. 8) noch leicht gestört. In den darunterliegenden Schichten größerer Geschwindigkeit ist eine qualitative Beeinträchtigung nicht mehr festzustellen (vgl. Abb. 7 u. 8). Um den Einfluß dieses Effektes näher zu untersuchen, wurden mit Hilfe von synthetischen Datensätzen Auslagegeometrien erzeugt, die Crossline-Abstände von 100 m (Abb. 9a), 50 m (Abb. 9b), und 25 m (Abb. 9c) hatten. Die Modelle hatten jeweils 3 Reflektoren in 700 m, 1750 m und 2800 m Tiefe (Abb. 9). Die Geschwindigkeit war konstant mit 1500 m/s und die Signallänge betrug  $T=0.04$  s. Für die Crossline-Migration wurde ein Migrationswinkel von 45 Grad und eine Apertur von 3000 m gewählt.

Die Testreihen machen deutlich, daß das Aliasing-Problem bei geringerem Abstand in Crossline-Richtung abnimmt (50 m) und bei einem Abstand von 25 m ganz verschwindet (Abb. 9a, 9b und 9c). Das Streifenmuster wird also durch den großen Crossline-Abstand hervorgerufen und ist eine Folge des räumlichen Aliasing. Weitere Untersuchungen zeigten, daß einmal mit kleinerem Migrationswinkel (30 Grad, Abb. 9d) und einmal mit geringerer Apertur (500 m, Abb. 9e) das Ergebnis verbessert wird. Das Muster wird dabei abgeschwächt, tritt aber weiterhin auf.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde für die Crossline-Migration des 3D-Datensatzes ein Migrationswinkel von 30 Grad gewählt. Da es in dieser Programmversion nicht möglich ist, einen zeitabhängigen Migrationswinkel für die Crossline-Migration festzulegen, haben wir diesen konstanten Wert gewählt. Damit werden in Bereichen geringerer Tiefe mit kleineren Geschwindigkeiten weniger Inlines berücksichtigt und das Ausmaß der störenden Streifen verringert. In größeren Tiefenlagen, in denen für die Zielsetzung des Projektes die Eliminierung der 3D-Effekte besonders wichtig ist, steht dagegen eine größere Anzahl von Inlines für die Crossline-Migration zur Verfügung. Mit zunehmenden Tiefen wird die gewählte Apertur von 6400 m effektiver und wird nicht mehr, wie für die geringeren Tiefen, durch den Migrationswinkel eingeschränkt (Abb. 10). Für große Tiefen ist entsprechend der Theorie der Effekt des Aliasings immer mehr zu vernachlässigen, da die Geschwindigkeiten zunehmen und die maximalen Frequenzen in den Daten abnehmen.

In Tabelle 2 sind die soeben festgelegten Parameter für die Durchführung der Crossline-Migration zusammenfassend dargestellt.

Abb. 7 : Stapelsektion ( $V_{\text{stack}} = \text{RMS-Geschwindigkeiten}$ ) der crossline-migrierten Inline  
257 mit starkem, prozeßbedingtem Aliasing



T I M E [s]

Abb. 8 : Stapelung ( $V_{\text{stack}} = \text{RMS-Geschwindigkeiten}$ ) der nicht crossline-migrierten  
Inline 257

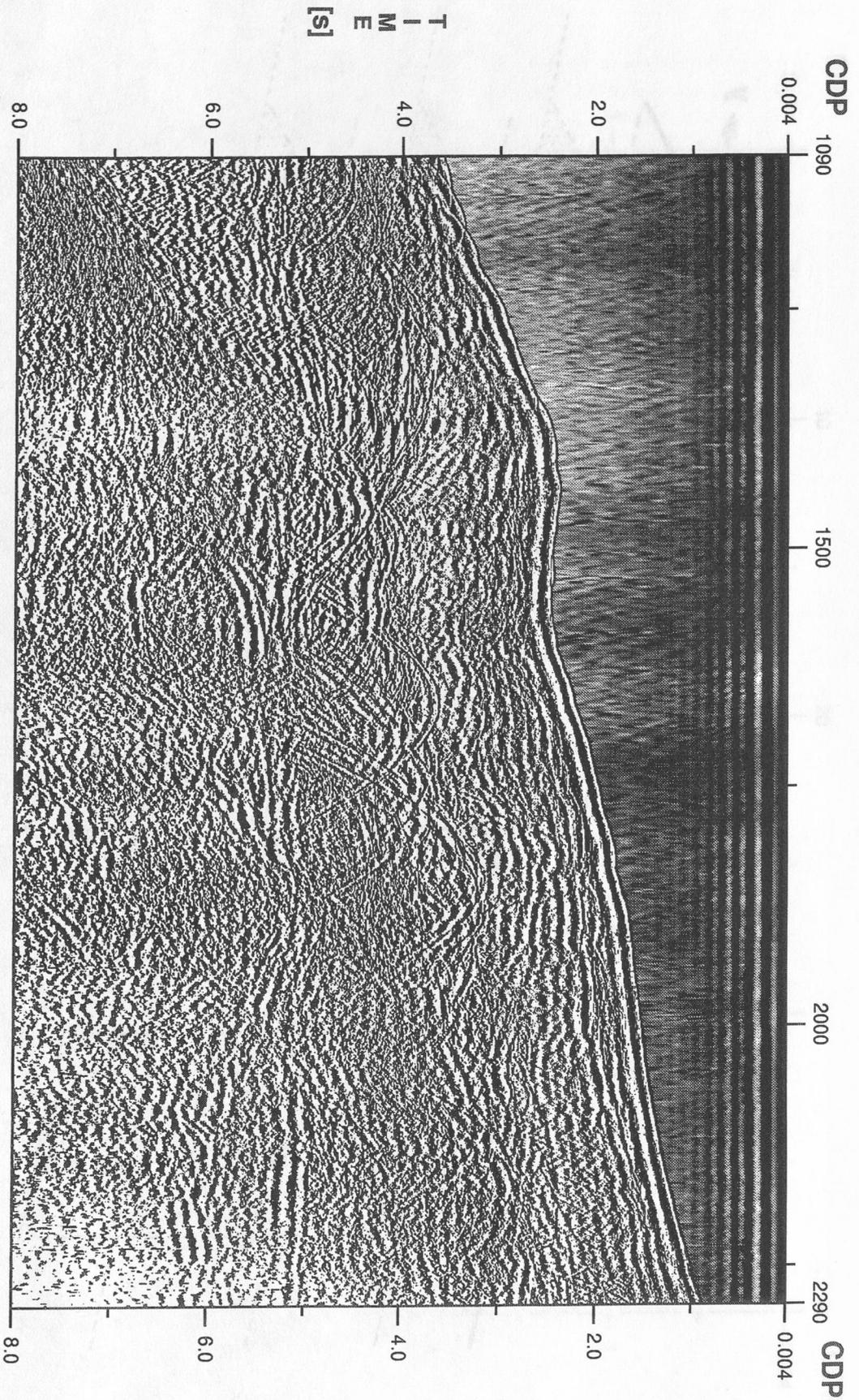
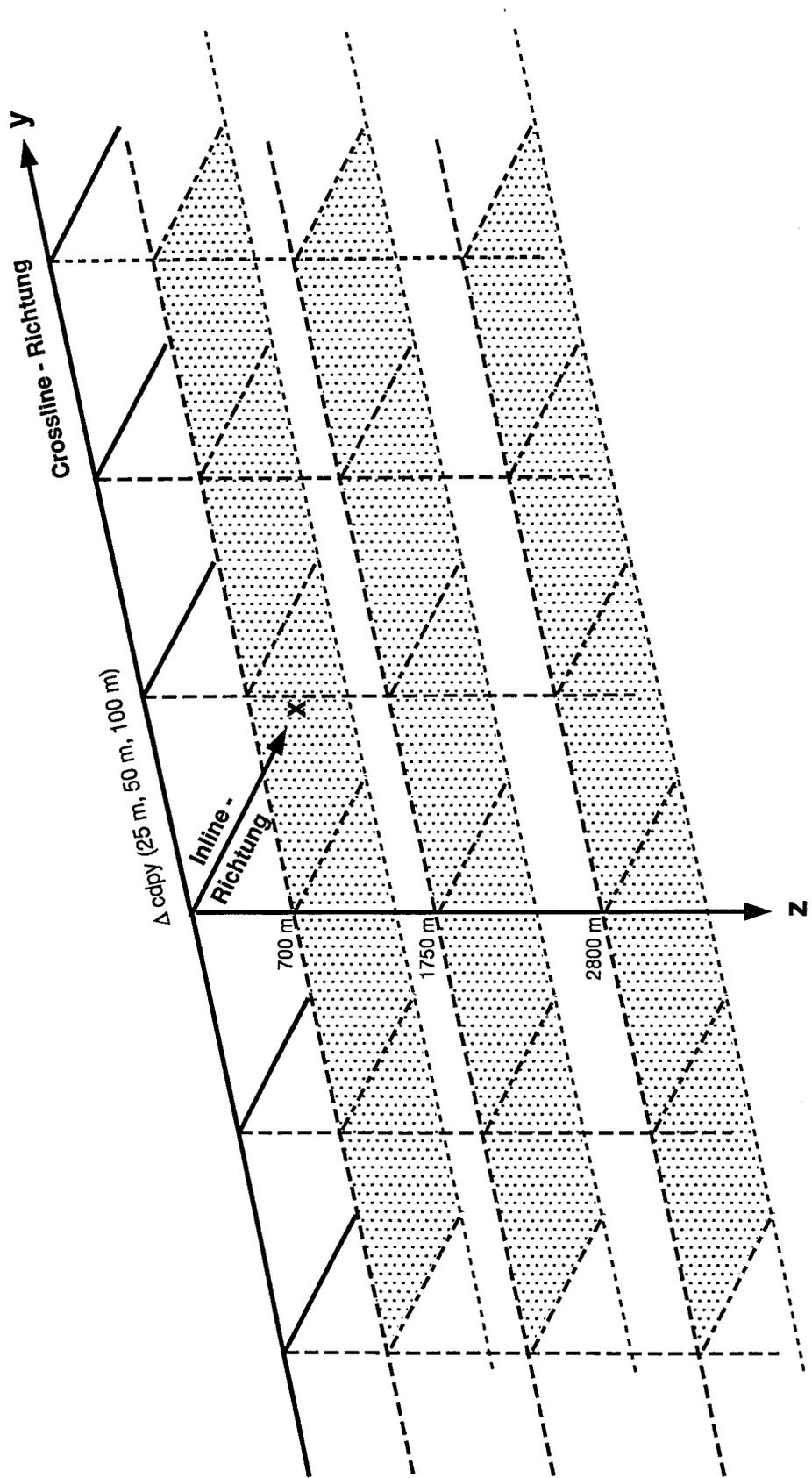


Abb. 9: Prinzipskizze des synthetischen Modells mit Reflektoren in 700 m, 1750 m und 2800 m Tiefe



**Abb. 9a : Stapelung der synthetischen Daten nach Anwendung einer Crossline-Migration mit Inline-Abständen von 100 m, Migrationswinkel = 45°, Migrationsapertur = 3000 m**

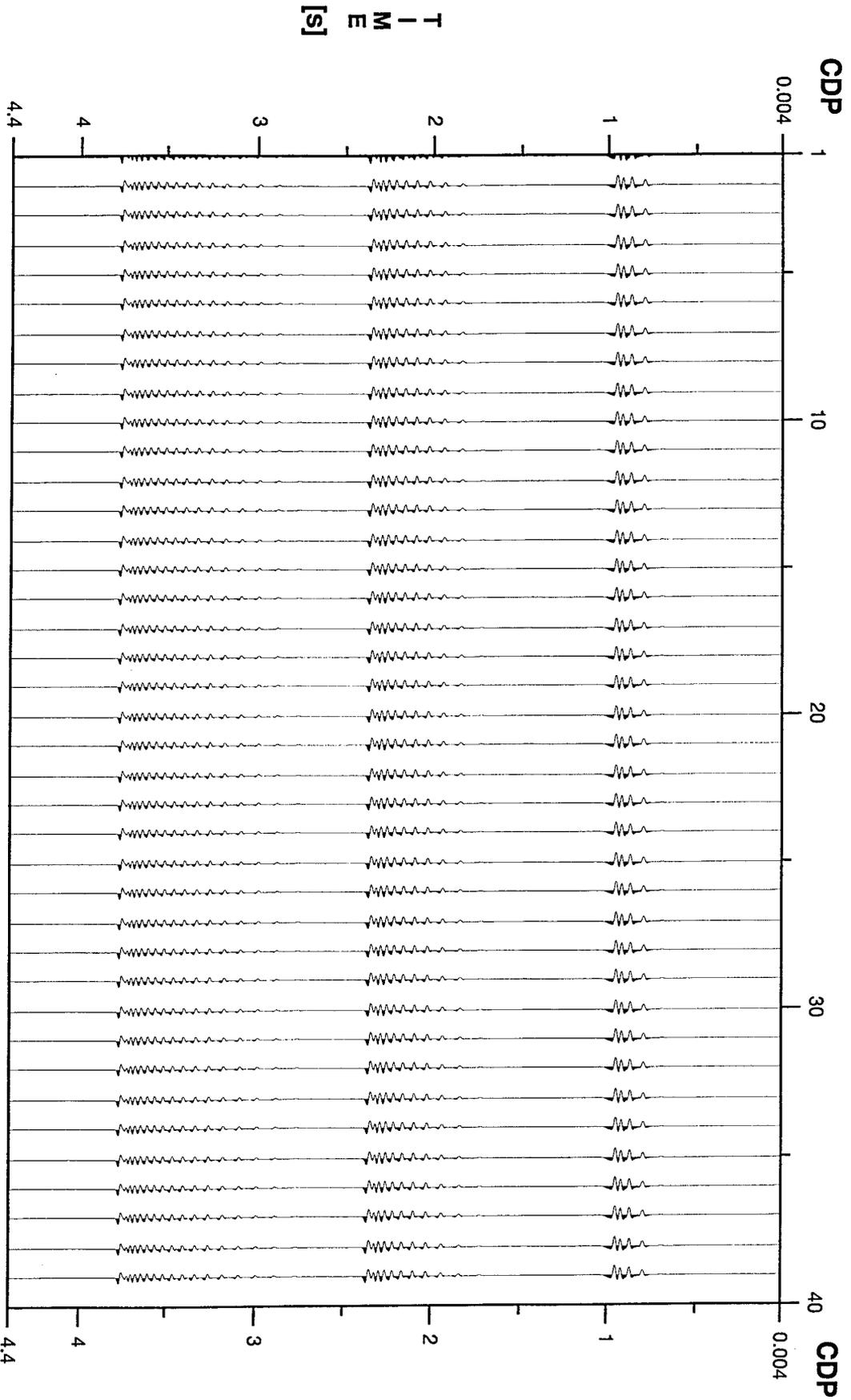
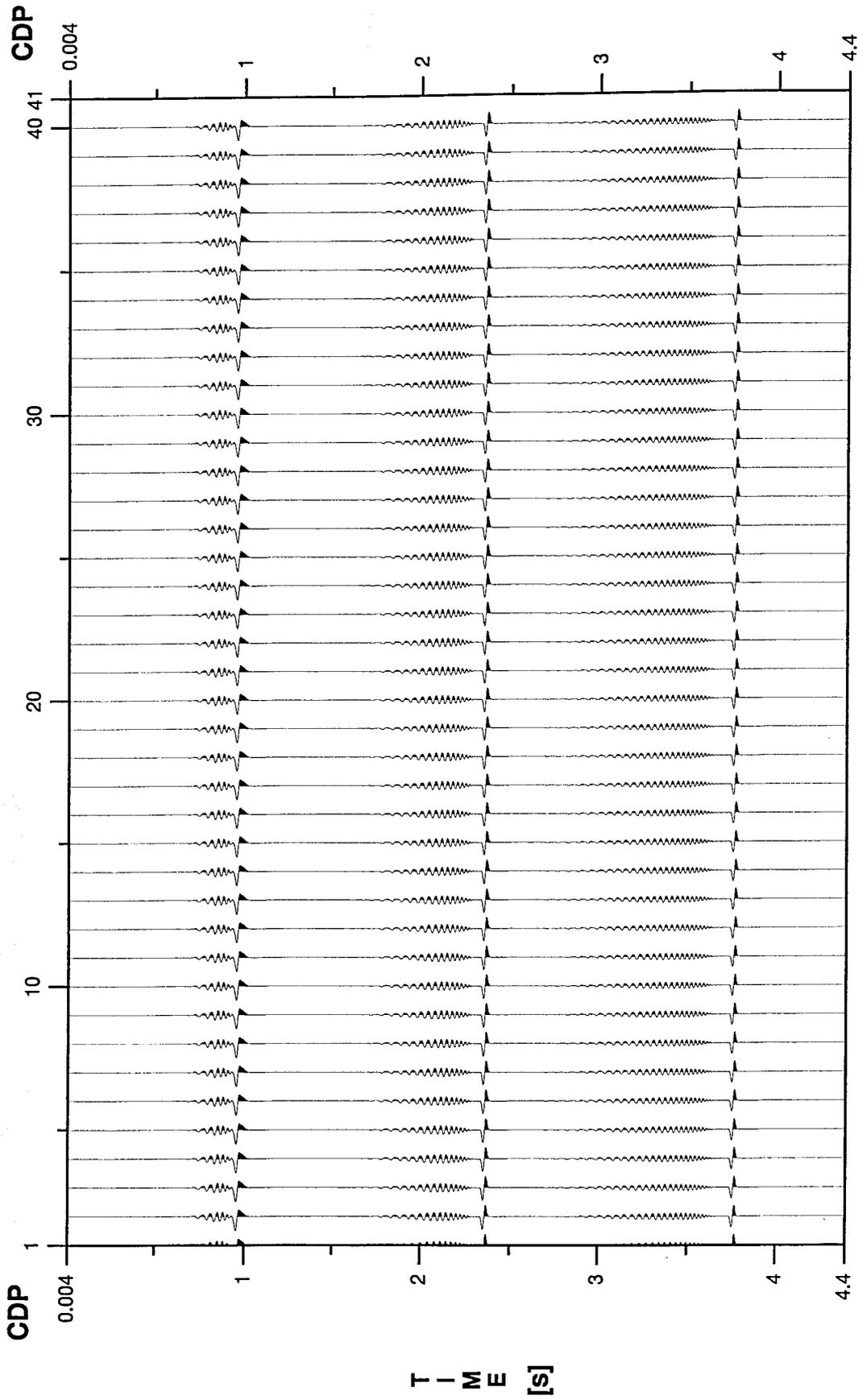


Abb. 9b : Stapelung der synthetischen Daten nach Anwendung einer Crossline-Migration mit Inline-Abständen von 50 m, Migrationswinkel = 45°, Migrationsapertur = 3000 m



**Abb. 9c : Stapelung der synthetischen Daten nach Anwendung einer Crossline-Migration mit Inline-Abständen von 25 m, Migrationswinkel = 45°, Migrationsapertur = 3000 m**

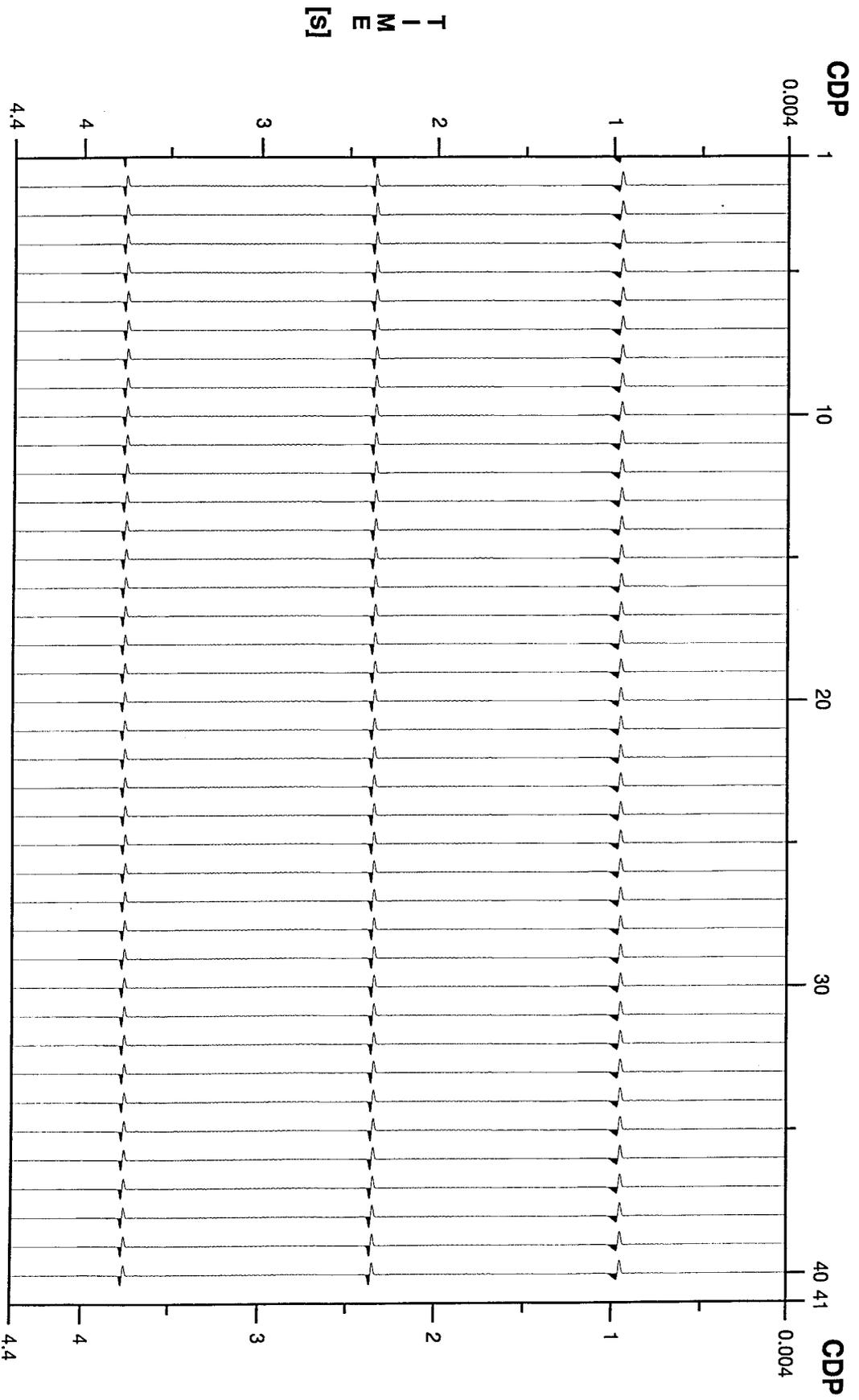
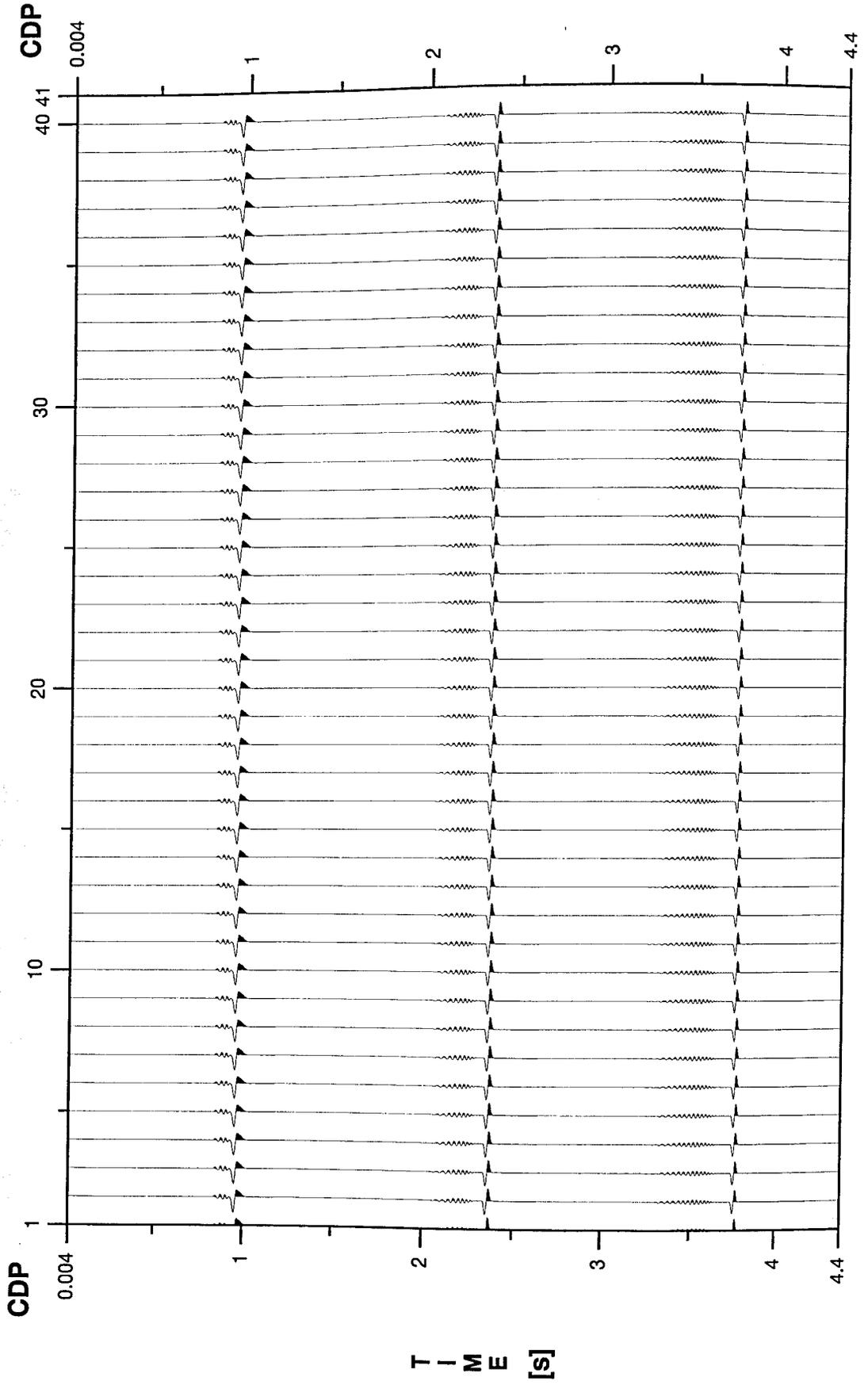
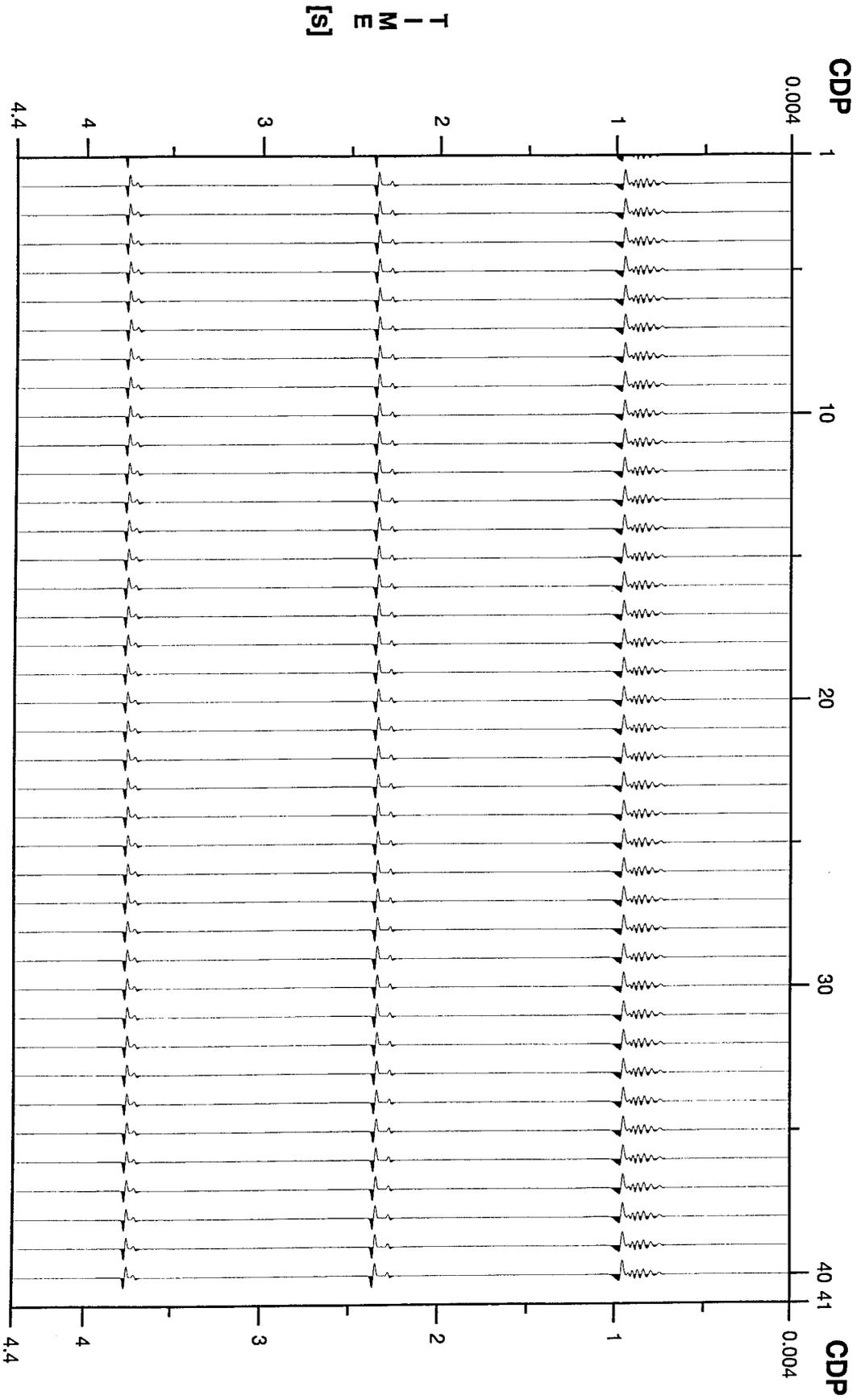
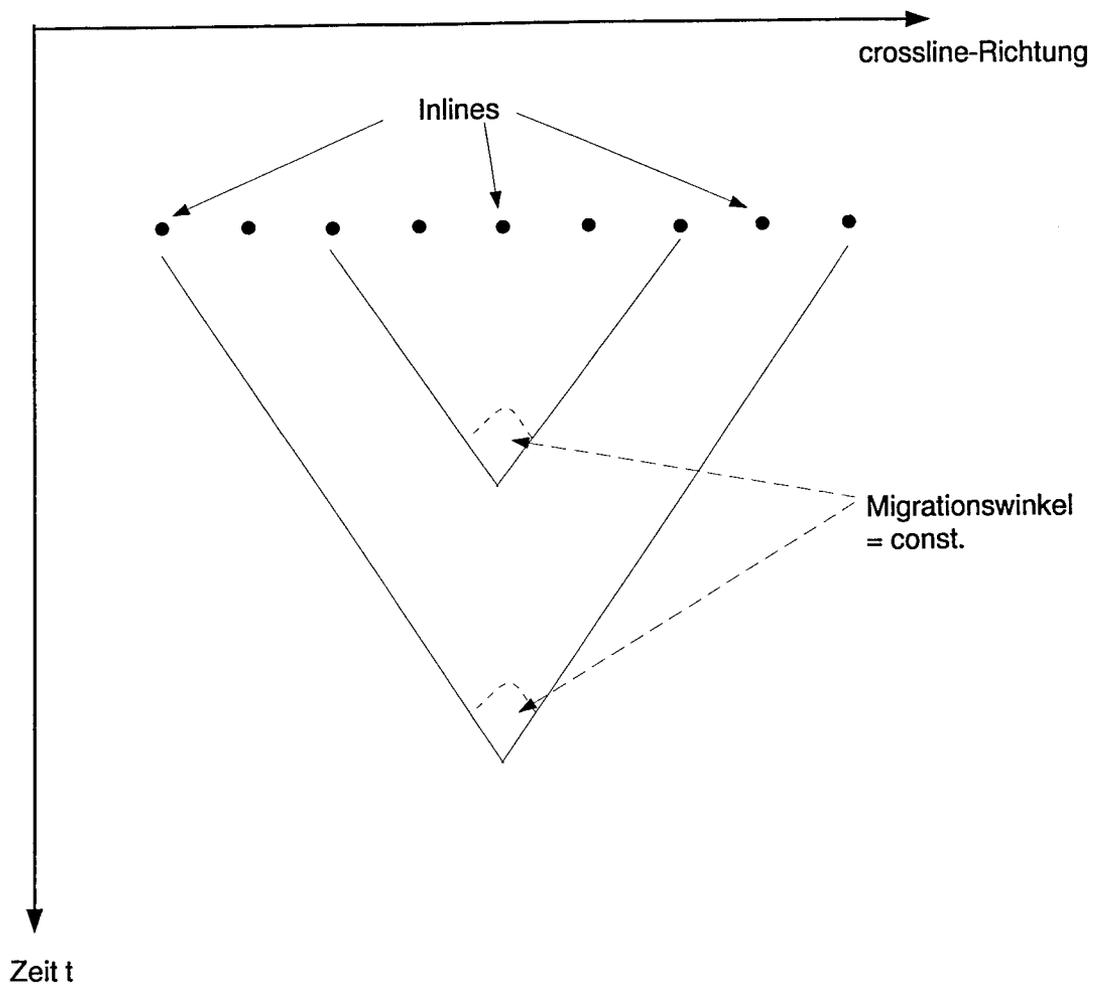


Abb. 9d : Stapelung der synthetischen Daten nach Anwendung einer Crossline-Migration mit  
Inline-Abständen von 50 m, Migrationswinkel = 30°, Migrationsapertur = 3000 m



**Abb. 9e : Stapelung der synthetischen Daten nach Anwendung einer Crossline-Migration mit Inline-Abständen von 50 m, Migrationswinkel = 45°, Migrationsapertur = 500 m**





**Abb. 10:** Bei konstantem Migrationswinkel nimmt die Zahl der Inlines, die bei der Crossline-Migration berücksichtigt werden, mit zunehmender Laufzeit zu.

Bandpassfilter mit denen die Inputdaten gefiltert werden	3/5 Hz - 40/60 Hz
Samplingintervall der Inputdaten: Samplingintervall der Outputdaten:	4 ms 8 ms
Crossline-migrierte CRP-Gather (Output)	Minimaler Offset: 200 m Maximaler Offset: 3200 m Inkrement: 150 m Abstand zwischen benachbarten Gathern einer Inline: 25 m
Migrationsapertur	6400 m
Migrationswinkel	30 Grad

Tabelle 2: Parameter, die für die Crossline-Migration benutzt wurden.

### c) Die Meeresbodenmultiple

Ein weiteres Problem, welches wir zu diesem Zeitpunkt des Projektes zu klären hatten, bestand in der Behandlung der Meeresbodenmultiplexen. In gestapelten ( $v_{\text{Stack}} = 1500$  m/s  $\sim$  Wassergeschwindigkeit), noch nicht crossline-migrierten Daten sieht man deutlich die Multiple des Meeresbodens (Abb. 11a). Da sich diese Multiple besonders in dem Bereich des 'rough surface' bei der späteren Fokussierungs- und Geschwindigkeitsanalyse als äußerst störend erweisen würde und z. T. eine vernünftige Geschwindigkeitsanalyse unmöglich machen würde, entschieden wir uns, diese Multiple mit einem FK-Filter zu eliminieren. Dabei hatten wir zwei unterschiedliche Ansätze und Fragen zu klären:

1. Müssen *sämtliche* Prestack-Daten *vor* der Crossline-Migration einem Prozeß der Multiplenunterdrückung (FK-Filterung) unterworfen werden, was einen enormen Arbeits- und Rechenzeitaufwand bedeutet hätte?
2. Verarbeitet der Crossline-Migrationsprozeß die Daten in der Art, daß nur die crossline-migrierten Daten dem Prozeß der Multiplenunterdrückung unterzogen werden müssen?

Im ersten Fall müßte ein Datenvolumen von ca. 52 GB bei 4 ms Samplingabstand bzw. ca. 26 GB bei 8 ms Samplingintervall prozessiert werden, im zweiten Fall müßten lediglich die crossline-migrierten Inlines dem Prozeß der Multiplenunterdrückung unterzogen werden, wodurch das zu prozessierende Datenvolumen um ein Vielfaches gesenkt werden könnte.

Auch hier zeigten die Testläufe für die Inline 199, daß die Meeresbodenmultiple durch die Crossline-Migration keine falschen oder zusätzlich störenden Effekte produziert, und daß somit der Prozeß der Multiplenunterdrückung effektiv nach der Crossline-Migration angewendet werden kann (Abb. 11b und 11c). Dadurch konnten wir sehr viel Rechenzeit und Personalaufwand einsparen.

Mit Klärung dieser beiden Probleme (Aliasing-Problem, Multiplen-Problem) hatten wir sämtliche Vorbereitungen für eine effektive Crossline-Migration der von uns ausgewählten Inlines abgeschlossen.

Zeit t

Abb. 10: Bei konstantem Migrationswinkel nimmt die Zahl der Inlines, die bei der Crossline-Migration berücksichtigt werden, mit zunehmender Laufzeit zu.

Abb. 11a: Stapelung (Vstack=1500m/s) der nicht crossline-migrierten Inlinie 199 ohne FK-Filterung. Deutlich ist die Multiple des Meeresbodens zu erkennen.

