

UNTERSUCHUNG UND VERGLEICH VON ZWEI VERSCHIEDENEN
3D-PRESTACK-MIGRATIONSVERFAHREN ALS
TWO PASS-VERFAHREN ZUR ABLEITUNG EINES
3D-MAKROGESCHWINDIGKEITSFELDES

D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Thorsten Gindler

Kiel 2000

Referent: Prof. Dr. D. Ristow

Korreferent: Prof. Dr. B. Milkereit

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 2000

Zum Druck genehmigt: Kiel, den 17. Juli 2000

Prof. Dr. H. König

Der Dekan

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	S. 1
2	Allgemeiner Überblick über die Migrationstechniken	S. 3
2.1	Die Tiefen- und Zeitmigration	S. 3
2.2	Die 3D-Migration	S. 4
2.2.1	Die 3D-Poststack-Migration	S. 5
2.2.2	Die 3D-Prestack-Migration	S. 5
3	Crossline-Migrationsmethode I mit Anwendung des DMO-Verfahrens (CMMO-Verfahren)	S. 11
3.1	Überblick über die DMO-Verfahren	S. 11
3.2	Das Forel-Gardner DMO-Verfahren	S. 13
3.2.1	Der DMO-Operator und das räumliche Aliasing-Problem	S. 16
3.2.2	Entwicklung einer Lösung für das räumliche Aliasing-Problem	S. 19
3.2.3	Entwicklung eines inversen DMO-Operators	S. 22
3.3	Herleitung eines Crossline-Migrationsverfahrens aus dem MMO-Verfahren	S. 24
3.3.1	Beschreibung des MMO-Verfahrens	S. 24
3.3.2	Beschreibung und Herleitung des CMMO-Verfahrens	S. 26
4	Crossline-Migrationsmethode II ohne Anwendung des DMO-Verfahrens (CMSO-Verfahren)	S. 33
4.1	Beschreibung des CMSO-Verfahrens	S. 33
5	Untersuchungen der beiden Crossline-Migrationsverfahren anhand synthetischer 3D-Beispiele	S. 37
5.1	Untersuchungen von CMMO- und CMSO-Verfahren im konstanten Geschwindigkeitsfall	S. 38
5.1.1	Der Einfluß der Aufnahmegeometrie im 3D-Fall	S. 47

5.1.2 Das räumliche Aliasing-Problem beim CMMO- und CMSO-Verfahren	S. 57
5.1.3 Auswirkungen des 3D-RMS-Feldes beim CMSO-Verfahren	S. 69
5.2 Die Auswirkungen von variablen Geschwindigkeiten auf die Crossline-Migrationsverfahren	S. 79
5.2.1 $v(z)$ -Geschwindigkeitsvariationen	S. 80
5.2.2 $v(x, z)$ -Geschwindigkeitsvariationen	S. 84
5.2.3 $v(y, z)$ und (x, y, z) -Geschwindigkeitsvariationen	S. 88
6 Anwenden der Crossline-Migrationsverfahren auf die Inline eines realen 3D-Prestack-Datensatzes	S. 103
7 Anwenden einer 3D-Prestack-Migration (Two Pass) auf einen realen Costa Rica-Datensatz	S. 111
7.1 Herleitung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C	S. 112
7.2 Ergebnisse der 3D-Poststack-Tiefenmigration mit den Makrogeschwindigkeitsfeldern B und C	S. 123
7.3 Ergebnisse der Crossline-Migration mit einem verbesserten 3D-RMS-Feld	S. 126
8 Zusammenfassung und Ausblick	S. 129
9 Literaturliste	S. 133
Anhang A: Realisierung des CMSO-Verfahrens	S. 137

1 Einleitung

Seismische Zeitsektionen sind eine graphische Darstellung der gemessenen Laufzeiten und Amplituden. Bei einfachen oder flach gelagerten geologischen Strukturen haben sie eine entfernte Ähnlichkeit mit dem Schichtenbild des geologischen Untergrundes. Die zeitliche Darstellung komplizierter tektonischer Verhältnisse läßt jedoch eine unmittelbare Deutung kaum zu: z.B. geneigte Reflektoren sind verschoben, viele Diffraktoren überlagern sich zu einem schwer interpretierbaren Gewirr von Einsätzen.