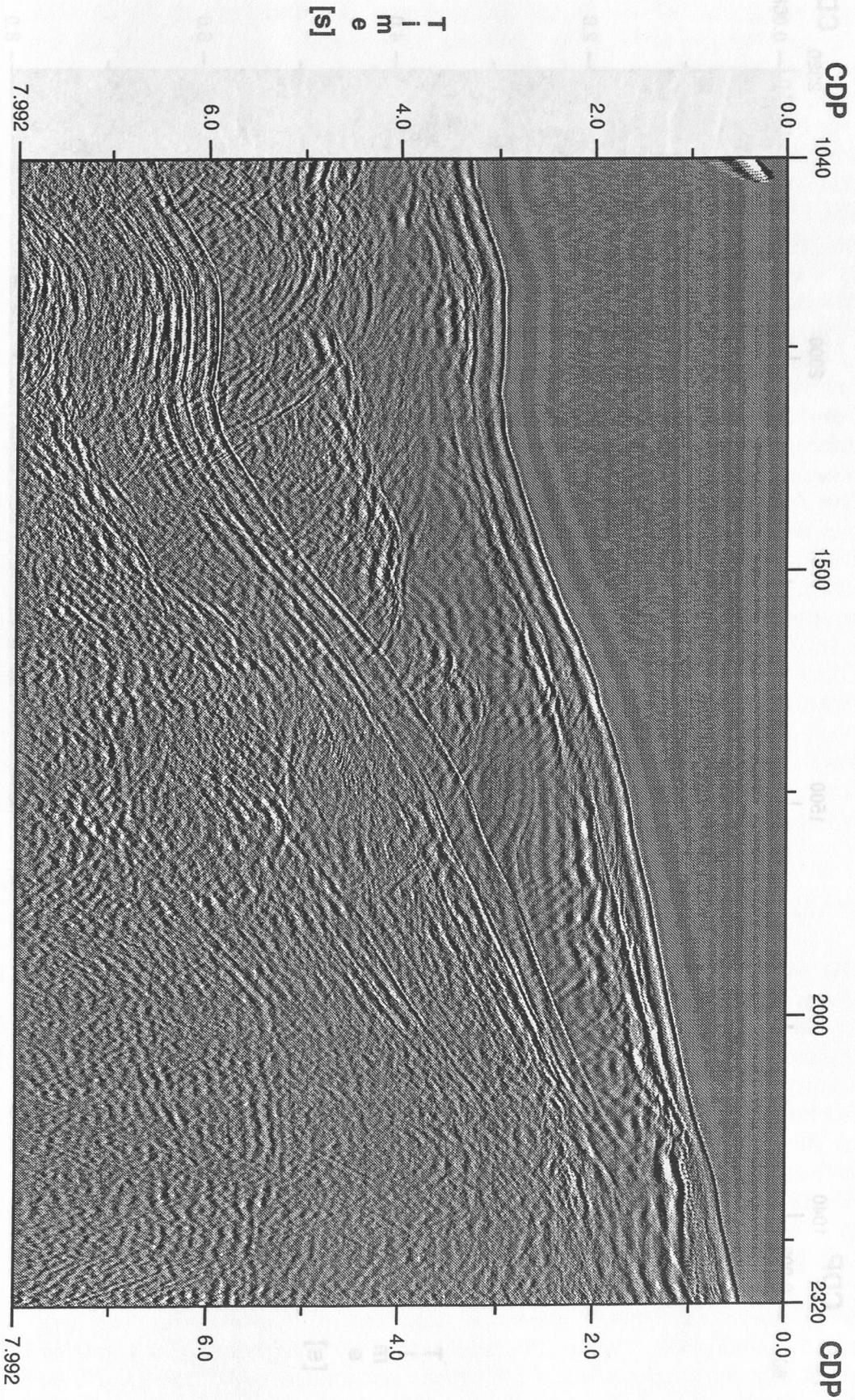
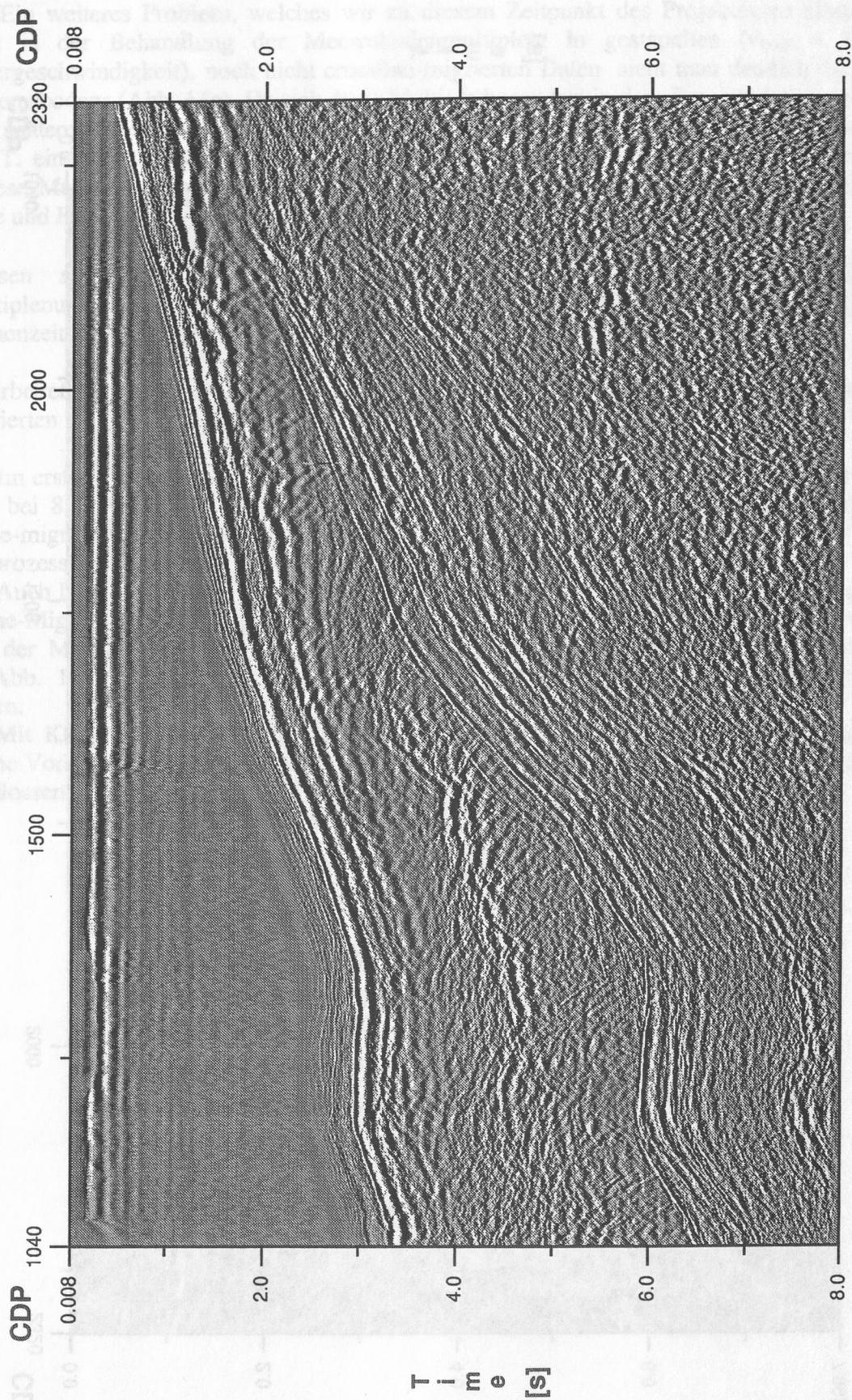
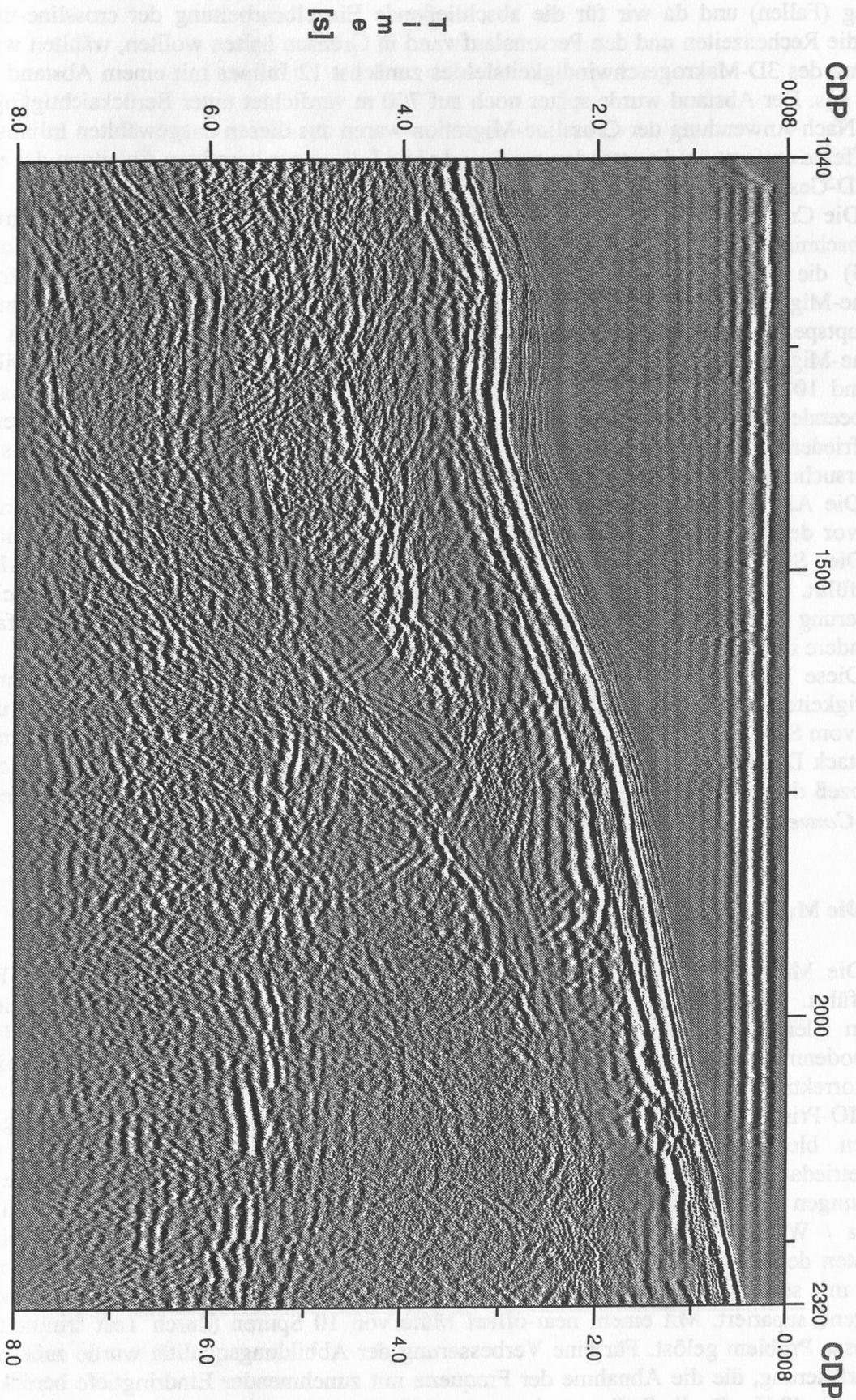


Abb. 11b: Stapelung ( $v_{\text{stack}}=1500$ ) der crossline-migrierten Inline 199 ohne FK-Filterung. Deutlich ist die Multiple des Meeresbodens zu erkennen.





**Abb. 11c: Stapelung (vstack=1500) der crossline-migrierten Inline 199 mit FK-Filterung. Die Multiple des Meeresbodens ist eliminiert.**

#### d) Start der Crossline-Migration (First Pass)

Da sich in Crossline-Richtung die Geologie (Streichen) weniger schnell ändert als in Inline-Richtung (Fallen) und da wir für die abschließende Einzelbearbeitung der crossline-migrierten Inlines die Rechenzeiten und den Personalaufwand in Grenzen halten wollten, wählten wir für die Erstellung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes zunächst 12 Inlines mit einem Abstand von i. a. 1400 m aus. Der Abstand wurde später noch auf 700 m verdichtet unter Berücksichtigung von 23 Linien. Nach Anwendung der Crossline-Migration waren aus diesen ausgewählten Inlines die 3D-Seiteneffekte entfernt, und es standen genügend viele Inlines zur iterativen Ableitung der einzelnen realen 2D-Geschwindigkeitsfelder zur Verfügung.

Die Crossline-Migration für die ausgewählten Inlines wurde aus Speicherplatzgründen in zwei Abschnitten durchgeführt. Dafür kamen für den ersten Teil der Crossline-Migration (Inline 115-185) die erste Hälfte des Datensatzes zum Einsatz. Im zweiten Abschnitt erfolgte die Crossline-Migration der Linien 199 bis 268. Die Rechenzeitdauer auf einer Sun sparc ultra 1 mit 1 GB Hauptspeicher und einem 170 MHz Prozessor betrug für den ersten und zweiten Teil der Crossline-Migration jeweils ca. 90 Stunden. Das Programm lief während dieser Zeit stabil und mit annähernd 100% CPU-Zeit, so daß die gesamte Crossline-Migration für 12 Inlines nach ca. 8 Tagen beendet war. Das Ergebnis dieser Crossline-Migration war für alle ausgewählten Inlines sehr zufriedenstellend und entsprach im Wesentlichen den Vorstellungen, die wir aus unseren Voruntersuchungen gewonnen hatten.

Die Abbildung 12a und 12b zeigen einen Ausschnitt der Stapelsektion von Inline 255 einmal vor der Crossline-Migration (Abb. 12a) und einmal nach der Crossline-Migration (Abb. 12b). Die Stapelung wurde jeweils mit der RMS-Geschwindigkeit des 3D-RMS-Feldes durchgeführt. Es wird deutlich, daß die crossline-migrierte Sektion eine entscheidende Verbesserung bei der Abbildungen der Reflektoren im Bereich des 'rough surface' und insbesondere im Bereich der abtauchenden Platte bewirkt.

Diese Phase des Projektes verlief relativ reibungslos, und es traten keine unerwarteten Schwierigkeiten auf. Die Outputfiles enthielten somit 12 bzw. 23 unabhängige 2D-Files, und diese wurden vom Sirius-Programm separat gespeichert (internes SEP-Format). Die crossline-migrierten 2D-Prestack Daten hatten pro Inline eine Größe von ca. 115 MB. Um diese Daten anschließend dem Prozeß der Multiplenunterdrückung zu unterziehen, mußten die Daten mit Hilfe des *Sirius-Format-Converters* in das SEG-Y-Format gewandelt werden.

#### e) Die Multiplenunterdrückung

Die Multiplenunterdrückung der crossline-migrierten Daten wurde mit einem FK-Filter durchgeführt. Der Prozeß der Multiplenunterdrückung beruht auf dem Laufzeitunterschied zwischen der multiplen und der primären Reflexion. Dazu werden für die erste Meeresbodenmultiple und die Primäre mit der gleichen zero-offset Zeit die unterschiedlichen NMO-Korrekturen berechnet (Levin, 1971). Mit der Hälfte der Differenz zwischen NMO-Multiple und NMO-Primär werden die schon NMO-korrigierten CMP-Familien nun überkorrigiert. Die Multiplen bleiben hierbei aber unterkorrigiert. Da die Stapelgeschwindigkeiten und die Bathymetriedaten (gespeicherte Ersteinsätze) schon in Dateien vorlagen, konnten diese Berechnungen automatisiert werden. Bei der anschließenden Fourier Transformation in den Frequenz / Wellenzahl Bereich wurden die Primären und die Multiplen in unterschiedliche Quadranten des FK-Spektrums abgebildet und konnten so getrennt werden. Nur im near-offset Bereich mit seinen geringen Neigungsunterschieden wurden die Primären von den Multiplen ungenügend separiert. Mit einem near-offset Mute von 10 Spuren (durch Test ermittelt) wurde auch dieses Problem gelöst. Für eine Verbesserung der Abbildungsqualität wurde außerdem eine Frequenzfilterung, die die Abnahme der Frequenz mit zunehmender Eindringtiefe berücksichtigt, von 5 Hz bis 40 Hz für die Sedimente bzw. von 5 Hz bis 25 Hz für die Keilstruktur durchgeführt.

Abb. 12a: Stapelung (mit RMS-Modell) der nicht crossline-migrierten Inline 255

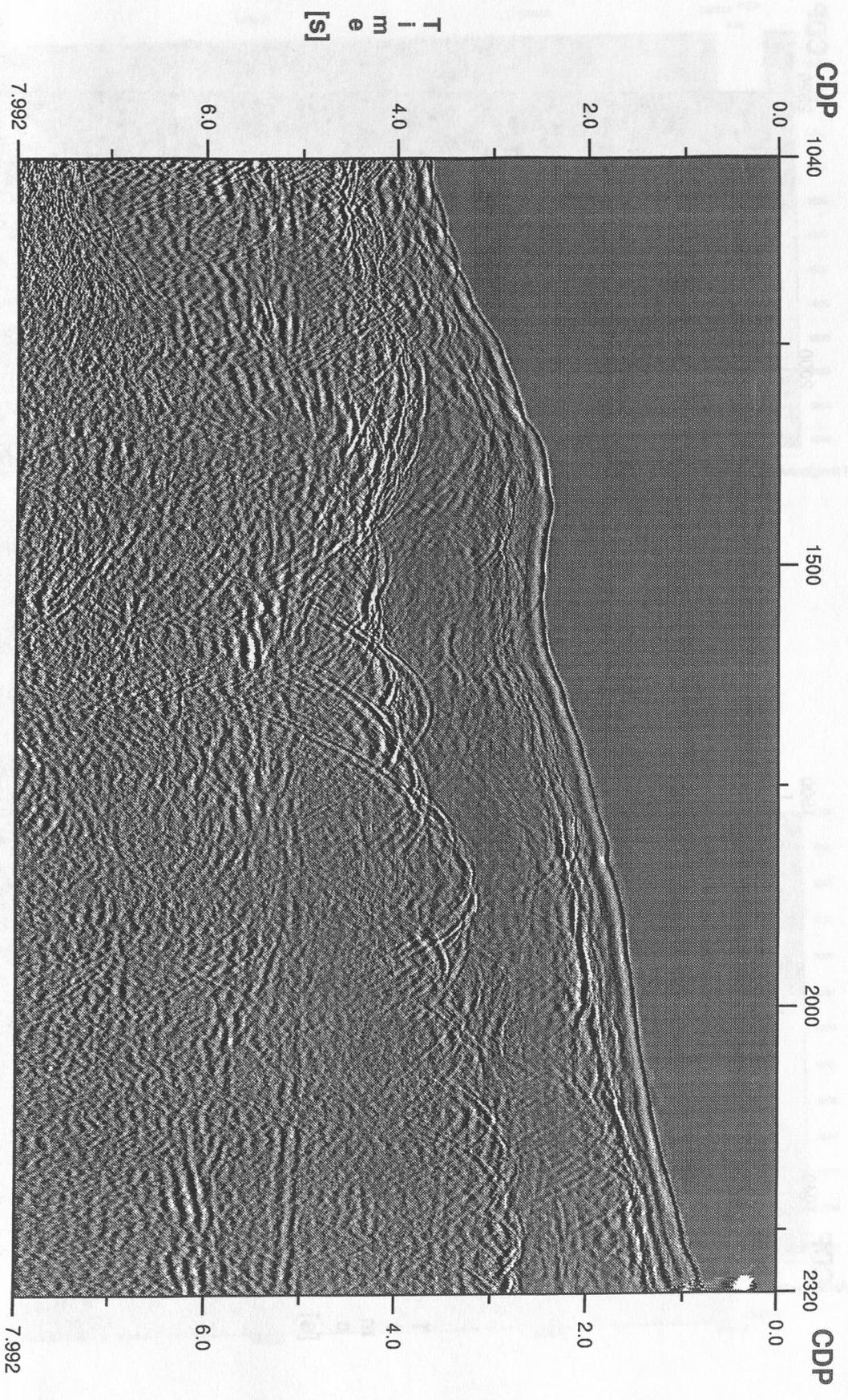
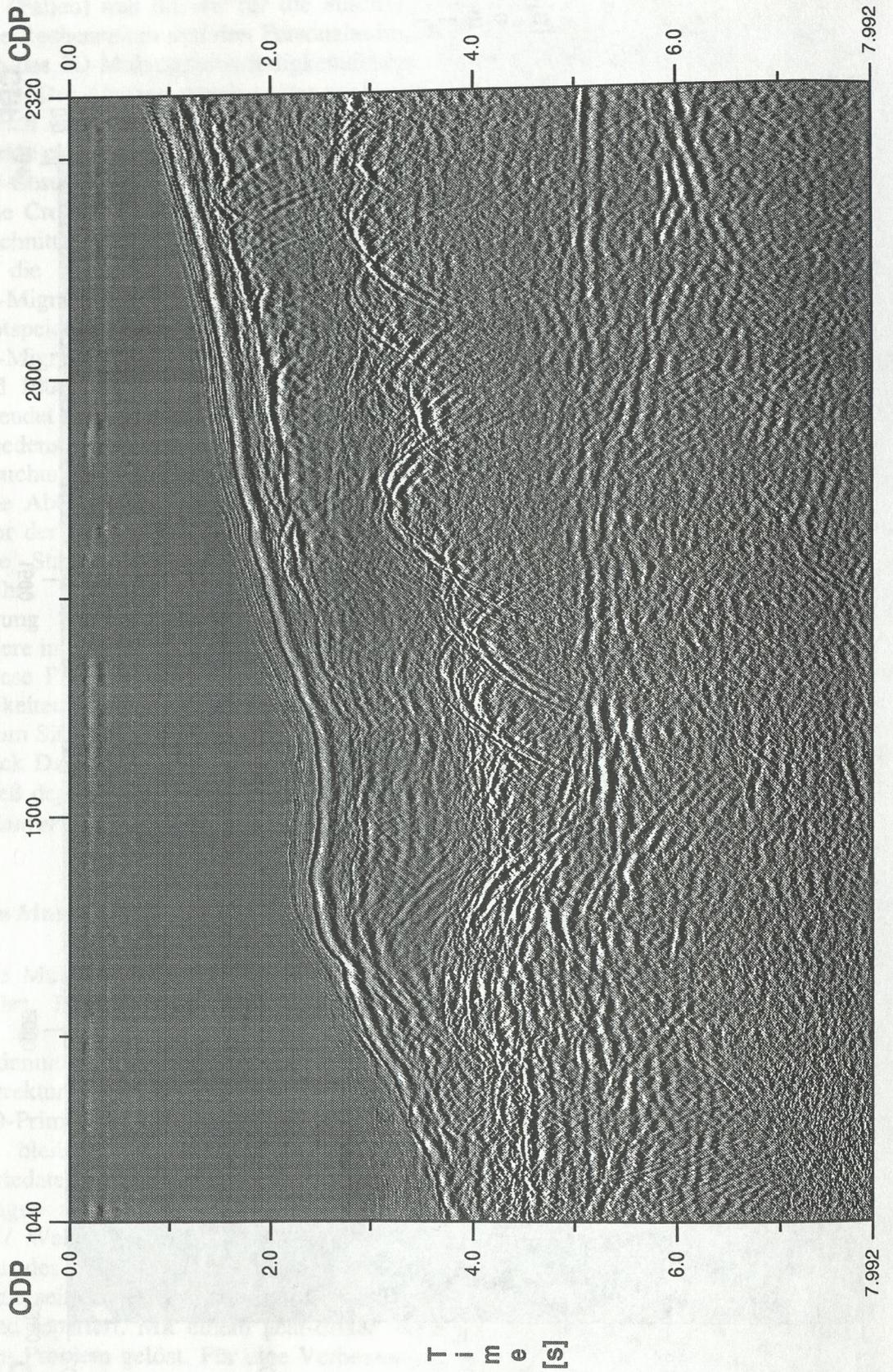
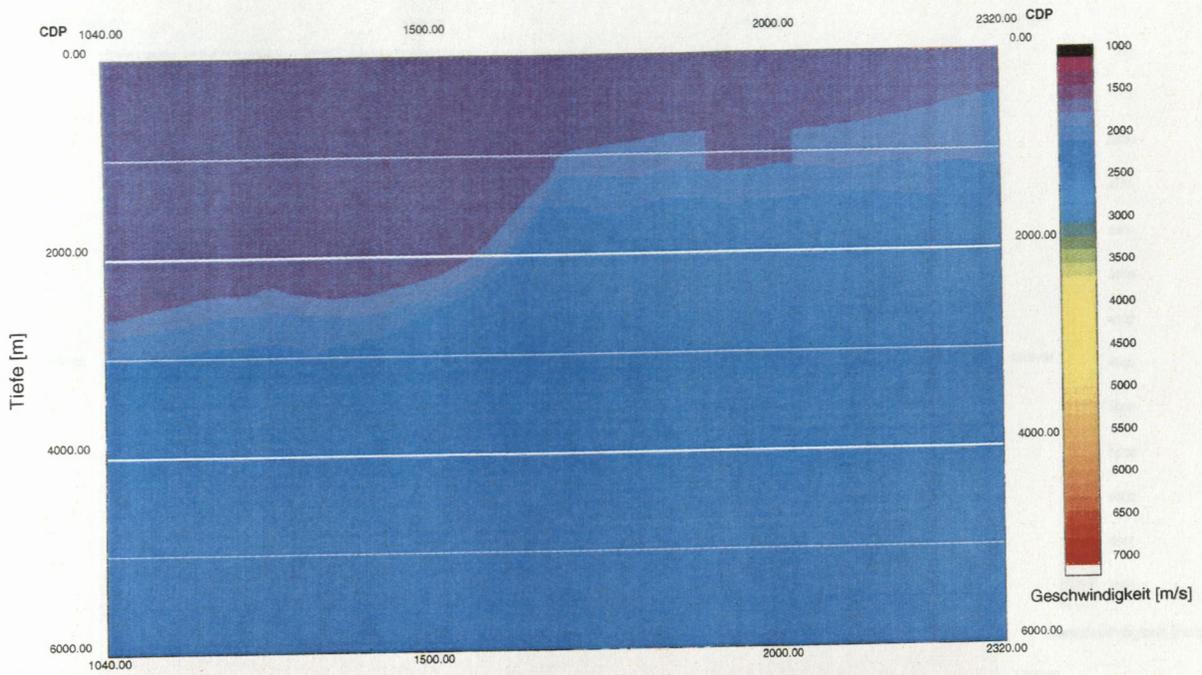


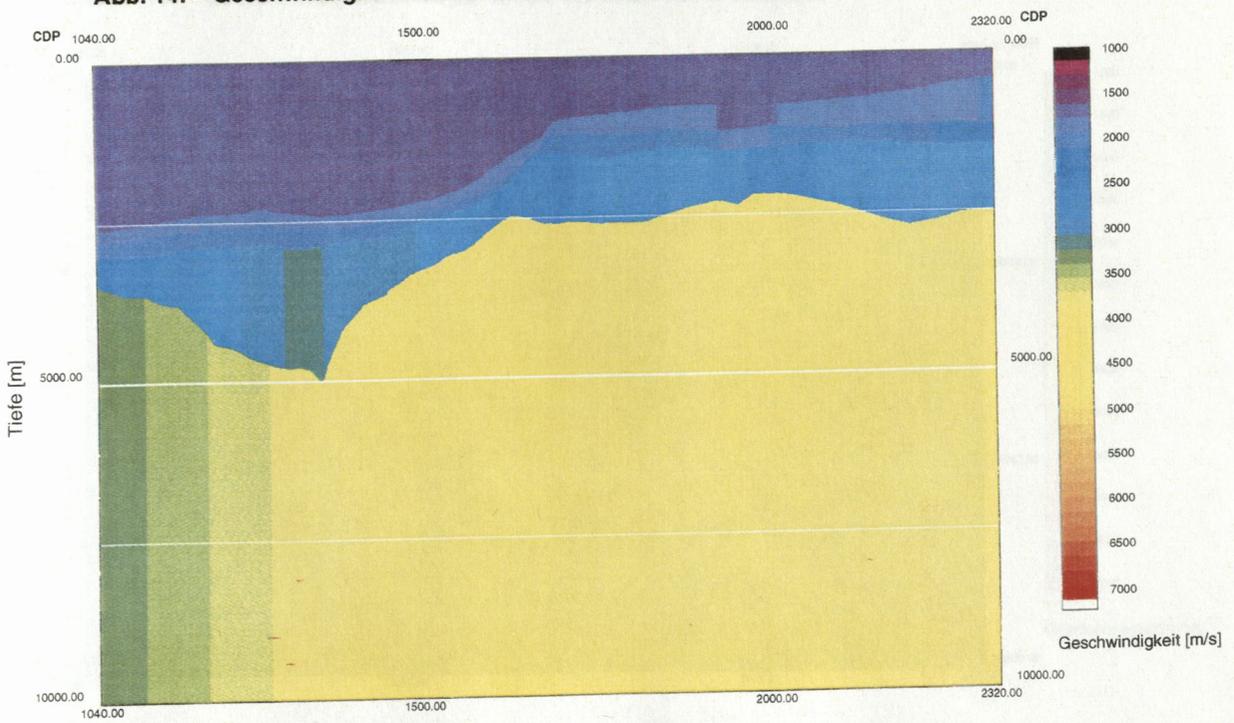
Abb. 12b : Stapelung (mit RMS-Modell) der crossline-migrierten Inline 255



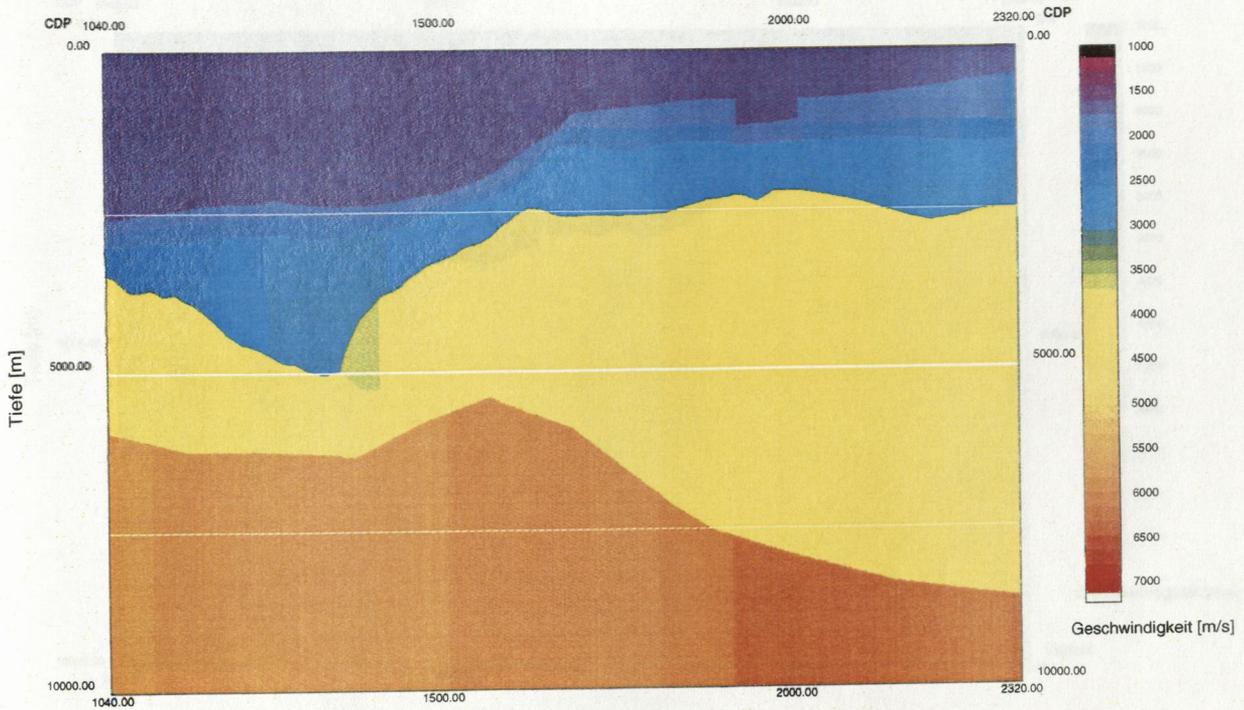
**Abb. 13: Geschwindigkeitsfeld der Inline 129 nach der 3. Iteration**



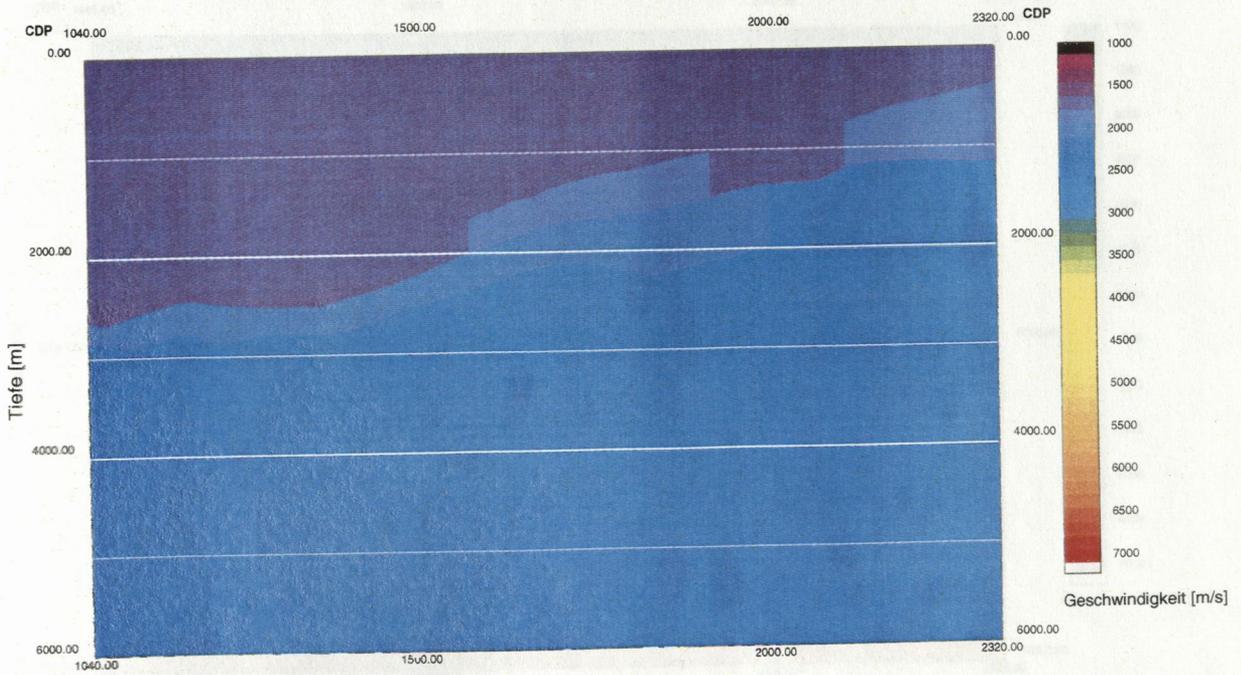
**Abb. 14: Geschwindigkeitsfeld der Inline 129 nach der 5. Iteration**



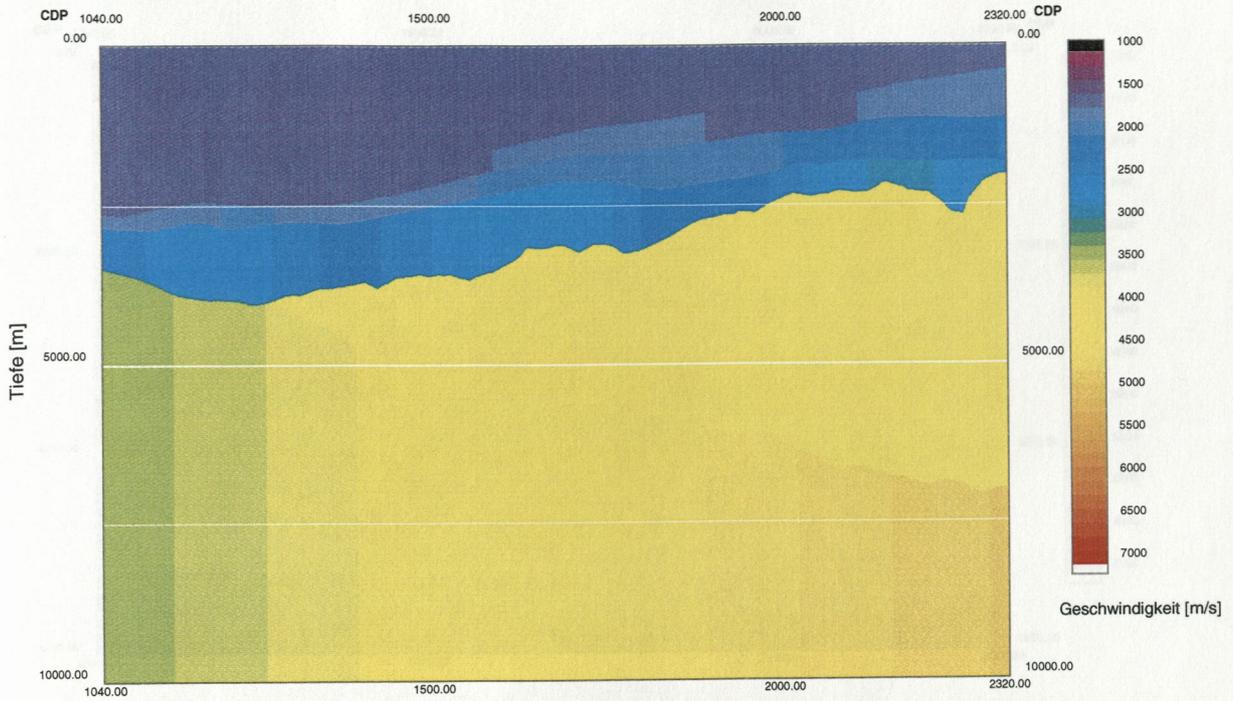
**Abb. 15: Geschwindigkeitsfeld der Inline 129 nach der 7. Iteration**



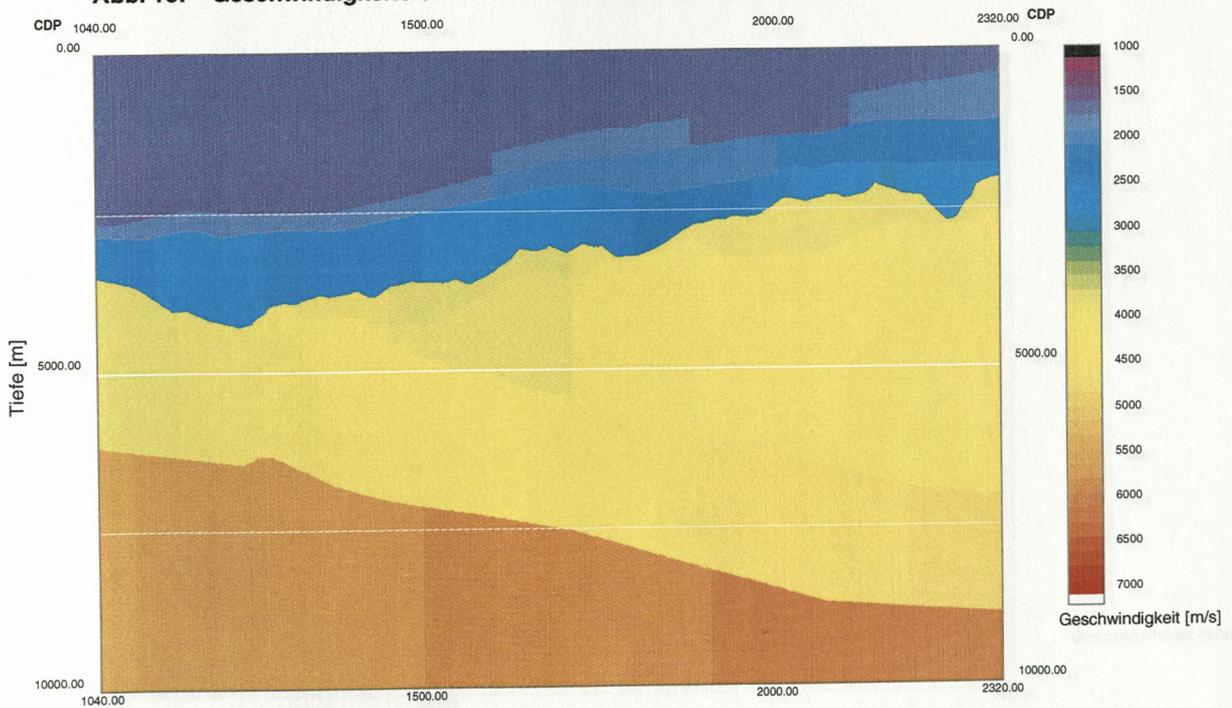
**Abb. 16: Geschwindigkeitsfeld der Inline 199 nach der 3. Iteration**



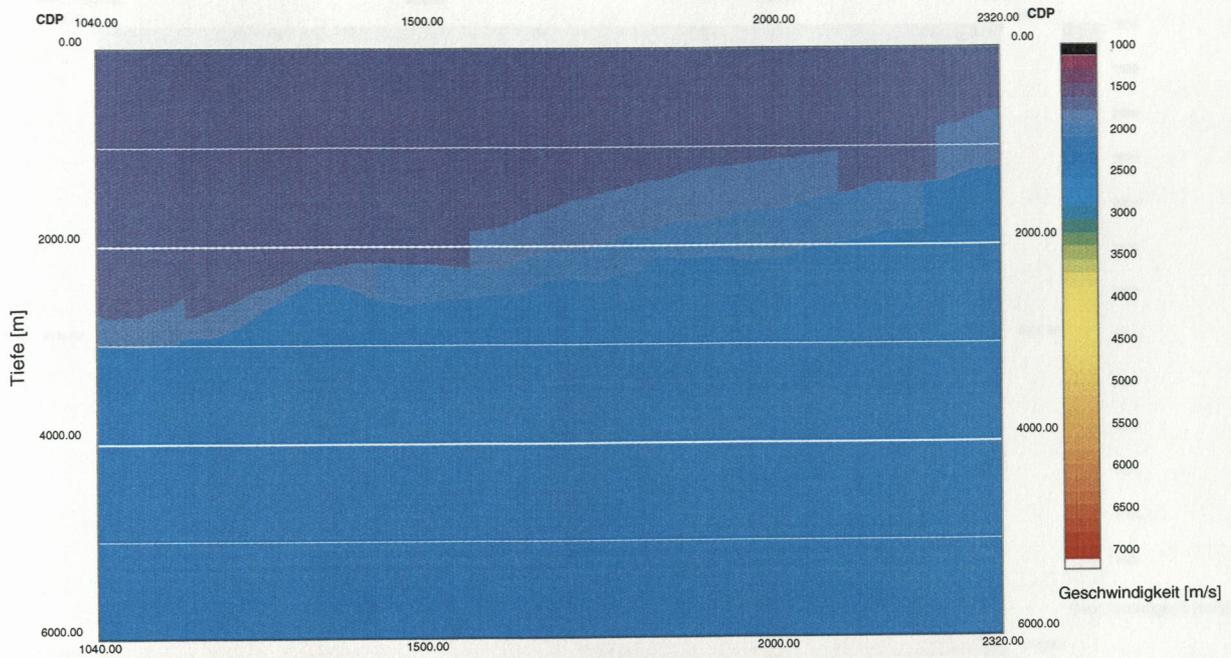
**Abb. 17: Geschwindigkeitsfeld der Inline 199 nach der 5. Iteration**



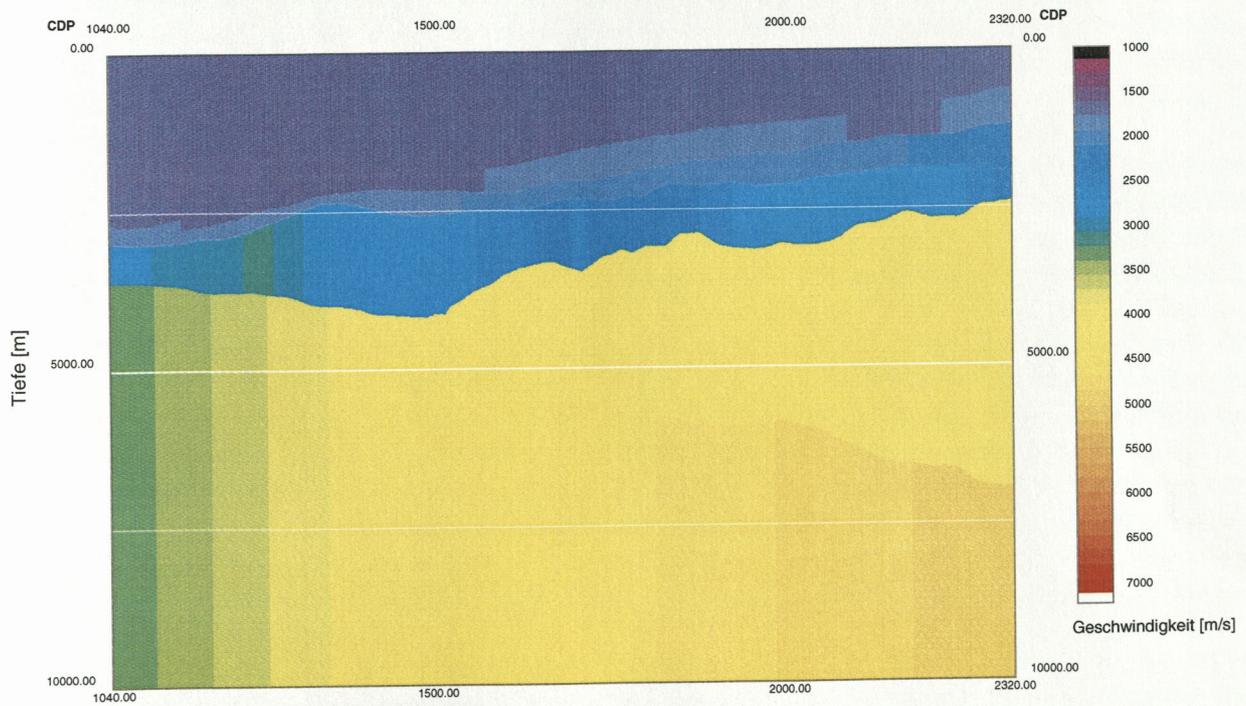
**Abb. 18: Geschwindigkeitsfeld der Inline 199 nach der 7. Iteration**



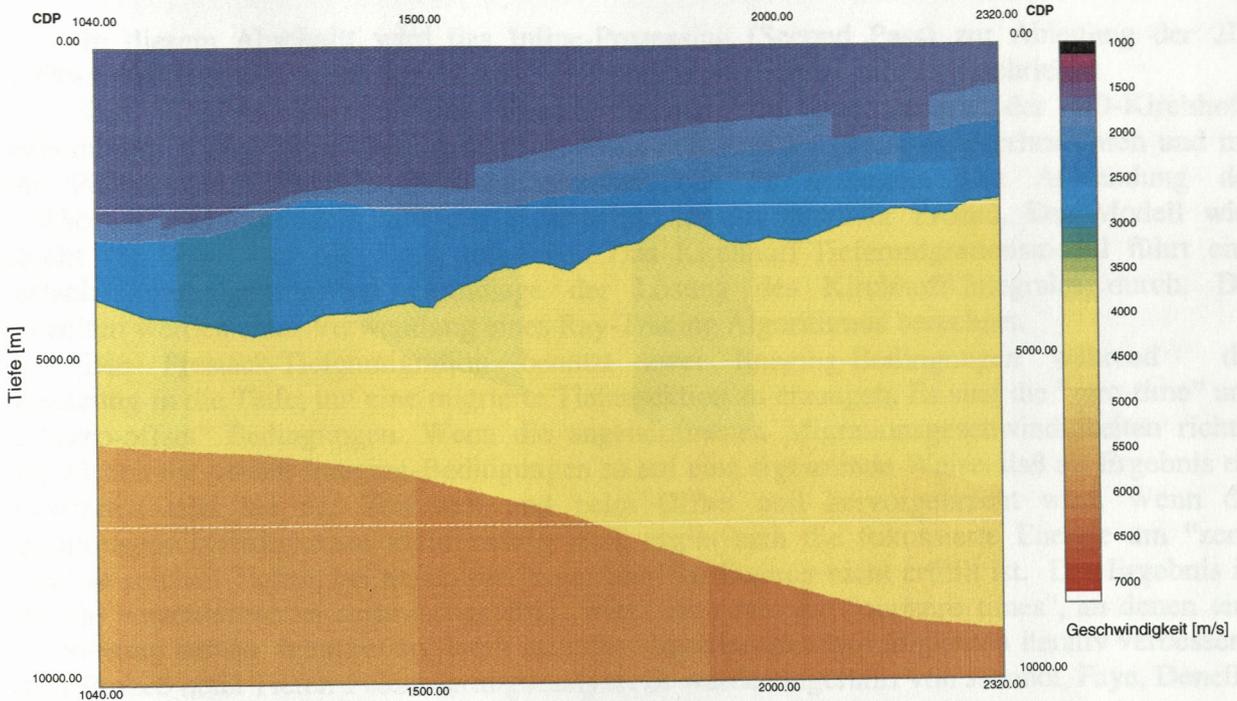
**Abb. 19: Geschwindigkeitsfeld der Inline 255 nach der 3. Iteration**



**Abb. 20: Geschwindigkeitsfeld der Inline 255 nach der 5. Iteration**



**Abb. 21: Geschwindigkeitsfeld der Inline 255 nach der 7. Iteration**



Alle erdseismisch migrierten Seismen wurden für das 2D-Imaging, die Geschwindigkeitsanalyse und die Erzeugung des Geschwindigkeitsfelds in ähnlicher Weise genutzt. Im ersten Schritt wurde ein poststack-aligniertes, seismische Parameter aus den Poststack-Daten erzeugt. Das Anfangsmodell für diese 0. Iteration basierte auf konstante Geschwindigkeit von  $v=1500$  m/s. Zusätzlich wurden auch die Fokussierungspunkte für die Startanalyse erzeugt, die zunächst für 200 CDP erstellt wurden. In der Testsequenz wurde nun auf allen Seismen der Inline 255 gepickt und abgespickert. Die Geschwindigkeiten der Wellenfronten wurden aus der Zeitverschiebung erhalten und ebenfalls für alle 2D-Linien gepickt. Für die folgende 1. Iteration wurden die ersten 2D-Geschwindigkeitsfelder für jede erdseismisch migrierte 2D-Linie erstellt. Unter dem Meeresboden wurde dabei zunächst mit der nächsttieferen zu erwartenden Geschwindigkeit fortgesetzt (1600-1800 m/s), bevor in den folgenden Bearbeitungsschritten die Geschwindigkeiten mit Hilfe der Fokussierungsanalyse korrigiert und verbessert wurden.

Das Vorgehensweise wurde für jeden der im pickenden Horizont vom Meeresboden fortgeführt. So wurde nun schrittweise ein Interferenzmodell für jeden Horizont durchgeführt. Das Interferenzmodell für jede Linie wurde damit schichtweise von oben nach unten erstellt. Im Gegensatz zur Bearbeitung einzelner oder mehrerer weit auseinanderliegender Inlines liegt bei der Fokussierungsgangweise und Tiefenmigration vieler engstehender 2D-Linien ein großer Vorteil darin, daß bei Unsicherheit des Horizontverlaufs die Daten Parallellinien in den Interferenzprozess mit eingebunden werden können. So wird Picken und Entwickeln der 2D-Linien schon eine erste Verzahnung der benachbarten Inlines bewerkstelligen. In vielen Fällen besteht darum die verbesserte Möglichkeit, das Geschwindigkeitsfeld an die geologischen Strukturen anzupassen. Klänge werden, bei der Analyse der 2D-Geschwindigkeitsfelder für die einzelnen Inlines, die Geschwindigkeitswerte in tieferen Schichten nicht nur in inline-Richtung, sondern auch in Crossline-Richtung mit dem Inlines-Geschwindigkeitswert werden deshalb durch die Gitter in beiden Richtungen besser unterstützt.

Entstanden für die ausgewählten Inlines jeweils ein 2D-Geschwindigkeitsmodell, das an die geologischen Gegebenheiten im Untergrund angepaßt ist. Als Beispiele werden die Geschwindigkeitsmodelle der Inline 129 (Abb. 13-15), der Inline 199 (Abb. 16-18) und der Inline

### 3.2.2.3 Die 2D-Kirchhoff-Prestack-Tiefenmigration und Fokussierungsanalyse (Second Pass)

In diesem Abschnitt wird das Inline-Prozessing (Second Pass) zur Ableitung der 2D-Geschwindigkeitsmodelle aus den 12 bzw. 23 crossline-migrierten Inlines beschrieben.

Das KIRPACK-Modul des Paketes Sirius 3D bietet neben der 2D-Kirchhoff-Tiefenmigration auch die Möglichkeit, Migrations-Fokussierungsanalysen durchzuführen und mit dem Pick-Modul, 2D-Makrogeschwindigkeitsmodelle zu erzeugen. Die Anwendung des Kirchhoff-Migrationsmoduls und des Pickmoduls ist ein iterativer Prozeß. Das Modell wird Schicht für Schicht in die Tiefe aufgebaut. Das Kirchhoff-Tiefenmigrationsmodul führt eine Prestack-Tiefenmigration auf Grundlage der Lösung des Kirchhoff-Integrales durch. Die Laufzeiten werden unter Verwendung eines Ray-Tracing Algorithmus berechnet.

Die Prestack-Tiefenmigration benutzt zwei Imaging-Bedingungen während der Fortsetzung in die Tiefe, um eine migrierte Tiefensektion zu erzeugen. Es sind die "zero-time" und die "zero-offset" Bedingungen. Wenn die angenommenen Migrationsgeschwindigkeiten richtig sind, wirken die beiden Imaging-Bedingungen so auf eine ergänzende Weise, daß als Ergebnis ein fokussiertes Bild bei der Zeit null und beim Offset null hervorgebracht wird. Wenn die Migrationsgeschwindigkeiten nicht richtig sind, ergibt sich die fokussierte Energie am "zero-offset" in solchen Tiefen, bei denen die "zero-time"-Bedingung nicht erfüllt ist. Das Ergebnis ist dann ein verschlechtertes seismisches Bild. Wenn man nun die "nonzero times", an denen eine Fokussierung auftritt, interpretiert, kann man die Migrationsgeschwindigkeiten iterativ verbessern. Dieser Prozeß heißt Tiefen-Fokussierungsanalyse. Er wurde eingeführt von Jeannot, Faye, Denelle, (1986).

Alle crossline-migrierten Inlines wurden für das 2D-Imaging, die Geschwindigkeitsanalyse und die Erzeugung des Geschwindigkeitsmodells in iterativer Weise genutzt. Im ersten Schritt wurde eine prestack-migrierte seismische Tiefensektion aus den Prestack-Daten erzeugt. Das Geschwindigkeitsmodell für diese 0. Iteration besitzt eine konstante Geschwindigkeit von  $v=1500$  m/s. Damit wurden auch die Fokussierungspanels für die Startanalyse erzeugt, die zunächst für jeden 100. CDP erstellt wurden. In den Tiefensektionen wurde nun auf allen Inlines der Meeresboden gepickt und abgespeichert. Die Geschwindigkeiten der Wassersäule wurden aus der Tiefenfokussierung erhalten und ebenfalls für alle 2D-Linien gepickt. Für die folgende 1. Iteration wurden daraus die ersten 2D-Geschwindigkeitsfelder für jede crossline-migrierte 2D-Inline gebildet. Unter dem Meeresboden wurde dabei zunächst mit der nächsthöheren zu erwartenden Geschwindigkeit fortgesetzt (1600-1800 m/s), bevor in den folgenden Bearbeitungsschritten die Geschwindigkeiten mit Hilfe der Fokussierungsanalyse korrigiert und bestimmt wurden.

Diese Vorgehensweise wurde für jeden neu zu pickenden Horizont vom Meeresboden abwärts fortgeführt. So wurde im allgemeinen ein Iterationsschritt für jeden Horizont durchgeführt. Das Geschwindigkeitsmodell für jede Linie wurde damit schichtweise von oben nach unten aufgebaut. Im Gegensatz zur Bearbeitung einer einzelnen oder mehrerer weit auseinanderliegender 2D-Linien, liegt bei der Fokussierungsanalyse und Tiefenmigration vieler engabständiger, paralleler 2D-Linien ein großer Vorteil darin, daß bei Unsicherheit des Horizontverlaufs die benachbarten Parallellinien in den Interpretationsprozeß mit eingebunden werden können. So entsteht beim Picken und Entwickeln der 2D-Linien schon eine enge Verzahnung der benachbarten Linien untereinander. In vielen Fällen besteht darum eine verbesserte Möglichkeit, das Geschwindigkeitsmodell an die geologischen Strukturen anzupassen. Ebenso werden, bei der Berechnung der 2D-Geschwindigkeitsfelder für die einzelnen Inlines, die Geschwindigkeitswerte in den einzelnen Schichten nicht nur in Inline-Richtung, sondern auch in Crossline-Richtung geglättet. Falsche Geschwindigkeitswerte werden deshalb durch die Glättung in beiden Dimensionen besser unterdrückt.

So entstanden für die ausgewählten Inlines jeweils ein 2D-Geschwindigkeitsmodell, welches an die geologischen Gegebenheiten im Untergrund angepaßt ist. Als Beispiele werden die Geschwindigkeitsmodelle der Inline 129 (Abb. 13-15), der Inline 199 (Abb. 16-18) und der Inline

255 (Abb. 19-21) jeweils nach der 3., 5. und 7. Iteration gezeigt. Diese drei Inlines repräsentieren Bereiche innerhalb der 3D-Fläche, in denen zum einen Hangrutschungen in der Bathymetrie (Inline 129) auftreten und zum anderen ein relativ ungestörtes Gebiet der Subduktionszone (Inline 199 und 255) vorliegt.

In der Anfangsphase (1.-3. Iteration) wurden lediglich die Geschwindigkeiten der Wassersäule und der Hangsedimente bestimmt, und die Geschwindigkeiten der tieferliegenden Schichten wurden noch nicht genau analysiert. Es wurde hier zunächst mit der geringsten anzunehmenden Geschwindigkeit für die tieferliegenden Schichten (abtauchende Sedimente, Keilstruktur, abtauchende Platte) die nachfolgende Iteration berechnet.

Im 5. Iterationsschritt wurde schon die Struktur des Keiles deutlich und seine Geschwindigkeit bestimmt. Dieses wurde als Grundlage für die folgende 5. Kirchhoff-Tiefenmigration und Fokussierungsanalyse verwendet, um die abtauchenden Sediment- bzw. Krustenschichten genauer analysieren zu können. In diesem Bearbeitungszustand wurde schon der starke Geschwindigkeitssprung zwischen den Hangsedimenten und dem Keilmaterial deutlich. Die Geschwindigkeit stieg hier von 2500-2800 m/s auf ca. 3800 m/s an. Ebenfalls wurden die geringfügigen lateralen Geschwindigkeitsänderungen in den Hangsedimenten und größere laterale Geschwindigkeitsänderungen, als Grundlage für die weitere Geschwindigkeitsanalyse, in den subduzierenden Schichten sichtbar.

Zum Schluß (7. Iteration) zeigte das Geschwindigkeitsmodell einen vollständigen Aufbau des Kontinentalrandes bis hinunter zu den tieferliegenden abtauchenden Schichten. Nun wurde auch eine laterale Geschwindigkeitsänderung innerhalb des Keiles deutlich. Die Keilspitze bzw. der südöstliche Übergang des Keiles zu den akkretierten Sedimenten besitzt eine geringere Geschwindigkeit als der restliche Keil. Die Geschwindigkeiten der abtauchenden Platte konnten in dieser Bearbeitung nur punktuell erfaßt werden und mußten daher für die Geschwindigkeitsmodelle durch weitere geologischen Annahmen fortgesetzt werden.

Die Abbildungen 22 - 30 zeigen die tiefenmigrierten Sektionen der Inlines 129, 199 und 255 jeweils nach der 3., 5. und 7. Iteration. Man erkennt die verbesserten seismischen Abbildungen der Untergrundstruktur mit den jeweiligen Iterationsschritten, die vom Meeresboden ausgehend in die Tiefe fortgesetzt wurden.