Die Aufgabe der Migration besteht darin, aus den gemessenen Laufzeiten ein maßstäbliches, d.h. im geometrischen Sinne ähnliches Bild des erfaßten Untergrundes mit seinen Strukturen zu rekonstruieren (Ristow, 1997). Im Fall von komplizierten geologischen Untergrundstrukturen, wenn besonders laterale Geschwindigkeitsvariationen auftreten, kann eine Tiefenmigration das wahre Abbild des Untergrundes liefern. Zur Durchführung einer Tiefenmigration wird ein möglichst realistisches Geschwindigkeitsfeld (Makrogeschwindigkeitsfeld) benötigt. Die Tiefenmigrationsverfahren setzen dafür zuverlässige und korrekte Makrofelder voraus, zu starke Abweichungen erzeugen im Migrationsergebnis Defokussierungen und Artefakte. Im 2D-Fall können die entsprechenden 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder durch Anwendung der 2D-Prestack-Migrationsmethode auf ungestapelte Daten (Prestack-Daten) abgeleitet werden. Im 3D-Fall kann das zugehörige 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld vom Prinzip her ebenfalls durch eine vollständige 3D-Prestack-Migration hergeleitet werden. Allerdings ist dieses Verfahren oft kompliziert und sehr aufwendig und wird deshalb in der Praxis häufig lediglich „target-orientiert“ eingesetzt. Daher werden einfachere 3D-Prestack-Migrationsverfahren gesucht und angewandt, um bei einem vertretbaren wirtschaftlichen Aufwand ein 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld ableiten zu können.

Ein wesentliches Ziel von 3D-Prestack-Migrationsverfahren (Two Pass) ist es, aus den gemessenen 3D-seismischen Daten ein zuverlässiges 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld abzuleiten. Dabei besteht der 1. Schritt (First Pass) im Wesentlichen aus einem Crossline-Migrations-Verfahren, bei dem sämtliche 3D-Seiteneffekte aus den 3D-seismischen Daten eliminiert werden. Es liegen anschließend nur noch 2D-Prestack-Daten entlang ausgewählter 2D-Linien (Inlines) vor. Im 2. Schritt (Second Pass) wird auf diese 2D-Prestack-Daten eine 2D-Prestack-Tiefenmigrationsanalyse angewandt. Das Ergebnis sind schließlich 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder, die jeweils einen vertikalen Schnitt durch das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld darstellen.

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Methoden zur Durchführung der Crossline-Migration (First Pass) vorgestellt. Die erste Crossline-Migrationsmethode beruht auf einem in der geophysikalischen Literatur bekannten Verfahren. Die zweite Crossline-Migrationsmethode (CMMO) wurde im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, welches sich von der Methodik her wesentlich vom ersten Verfahren unterscheidet. Beide Methoden werden vom Prinzip her vorgestellt, miteinander verglichen und ihre Effektivität anhand verschiedener synthetischer und realer 3D-Datensätze analysiert. Es wird sich zeigen, daß die beiden Crossline-Migrations-Methoden sowohl spezifische als auch gemeinsame Vor- und Nachteile in möglichen Einsatz-Situationen besitzen. Am Ende der Untersuchungen wird eine der

beiden Crossline-Migrationsmethoden ausgewählt und innerhalb des Two Pass-Prozesses zur Bestimmung von 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldern auf einen realen Datensatz eingesetzt. Das Ergebnis dieses Two Pass-Prozesses sind schließlich zwei unterschiedlich genaue 3D-Makrogeschwindigkeitsfelder, mit denen der vollständige reale 3D-Datensatz mit der 3D-Poststack-Tiefenmigration tiefenmigriert wurde.

2 Allgemeiner Überblick über die Migrationstechniken

In diesem Kap. 2 werden die verschiedenen existierenden Migrationsmethoden kurz vorgestellt und gegeneinander abgegrenzt.