Abb. 22: Tiefenmigration der Inline 129 nach der 3. Iteration

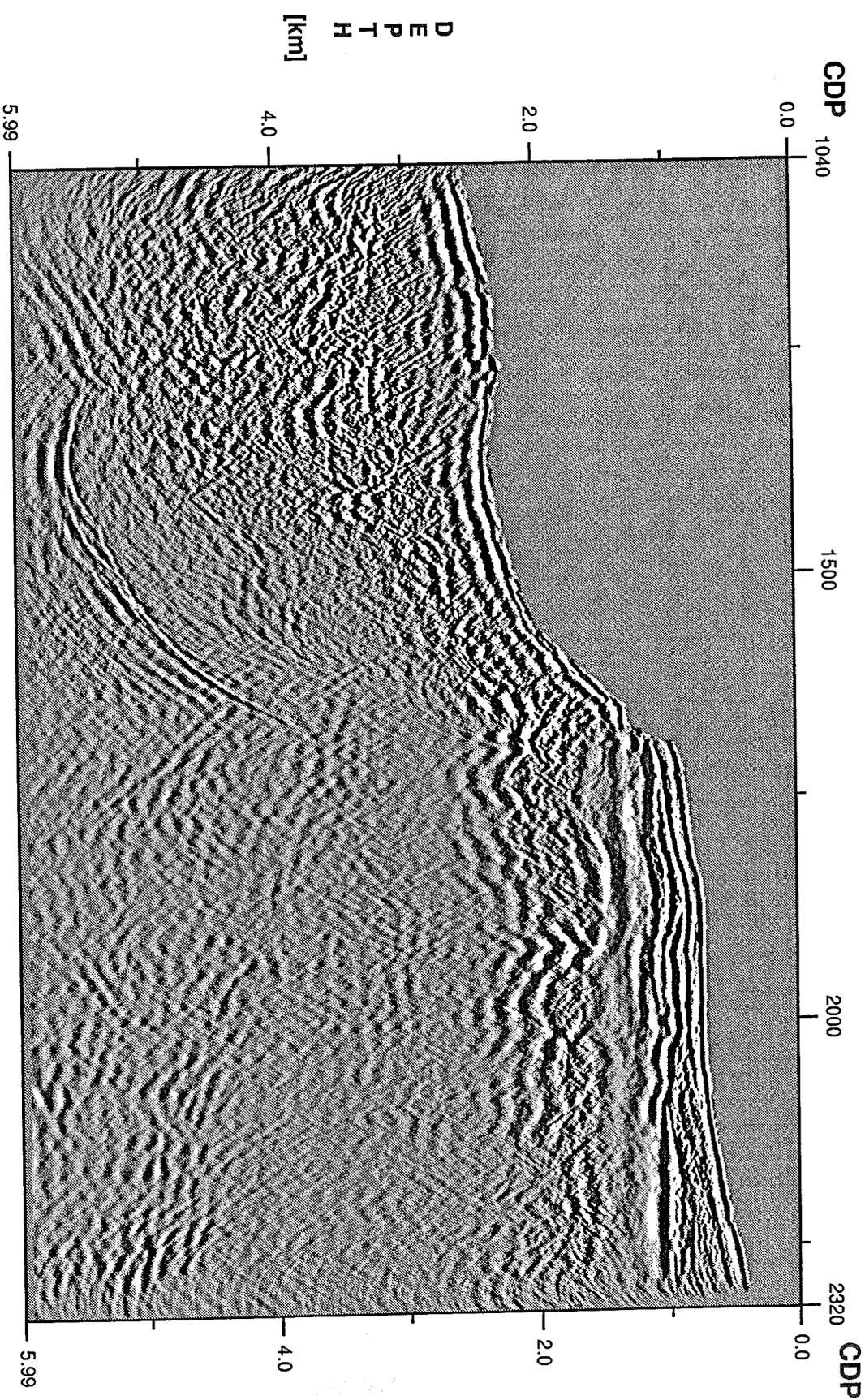


Abb. 23: Tiefenmigration der Inline 129 nach der 5. Iteration

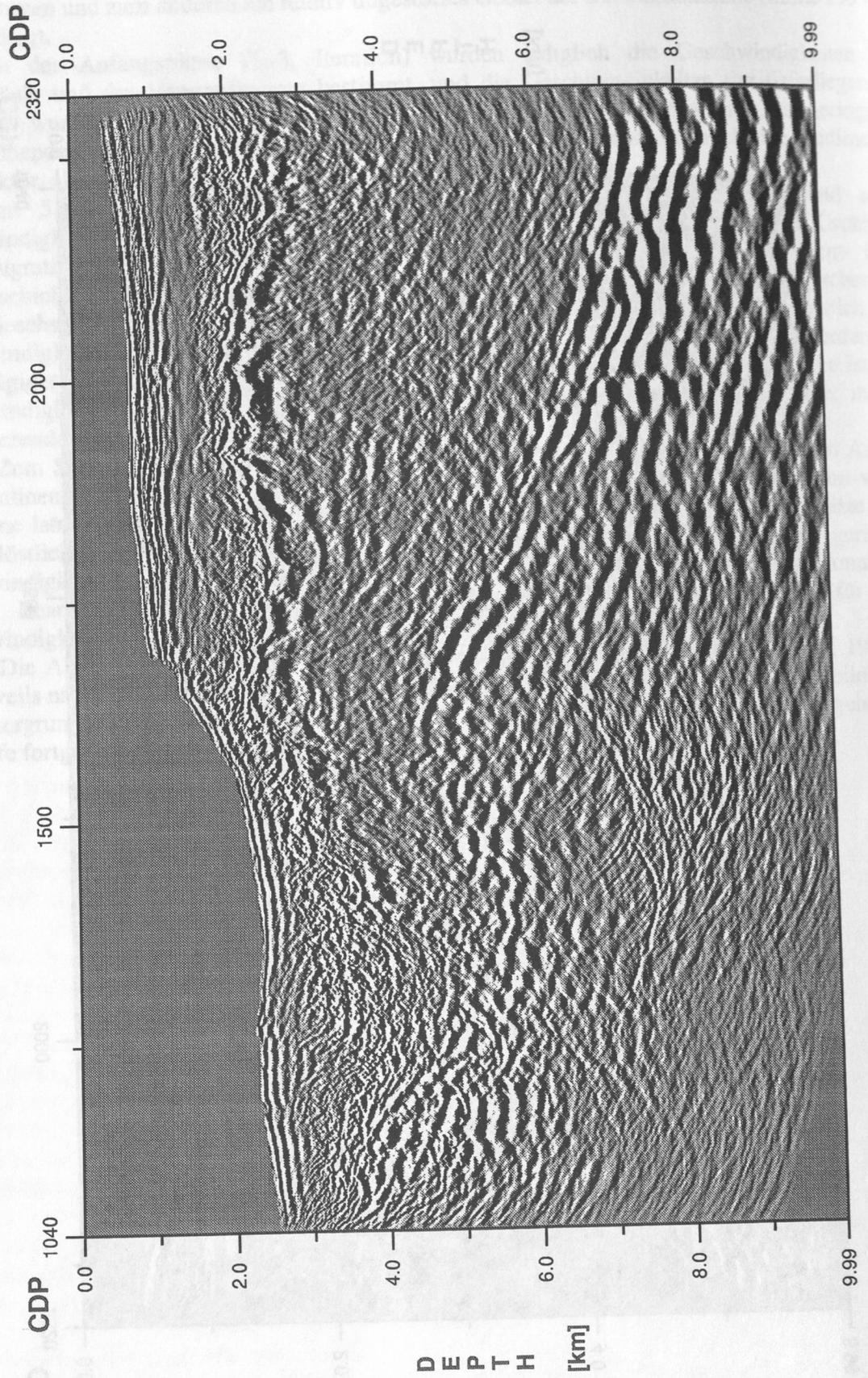


Abb. 24: Tiefenmigration der Inline 129 nach der 7. Iteration

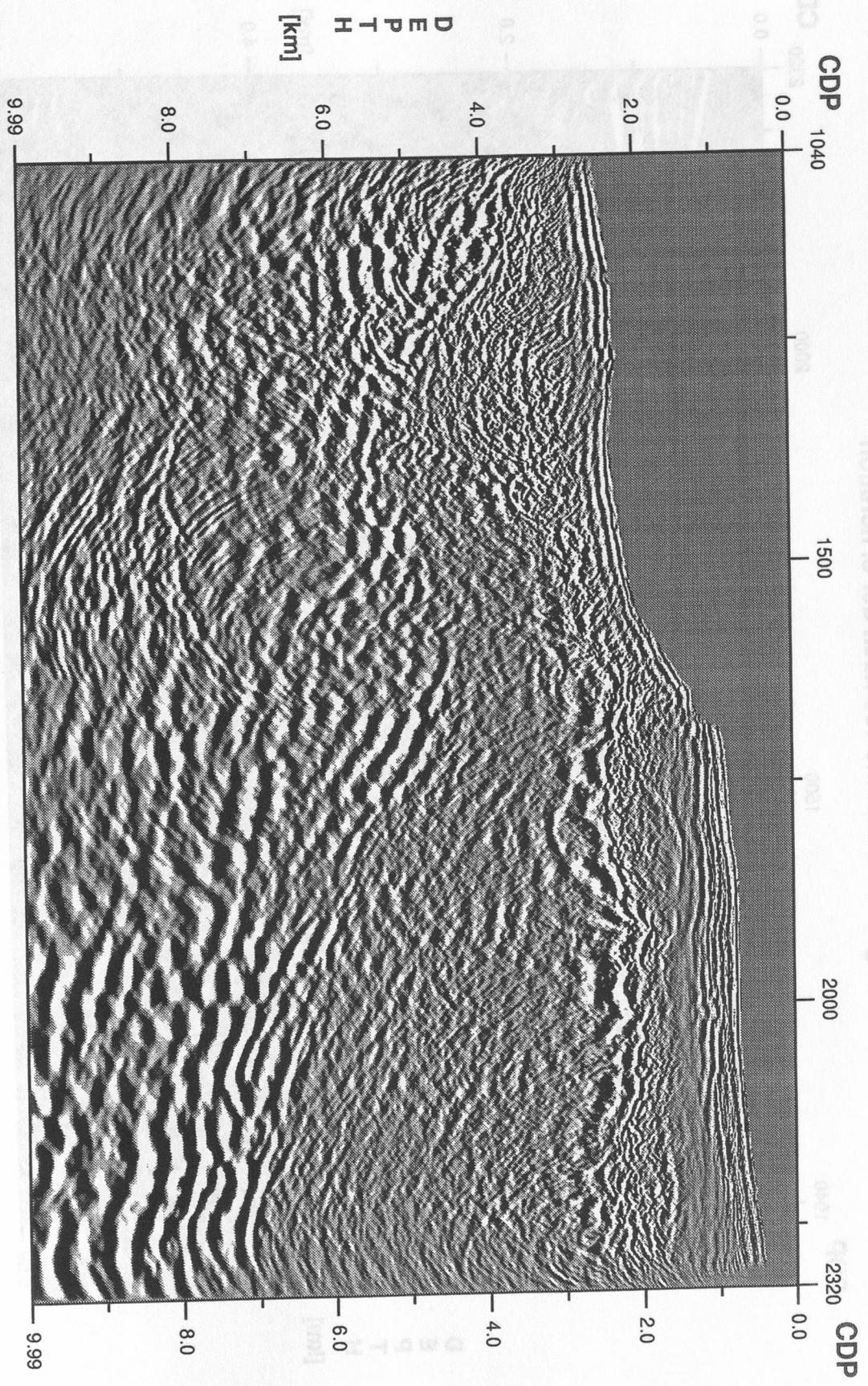


Abb. 25: Tiefenmigration der Inline 199 nach der 3. Iteration

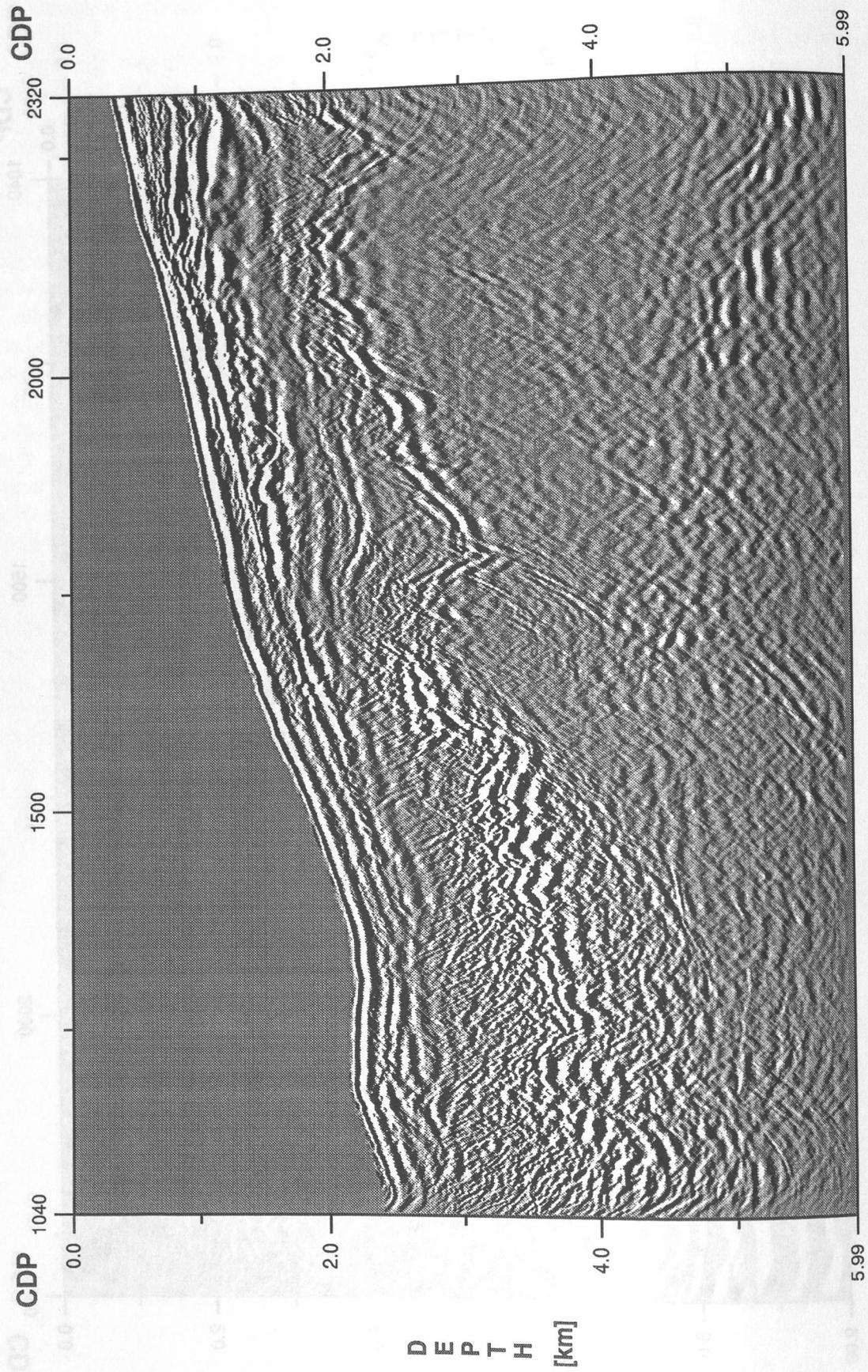


Abb. 26: Tiefenmigration der Inline 199 nach der 5. Iteration

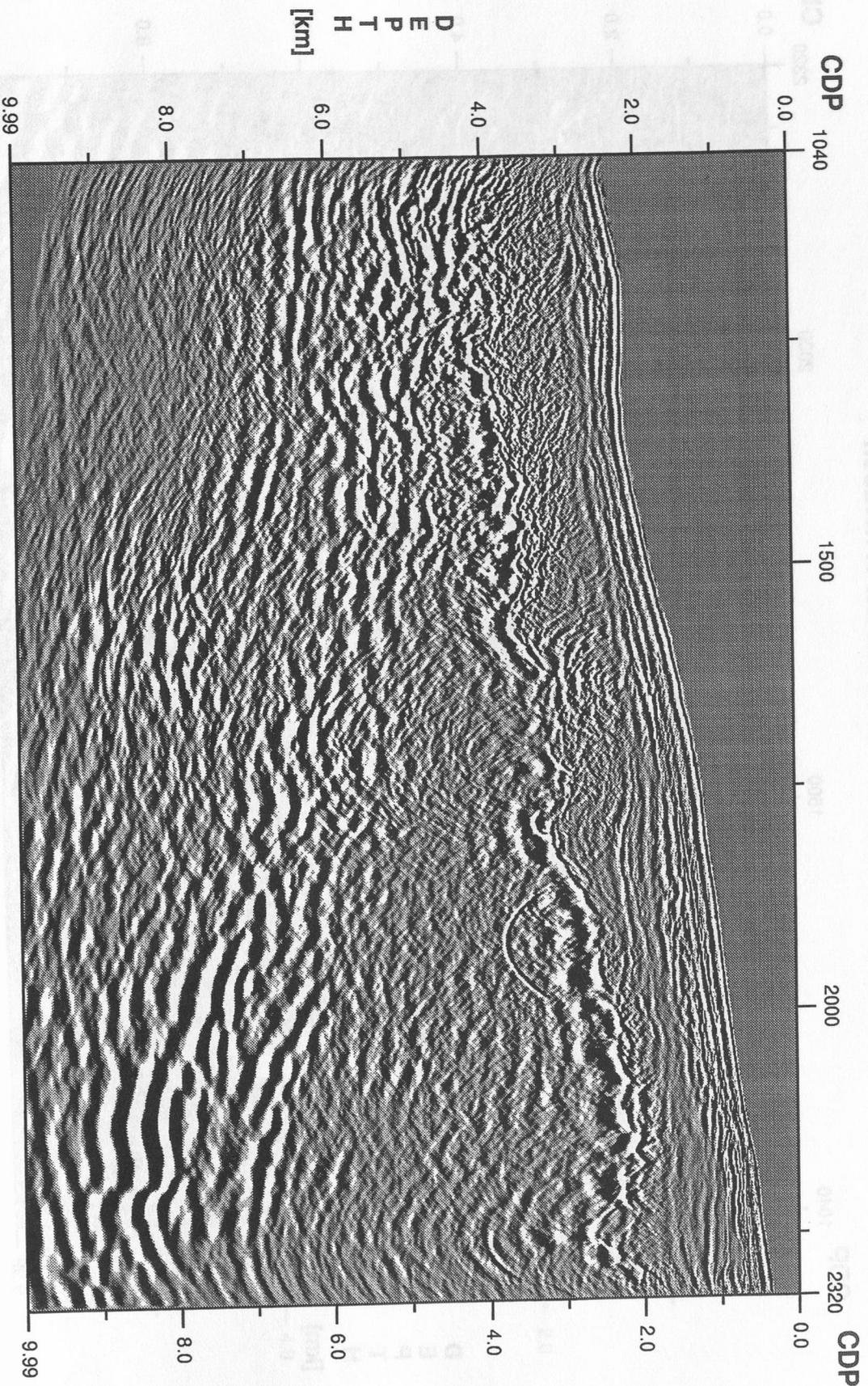


Abb. 27: Tiefenmigration der Inline 199 nach der 7. Iteration

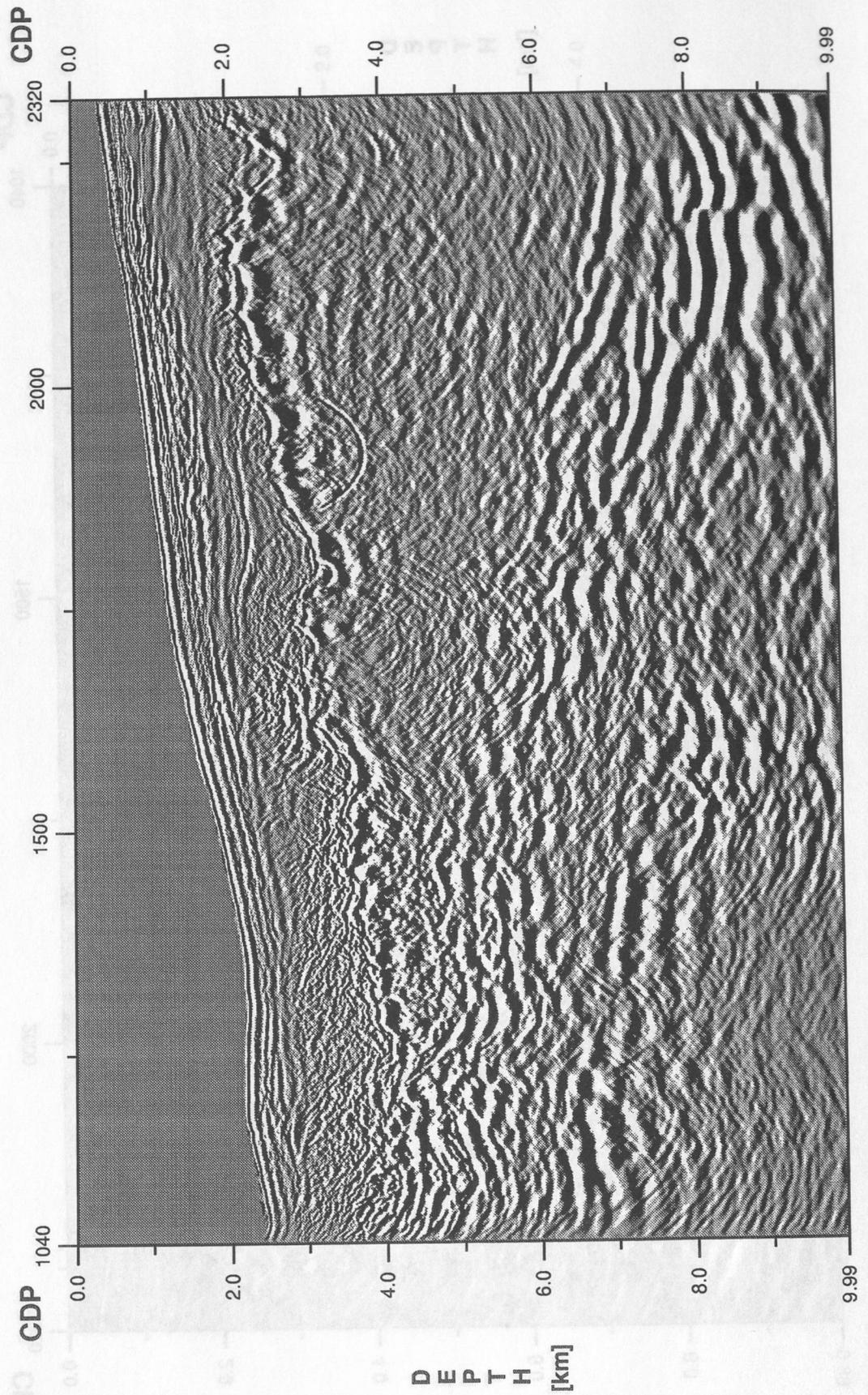


Abb. 28: Tiefenmigration der Inline 255 nach der 3. Iteration

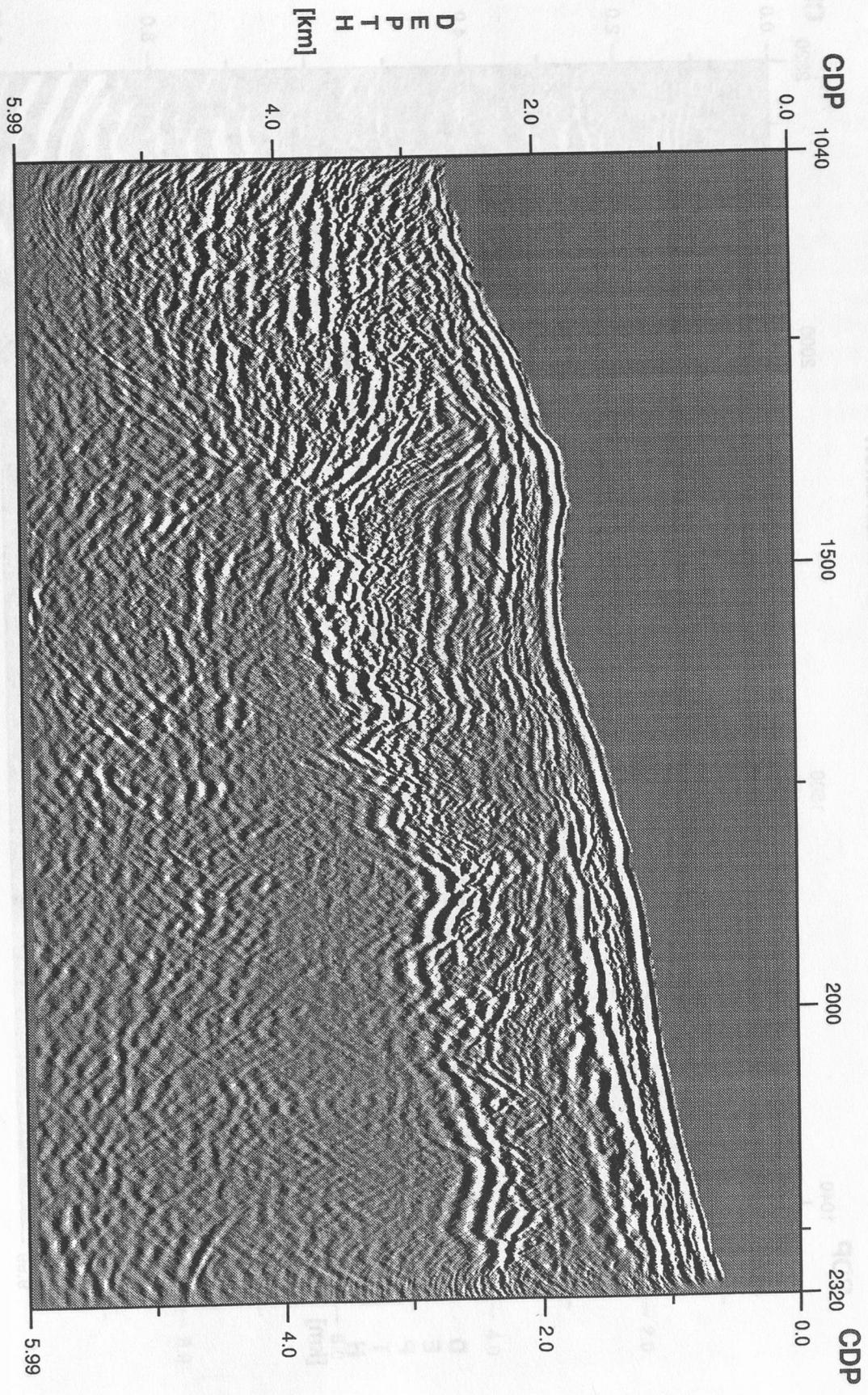


Abb. 29: Tiefenmigration der Inline 255 nach der 5. Iteration

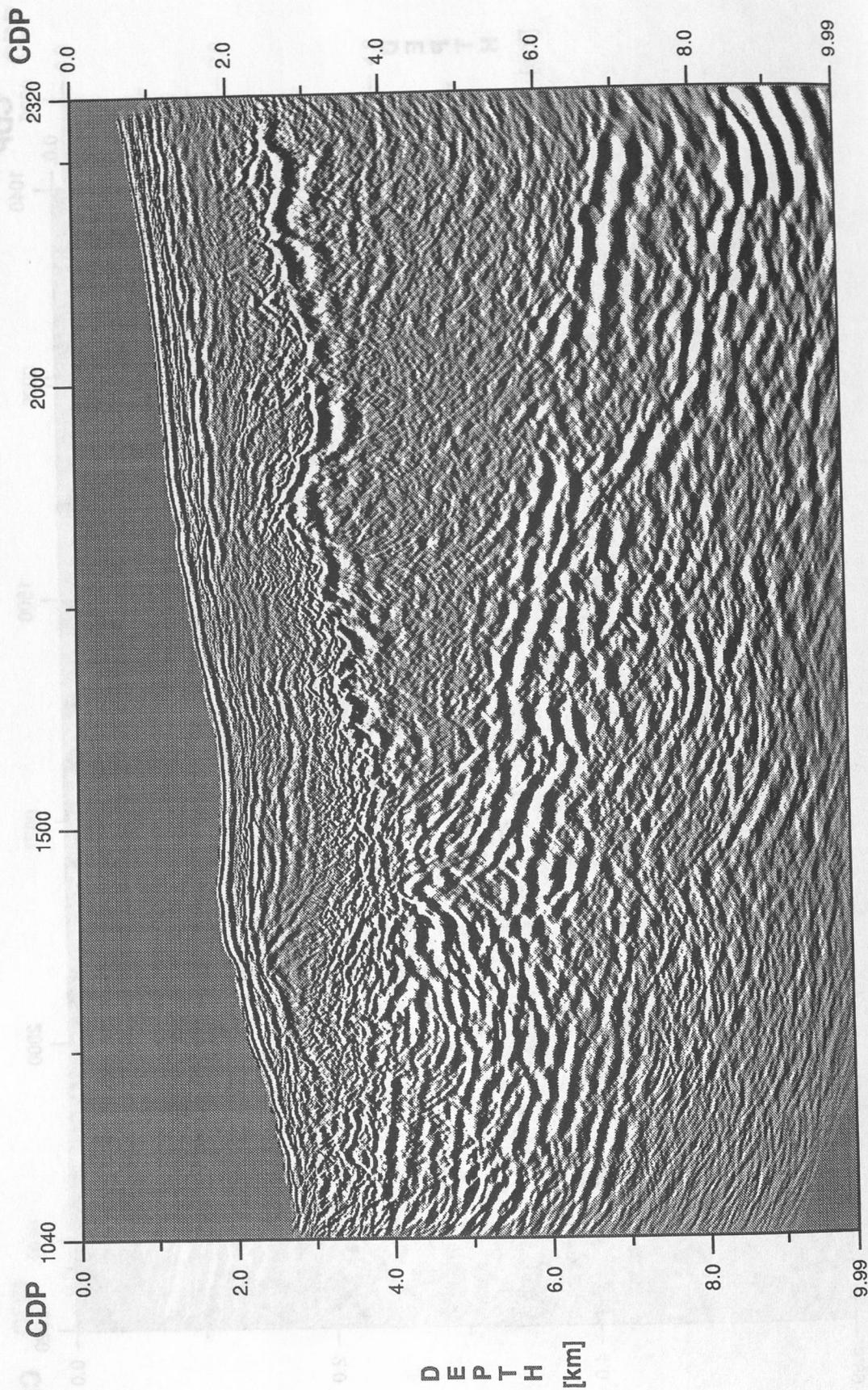
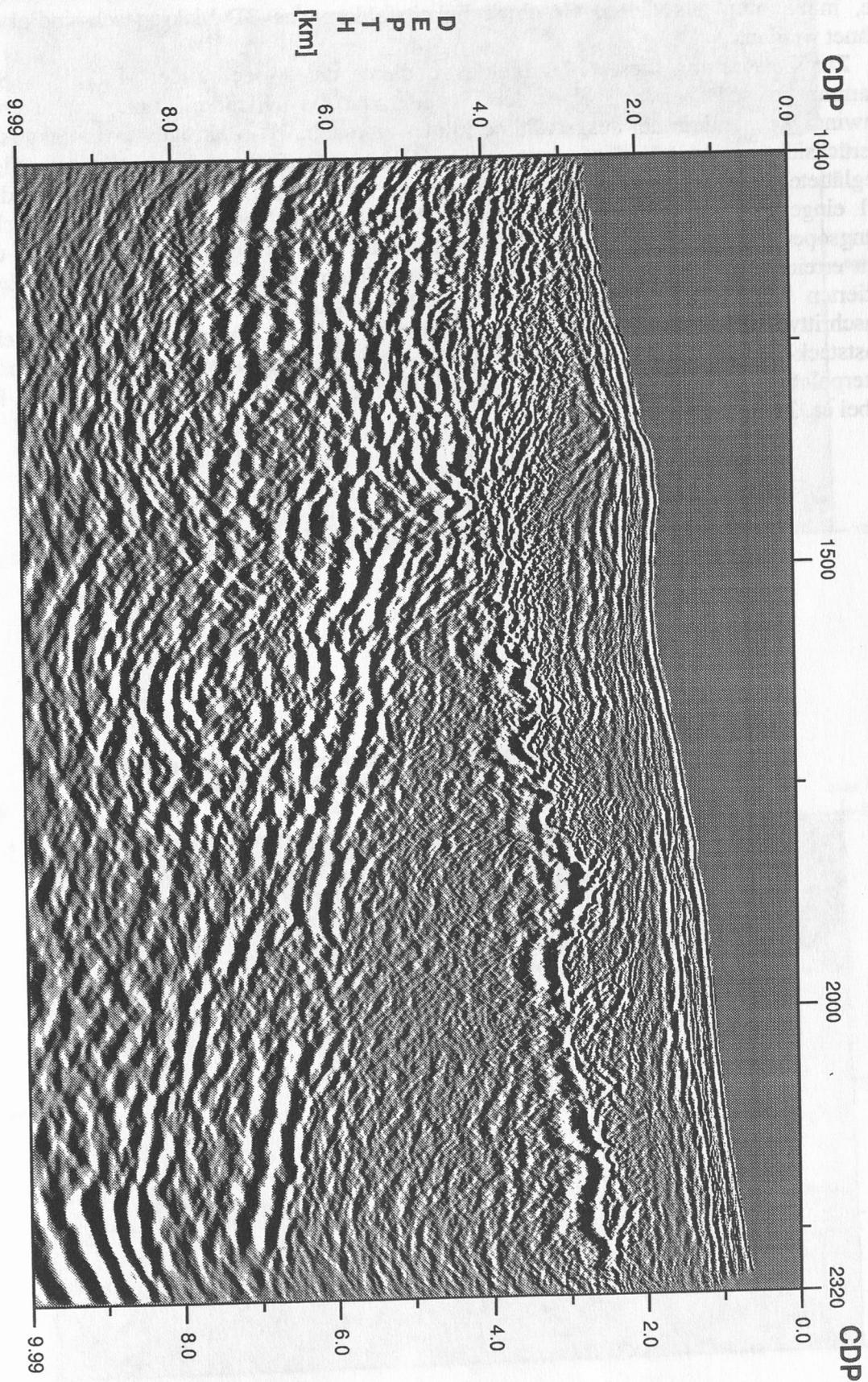


Abb. 30: Tiefenmigration der Inline 255 nach der 7. Iteration



### 3.2.3 Der Sirius 3D-Velocity-Modelbuilder

Nachdem für alle ausgewählten Inlines jeweils ein 2D-Geschwindigkeitsmodell erzeugt wurde, mußte nun aus diesen Geschwindigkeitsfeldern das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B berechnet werden.

Zur Generierung dieses Makrofeldes B diente das Modelbuilder-Modul des Sirius 3D-Programmpaketes. Dabei interpoliert der Modelbuilder die fehlenden Inlines zwischen den 2D-Geschwindigkeitsfeldern der ausgewählten Inlines zu einem 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld unter der Berücksichtigung des Verlaufs der einzelnen Horizonte. Für die spätere Poststack-Migration ist ein geglättetes Makrogeschwindigkeitsfeld wichtig. Eine solche Glättung kann im Modelbuilder-Modul eingestellt und durchgeführt werden. Verschiedene Tests mit unterschiedlich starken Glättungsoperatoren zeigten, daß ein Glättungsoperator von mittlerer Stärke ausreicht, um dieses Ziel zu erreichen (Abb. 31a/b, 32a/b, 33a/b). Nach Interpolation und Glättung des Makrofeldes exportierten wir das neu generierte Makrogeschwindigkeitsfeld B im Segy-Format mit einer Tiefenschrittweite von 30 m und bis in eine Tiefe von 8010 m, um mit diesem die anschließende 3D-Poststack-Tiefenmigration durchzuführen. Die Rechenzeiten, die der Sirius 3D-Modelbuilder für Interpolation, Glättung und Export des Makrofeldes B benötigt hat, waren relativ klein und lagen bei ca. 2 h.

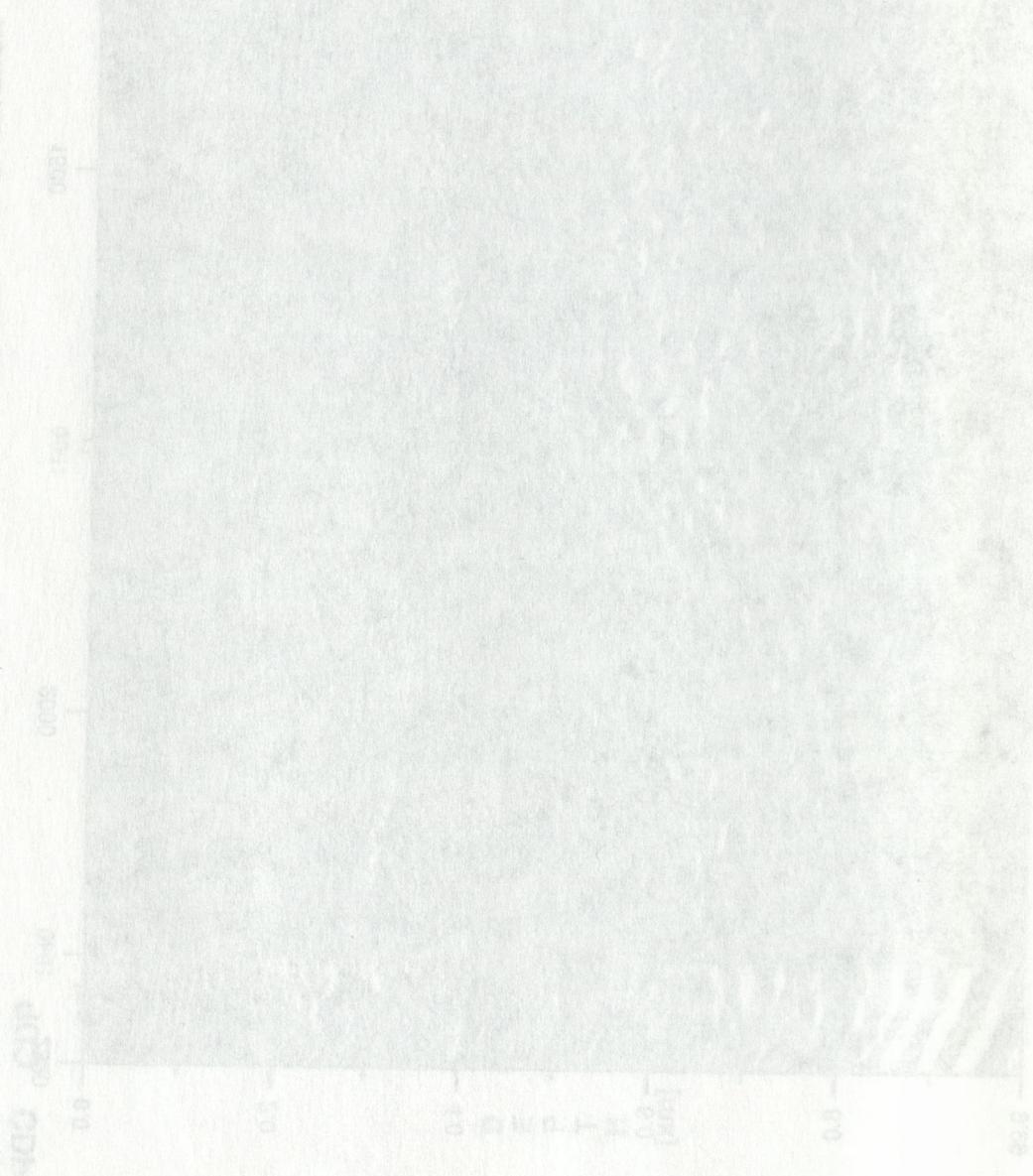


Abb. 31a: Inline 129 nach Anwendung eines Glättungsoperators mittlerer Stärke auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

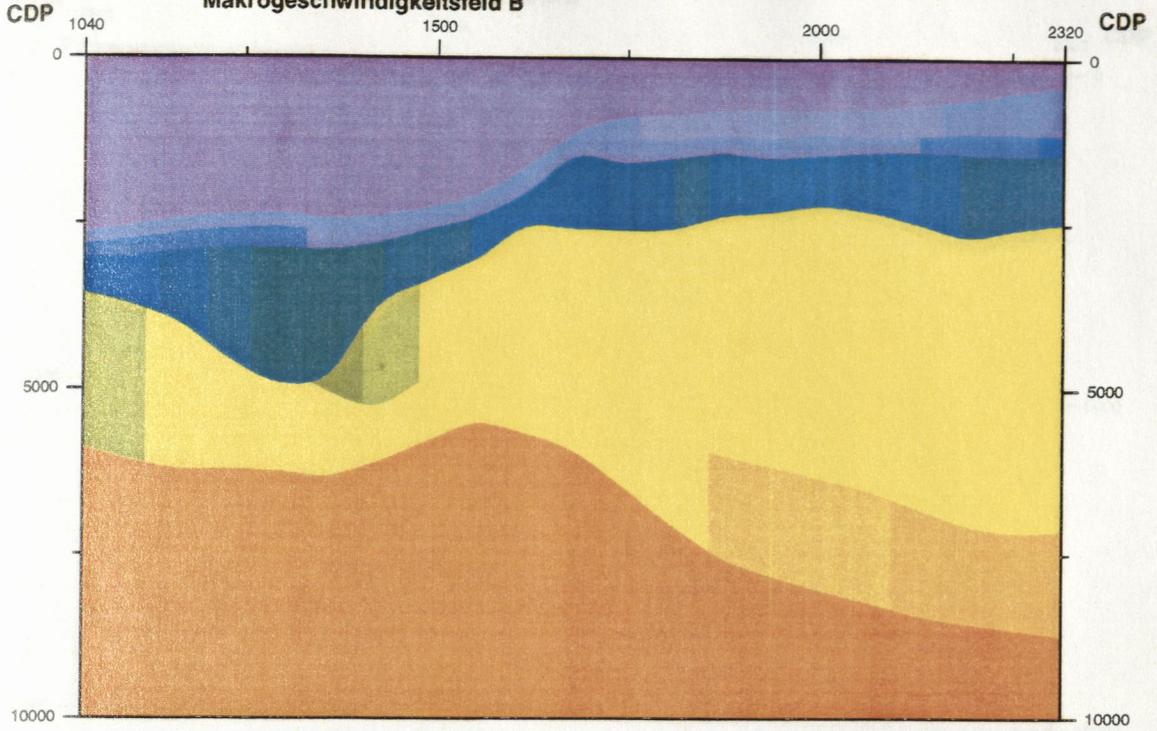


Abb. 31b: Inline 199 nach Anwendung eines Glättungsoperators mittlerer Stärke auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

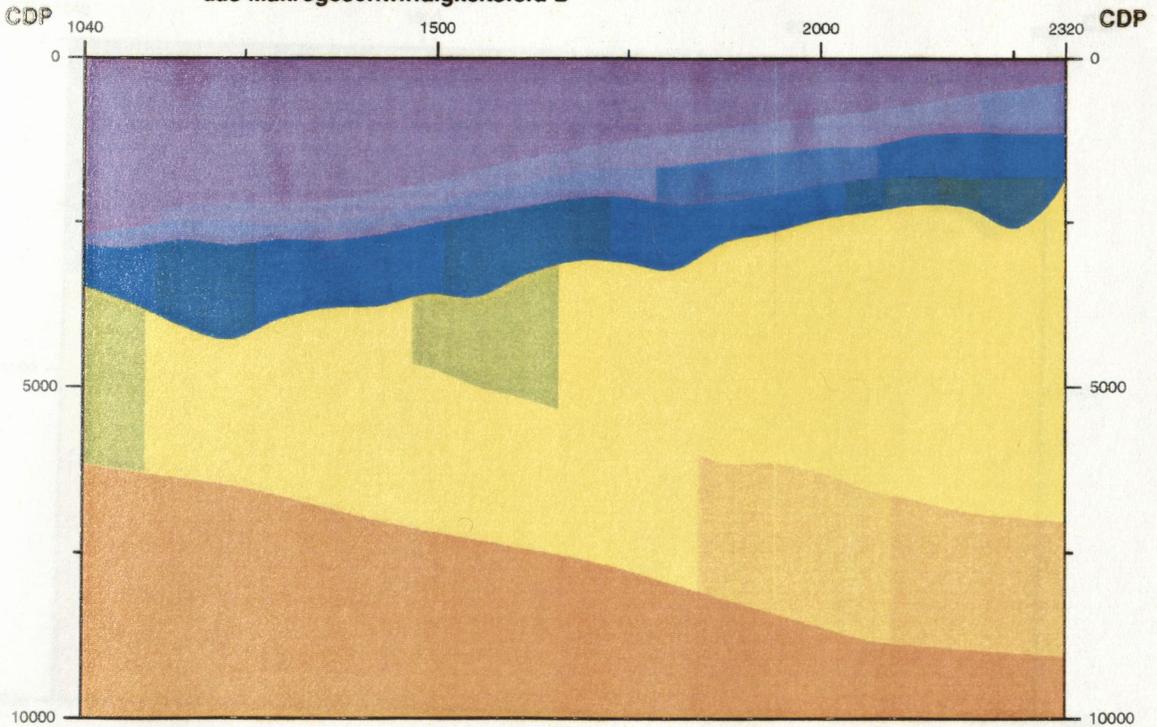


Abb. 32a: Inline 129 nach Anwendung eines Glättungsoperators schwacher Stärke auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

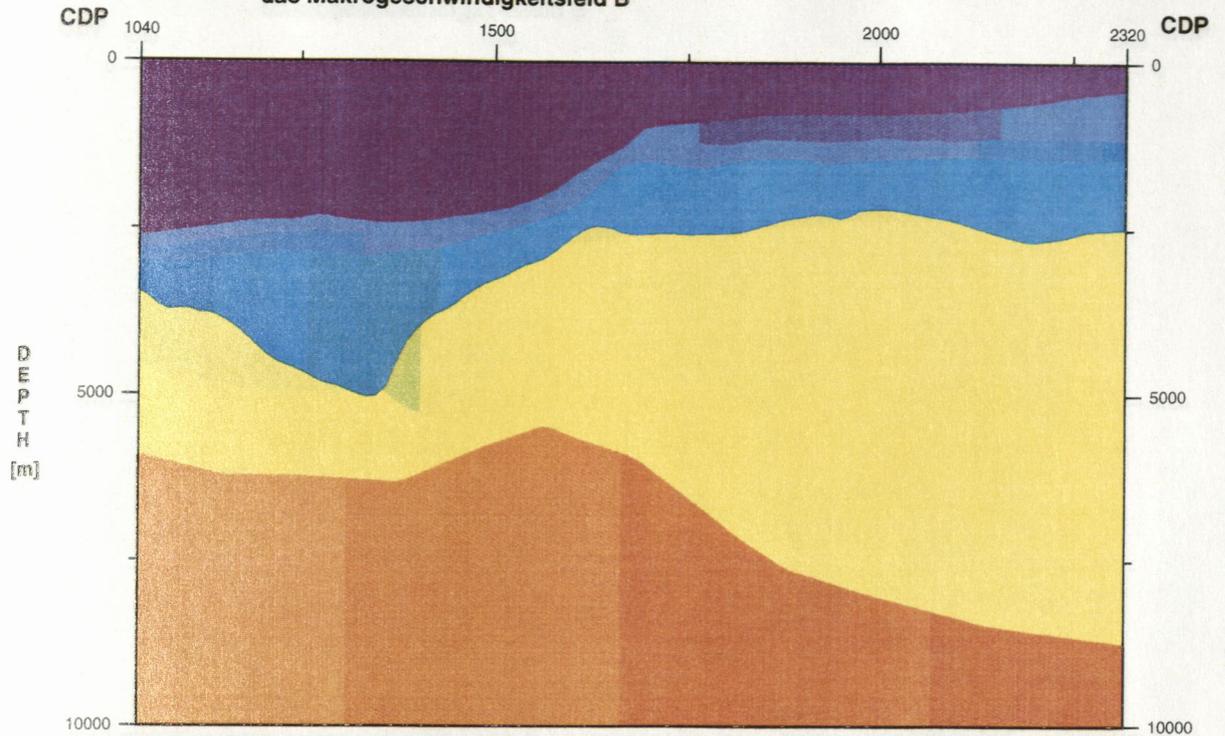


Abb. 32b: Inline 199 nach Anwendung eines Glättungsoperators schwacher Stärke auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

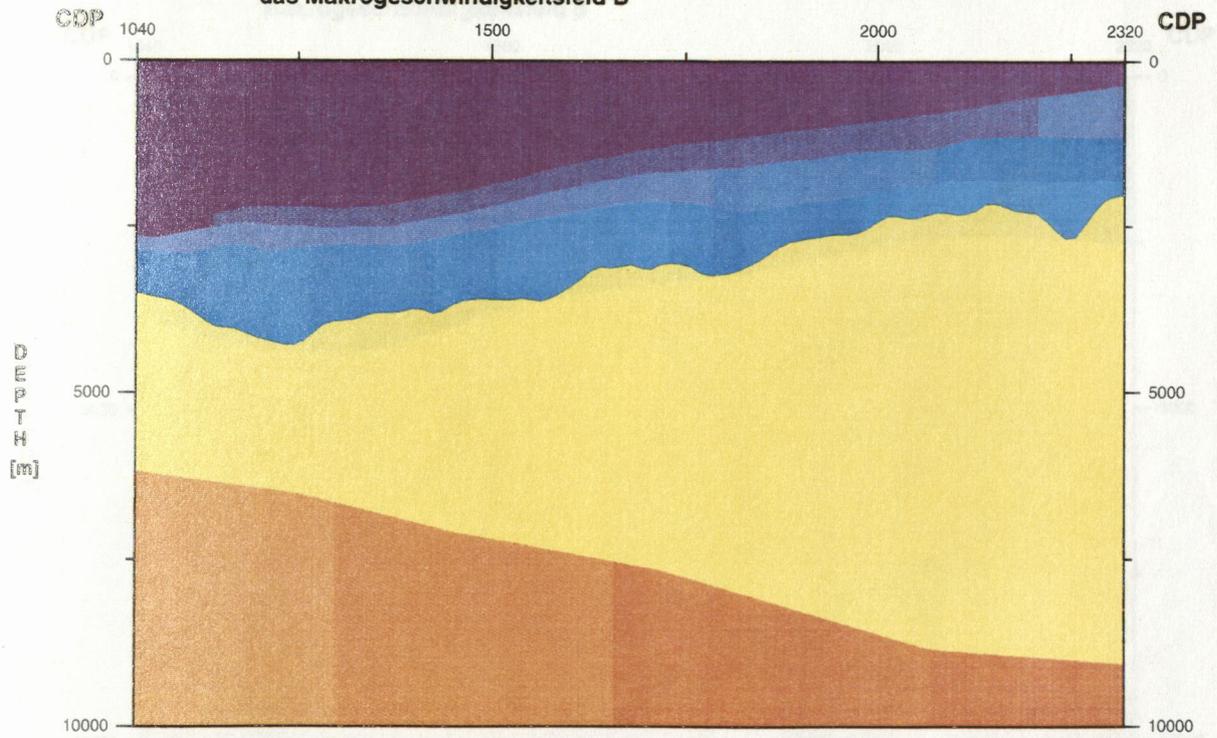


Abb. 33a: Inline 129 nach Anwendung eines starken Glättungsoperators auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

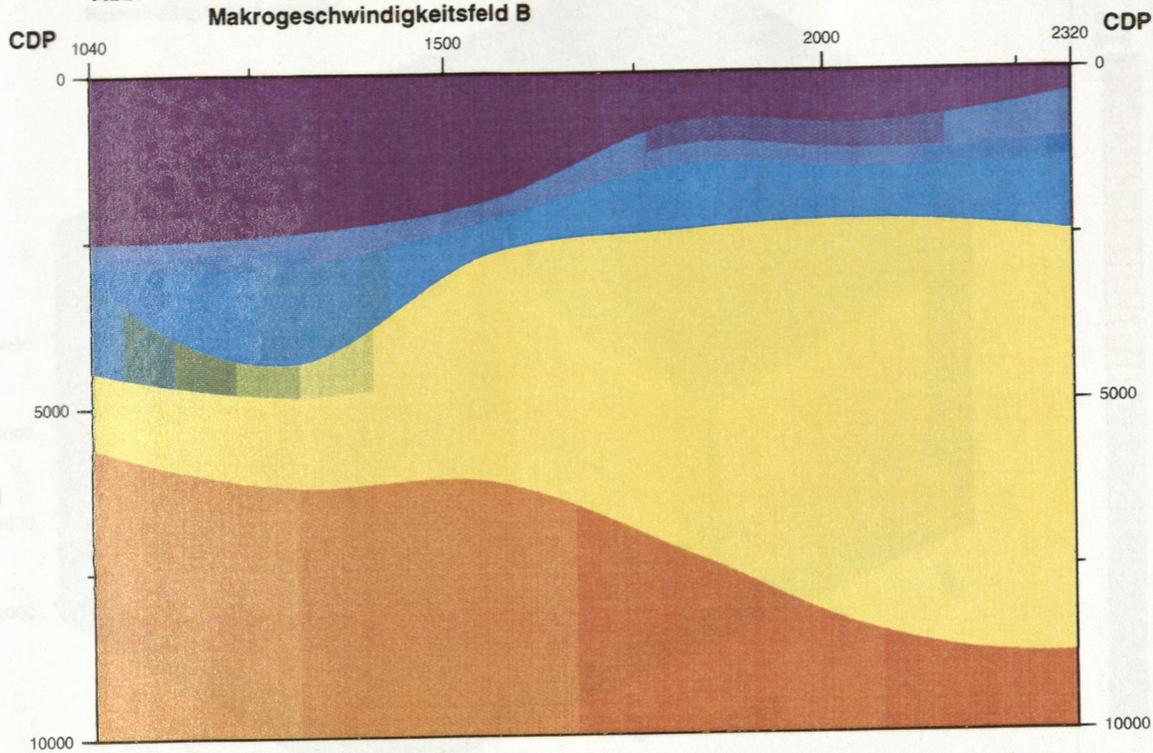


Abb. 33b: Inline 199 nach Anwendung eines starken Glättungsoperators auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

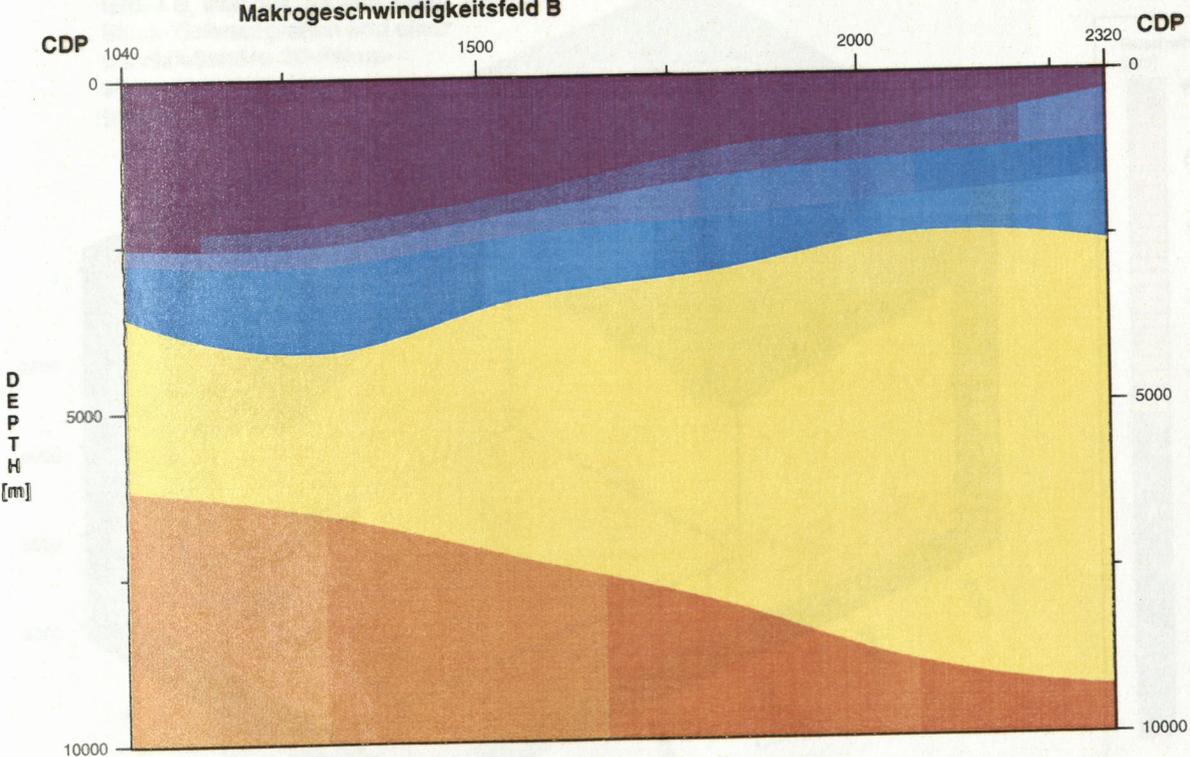


Abb. 33a: Inline 129 nach Anwendung eines starken Glättungsoperators auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

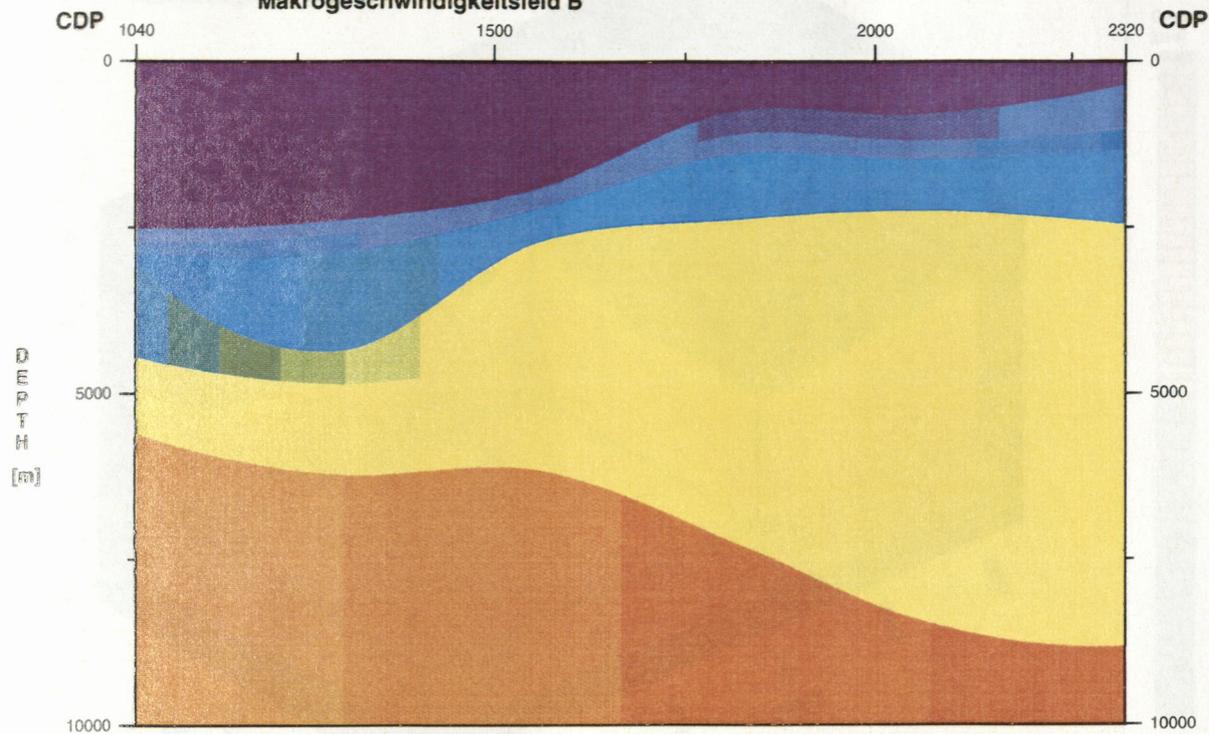


Abb. 33b: Inline 199 nach Anwendung eines starken Glättungsoperators auf das Makrogeschwindigkeitsfeld B

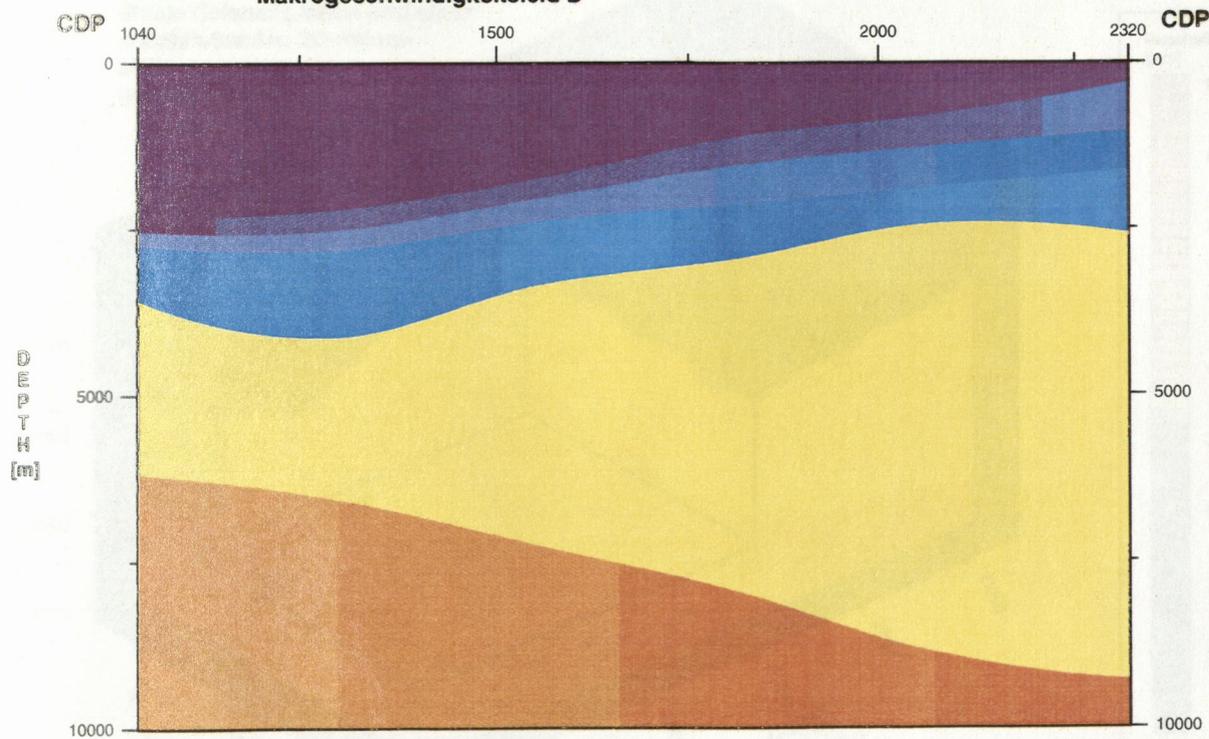


Abb. 34: 3D-Darstellung des Makrogeschwindigkeitsfeldes A, welches aus Stapelgeschwindigkeiten abgeleitet wurde.

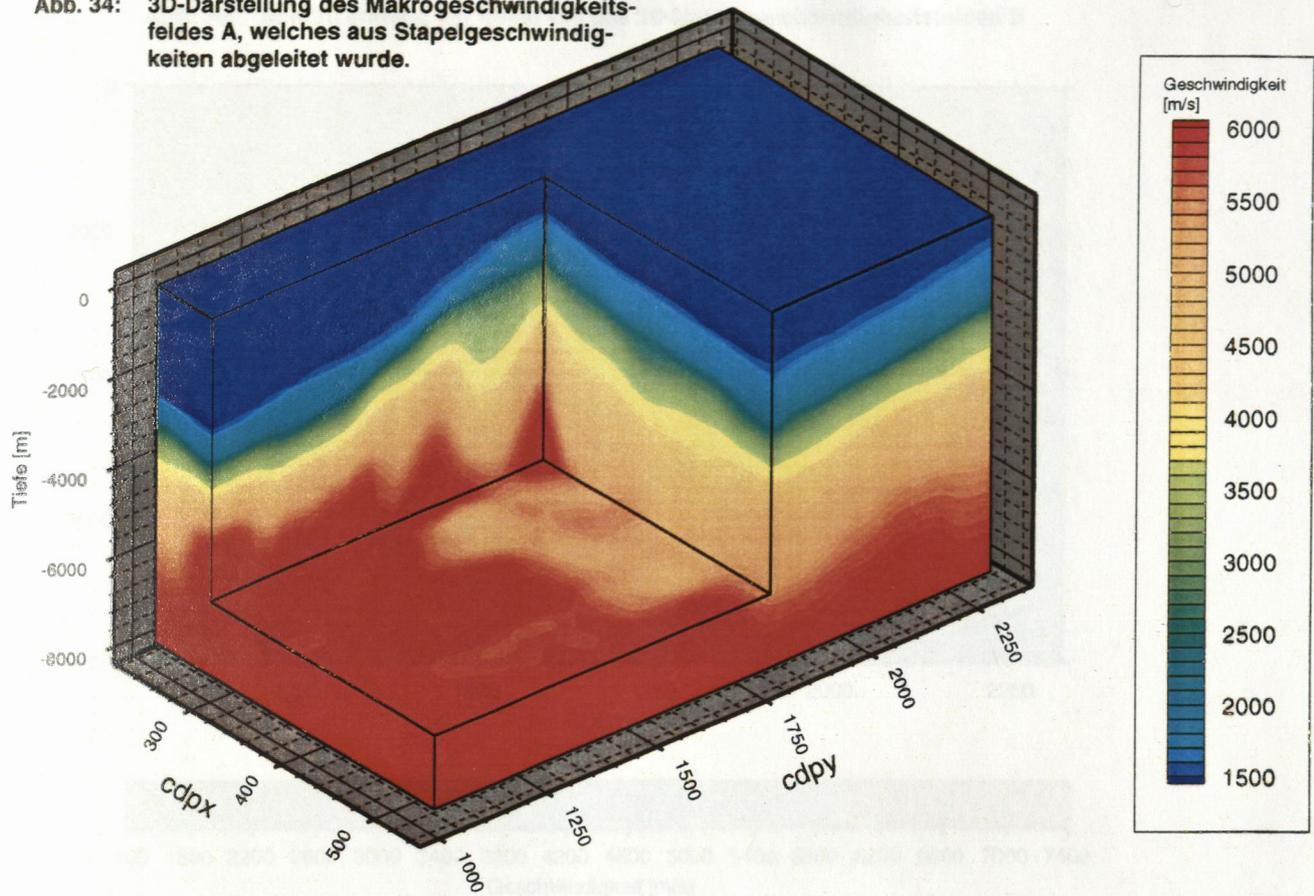
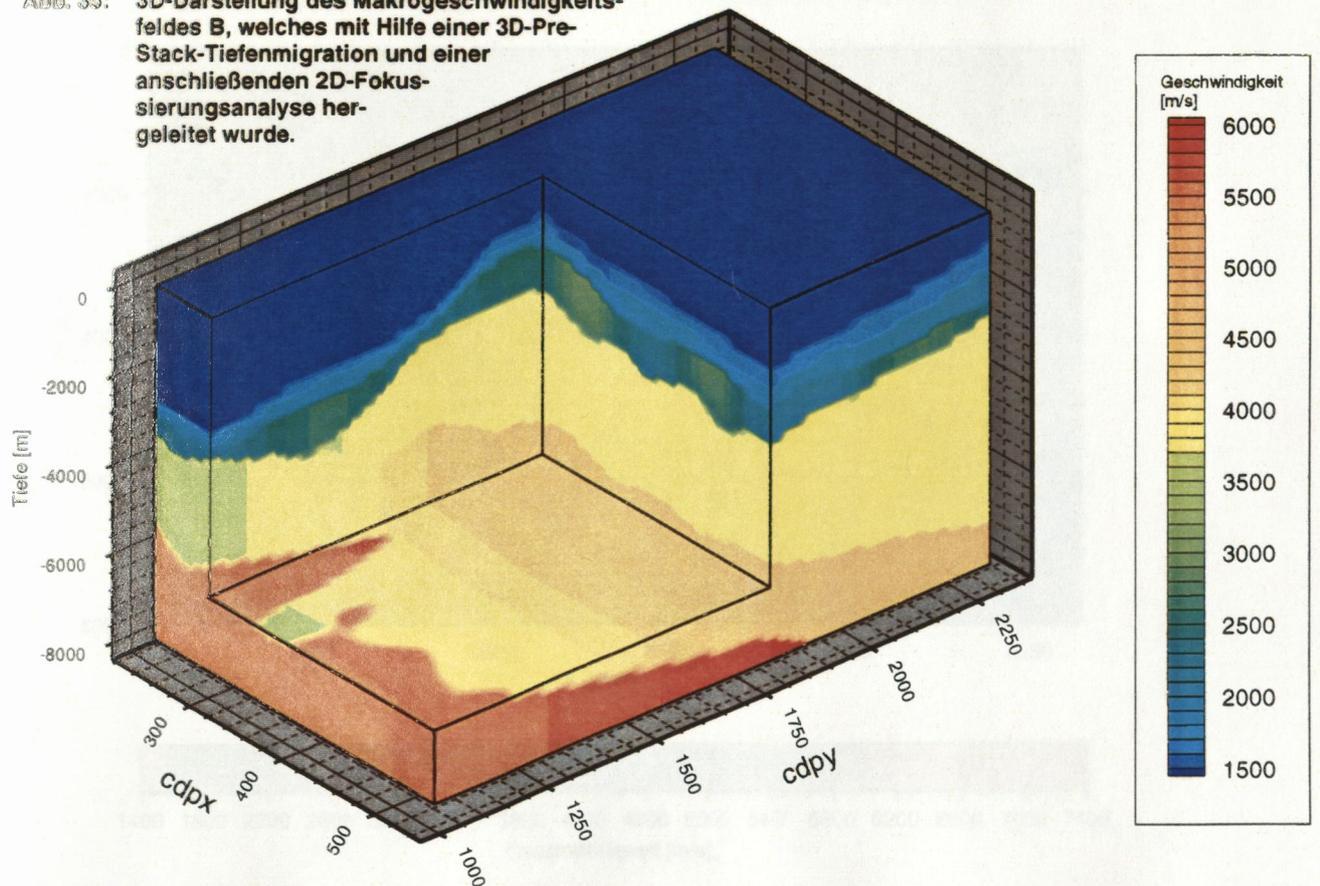
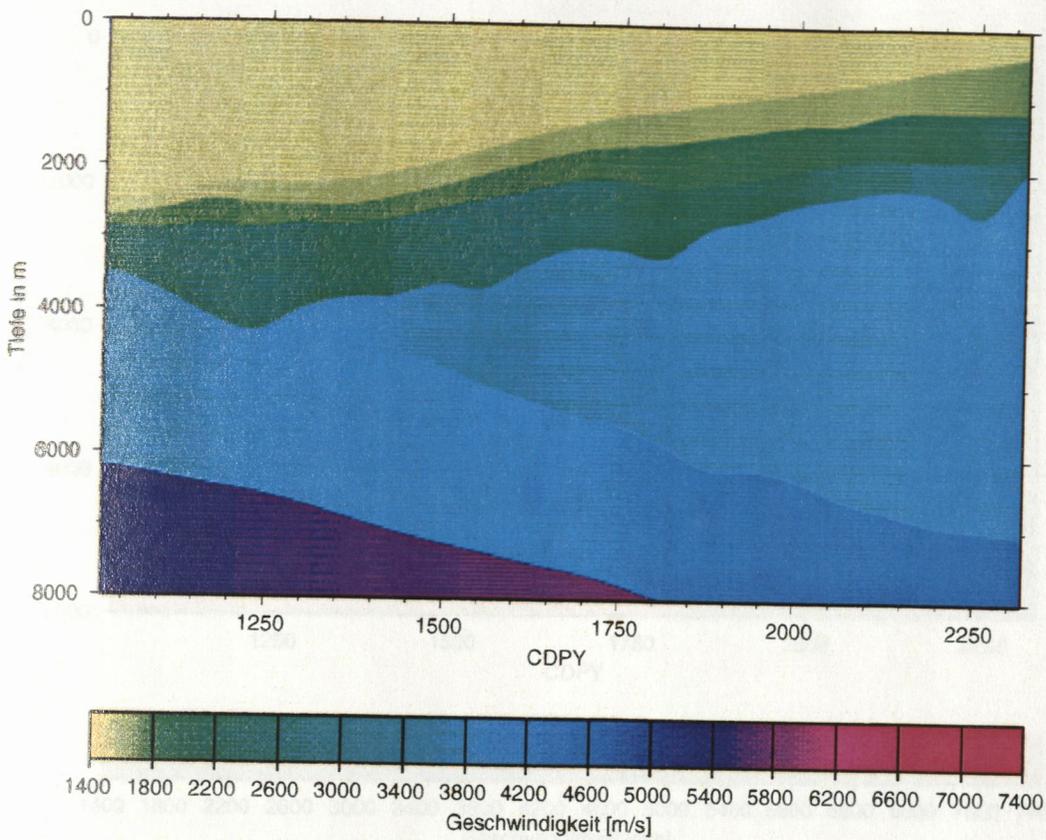


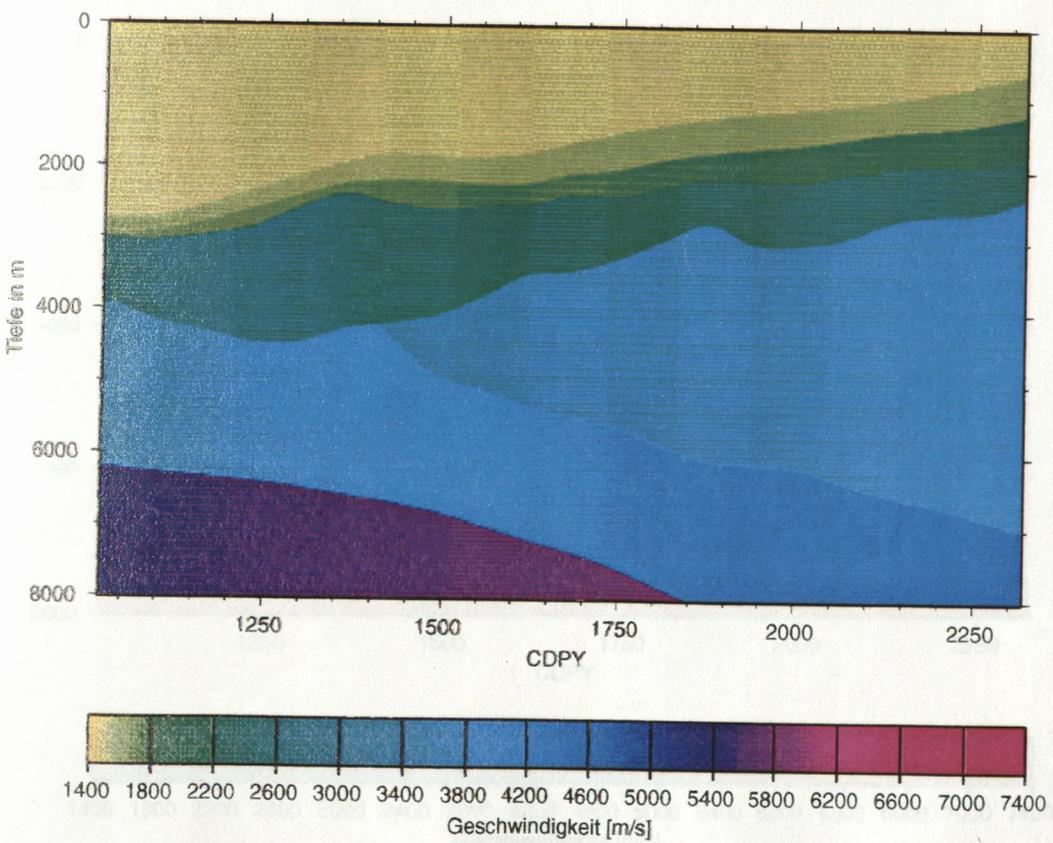
Abb. 35: 3D-Darstellung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B, welches mit Hilfe einer 3D-Pre-Stack-Tiefenmigration und einer anschließenden 2D-Fokussierungsanalyse hergeleitet wurde.



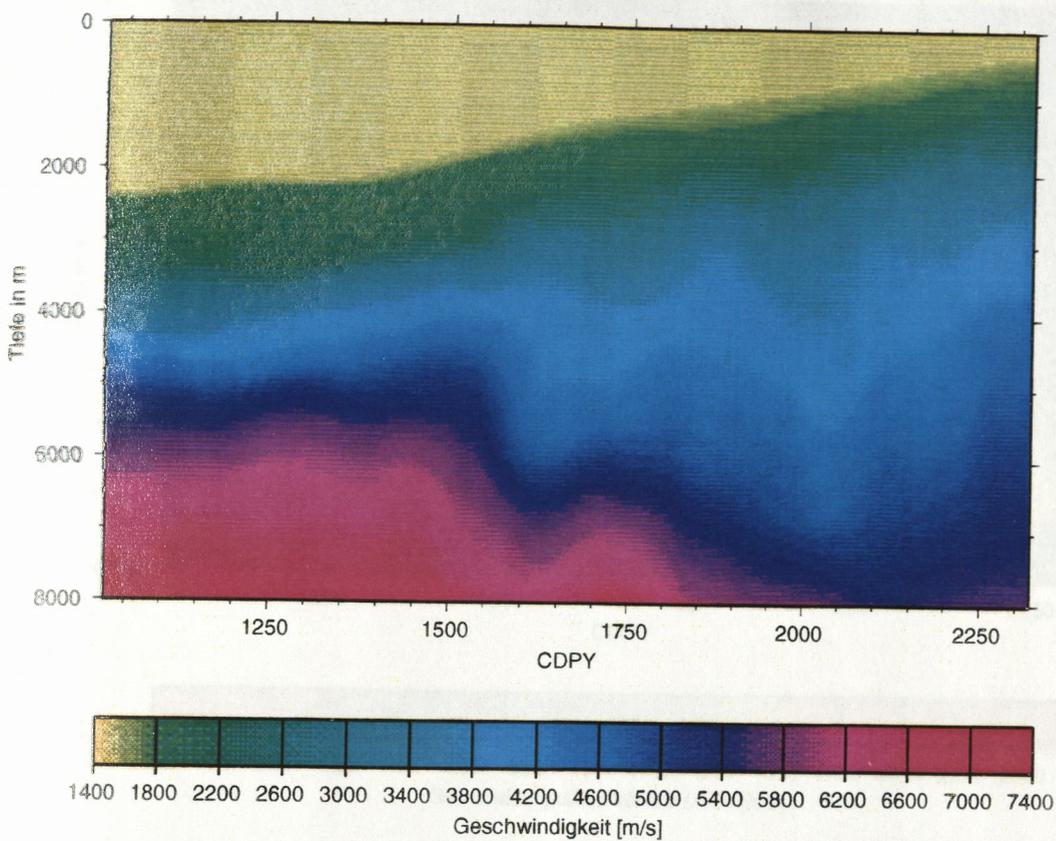
**Abb. 36: Schnitt entlang der Inline 400 des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes B**



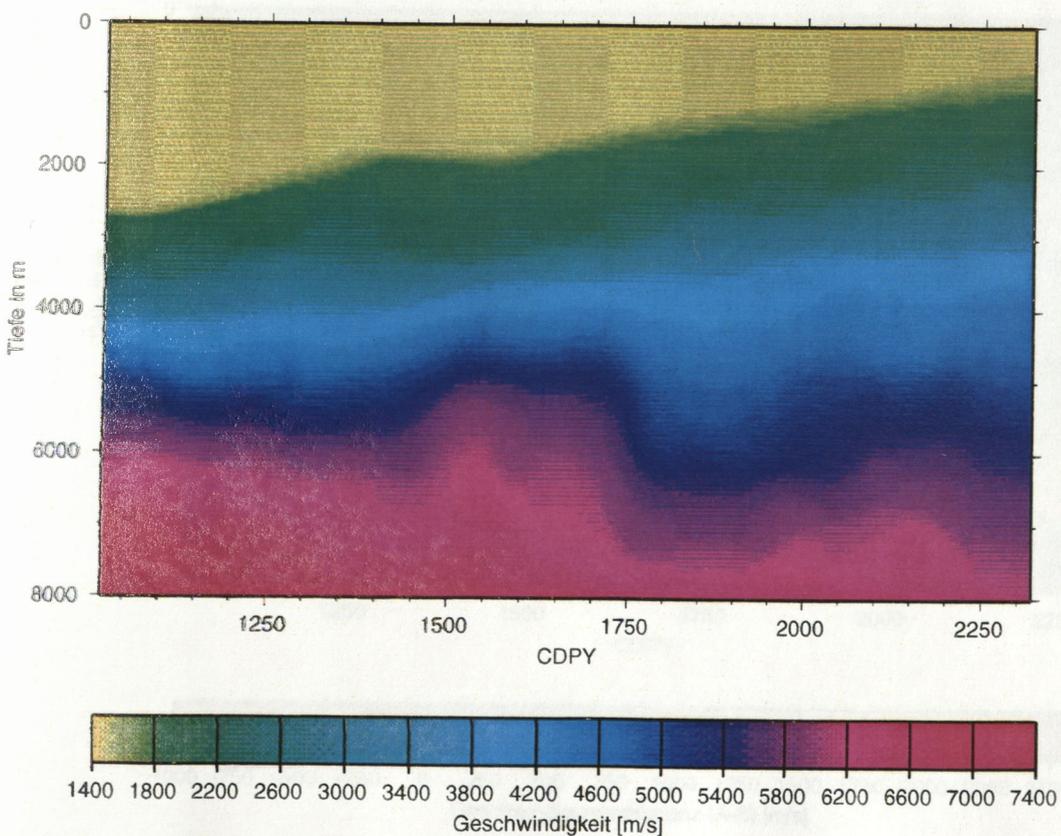
**Abb. 37: Schnitt entlang der Inline 514 des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes B**



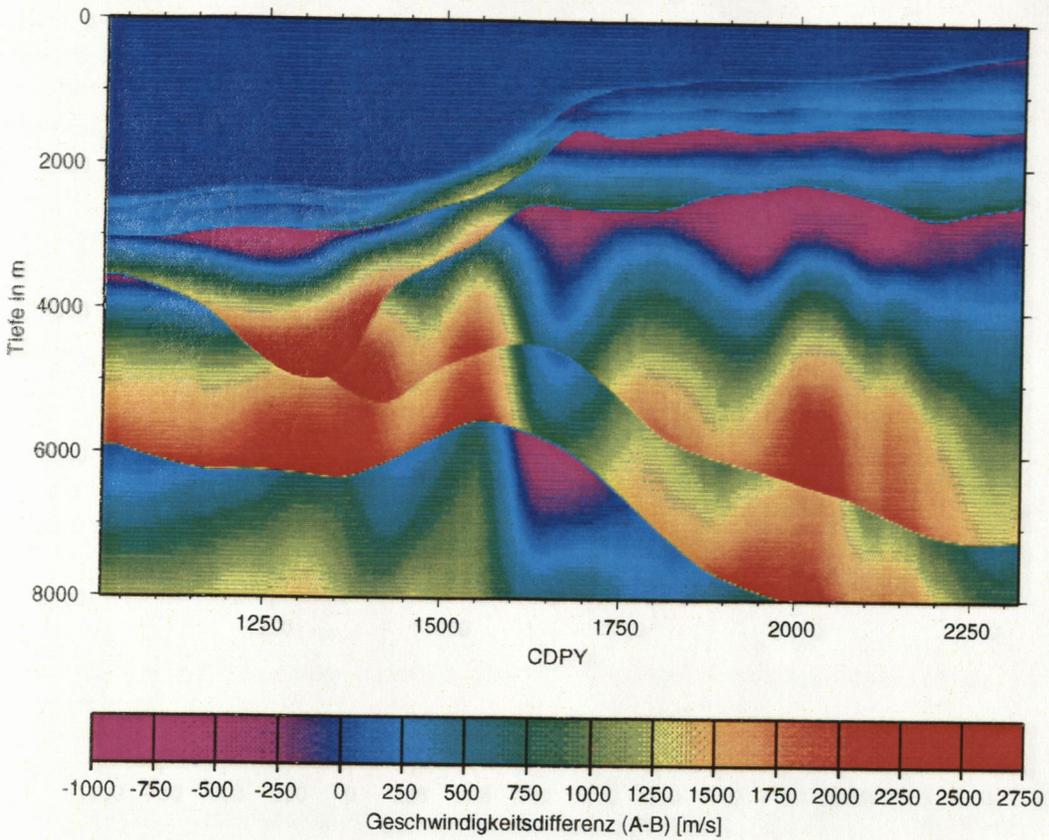
**Abb. 38: Schnitt entlang der Inline 400 des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes A**



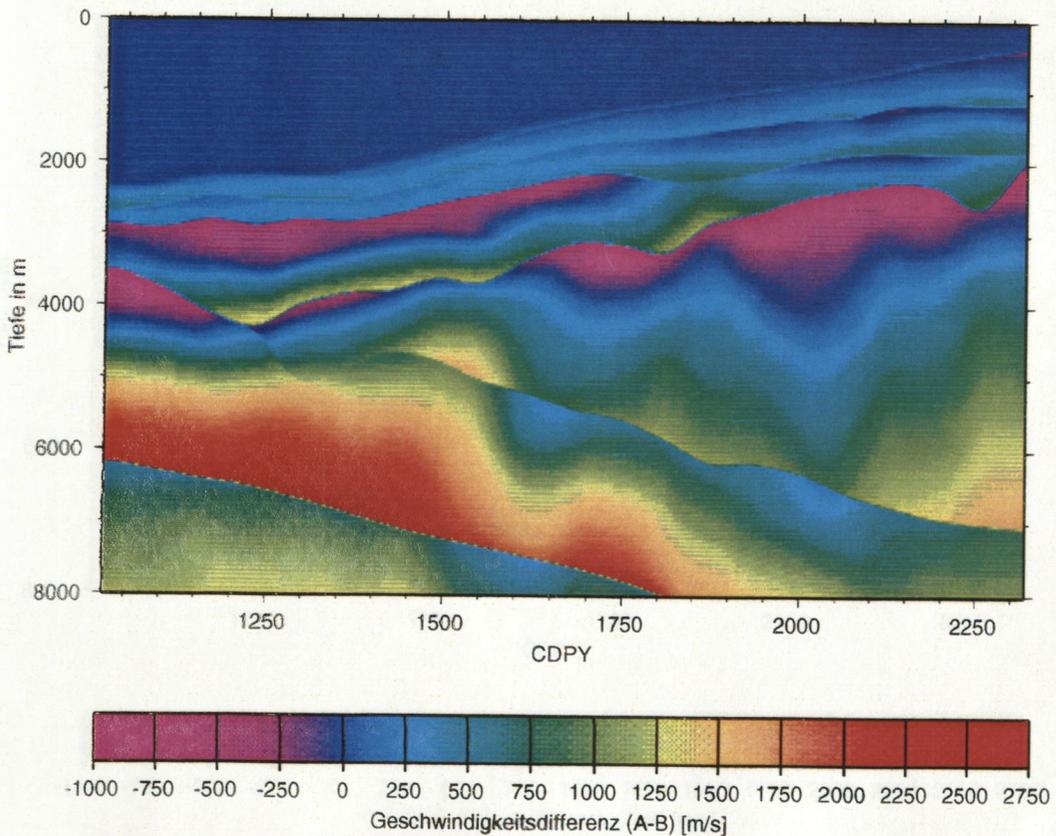
**Abb. 39: Schnitt entlang der Inline 514 des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes A**



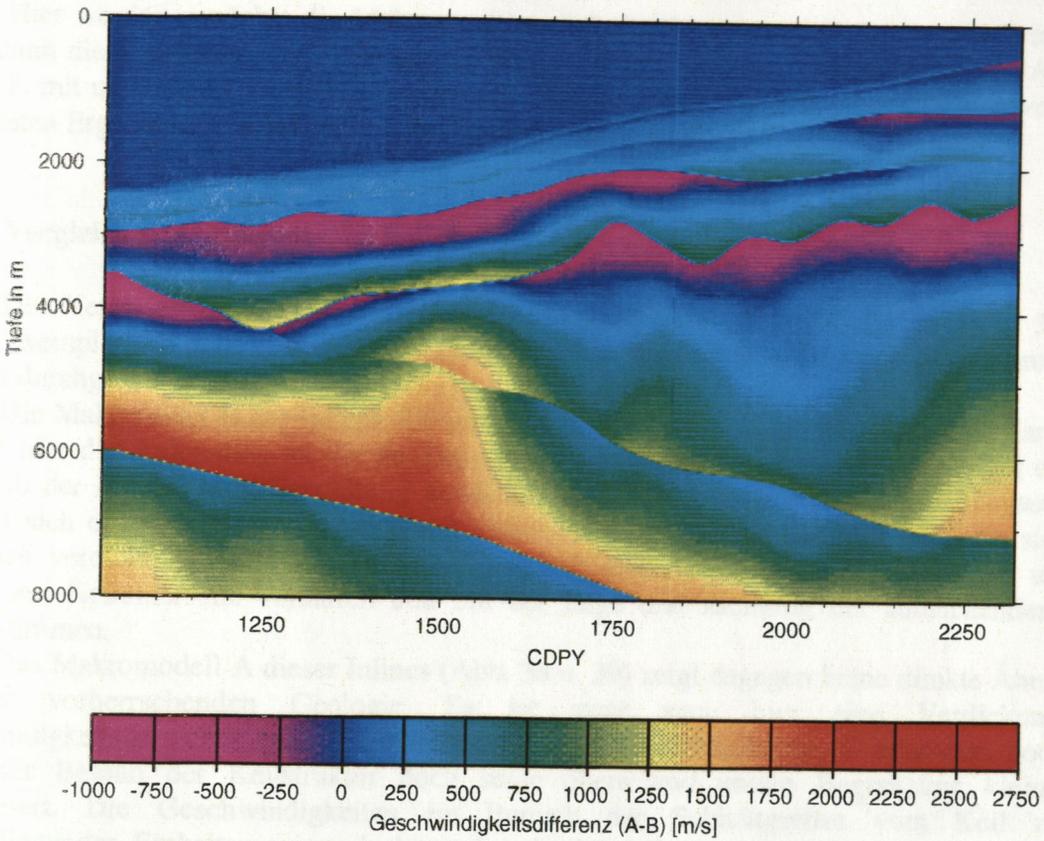
**Abb. 40: Absolute Geschwindigkeitsdifferenz der Makrogeschwindigkeitsfelder (A minus B) für die Inline 258**



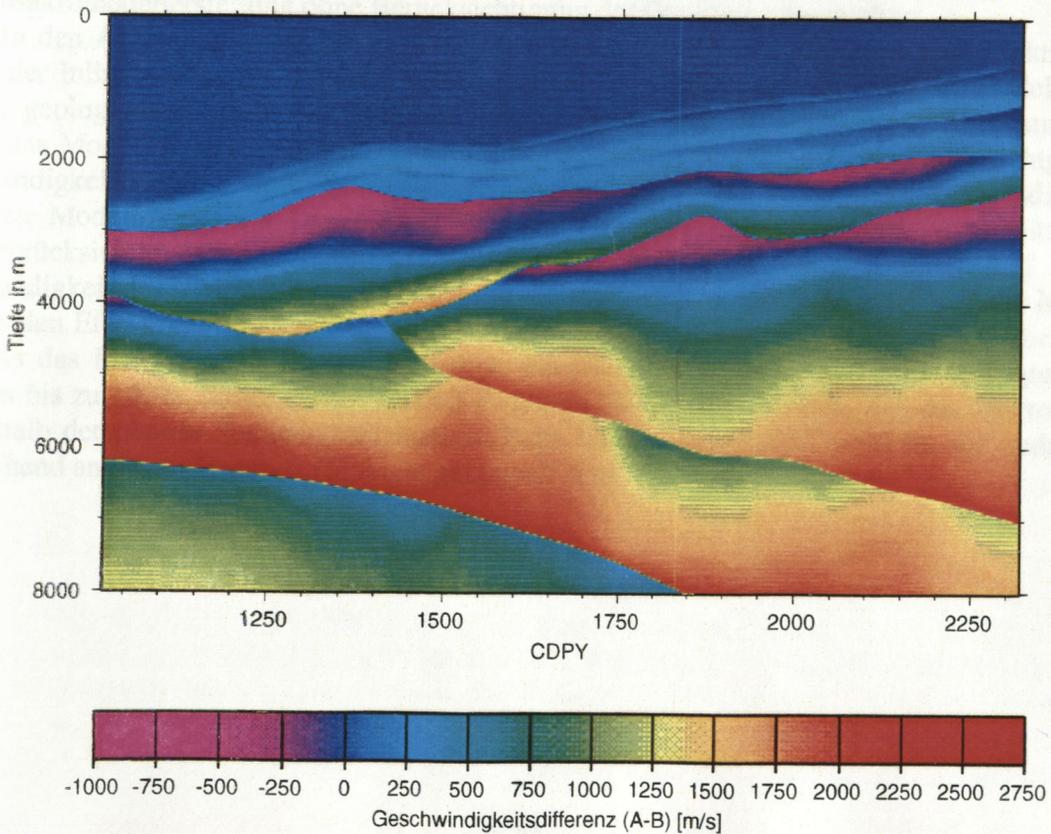
**Abb. 41: Absolute Geschwindigkeitsdifferenz der Makrogeschwindigkeitsfelder (A minus B) für die Inline 400**

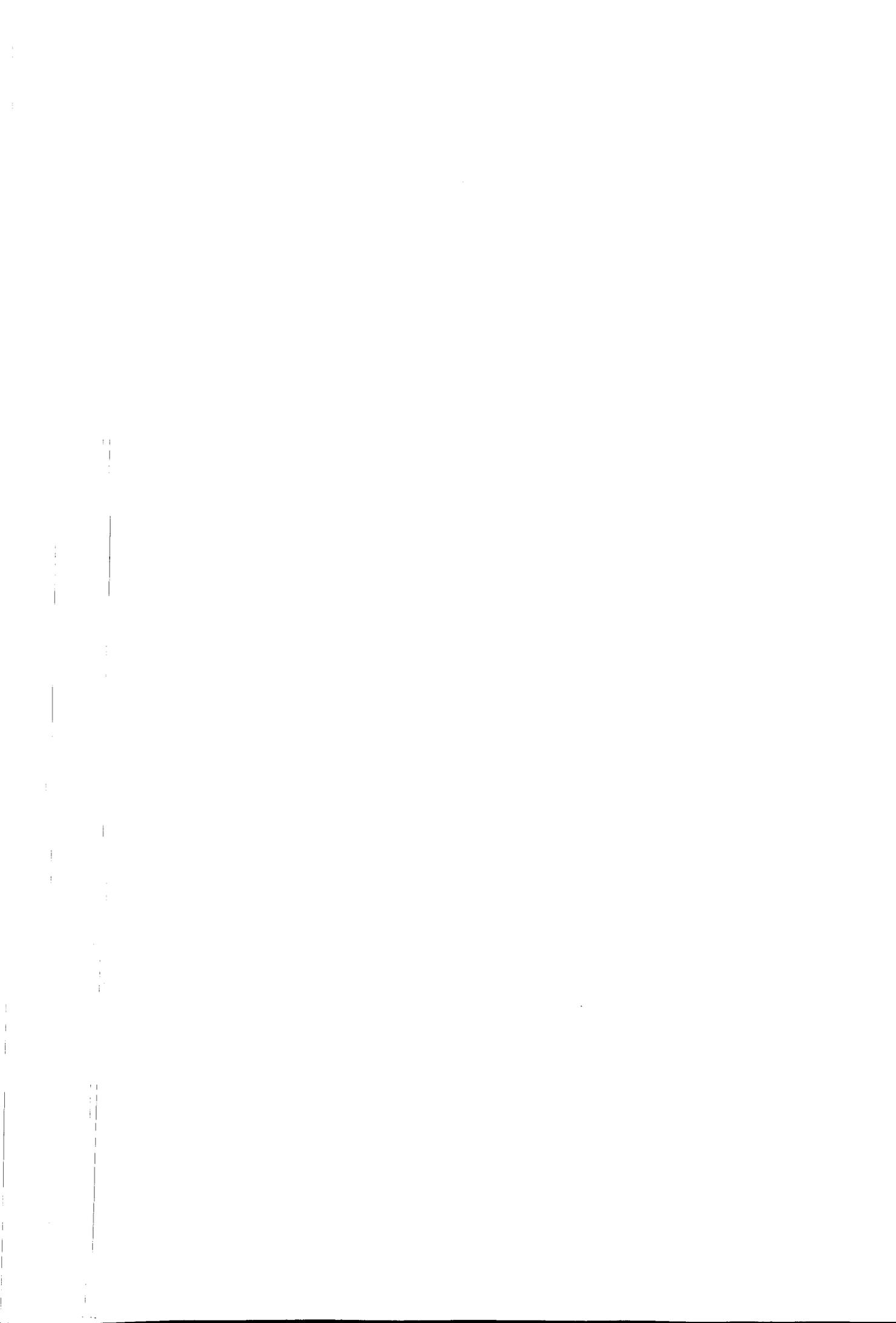


**Abb. 42: Absolute Geschwindigkeitsdifferenz der Makrogeschwindigkeitsfelder (A minus B) für die Inline 450**



**Abb. 43: Absolute Geschwindigkeitsdifferenz der Makrogeschwindigkeitsfelder (A minus B) für die Inline 514**





### 3.3 Darstellung der Ergebnisse

Hier werden zunächst die Makrogeschwindigkeitsfelder A und B miteinander verglichen, bevor dann die Ergebnisse der 3D-Poststack Migration mit Makrogeschwindigkeitsfeld A bzw. B und z. T. mit unterschiedlichen Migrationsverfahren vorgestellt werden. Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse im Abschnitt 3.3.4 noch einmal zusammengefaßt.

#### 3.3.1 Vergleich der Makrogeschwindigkeitsfelder A und B

Der Vergleich der beiden Makrogeschwindigkeitsfelder A und B (Abb. 34 u. 35) wird jeweils exemplarisch an den Geschwindigkeitsmodellen der Inlines (Poststack-Numerierung) 258 und 398 durchgeführt.

Die Makrofelder B der Inlines 400 und 514 sind in den Abbildungen 36 und 37 dargestellt. Es wird hier die Anlehnung an die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet deutlich. Unterhalb der für die Modellerstellung gewählten drei Schichten der Kontinentalhangsedimente erstreckt sich ein keilförmiger Bereich mit Geschwindigkeiten von ca. 3800 m/s, die sich nach Nordosten verdickt. Darunter liegen zwei Schichten höherer Geschwindigkeiten, die ungefähr parallel zur Keilunterseite verlaufen und mit der Lage und Richtung der abtauchenden Platte übereinstimmen.

Das Makromodell A dieser Inlines (Abb. 38 u. 39) zeigt dagegen keine direkte Ähnlichkeit mit der vorherrschenden Geologie. Es ist zwar auch hier eine Verdickung des Geschwindigkeitsbereiches von 3000 m/s bis 4000 m/s nach Nordosten zu erkennen, doch wird weder der Beginn der Keilstruktur noch seine obere und untere Begrenzung kleinräumig differenziert. Die Geschwindigkeiten im Bereich der Schichtgrenze vom Keil zu den darunterliegenden Einheiten zeigen insbesondere im Modell der Inline 258 (Abb. 38) einen sehr ungleichmäßigen Verlauf, der von den geologischen Verhältnissen stark abweicht. Diese Unterschiede machen die auf der Stapelgeschwindigkeitsanalyse beruhende und nicht auf die Geologie abgestimmte Vorgehensweise bei der Erstellung des Modells A deutlich. In dieser Vorgehensweise wurde ein an diskreten Stützstellen festgelegtes RMS-Geschwindigkeitsmodell für die Makromodellerstellung ohne Berücksichtigung der Geologie umgerechnet.

In den Abbildungen 40-43 sind die Abweichungen des Makrofeldes A vom Makrofeld B anhand der Inlines 258, 400, 450 und 514 dargestellt. Die Differenzbildung beider Modelle zeigt auch die geologische Struktur des Makromodells B. Diese Struktur prägt sich so dominant durch, da sich das Modell B aus Intervallgeschwindigkeiten zusammensetzt, und an den Schichtgrenzen Geschwindigkeitssprünge auftreten. Dagegen besteht das von den RMS-Geschwindigkeiten abgeleitete Modell A aus i. a. kontinuierlich mit der Tiefe anwachsenden Geschwindigkeitswerten ohne Berücksichtigung der realen Schichtgrenzen. Auffallend ist die im Mittel höhere Geschwindigkeit des Makrofeldes A. Bis auf die durch die unterschiedliche Ableitung der Modelle entstehenden Effekte an den Schichtgrenzen, an denen das Makromodell A bis zu 20% niedrigere Werte als das Makromodell B erreicht, liegen die Geschwindigkeiten um 20%-60%, punktuell sogar um bis zu 100%, höher als bei Modell B. Damit läßt sich feststellen, daß das Makromodell A unterhalb der oberen Sedimentschichten zu hohe Geschwindigkeiten aufweist, die zudem nur unzureichend an die vorliegende Geologie gekoppelt sind.

### 3.3.2 Die 3D-Poststack-Tiefenmigration (One Pass)

Zunächst sollen die uns zur Verfügung stehenden 3D-Poststack-Tiefen-Migrationsverfahren diskutiert und anschließend die Ergebnisse der zugehörigen 3D-Tiefenmigrationen (One Pass) unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien verglichen werden.

#### 3D-Poststack-Tiefen-Migrationsverfahren:

Für die 3D-Tiefenmigration standen uns folgende Migrationsverfahren zur Verfügung:

- Split-Step-Fourier-Migration (Stoffa et al., 1990)
- Finite-Differenzen-(FD)-Migration (Ristow und Rühl, 1997)
- Fourier-FD-Migration (Ristow und Rühl, 1994, Rühl et al., 1995; Ristow und Rühl, 1997)

<i>Method</i>	<i>Lateral variation of velocity</i>	<i>Steep dip resolution</i>	<i>Authors</i>
Phase-Shift Migration	no	excellent	Gazdag, 1978
Split-Step Fourier Migration	moderate	good	Stoffa et al., 1990
Finite-Difference Migration by Multi-Way-Splitting	strong	moderate	GEOMAR group, 1995 Ristow, Rühl, 1997
Fourier-Finite Difference Migration	strong	good	GEOMAR group, 1996 Ristow, Rühl, 1997

Tabelle 3: Bei GEOMAR zur Verfügung stehende Programme für den flexiblen und effizienten Einsatz einer 3D-Poststack-Migration.

Das Split-Step-Verfahren wurde in der ersten Projektphase aufgrund der geringen Rechenzeiten für eine erste Tiefenmigration mit einem vorläufigen 3D-Geschwindigkeitsmodell benutzt (siehe Zwischenbericht, 1997). Dieses Migrationsverfahren konnte aufgrund der Nachteile bei lateral variablen Makrogeschwindigkeitsmodellen im weiteren Projektverlauf für eine kleinräumige Interpretation ausgeschlossen werden (siehe Tabelle 3). Damit standen uns noch die FD-Migration bzw. die FFD-Migration für eine Interpretation zur Verfügung.

Umfangreiche Tests wurden durchgeführt, um für unsere Zielsetzung das effizientere Migrationsverfahren und die zugehörigen optimalen Parameter zu bestimmen. Dabei wurde für die Parametertests das schnelle Split-Step-Verfahren eingesetzt. Am Ende dieser Tests wurde der gesamte 3D-Poststack-Datensatz jeweils mit dem Split-Step, FD- und dem FFD-Verfahren vollständig 3D-tiefenmigriert. Zu diesem Zeitpunkt stand uns nur das Makrogeschwindigkeitsfeld A aus der ersten Projektphase zur Verfügung. In die Migration eingegeben wurde jeweils der Datensatz bis 8 s. Die Samplingrate betrug 4 ms. Der Frequenzbereich für die Migrationen lag zwischen 5 und 35 Hz. Tests hatten bestätigt, daß in diesem Frequenzbereich der Hauptteil der Reflexionsenergie liegt. Der 3D-Poststack-Datensatz umfaßt 309 Inlines und 1300 Crosslines (siehe Tabelle 1). Um die Randeckeffekte abzuschwächen, wurden an allen Rändern Nullspuren angehängt, so daß die gesamte Fläche 384 x 1440 CDPs betrug. Diese Zahlenwerte lassen sich durch Produkte kleiner Primzahlen darstellen, was zu einer günstigen Durchführung der in den Migrationsprogrammen benutzten 2D-Fourier Transformation beiträgt. Der Datenbereich wurde im Übergangsbereich zu den Nullspuren zur Vermeidung von Randeckeffekten mit einem Cosinusfenster

tapert. Die Tiefenmigrationen wurden bis in eine Tiefe von 8 km durchgeführt. Tests hatten ergeben, daß diese Tiefe ausreicht, um das Interpretationsziel dieses Projektes zu erreichen. Die Schrittweite bei der Absenkung des Wellenfeldes betrug 30 m.

#### *Ergebnisse der 3D-Poststack-Tiefen-Migration (One Pass):*

Die Abbildungen 44a - 46c zeigen 3D-tiefenmigrierte Sektionen der Inlines 258, 400 und 514 jeweils nach der Split-Step, der FD- und der FFD-Migration. Der Bereich oberhalb des Meeresbodens wurde gemutet. Ein Qualitätsvergleich der migrierten Linien zeigt keine deutlichen Unterschiede zwischen dem FD- und dem FFD-Verfahren, wohl aber, wie vermutet, zum Split-Step-Verfahren. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Migrationsverfahren werden vor allem oberhalb der Keiloberkante (rough surface), aber auch am rough surface selbst deutlich. Ein Vergleich z.B. der Abbildungen 46 a - c zeigt deutlich, daß das Split-Step-Verfahren gegenüber dem FD- bzw. FFD-Verfahren nicht in der Lage ist, bestimmte Strukturen aufzulösen (z.B. der Bereich der Inline 514 zwischen CDP 1600 - 1800). Ein Qualitätsvergleich der migrierten Linien zwischen dem FD- und dem FFD-Verfahren zeigt hingegen, wie schon vermutet, kaum deutliche Unterschiede. Aufgrund der Tatsache, daß die Rechenzeiten beim FFD-Verfahren ca. 50% größer waren als die des FD-Verfahrens, entschieden wir uns, aus zeitlichen Gründen für die folgende 3D-Poststack-Tiefenmigration mit dem neuen 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B, das FD-Verfahren zu benutzen.

Diese abschließende 3D-Poststack-Tiefenmigration, unter Verwendung des in der zweiten Projektphase erstellten Makrogeschwindigkeitsfeldes B, wurde mit denselben Parametern und Dimensionierungen durchgeführt, wie die FD-Migration mit Makrofeld A. Die Rechenzeitdauer für die gesamte 3D-Migration betrug mit diesen Werten 190 Stunden (Rechner: Sun sparc ultra 1 mit 170 MHz Prozessor und 1GB Arbeitsspeicher), bei annähernd 100 % CPU-Zeit.