2.1 Die Tiefen- und Zeitmigration

In der Migrationstechnik unterscheidet man die Zeit- und die Tiefenmigration (Yilmaz, 1994).

a) Tiefenmigration

Unter einer Tiefenmigration versteht man die Abbildung einer seismischen Zeitsektion $p(x, y, t)$ [Seismogramm oder Zero-Offset-Funktion] mit Hilfe eines Migrationsverfahrens in eine Tiefensektion $f(x, y, z)$ und zwar unter Einbeziehung eines ortsabhängigen Geschwindigkeitsfeldes (Makrogeschwindigkeitsfeld) $v = v(x, y, z)$.

Die dazu benutzten Tiefenmigrations-Algorithmen berücksichtigen die Brechung der Strahlen an den jeweiligen Schichtgrenzen im Untergrund. Da die Brechung an den Schichtgrenzen jedoch stark von den Geschwindigkeiten abhängt, können fehlerhafte Geschwindigkeitsfelder das Ergebnis deutlich verfälschen. Die Genauigkeit der verwendeten Geschwindigkeitsfelder hat eine wesentliche Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse. Sind die lateralen Geschwindigkeitsgradienten im Untergrund sehr stark, so kann nur eine Tiefenmigration ein richtiges Abbild des Untergrundes liefern (Yilmaz, 1994).

Das Makrogeschwindigkeitsfeld:

Ein für die Tiefenmigration benötigtes detailliertes Geschwindigkeitsmodell, in dem auch alle lateralen Geschwindigkeitsvariationen mit berücksichtigt werden (Yilmaz, 1994), heißt Makrogeschwindigkeitsfeld. Der Begriff Makrogeschwindigkeitsfeld ist sehr anschaulich, da er beschreibt, daß das für die Tiefenmigration benötigte Geschwindigkeitsfeld nicht zu kleinräumig sein darf und lediglich die großräumigen Strukturen der Geschwindigkeitsverteilung (Berkhout, 1984) repräsentiert. Das bedeutet z.B., daß die Geschwindigkeitsverteilung in den einzelnen Schichten so sein sollte, daß diese durch Gradienten dargestellt werden kann. Im folgenden wird das für eine Tiefenmigration benötigte Geschwindigkeitsmodell deshalb ausschließlich mit Makrogeschwindigkeitsmodell bezeichnet.

b) Zeitmigration

Das Ergebnis der Tiefenmigration $f(x, z)$ sollte eigentlich grundsätzlich im Tiefenbereich z dargestellt werden. Oft aber wird die Tiefe z durch eine Vertikallaufzeit τ ersetzt:

$$\tau(z) = 2 \cdot \int_0^z \frac{dp}{c(p)} \quad . \quad (2.1)$$

Dabei ist $c(z)$ eine dem Modell angepaßte Ersatzgeschwindigkeit. Die Ersatzgeschwindigkeit darf sogar von der Koordinate x abhängen (Ristow, 1997).

Die Darstellung der migrierten Daten im Zeit-Bereich bietet einige Vorteile: Stapelsektionen und migrierte Sektionen lassen sich besser „vergleichen“, der Frequenzinhalt bleibt nahezu erhalten, Multiple lassen sich eindeutiger identifizieren. Bei den Zeitmigrationsverfahren wird der Algorithmus so geändert, daß das Ergebnis automatisch im Zeitbereich dargestellt wird. Viele Zeitmigrationsverfahren liefern allerdings bei lateralen Geschwindigkeitsänderungen inkorrekte Ergebnisse, weil der Algorithmus die Brechung an den Schichtgrenzen nicht richtig berücksichtigt.

Es handelt sich bei der Zeitmigration um einen unvollständigen Migrations-Algorithmus, der dennoch bis heute seine große praktische Bedeutung für die Migration von Zero-Offset-Daten behalten hat.