Die Abbildungen 47, 48 und 49 zeigen die 3D-tiefenmigrierten Sektionen der Inlines 258, 400 und 514 mit dem neuen Makrofeld B. Deutlich ist eine Verbesserung zu den entsprechenden 3D-tiefenmigrierten Sektionen mit dem Makrogeschwindigkeitsfeld A zu erkennen (vgl. Abb. 44 - 46). Ein Vergleich zwischen der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration mit dem Makrogeschwindigkeitsfeld A bzw. B zeigt für die ausgewählten Inlines in den Sedimentsequenzen keine deutlichen und charakteristischen Unterschiede. In diesem Bereich stimmen die Makrogeschwindigkeitsfelder A und B auch noch weitgehend überein. Aber schon die Keiloberkante der Keilstruktur bzw. der rough surface, an dem ein deutlicher Geschwindigkeitssprung erfolgt, zeigt Unterschiede in der Abbildungsgenauigkeit. Im Bereich der Keiloberkante zeigt das Makromodell A im allgemeinen 20% geringere Geschwindigkeiten auf als das Makromodell B. Durch diese Geschwindigkeitsunterschiede sind die starken Amplitudenkontraste entlang des rough surface bei Makromodell B mit zunehmender Tiefe weiter auseinandergezogen. Hinzu kommt eine verbesserte Anpassung an die geologischen Strukturen im Untergrund von Makrogeschwindigkeitsfeld B, was zu einer weiteren Qualitätsverbesserung der Abbildung beiträgt. Der darunterliegende keilförmige Bereich ist in beiden Migrationsergebnissen relativ homogen aufgebaut und zeigt keine neuen Schichtgrenzen. Unterhalb der Keilunterseite sind die Ergebnisse der 3D-Poststack-Migration mit Makrofeld B deutlich besser als die mit Makrofeld A. In diesem Bereich kommt der Vorteil des an die geologischen Verhältnisse angepaßten Makrogeschwindigkeitsfeldes B deutlich zum Tragen. Die abtauchende Platte ist hier sehr viel deutlicher und kontinuierlicher abgebildet.

Anzumerken sei hier noch, daß unabhängig vom gewählten Makrogeschwindigkeitsmodell eine signifikante Reflexion, die parallel unterhalb des Meeresbodens in einigen hundert Metern Entfernung verläuft, zu erkennen ist. Es handelt sich hierbei um einen BSR (Bottom Simulating Reflector), der im gesamten 3D-Datensatz flächenhaft zu verfolgen ist.

Abb. 44a: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (Split Step) der Inline 258 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

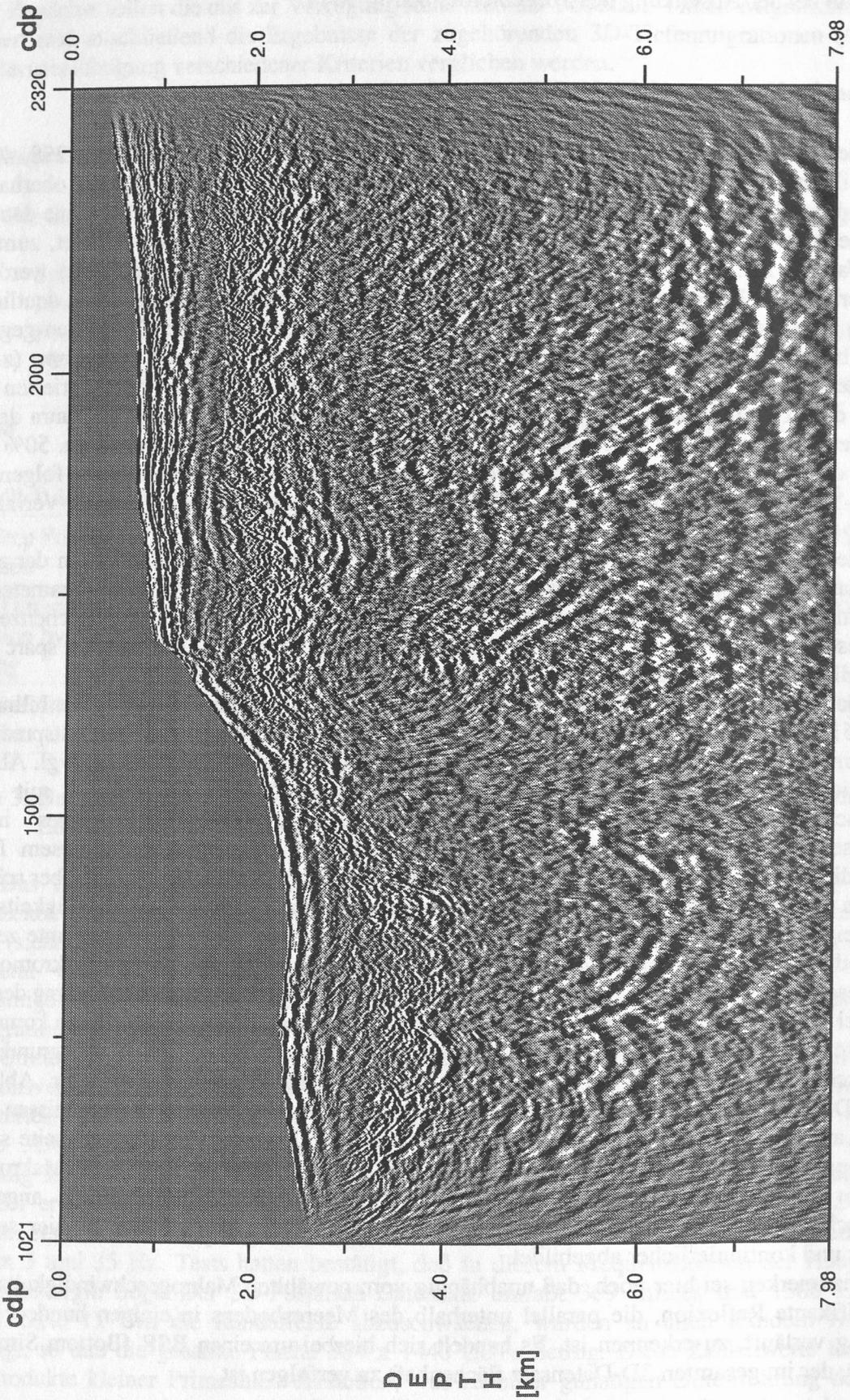


Abb. 44a: Ausschnitt der Inline 258 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (Split Step) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

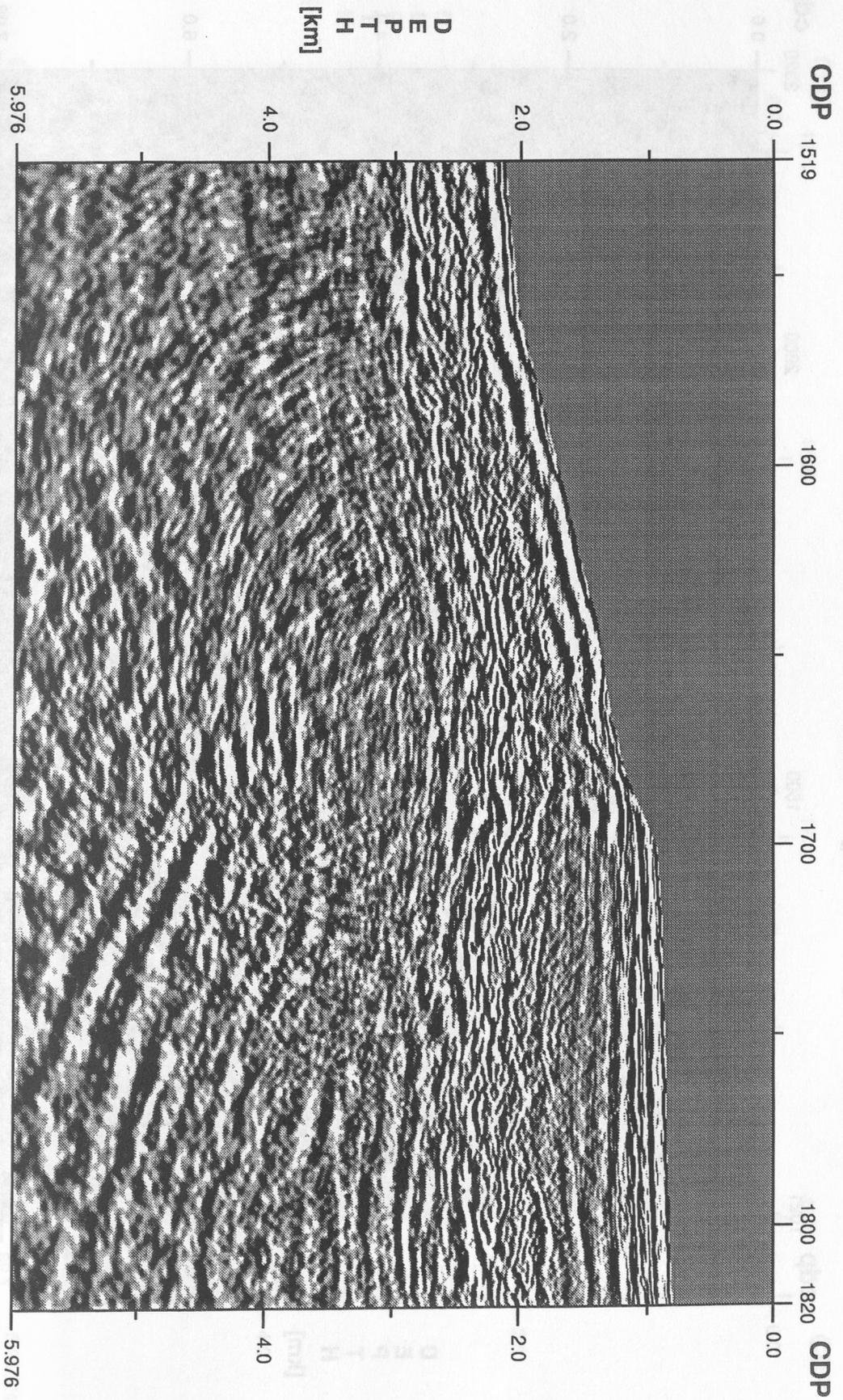


Abb. 44b: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) der Inline 258 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

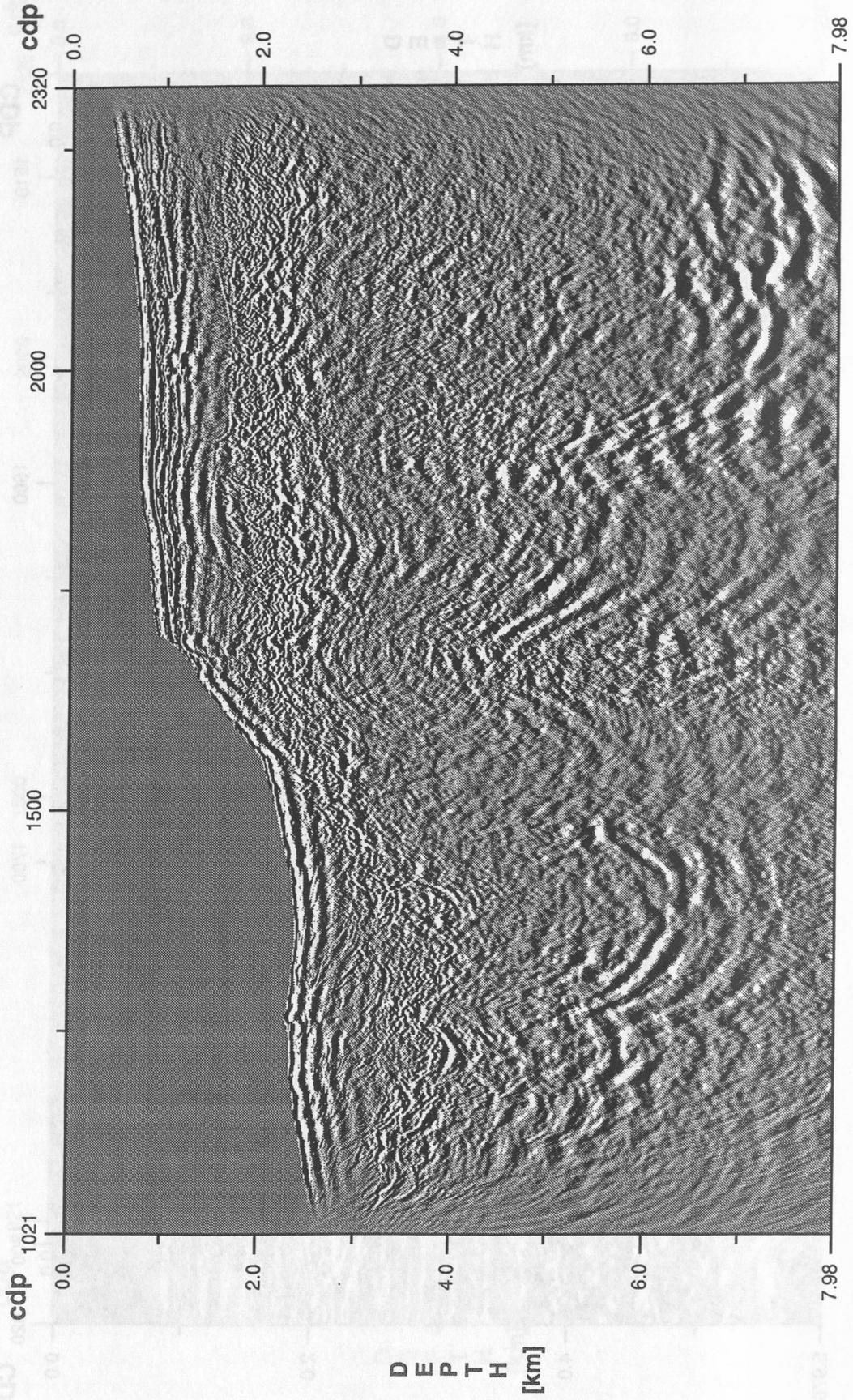


Abb. 44b: Ausschnitt der Inline 258 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

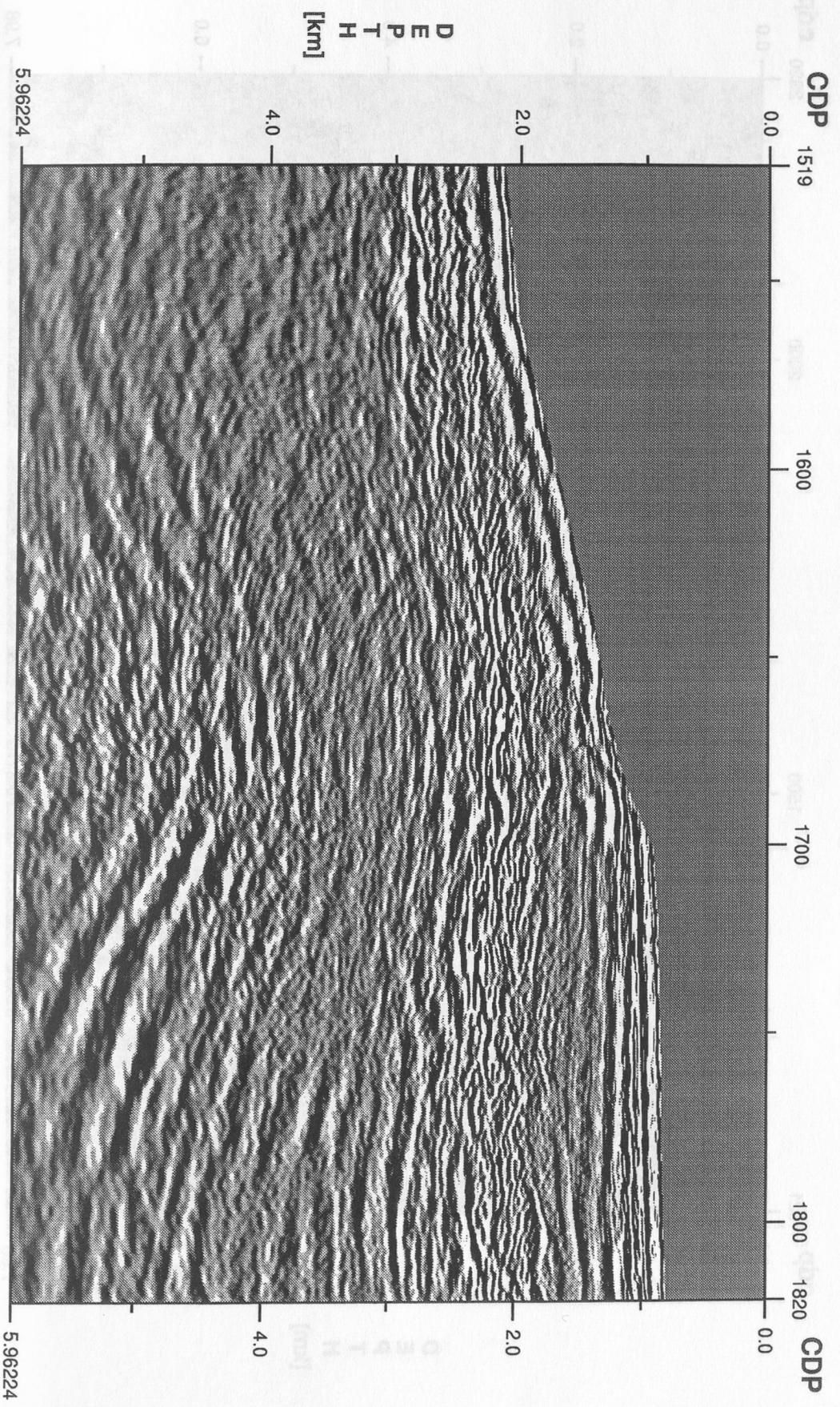


Abb. 44c: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FFD) der Inline 258 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

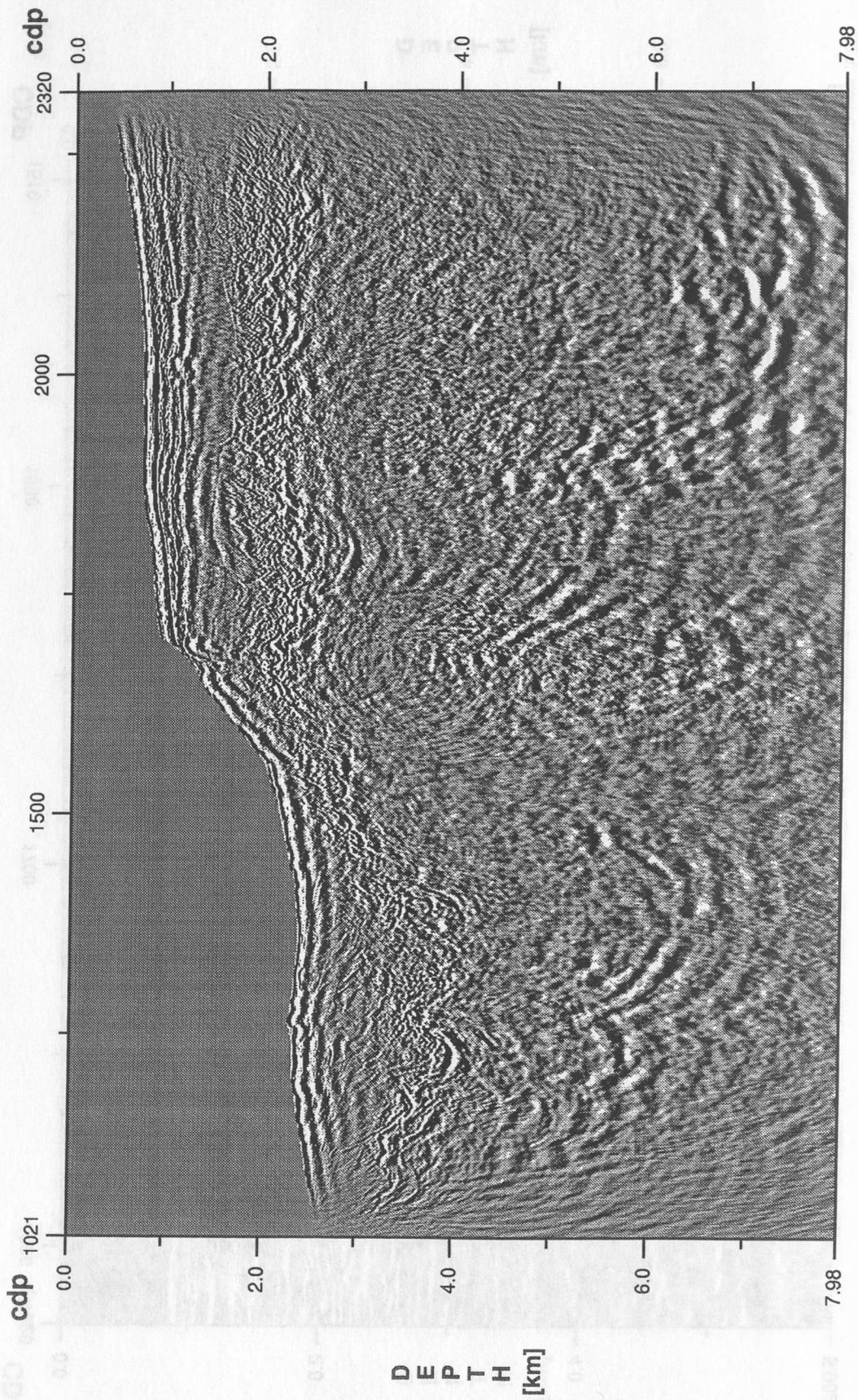


Abb. 44c: Ausschnitt der Inline 258 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FFD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

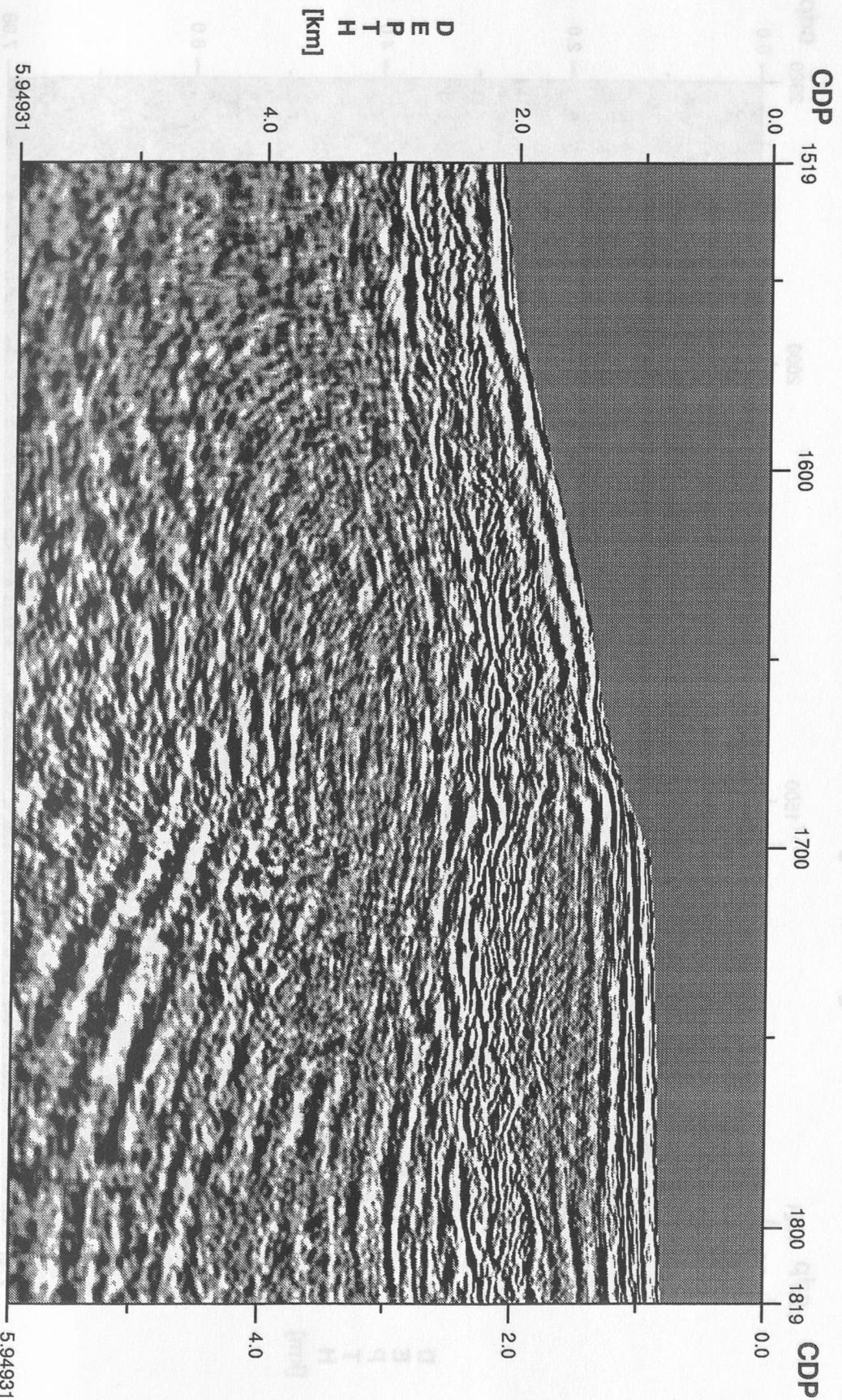


Abb. 45a: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (Split-Step) der Inline 400 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

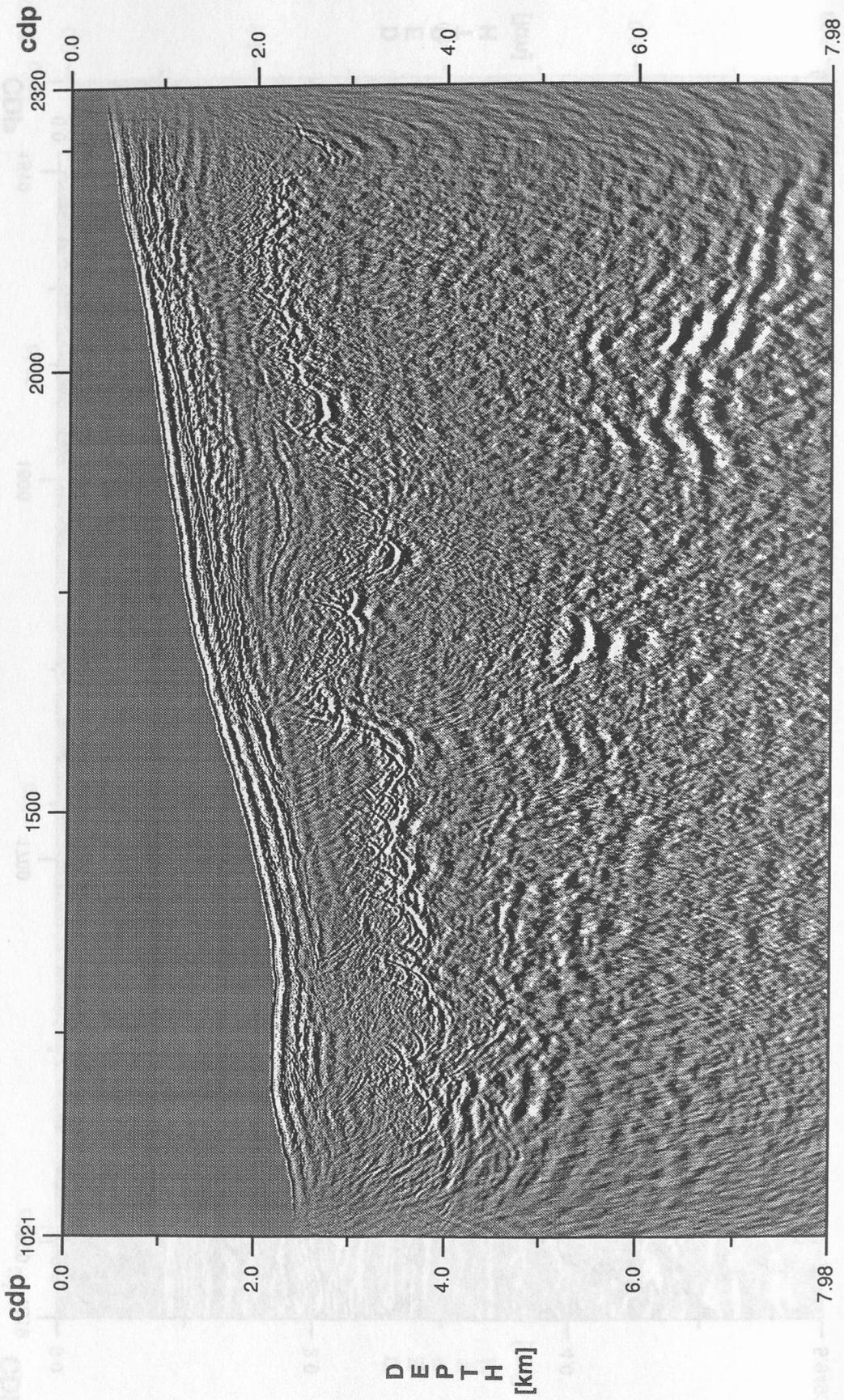


Abb. 45a: Ausschnitt der Inline 400 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (Split-Step) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

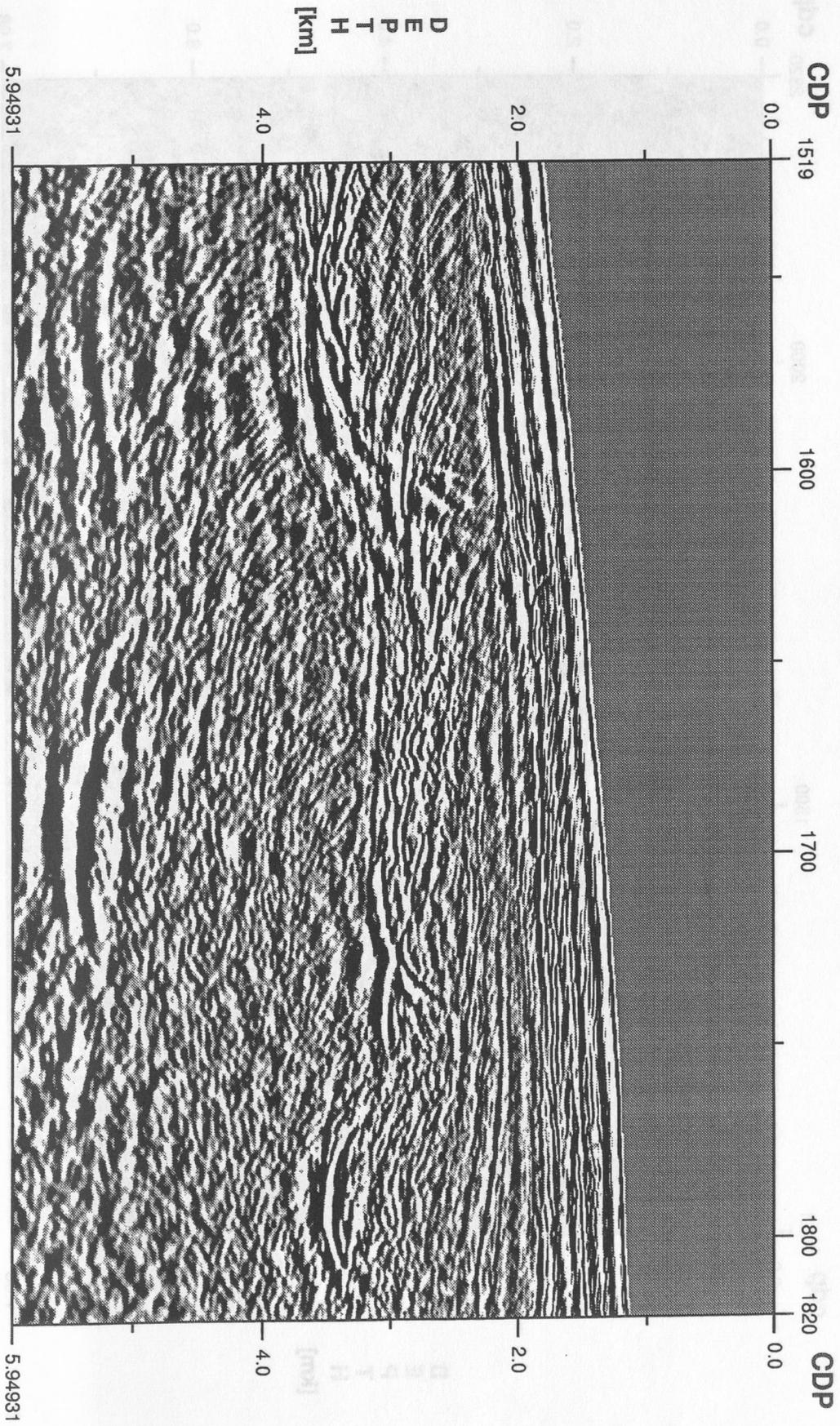
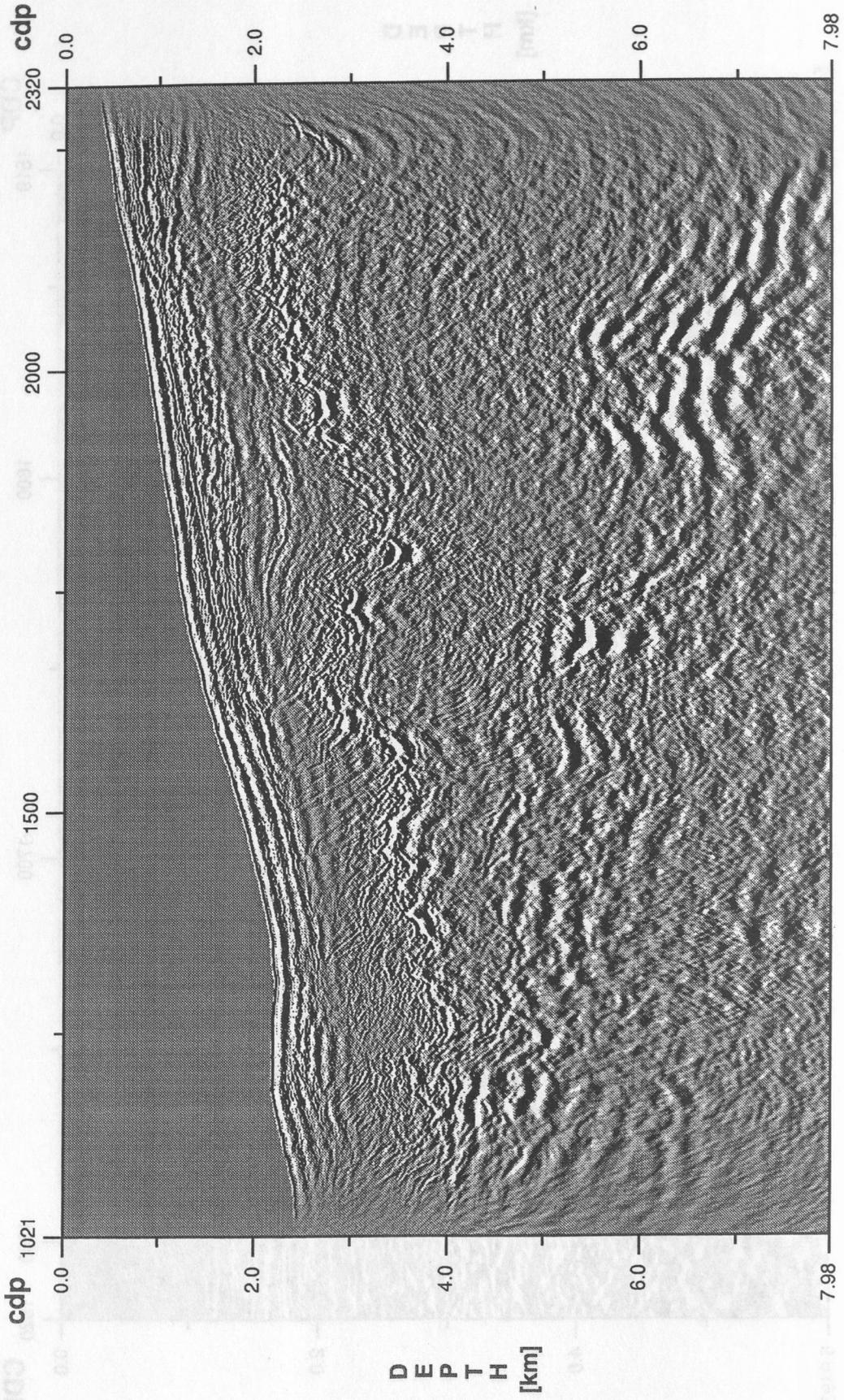
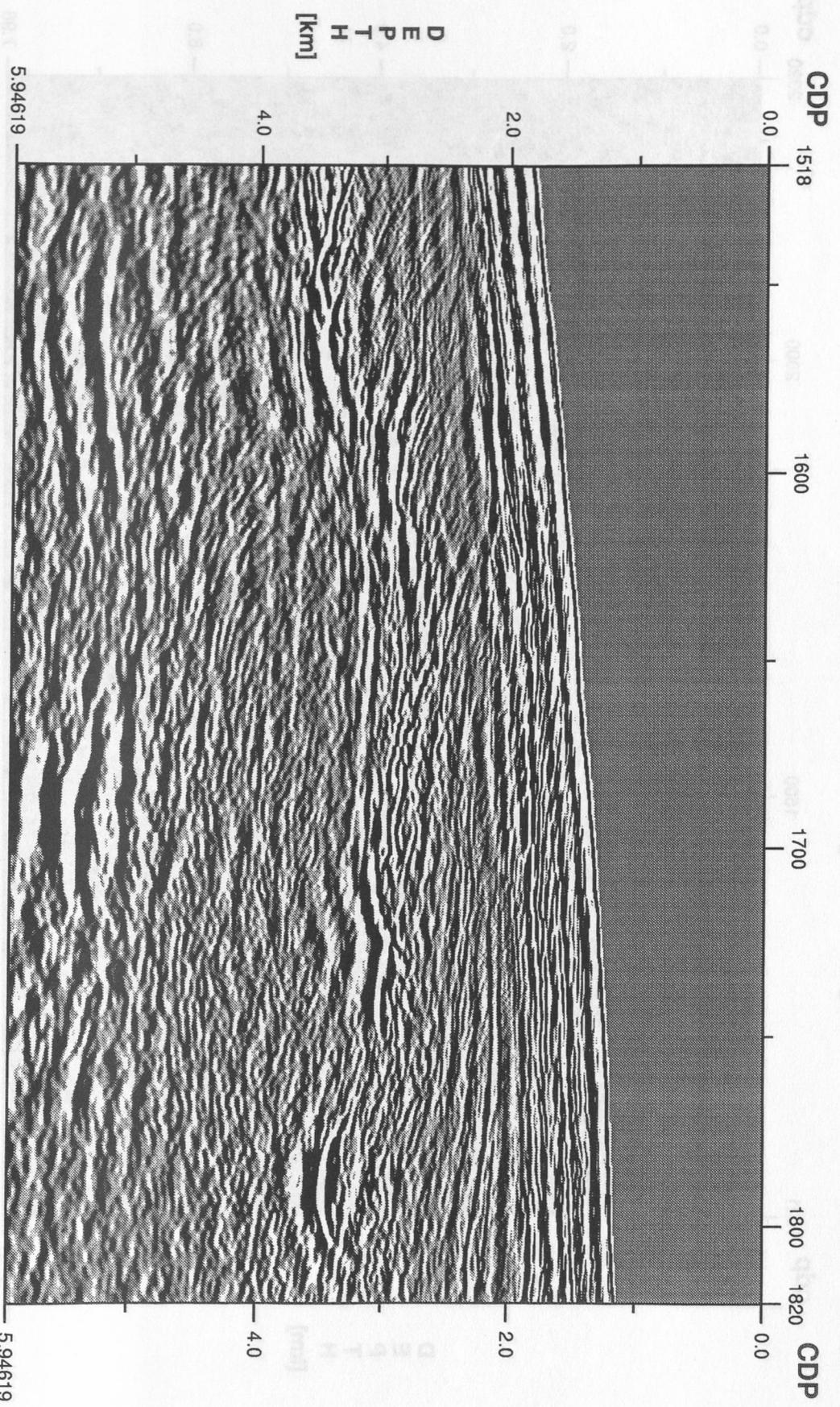


Abb. 45b: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) der Inline 400 mit  
Makrogeschwindigkeitsfeld A