Folgende Punkte sind dafür verantwortlich:

1. Oft ist die laterale Variation der Geschwindigkeiten so gering oder vernachlässigbar, daß der größere Aufwand einer Tiefenmigration nicht gerechtfertigt ist.
2. Auch bei mäßig bis stark lateralen Geschwindigkeitsänderungen soll die Zeitmigration möglichst schnell ein vorläufiges Ergebnis liefern.
3. Tiefenmigrationen setzen richtige Makrogeschwindigkeitsfelder voraus, um sinnvoll interpretierbare Ergebnisse zu erhalten. Zeitmigrationsverfahren sind dagegen in Bezug auf die Genauigkeit der Geschwindigkeitsfunktion wesentlich weniger empfindlich.

Die Zeitmigration spielt in dieser Arbeit insofern eine wichtige Rolle, weil die hier zu diskutierende „Crossline-Migration“ durch eine Zeitmigration realisiert wird.

2.2 Die 3D-Migration

Die 2D-Migration liefert ein fehlerhaftes Bild des Untergrundes, wenn sich die Struktur des Untergrundes senkrecht zur 2D-Linie (Streichrichtung) ändert. Viele Einsätze in einer 2D-migrierten Sektion sind durch Diffraktoren erzeugt worden, die außerhalb des vertikalen Schnitts durch die 2D-Meßlinie liegen (Yilmaz, 1994). Es handelt sich hierbei um 3D-Seiteneffekte. Wenn sich die Strukturen im Untergrund in allen Richtungen gleich stark ändern, dann kann nur noch eine 3D-Technik mit einer 3D-Migration ein zuverlässiges Abbild des Untergrundes ergeben. In der folgenden Abb. 2.1 wird eine Übersicht über die verschiedenen 3D-Migrationsverfahren gegeben

3D-Poststack-Migration

- a) Two-Pass (Zeitmigration)
- b) One-Pass (Tiefen- und Zeitmigration)

3D-Prestack-Migration

- c) Two-Pass (Zeitmigration im First Pass und Tiefenmigration im Second Pass; geeignet für Geschwindigkeitsanalysen)
- d) One-Pass (Tiefenmigration, meistens sehr aufwendig für Geschwindigkeitsanalysen)

Abb. 2.1: Übersicht über die verschiedenen 3D-Migrationsverfahren.

Die verschiedenen Verfahren werden kurz vorgestellt und zwar in der Reihenfolge a), b), d) und schließlich c). Das Verfahren c) der 3D-Prestack-Migration (Two Pass) ist Hauptgegenstand dieser Arbeit.

2.2.1 Die 3D-Poststack-Migration

a) 3D-Poststack-Migration als Two Pass-Verfahren

Hier werden im First Pass alle 2D-Profile zunächst in eine Richtung 2D-poststack-migriert (Jacubowicz, H., et al., 1983). Im anschließenden zweiten Second Pass werden dann die 2D-migrierten Daten in die zweite orthogonale Richtung umsortiert und noch einmal 2D-poststack-migriert. Diese Methode wird als Industriestandardverfahren seit ca. 1978 bis heute als schnelle Zeitmigration eingesetzt. Dieses Verfahren ist aber als 3D-Tiefen-Migrationsverfahren nicht geeignet (Ristow, 1995) und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

b) 3D-Poststack-Migration als One Pass-Verfahren

Im Unterschied zum Two Pass-Verfahren wird bei der Finiten-Differenzen-Realisierung des One Pass-Verfahrens das 3D-Wellenfeld vom Niveau z auf das Niveau $(z + dz)$ extrapoliert, und zwar unter Berücksichtigung eines ortsabhängigen Makrogeschwindigkeitsfeldes $v = v(x, y, z)$ im Intervall von z bis $(z + dz)$.

Anschließend erfolgt die Realisierung der Imaging Bedingung: Es werden alle Amplitudenwerte für den Zeitpunkt $t = 0$ herausgegriffen und als Reflektivität in der Tiefe $(z + dz)$ nach dem Sherwood-Loewenthal-Modell (Claerbout, 1984) interpretiert. Für den Zero-Offset Fall wird das „Exploding-Reflektor“-Modell (Sherwood-Loewenthal-Modell) angenommen: Jeder Diffraktionspunkt im Untergrund strahlt zur Zeit $t = 0$ eine „nach oben“ laufende akustische Welle ab, wobei die halbe Geschwindigkeit zwischen Diffraktor und der Meßfläche angenommen wird.