**Abb. 45b: Ausschnitt der Inline 400 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A**



**Abb. 45c: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FFD) der Inline 400 mit  
Makrogeschwindigkeitsfeld A**

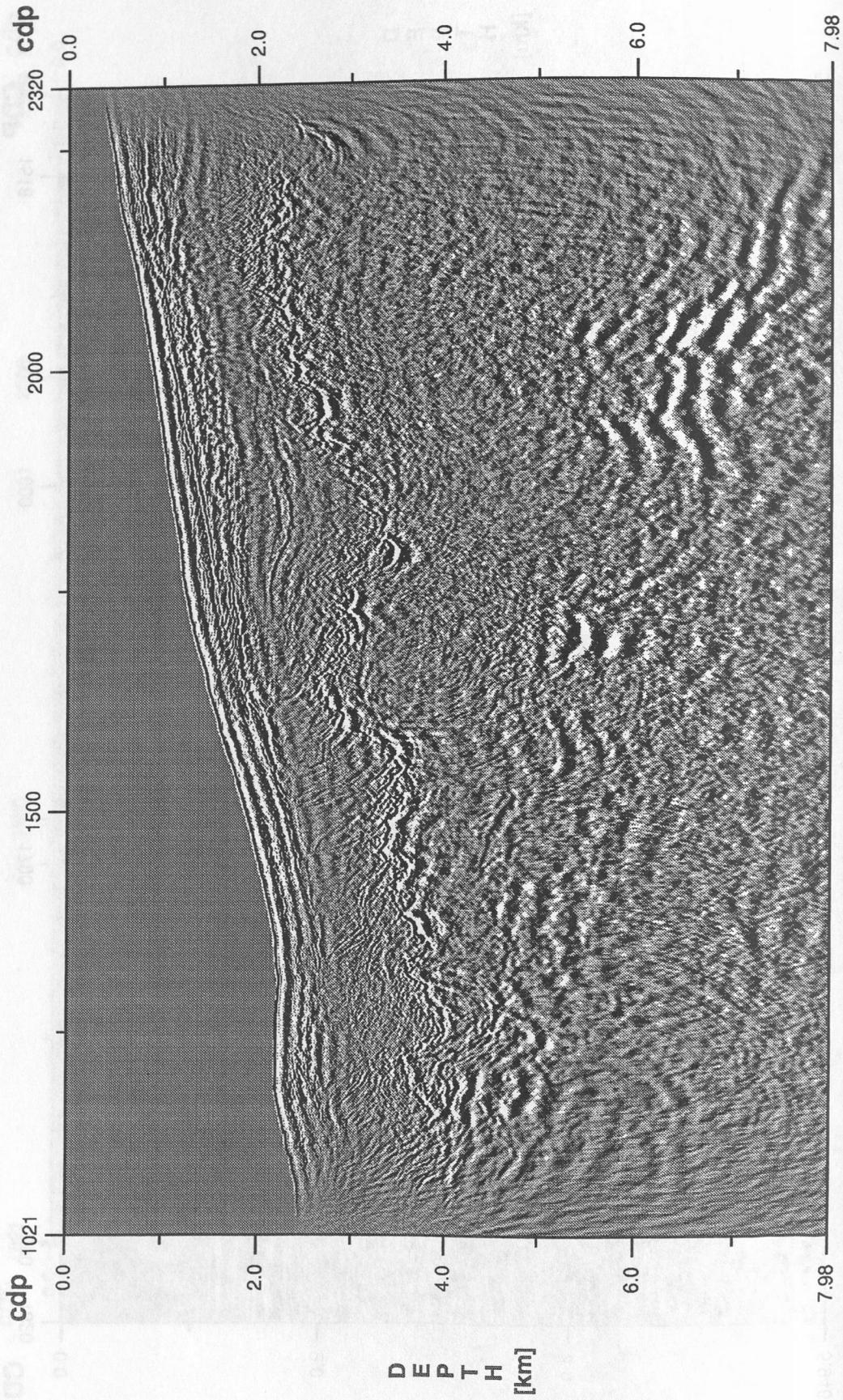


Abb. 45c: Ausschnitt der Inline 400 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FFD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

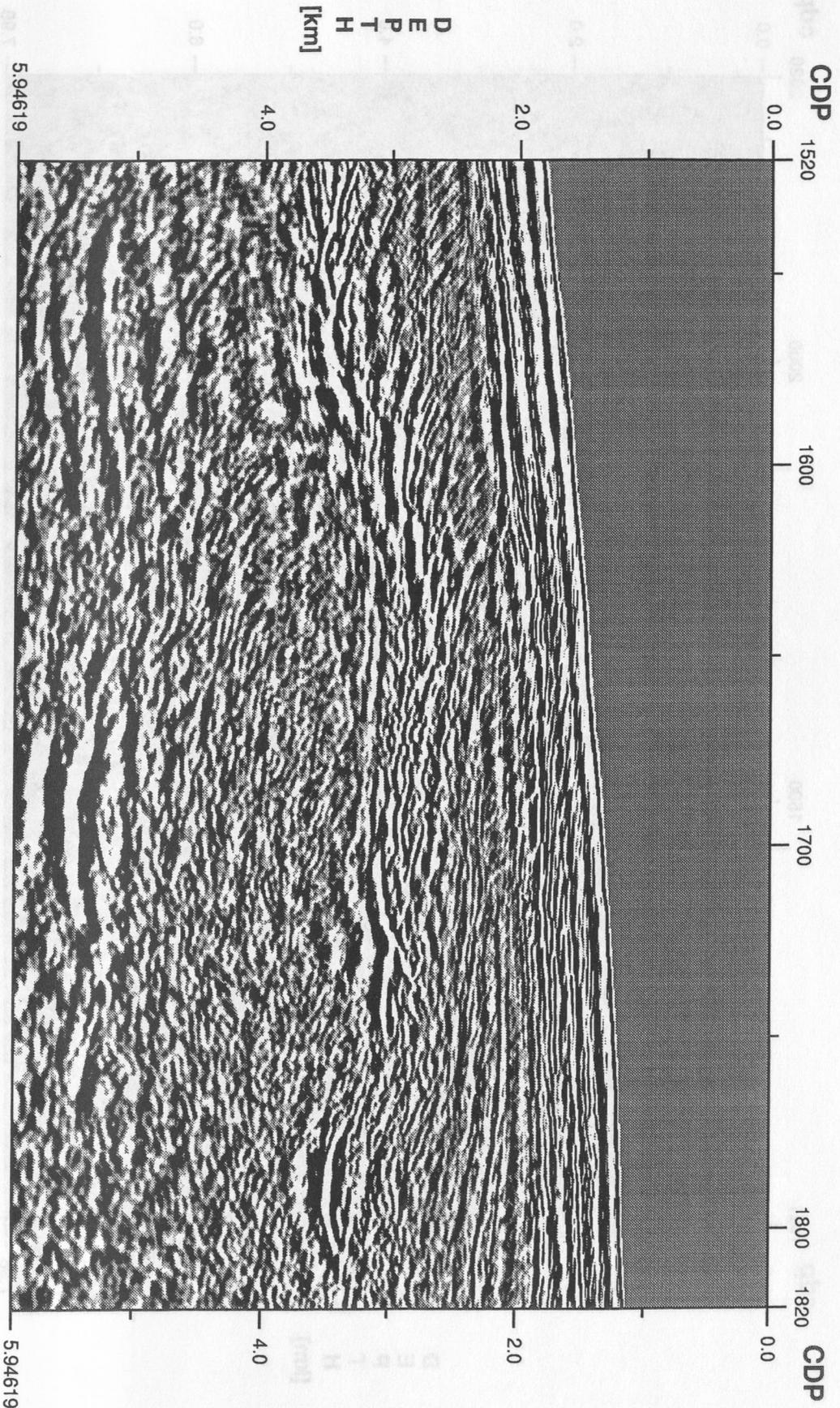
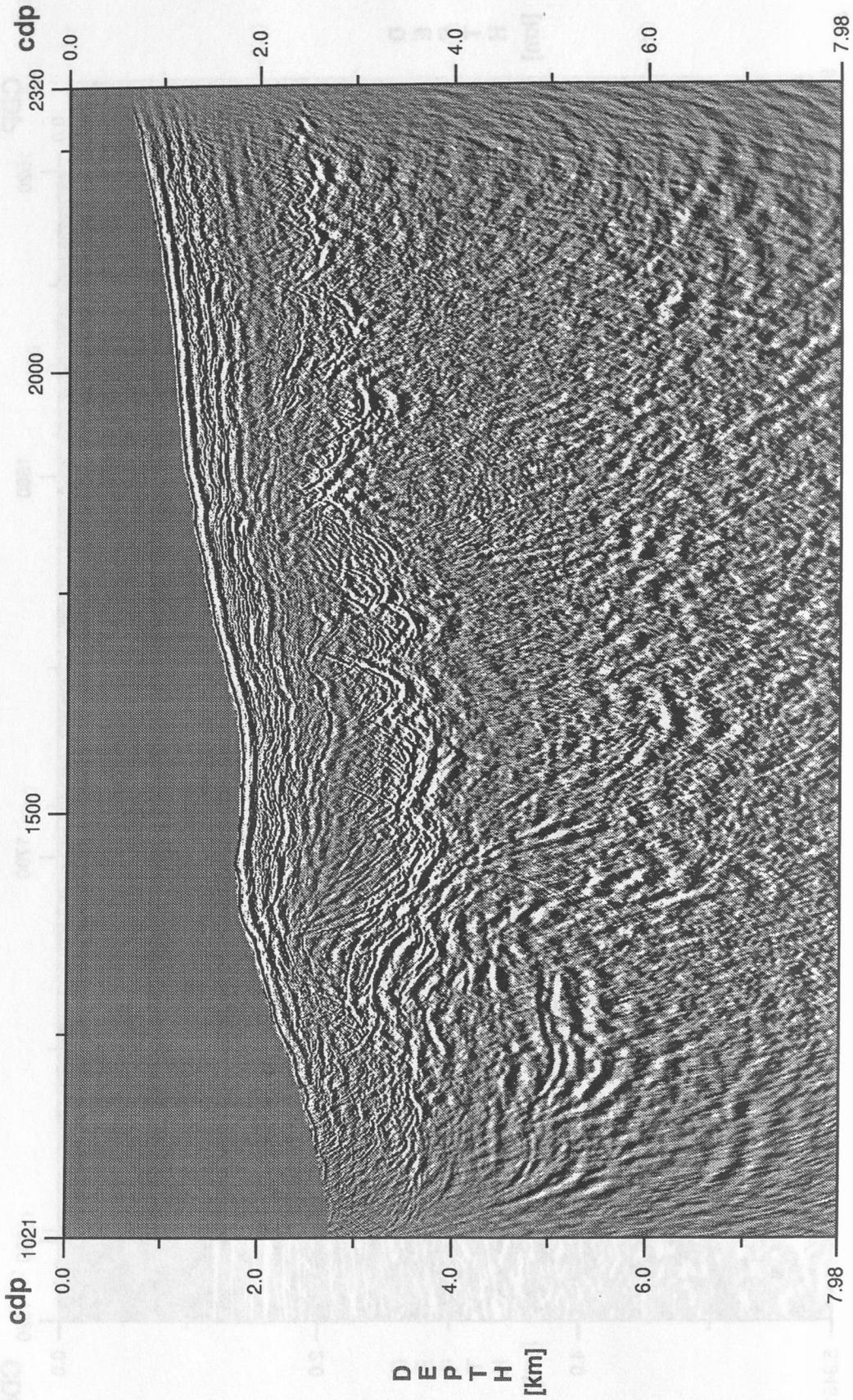


Abb. 46a: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (Split-Step) der Inline 514 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A



**Abb. 46a: Ausschnitt der Inline 514 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (Split-Step) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A**

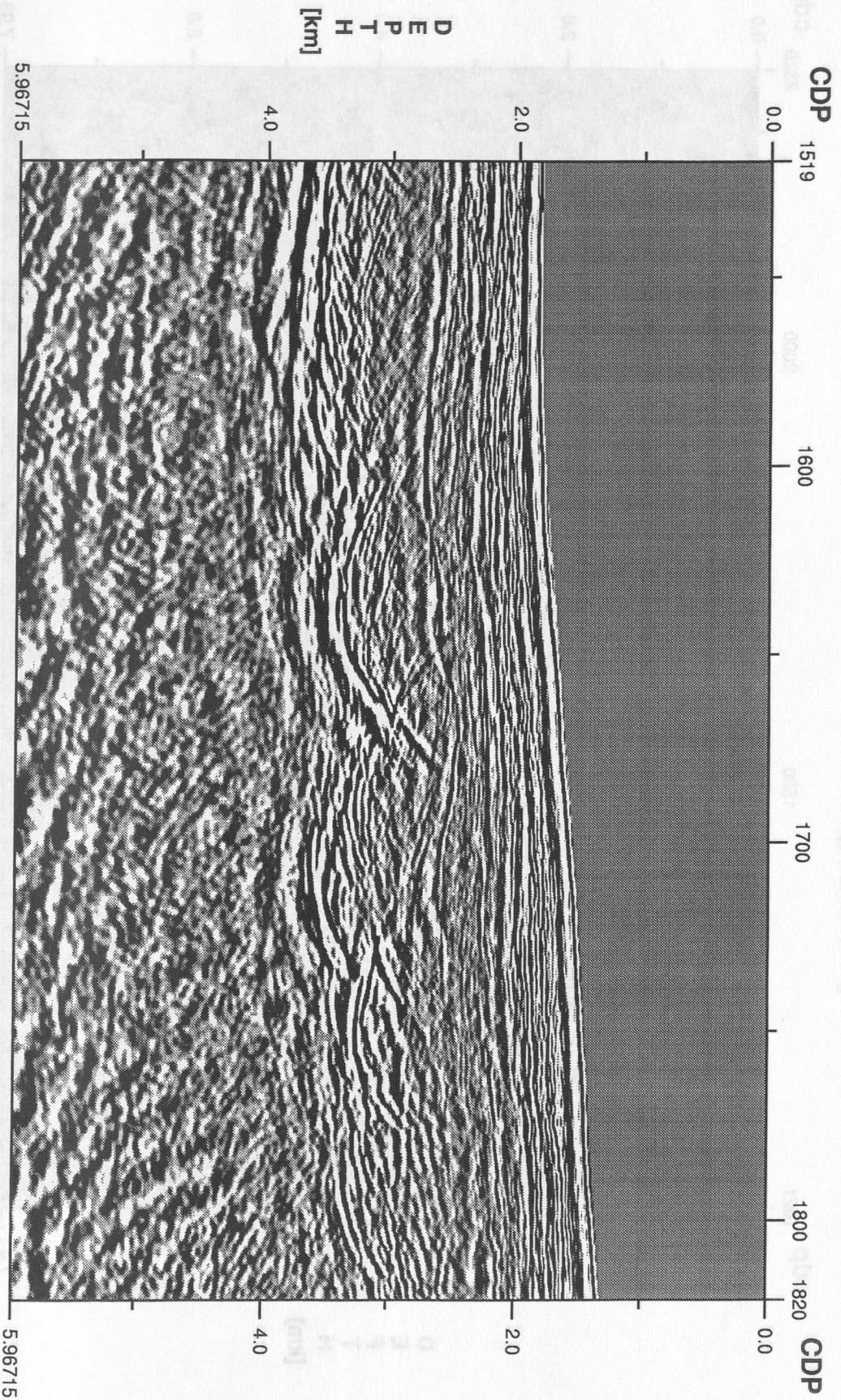


Abb. 46b: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) der Inline 514 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

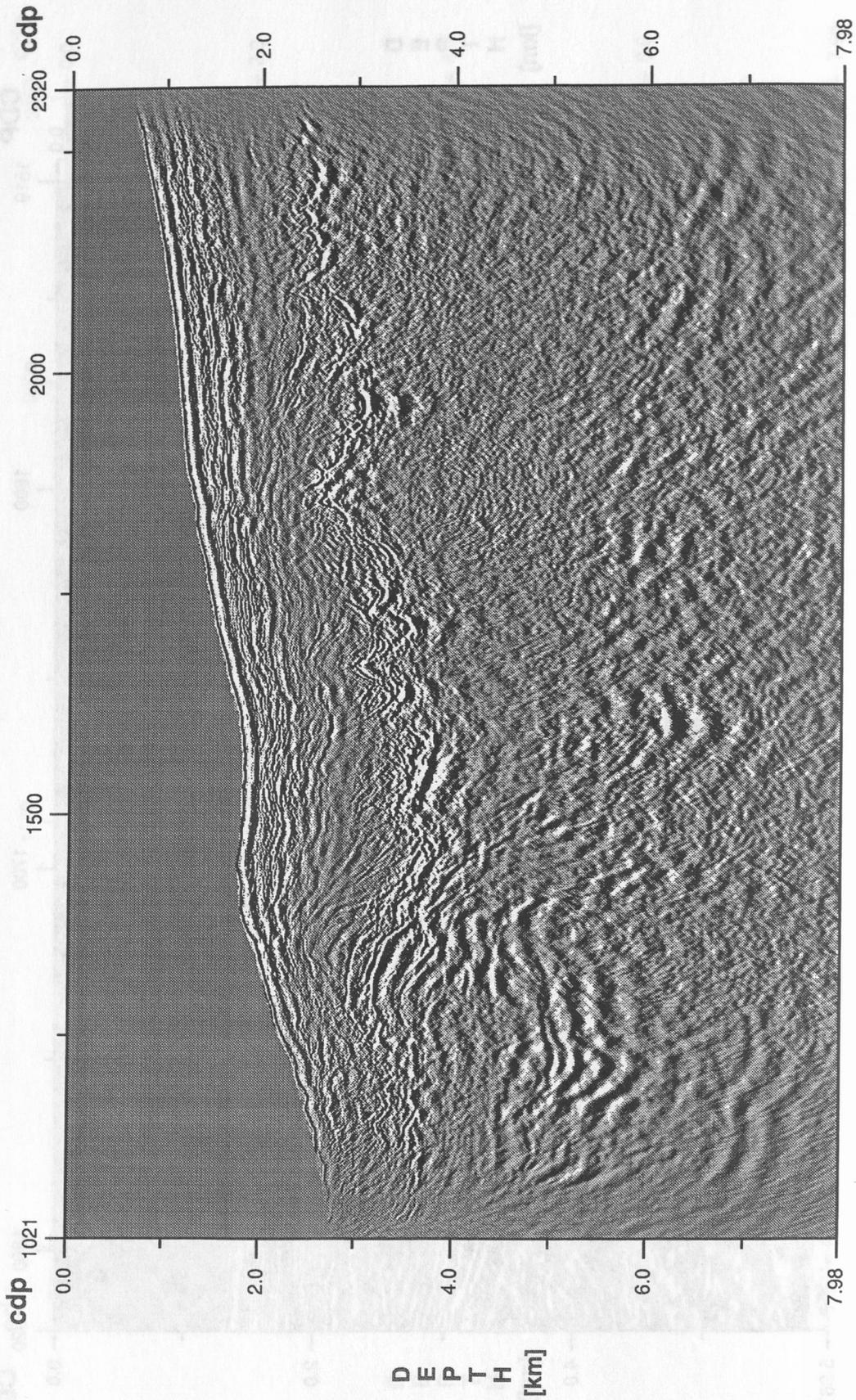


Abb. 46b: Ausschnitt der Inline 514 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) mit Makrogeschwindigkeitfeld A

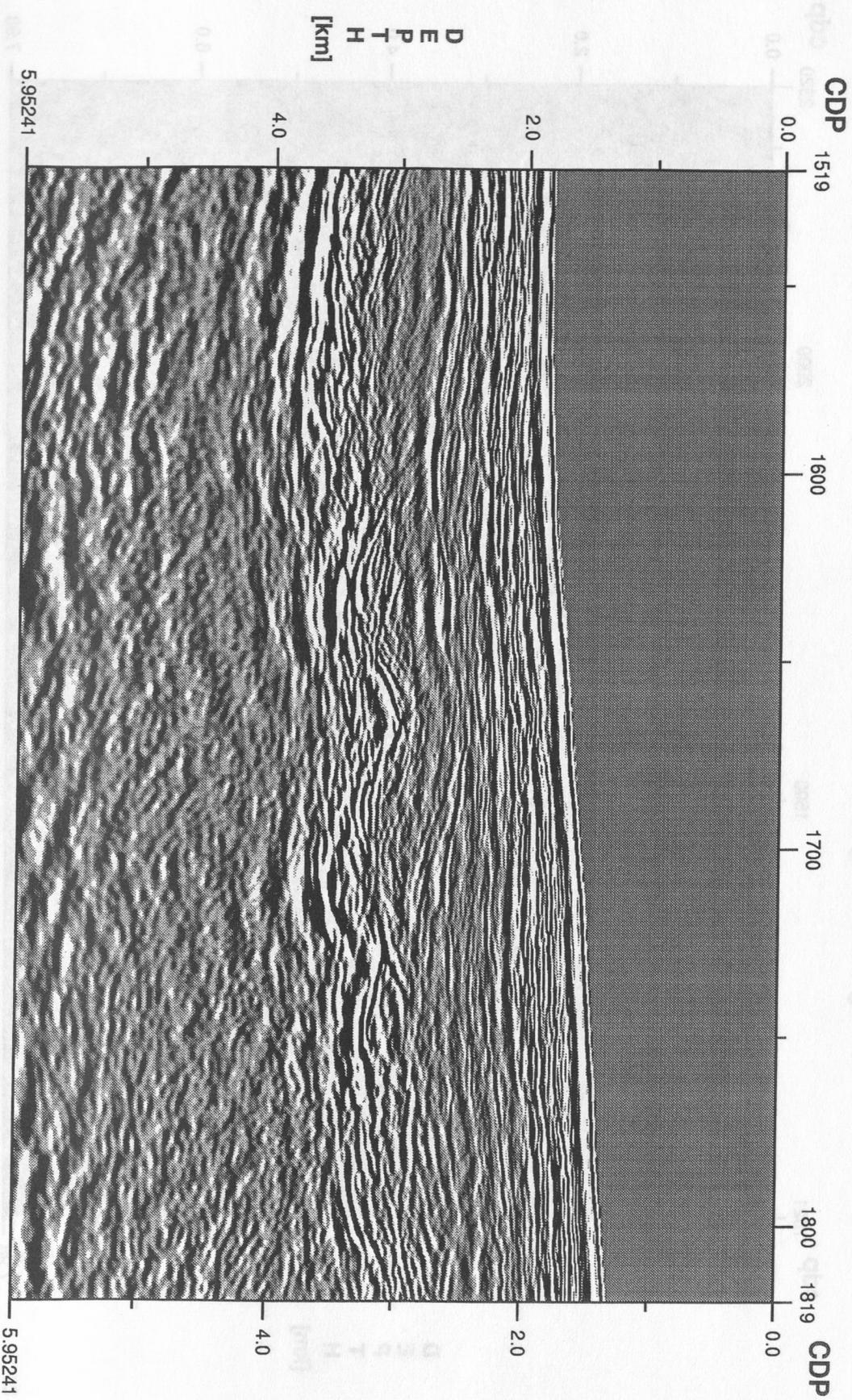


Abb. 46c: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FFD) der Inline 514 mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

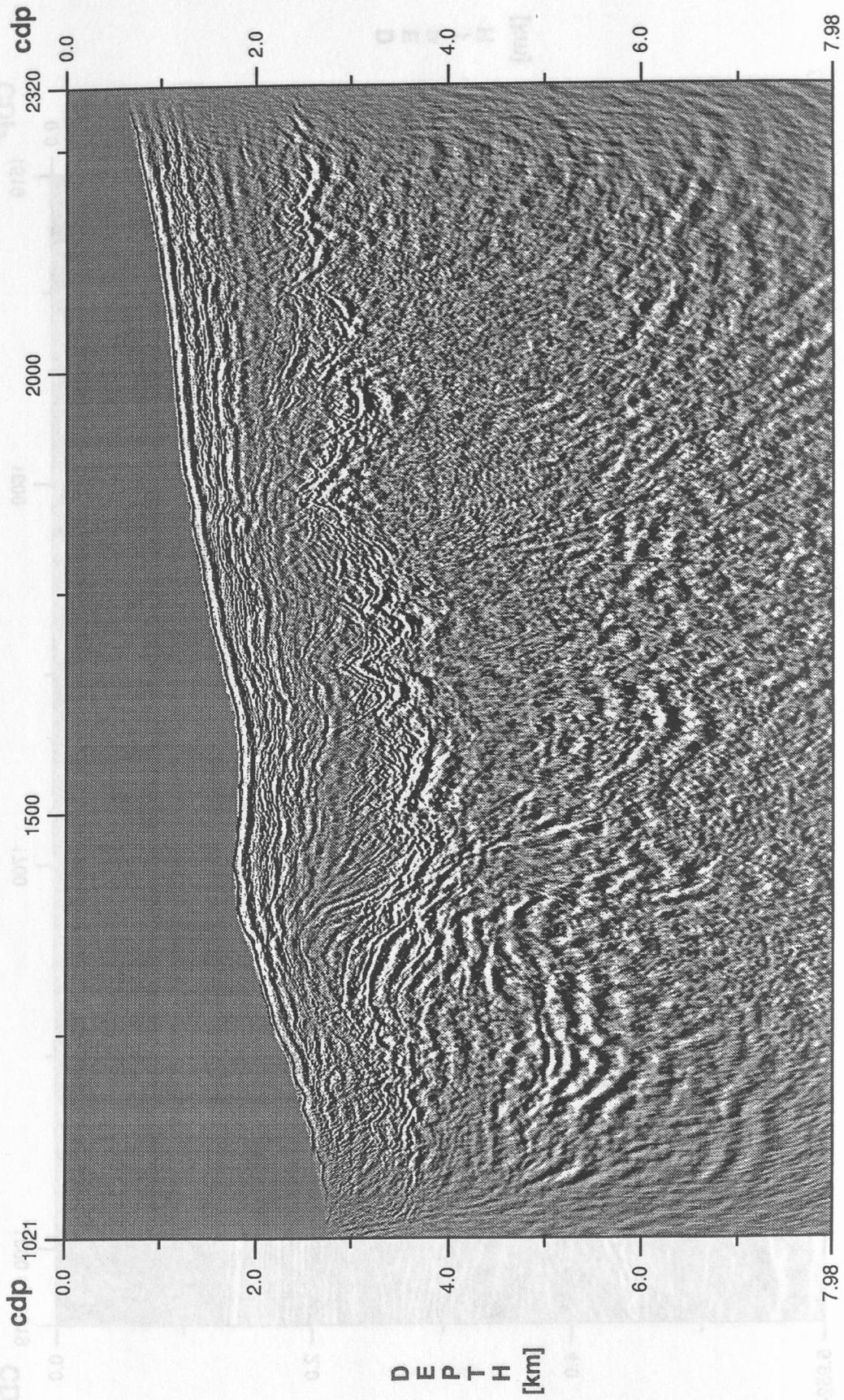


Abb. 46c: Ausschnitt der Inline 514 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FFD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld A

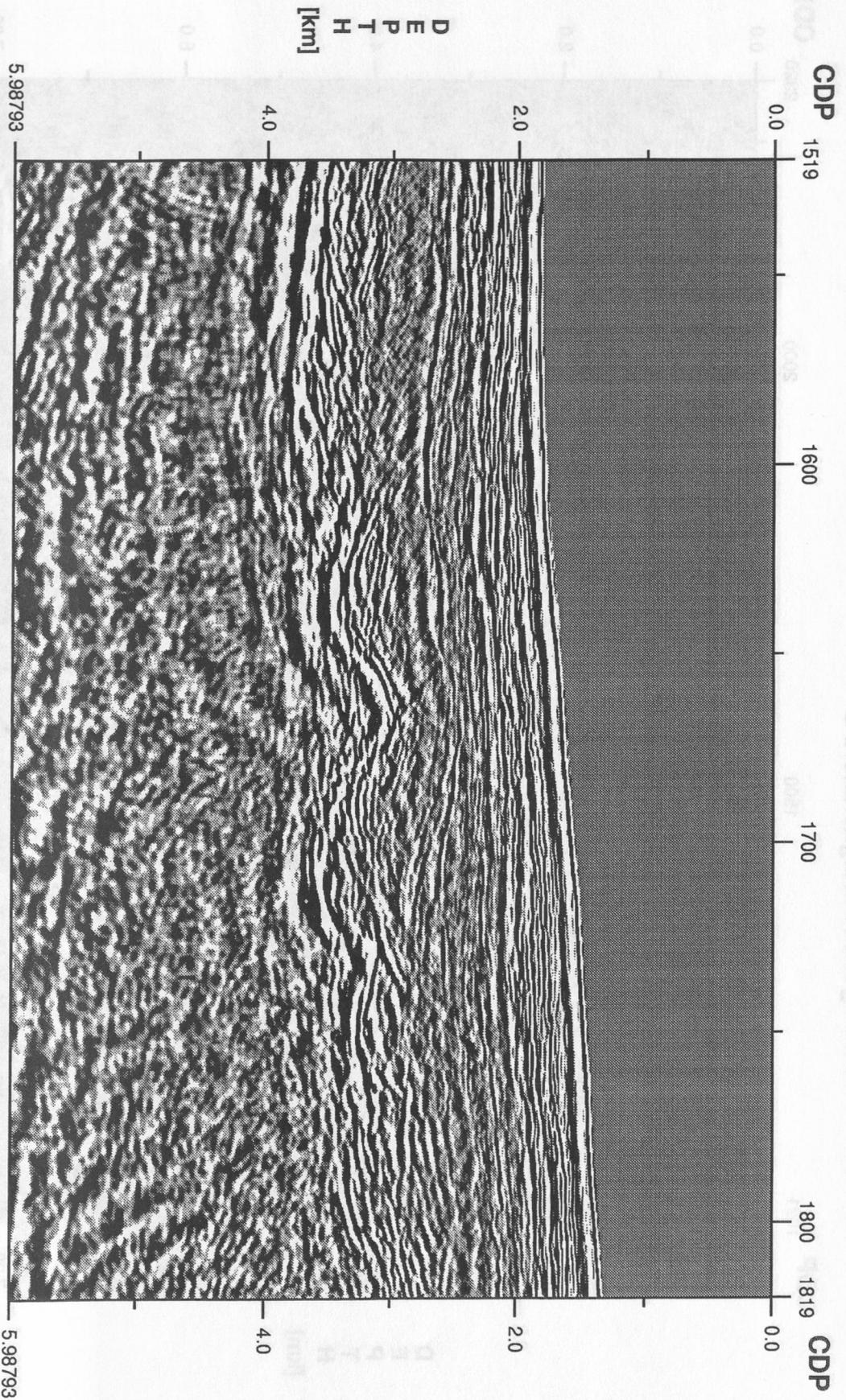


Abb. 47: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) der Inline 258 mit Makrogeschwindigkeitsfeld B

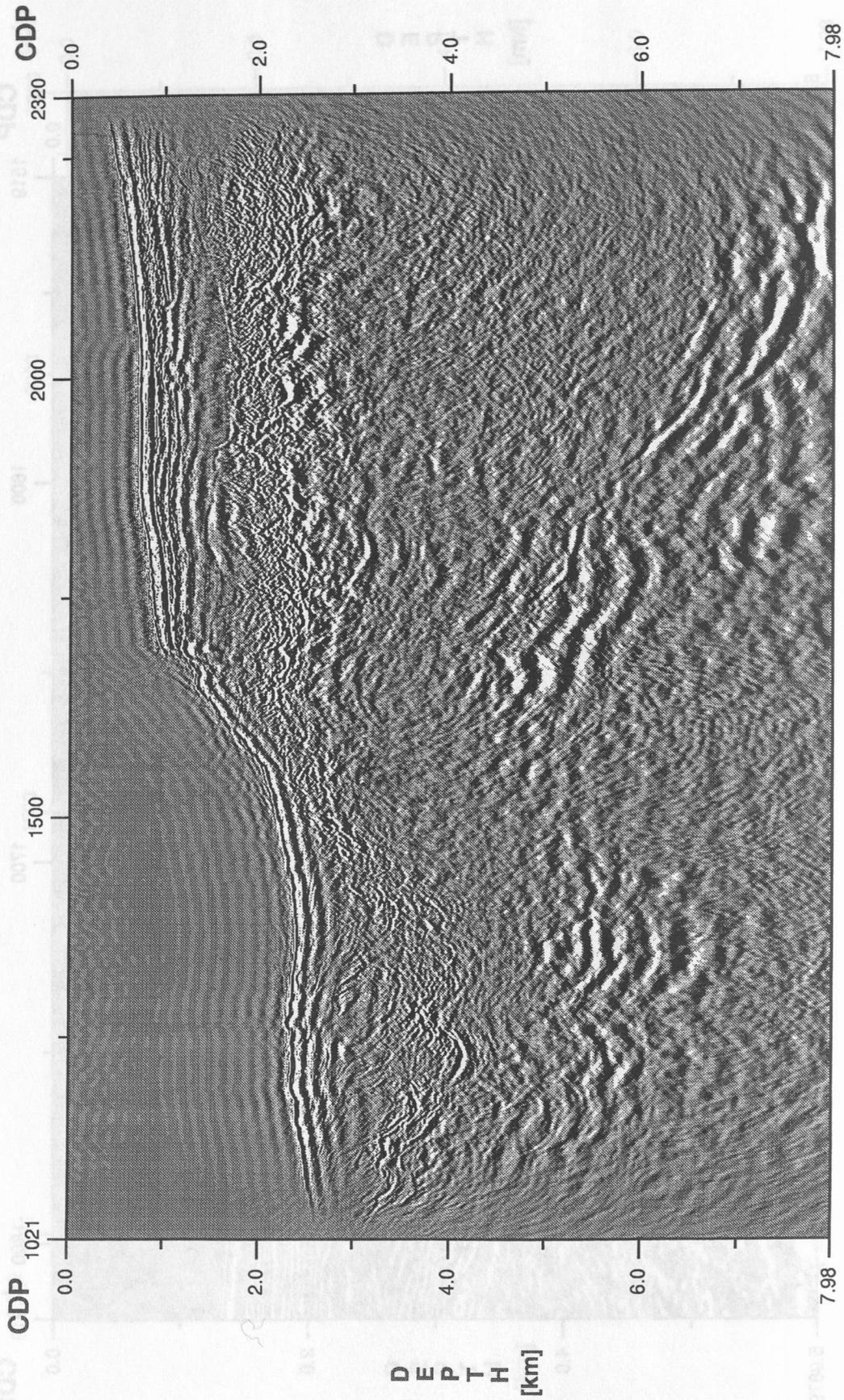


Abb. 47: Ausschnitt der Inline 258 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld B

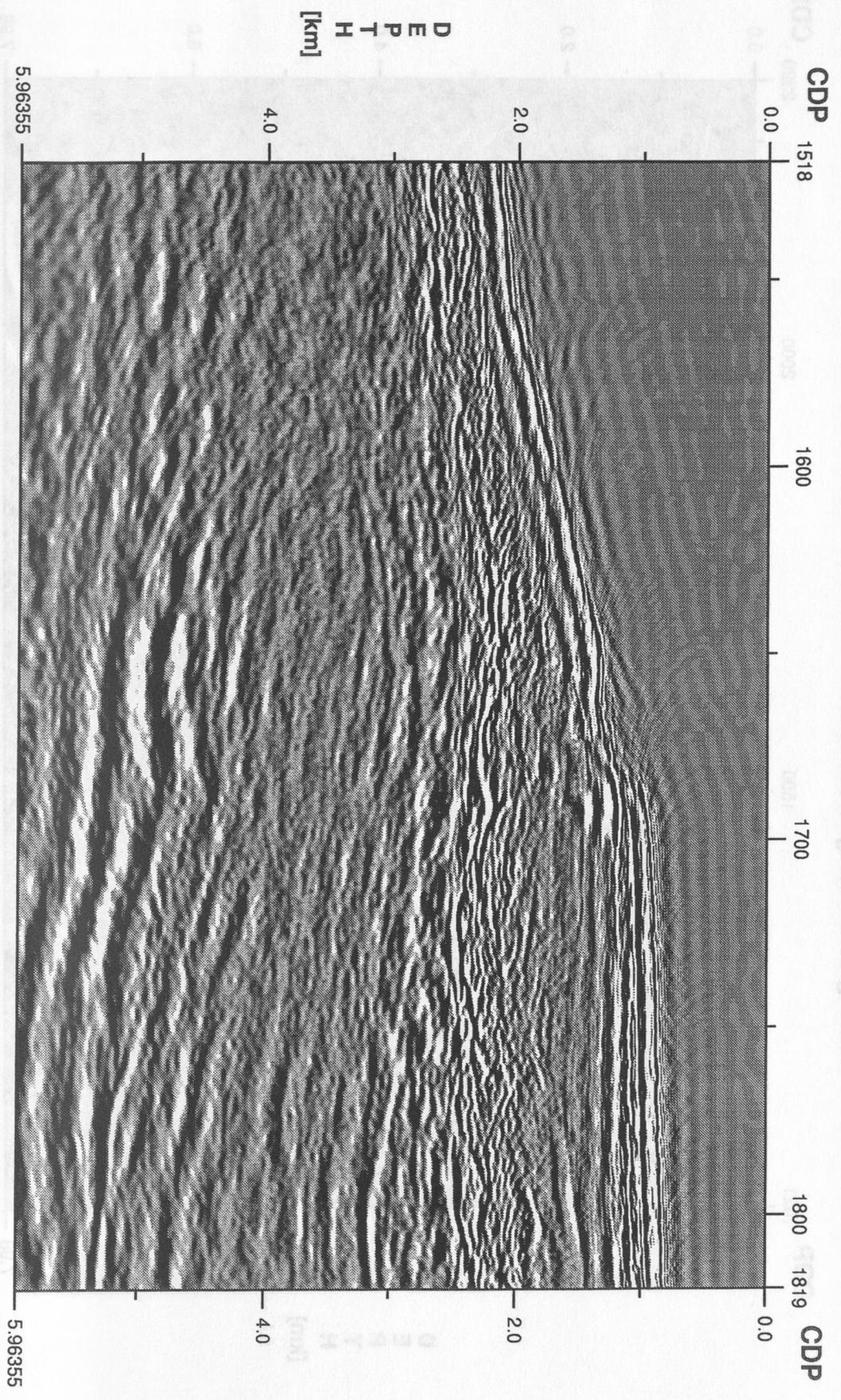
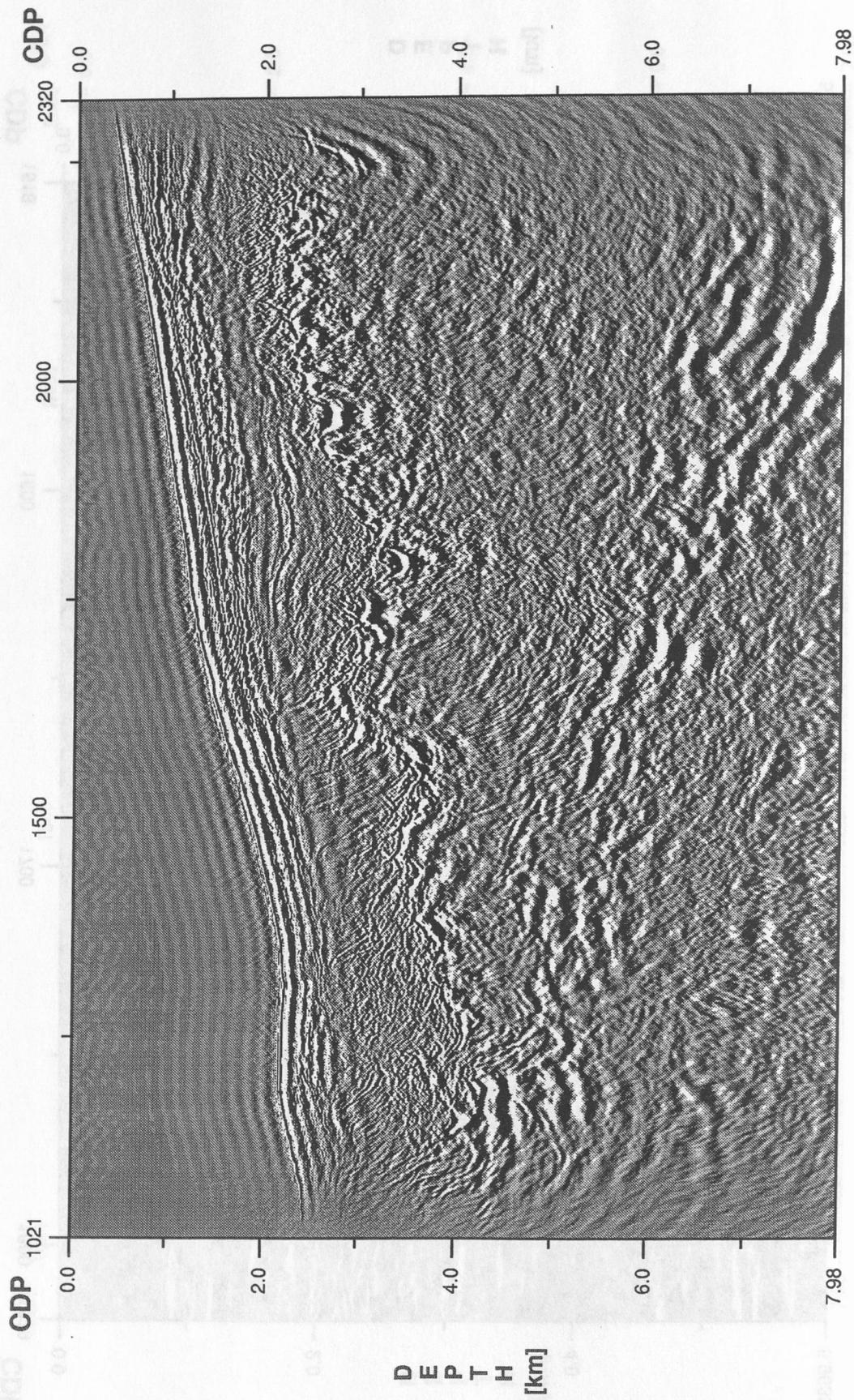


Abb. 48: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) der Inline 400 mit Makrogeschwindigkeitsfeld B



**Abb. 48: Ausschnitt der Inline 400 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld B**

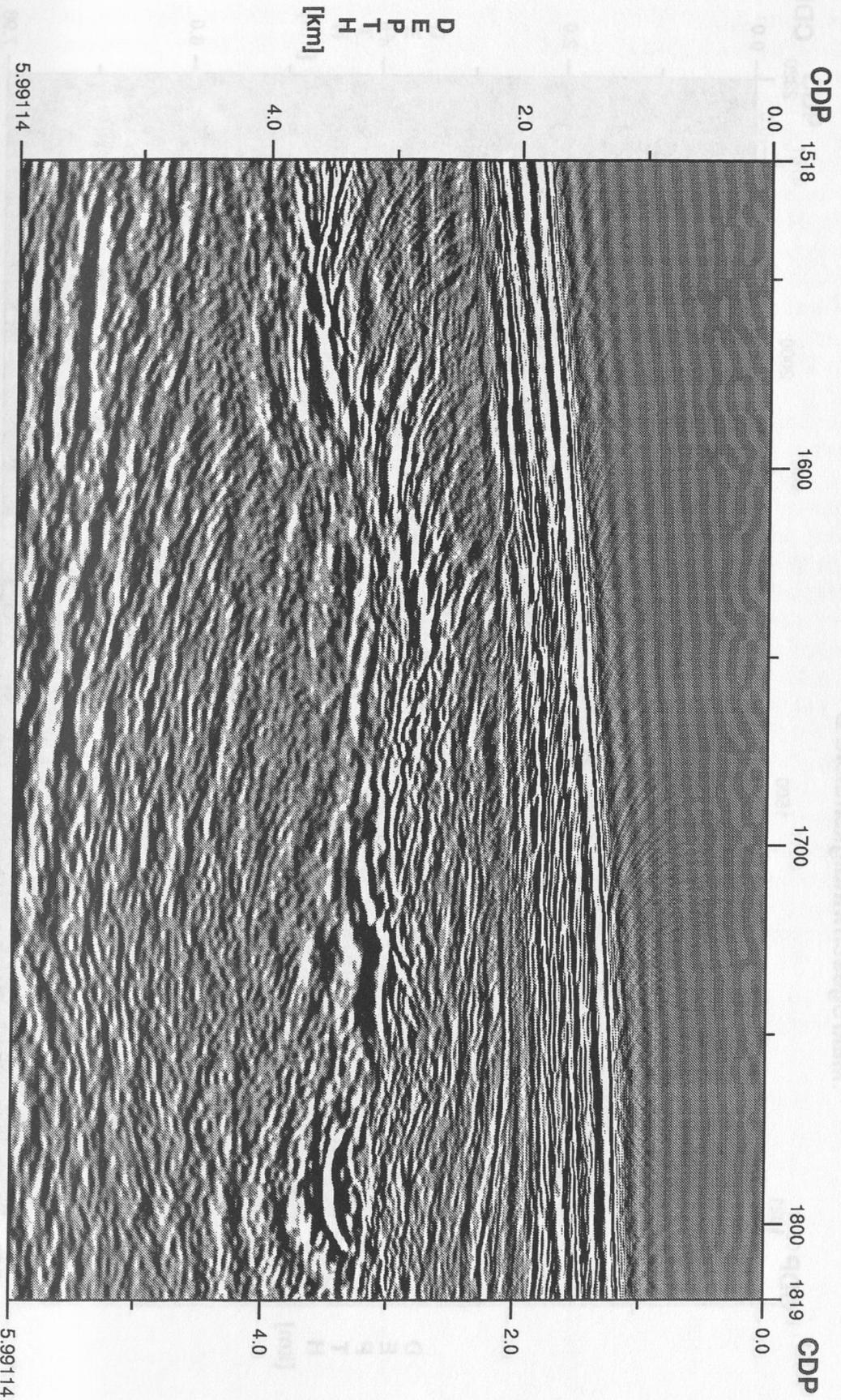


Abb. 49: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) der Inline 514 mit Makrogeschwindigkeitsfeld B

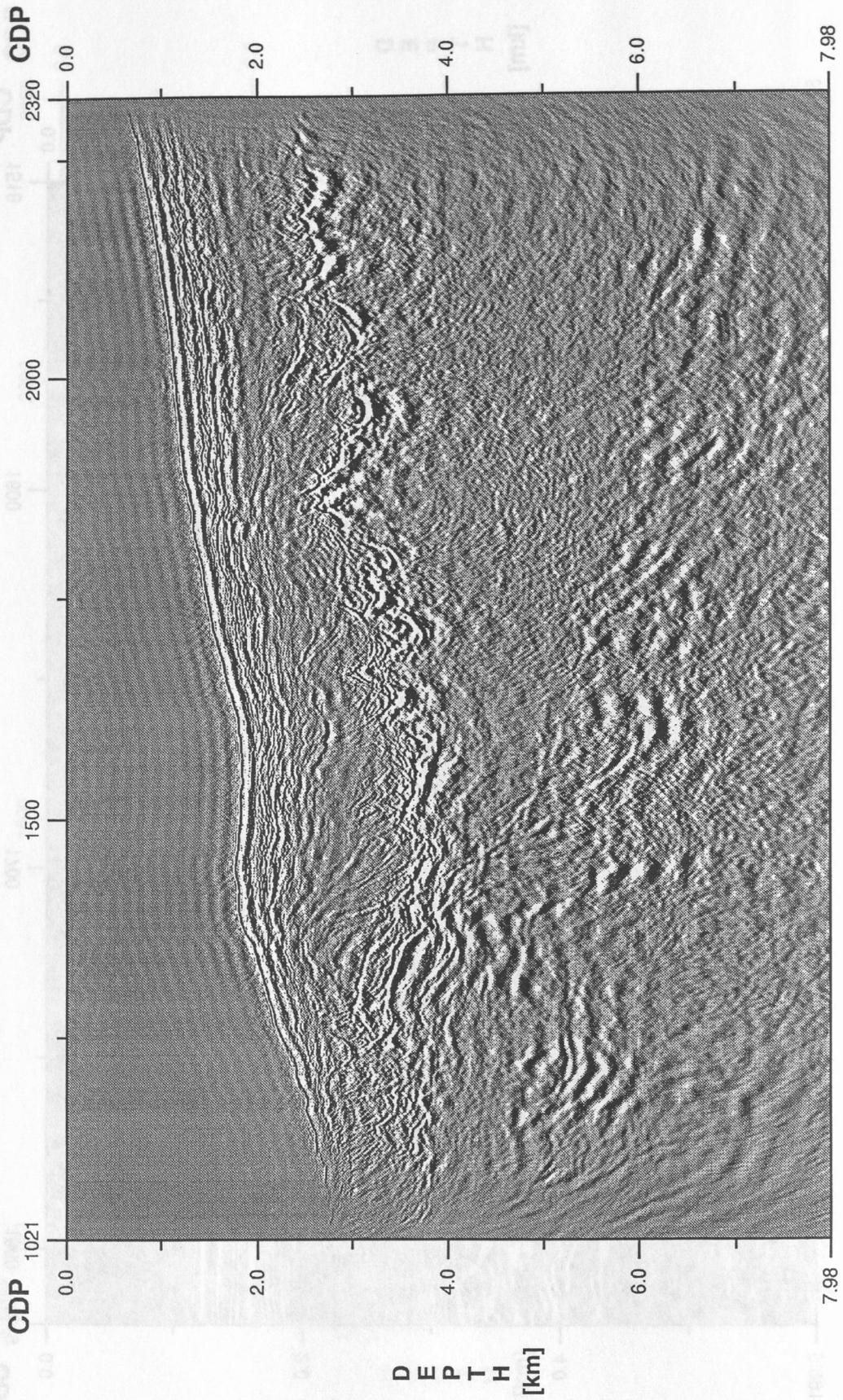
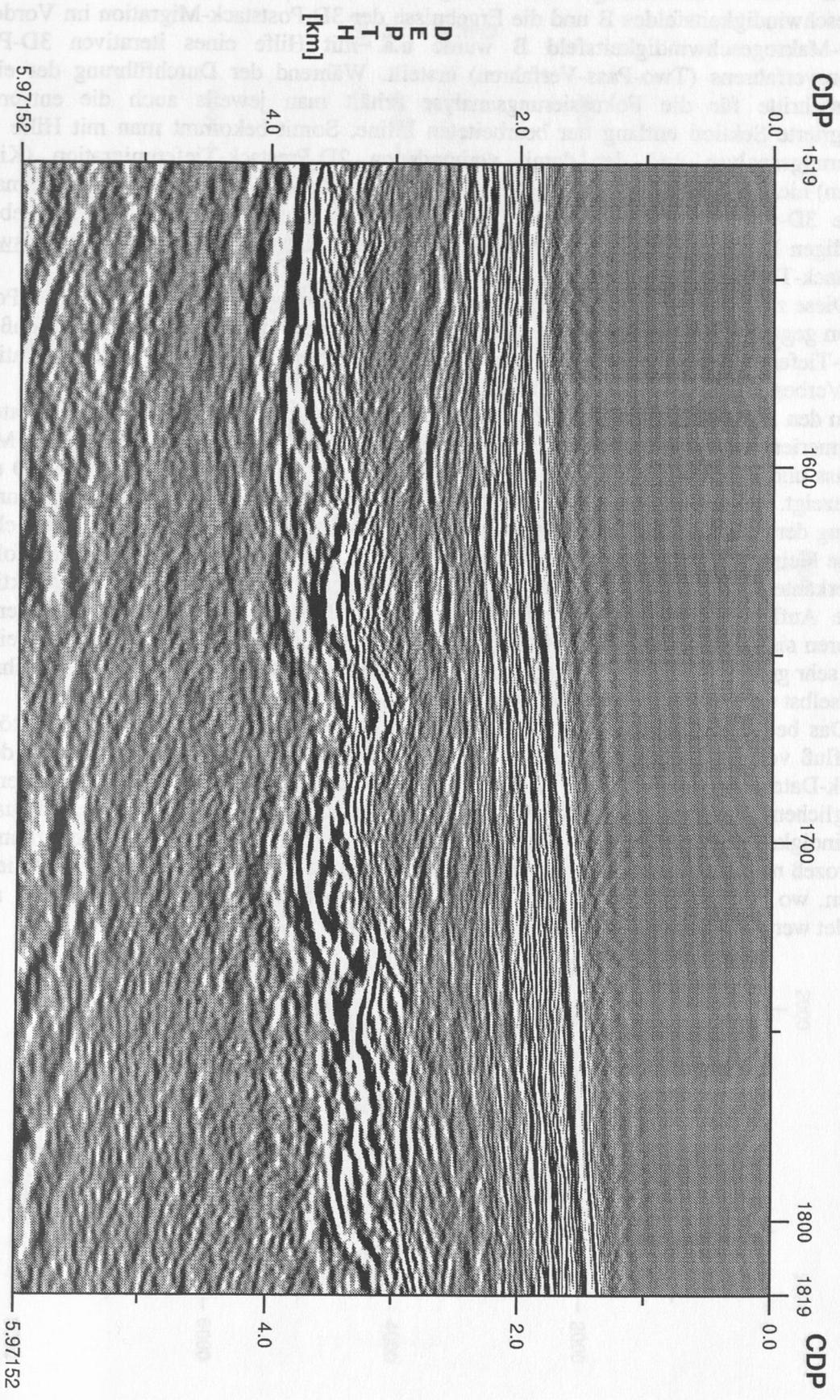


Abb. 49: Ausschnitt der Inline 514 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (FD) mit Makrogeschwindigkeitsfeld B



### 3.3.3 Die 3D-Prestack-Tiefenmigration (Two Pass)

Für die Zielsetzung des Projektes standen die Ableitung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes B und die Ergebnisse der 3D-Poststack-Migration im Vordergrund. Das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B wurde u.a. mit Hilfe eines iterativen 3D-Prestack-Migrationsverfahrens (Two-Pass-Verfahren) erstellt. Während der Durchführung der einzelnen Iterationsschritte für die Fokussierungsanalyse erhält man jeweils auch die entsprechende tiefenmigrierte Sektion entlang der bearbeiteten Inline. Somit bekommt man mit Hilfe der 2D-Fokussierungsanalyse und der damit verbundenen 2D-Prestack-Tiefenmigration (Kirchhoff-Verfahren) nicht nur Geschwindigkeitsfelder entlang der ausgewählten Inlines, sondern man erhält auch die 3D-prestack-tiefenmigrierten (Two Pass) Sektionen zu diesen Inlines. Neben dem vollständigen Ergebnis der 3D-Poststack-Tiefenmigration lag uns somit auch eine Auswahl von 3D-Prestack-Tiefenmigrationsergebnissen (Two Pass) vor.

Diese zusätzlich erhaltenen tiefenmigrierten Inlines können den Ergebnissen der Poststack-Migration gegenübergestellt und qualitativ verglichen werden. Dabei hat sich gezeigt, daß die 3D-Prestack-Tiefenmigration unter Umständen gegenüber der 3D-Poststack-Tiefenmigration eine weitere Verbesserung der Auflösung für die geologischen Strukturen erbringen kann.

In den Abbildungen 50 und 51 wird die Inline 255 (Numerierung für Prestack-Daten) bzw. 510 (Numerierung für Poststack-Daten, siehe Tabelle 1) einmal nach der 3D-Prestack-Migration (Two Pass und Kirchhoff-Verfahren) und einmal nach der 3D-Poststack-Migration (FD und One Pass) gezeigt. In beiden Abbildungen ist die deutlich keilförmige Struktur zu erkennen. Die Abbildung der Sedimentsequenzen darüber ist in der poststack-migrierten Sektion deutlicher. Hier wird eine kleinräumigere Unterteilung erreicht, und die Reflektoren sind besser zu verfolgen. Ab der Oberkante des Keiles (rough surface) zeigt dagegen die prestack-migrierte Sektion eine genauere Auflösung. Die Ober- und Unterkante des Keiles sind klarer zu erkennen. Beide Reflektoren sind eindeutig zum Keil hin abgegrenzt, und die untere Begrenzung der Keilstruktur verläuft sehr gerade bis hin zur Keilspitze. Das Reflexionsmuster beider Migrationsverfahren zeigt im Keil selbst eine sehr homogene Struktur.

Das bessere Imaging der tieferen Schichten bei der Prestack-Tiefenmigration könnte auf den Einfluß von ungenauen oder nur grob gesampleten Stapelgeschwindigkeiten, mit denen die Poststack-Daten erzeugt wurden, zurückgeführt werden. Die Poststack-Daten wurden in der ursprünglichen Version übernommen und konnten nicht noch einmal mit einem aktualisierten Geschwindigkeitsmodell neu gestapelt werden. Bei der Prestack-Migration konnte der Stapelprozeß mit den ungenaueren Stapelgeschwindigkeiten umgangen werden, so daß die tieferen Regionen, wo die Unterschiede in den Geschwindigkeitsmodellen am größten sind, i. a. besser abgebildet werden konnten.

Abb. 50: 3D-Pre-Stack-Tiefenmigration (Two Pass) der Inline 255 bzw. 510 mit Makrogeschwindigkeitsfeld B

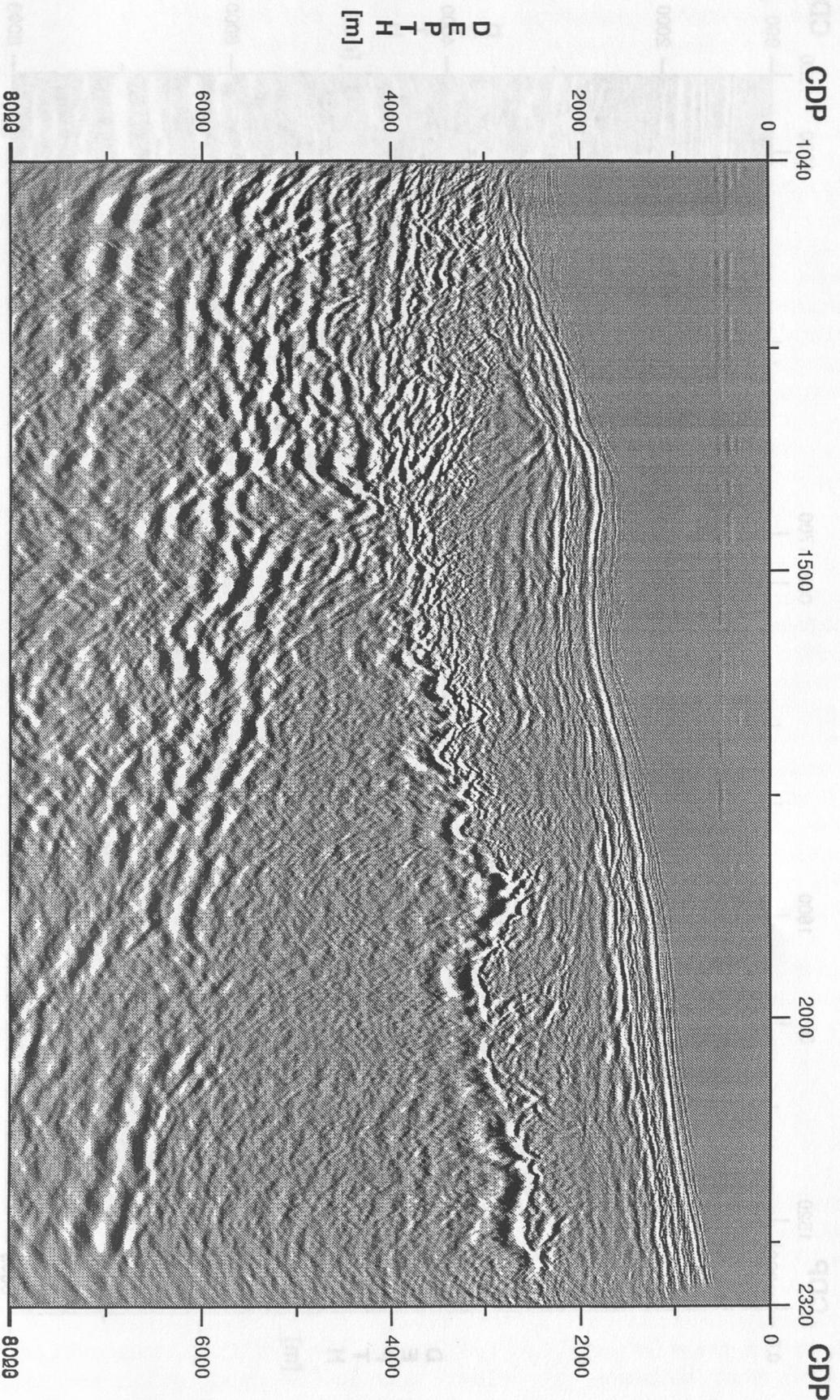
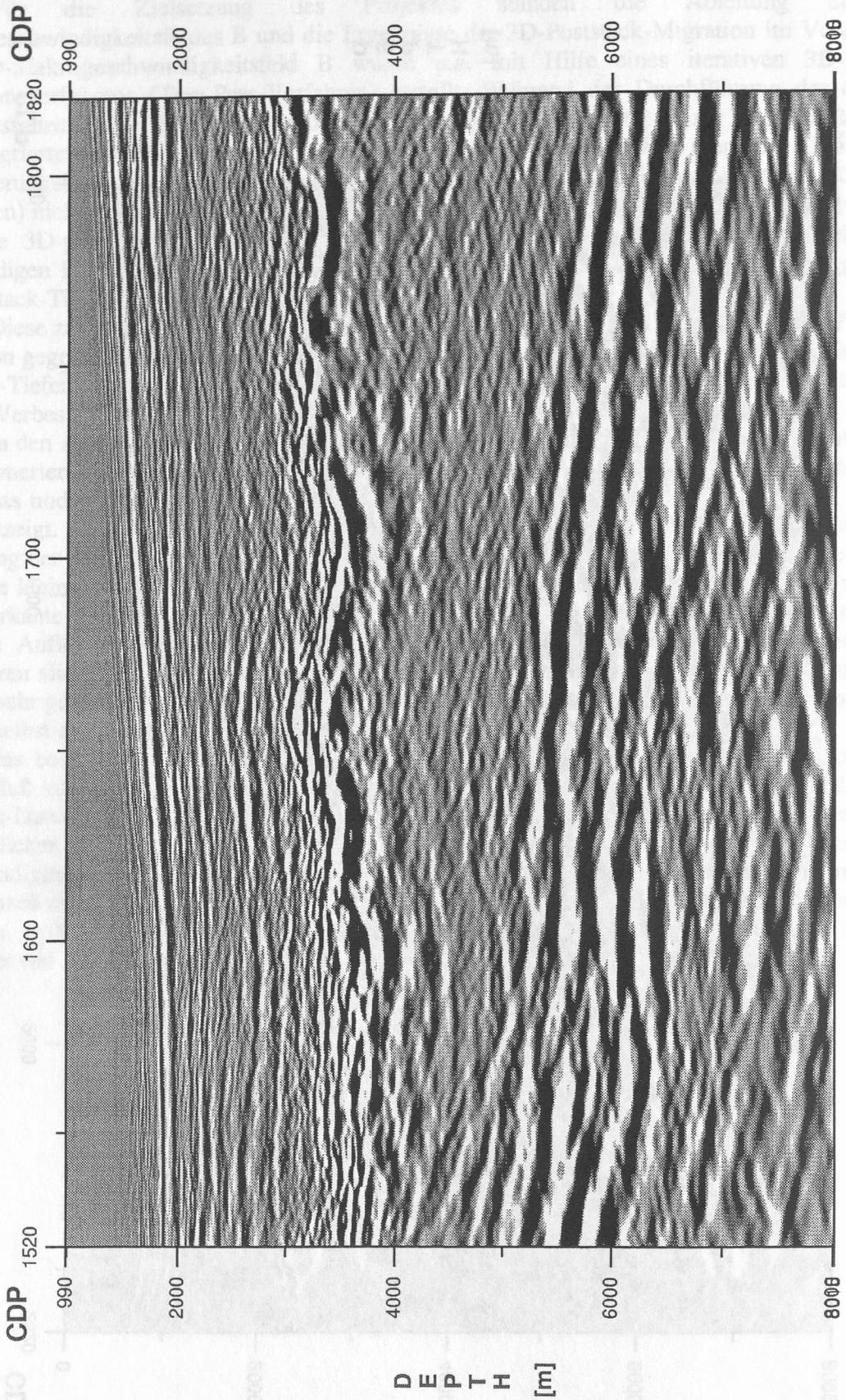


Abb. 50: Ausschnitt der Inline 255 bzw. 510 nach der 3D-Pre-Stack-Tiefenmigration (Two Pass) mit Makrogeschwindigkeitsfeld B



**Abb. 51: 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (One Pass) der Inline 255 bzw. 510 mit Makrogeschwindigkeitsfeld B**

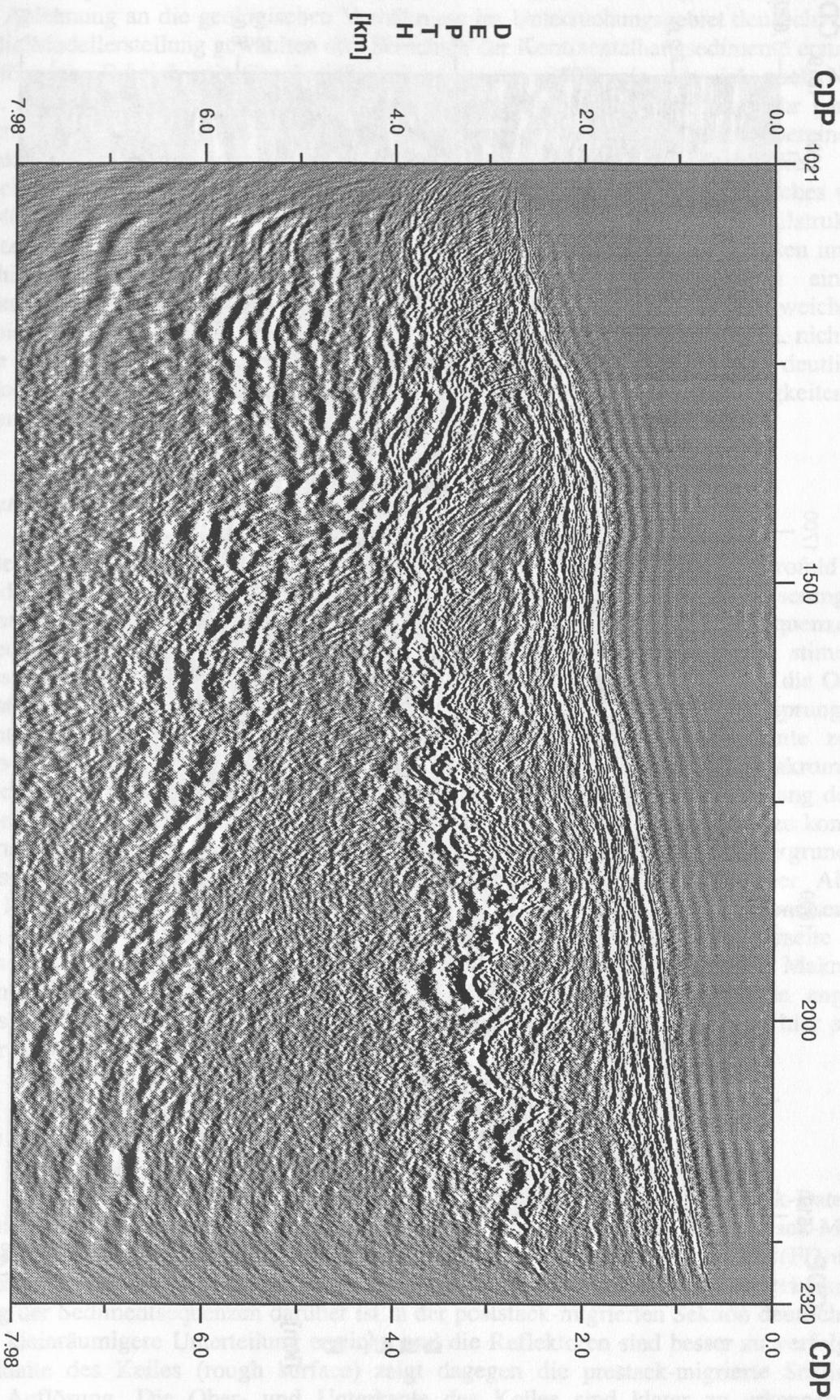
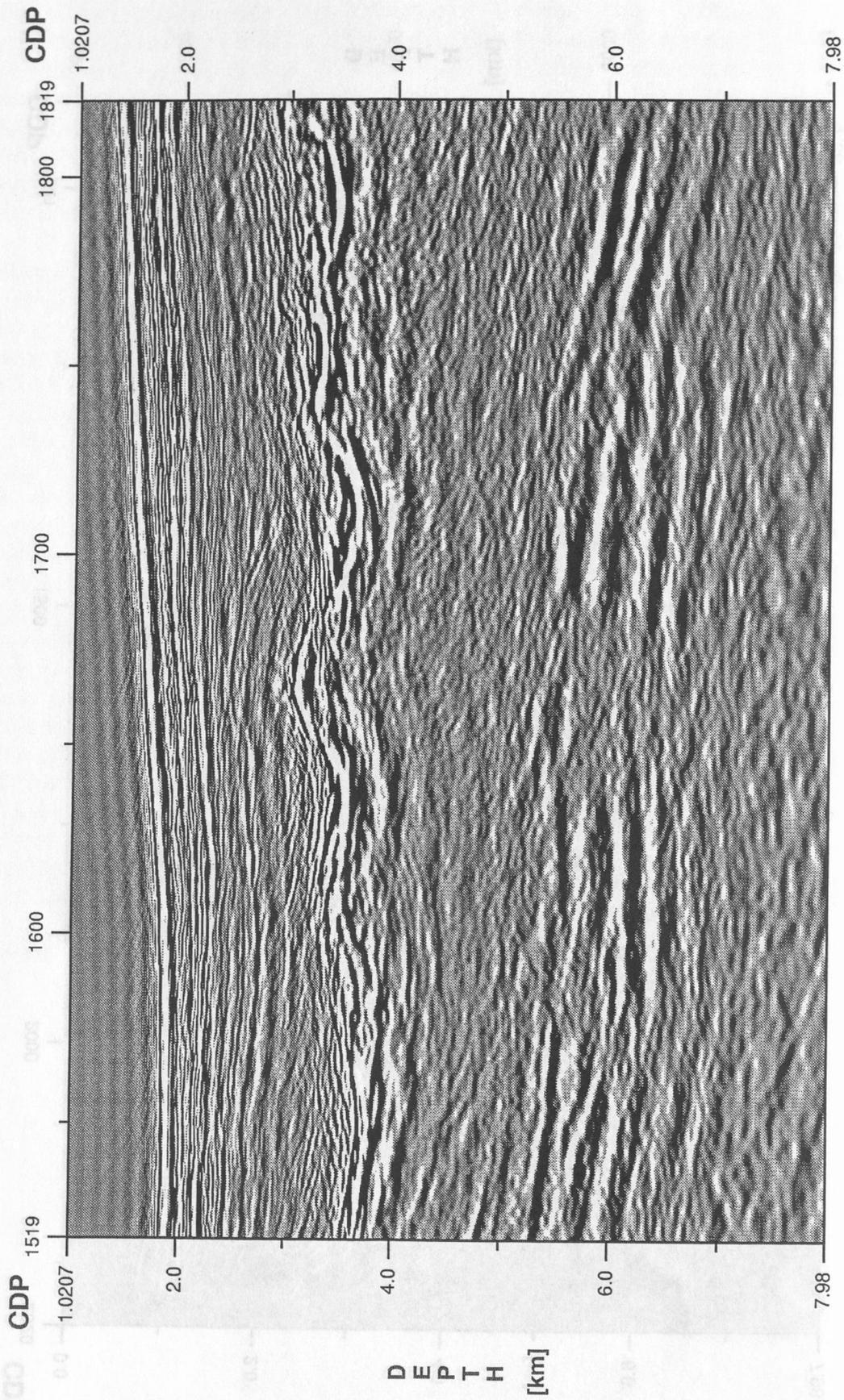


Abb. 51: Ausschnitt der Inline 255 bzw. 510 nach der 3D-Post-Stack-Tiefenmigration (One Pass) mit Makrogeschwindigkeitsfeld B



### 3.3.4 Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse

Das Beispiel des Makrofeldes B der Inline 514 ist in der Abbildung 37 dargestellt. Es wird hier die Anlehnung an die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet deutlich. Unterhalb der für die Modellerstellung gewählten drei Schichten der Kontinentalhangsedimente erstreckt sich ein keilförmiger Bereich mit Geschwindigkeiten von ca. 3800 m/s, der sich nach Nordosten verdickt. Darunter liegen zwei Schichten höherer Geschwindigkeiten, die ungefähr parallel zur Keilunterseite verlaufen und mit der Lage und Richtung der abtauchenden Platte übereinstimmen. Das Makromodell A der Inline 514 (Abb. 39) zeigt keine direkte Ähnlichkeit mit der vorherrschenden Geologie. Es ist zwar eine Verdickung des Geschwindigkeitsbereiches von 3000 m/s bis 4000 m/s nach Nordosten zu erkennen, doch wird weder der Beginn der Keilstruktur noch seine obere und untere Begrenzung kleinräumig differenziert. Die Geschwindigkeiten im Bereich der Schichtgrenze vom Keil zu den darunterliegenden Einheiten zeigen einen sehr ungleichmäßigen Verlauf, der von den geologischen Verhältnissen stark abweicht. Diese Unterschiede machen die auf der Stapelgeschwindigkeitsanalyse beruhende und nicht an die Geologie abgestimmte Vorgehensweise bei der Erstellung des Modells A deutlich. Das Makromodell A weist unterhalb der oberen Sedimentschichten zu hohe Geschwindigkeiten auf, die zudem nur unzureichend an die vorliegende Geologie gekoppelt sind.

#### *3D-Poststack-Migration mit Makrofeld A und B:*

Bei einem Vergleich der 3D-tiefenmigrierten Sektionen einmal mit dem Makrofeld A (Abb. 46 b) und einmal mit dem neuen Makrofeld B (Abb. 49) ist eine deutliche Verbesserung bei der Anwendung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B zu erkennen. In den Sedimentsequenzen treten keine deutlichen und charakteristischen Unterschiede auf. In diesem Bereich stimmen die Makrogeschwindigkeitsfelder A und B auch noch weitgehend überein. Aber schon die Oberkante der Keilstruktur bzw. der rough surface, an dem ein deutlicher Geschwindigkeitssprung erfolgt, zeigt Unterschiede in der Abbildungsgenauigkeit. Im Bereich der Keiloberkante zeigt das Makromodell A im allgemeinen 20% geringere Geschwindigkeiten auf als das Makromodell B. Durch die Geschwindigkeitsunterschiede sind die starken Amplitudenkontraste entlang des rough surface bei Makromodell B mit zunehmender Tiefe weiter auseinandergezogen. Hinzu kommt eine verbesserte Anpassung an die geologischen Strukturen im Untergrund von Makrogeschwindigkeitsfeld B, was zu einer weiteren Qualitätsverbesserung der Abbildung beiträgt. Der darunterliegende keilförmige Bereich ist in beiden Migrationsergebnissen relativ homogen aufgebaut und zeigt keine neuen Schichtgrenzen. Unterhalb der Keilunterseite sind die Ergebnisse der 3D-Poststack-Migration mit Makrofeld B deutlich besser als die mit Makrofeld A. In diesem Bereich kommt der Vorteil eines an die geologischen Verhältnisse angepaßten Makrogeschwindigkeitsfeldes B deutlich zum Tragen. Die abtauchende Platte ist hier sehr viel deutlicher und kontinuierlicher abgebildet.

#### *Vergleich der Prestack- und Poststack-Migration:*

In den Abbildungen 50 und 51 wird die Inline 255 (Numerierung für Prestack-Daten) bzw. 510 (Numerierung für Poststack-Daten, siehe Tabelle 1) einmal nach der 3D-Prestack-Migration (Two Pass und Kirchhoff-Verfahren) und einmal nach der 3D-Poststack-Migration (FD und One Pass) gezeigt. In beiden Abbildungen ist die deutlich keilförmige Struktur zu erkennen. Die Abbildung der Sedimentsequenzen darüber ist in der poststack-migrierten Sektion deutlicher. Hier wird eine kleinräumigere Unterteilung erreicht, und die Reflektoren sind besser zu verfolgen. Ab der Oberkante des Keiles (rough surface) zeigt dagegen die prestack-migrierte Sektion eine genauere Auflösung. Die Ober- und Unterkante des Keiles sind klarer zu erkennen. Beide

Reflektoren sind eindeutig zum Keil hin abgegrenzt, und die untere Begrenzung der Keilstruktur verläuft sehr gerade bis hin zur Keilspitze. Das Reflexionsmuster beider Migrationsverfahren zeigt im Keil selbst eine sehr homogene Struktur.

Bei der Prestack-Migration konnte der Stapelprozeß mit den ungenaueren Stapelgeschwindigkeiten umgangen werden, so daß die tieferen Regionen, wo die Unterschiede in den beiden Geschwindigkeitsmodellen A und B am größten sind, i. a. besser abgebildet werden.

## 4 Ausblick

Während der Projektarbeiten haben sich neue interessante Arbeitsziele ergeben, die im laufenden Projekt nicht eingeplant waren und deren vollständige Realisierung die Rechnerkapazität weit überstiegen hätte.

### *Verdichtung der Analysenpunkte:*

Für eine weitergehende Analyse und kleinräumigere Auflösung des Geschwindigkeitsfeldes müßte in Zukunft eine Verdichtung der Inlines vorgenommen werden. Das bedeutet, daß zunächst mehr Linien crossline-migriert (First Pass) und im anschließenden Second Pass weiterbearbeitet werden müßten. Mit geringeren Abständen in Crossline-Richtung und den daraus resultierenden zusätzlichen Informationen könnte der Beginn bzw. Verlauf der Keilspitze und ihrer Geschwindigkeitsstruktur genauer festgelegt werden. Es stünden dann auch weitere Stützstellen und Geschwindigkeitsinformationen von der abtauchenden Platte zur Verfügung, so daß diese auch besser abgebildet werden könnte.

Weiterhin ist es wichtig, den Schwerpunkt mehr auf die Auswertung einzelner 2D-Linien nach Anwendung der Crossline-Migration zu legen, denn nur während der Fokussierungsanalysen im Second Pass können entscheidende Abschnitte des Untergrundes mit der genügenden Genauigkeit kleinräumig und detailliert vorinterpretiert werden und können so zusammen mit einer abschließenden Gesamtinterpretation des gesamten 3D-tiefenmigrierten Datensatzes das bestmögliche Ergebnis liefern.

### *Iteration des RMS-Geschwindigkeitsfeldes:*

Eine Verbesserung der Ergebnisse der Crossline-Migration (First Pass) müßte sich durch ein verbessertes 3D-RMS-Modell ergeben. Ein solches steht uns im Prinzip schon zur Verfügung, denn das Sirius-Programm kann aus dem generierten 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B ein neues 3D-RMS-Feld erzeugen. Dieses ist dann wesentlich genauer als das bisher verwendete RMS-Modell und damit ist die Möglichkeit einer verbesserten Crossline-Migration gegeben. Dieser Ansatz ist jedoch im Rahmen dieses Projektes nicht weiter untersucht worden.

### *3D-Prestack-Tiefenmigration des vollständigen 3D-Datenvolumen:*

Anstatt eine 3D-Tiefenmigration (One Pass) der 3D-Poststack-Daten mit dem Makrogeschwindigkeitsfeld B durchzuführen, ist es auch möglich, auf den gesamten 3D-Prestack-Datensatz eine 3D-Prestack-Tiefenmigration (Two Pass) anzuwenden. Hierfür müßten sämtliche 3D-Prestack-Daten zunächst crossline-migriert werden. Das Ergebnis wären dann 154 crossline-migrierte Inlines, die dann im Second Pass mit dem vorhandenen Makrogeschwindigkeitsfeld B tiefenmigriert würden. Der Rechenzeitaufwand würde sich für die Crossline-Migration (First Pass) mit dem von uns verwendeten Rechner (Sun sparc ultra 1 mit 170 MHz Prozessor und 1 GB Hauptspeicher) auf ca. 90 Tage belaufen, die Tiefenmigration mit dem gegebenen Makrogeschwindigkeitsfeld B im Second Pass würde ca. 14 Tage dauern. Das Migrationsergebnis dieser Two-Pass-Migration könnte anschließend für das gesamte 3D-Volumen interpretiert werden. Die Nachteile einer 3D-Poststack-Migration, die durch den Prozeß des Stapelns entstanden sind, würden hierbei nicht auftreten.

Insgesamt gesehen bietet die 3D-Prestack-Migration (Two Pass) eine gute und effiziente Möglichkeit, um in Zukunft 3D-seismische Daten hochauflösend und flächenhaft zu prozessieren.

## 5 Danksagungen

Für die Unterstützung und konstruktive Diskussionen danken wir:

Dr. Thomas Rühl, *GEOMAR*,

Dr. Cesar Ranero, *GEOMAR*,

Dr. Dirk Kläschen, *GEOMAR*,

Prof. Dr. Roland von Huene, *GEOMAR*,

Dipl.-Geophys. Ulrich Bartschat, *GEOMAR*,

Karsten Neumann, *GEOMAR*,

Sven Wedemeyer, *GEOMAR*,

Dr. Willi Weinrebe, *GEOMAR*,

Dr. Rüdiger Kunze, *GEOMAR*,

Dr. Christian Reichert, *BGR*,

Dr. Heinrich Meyer, *BGR*.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung, die dieses Projekt erst möglich gemacht hat.

## 6 Literaturverzeichnis

Jeannot JP, Faye JP, and Denelle E (1986) Prestack migration velocities from depth focusing analysis. 56<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 438 - 440

Levin FK (1971) Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 36, 510 - 516

Ristow D, Rühl T (1994) Fourier Finite-Difference Migration. *Geophysics*, 59, 12, 1882 - 1893

Rühl T, Kopp C, Ristow D, (1995) Fourier finite difference migration for steeply dipping reflectors with complex overburden. *Geophysical Prospecting*, 43, 7, 919 - 938

Ristow D, Rühl T, (1997) 3-D implicit finite-difference migration by multi-way splitting. *Geophysics*, 62, 2, 554 - 567

Ristow D, Rühl T, (1997) Optimized operators for 3-D Fourier finite-difference migration. *J of Seismic Exploration*. 6, 367 - 383

Stoffa P L, Fokkema J T, De Luna Freire, RM, and Kessinger WP (1990) Split-step fourier migration. *Geophysics*, 56, 410 - 421

Devaux V, Gardner GHF, Rampersad T (1996) 3-D prestack depth migration by Kirchhoff Operator Splitting. Expanded Abstract SEG Annual Meeting, Denver

Zwischenbericht, DFG Vorhaben Hi 179/26-1, Febr. 1997