Diese 3D-Tiefenmigrations-Methode liefert eine recht genaue Abbildung des Untergrundes, sofern das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld bekannt ist und der 3D-Stapelprozeß zulässig ist (Ristow, 1997). Dieses Verfahren wird im Rahmen dieser Arbeit in Kap. 7 auf reale 3D-Daten eingesetzt.

2.2.2 Die 3D-Prestack-Migration

d) 3D-Prestack-Migration als One Pass-Verfahren

In einigen 3D-Meßgebieten läßt sich wegen der Komplexität der geologischen Strukturen (z.B. Salzstöcke, Salzkissen) eine richtige 3D-Stapelung von 3D-CMP-seismischen Daten nicht durchführen. In solchen Fällen werden ungestapelte 3D-Daten (3D-Prestack-Daten) mit einem 3D-Prestack-Tiefenmigrations-Verfahren bearbeitet, der 3D-Stapelprozeß wird dabei umgangen. Allerdings muß bei diesem Verfahren das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld genau bekannt sein.

Der große Vorteil der Prestack-Tiefenmigrations-Verfahren besteht darin, daß die Makrogeschwindigkeitsfelder durch iteratives Processing aufdatiert und optimiert

werden können (vgl. Kap. 7). 2D-Prestack-Tiefenmigrations-Verfahren sind heute bereits als Standardverfahren zu betrachten und sind notwendiger Teil jedes modernen seismischen Bearbeitungssystems. 3D-Prestack-Tiefen-Migrationsverfahren sind seit ca. 1992 für praktische Anwendungen entwickelt worden. Diese Verfahren werden besonders in speziellen Fällen bei äußerst komplizierten geologischen Strukturen (z.B. Auflösung der Schichten unter Salzstrukturen) angewandt. In den letzten Jahren sind 3D-Prestack-Migrationsverfahren wegen der enormen Leistungsentwicklung der Computer für die Praxis entwickelt worden (Cabrera et al., 1992). Dabei werden oft die Vorteile der Kirchhoff-Migrationsmethode [z.B. hohe Flexibilität bei ungleichmäßiger Anordnung der Schüsse und Empfänger, Migration von starken Neigungen, Yilmaz (1994), bestimmte Bereiche für Migrationsergebnisse sind anwählbar: „target-oriented-migration“, Ratcliff et al. (1992)] geschickt ausgenutzt.

Nach Cabrera et al. (1992) und Ratcliff et al. (1992) gibt es dabei die folgenden Ansätze zur drastischen Reduzierung der Rechenzeit:

- Target-orientiertes Vorgehen (z.B. auch ausgewählte Sektionen) durch 3D-Kirchhoff-Verfahren,
- Parallelisierung der Aufgaben mittels Massiv-Paralleler Rechner.

Die 3D-Prestack-Tiefenmigration einschließlich der Bestimmung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes eines 3D-Gesamtvolumens übersteigt jedoch im allgemeinen die Rechnerkapazität vieler Institute und Gesellschaften und beinhaltet sehr lange Rechenzeiten (Größenordnung: einige Monate). Eine sinnvolle und effiziente Alternative für dieses Verfahren stellt die 3D-Prestack-Tiefenmigration als Two Pass-Verfahren dar.

c) 3D-Prestack-Migration als Two Pass-Verfahren

Wie im Fall des Two Pass-Verfahrens für gestapelte 3D-Daten (Zero-Offset-Daten) (Jacubowicz et al., 1983) gilt auch hier, daß dieses Zeit-Migrationsverfahren im First Pass für 3D-ungestapelte Daten (3D-Prestack-Daten) nur als Approximation zu betrachten ist. Der Vorteil liegt jedoch darin, daß das Two Pass-Verfahren viel weniger Rechenzeit benötigt als das One Pass-Verfahren. Dieses Verfahren eignet sich daher sehr gut für Geschwindigkeitsanalysen und zur Ableitung von zuverlässigen 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldern.

Eine verbesserte Variante dieses Two Pass-Verfahrens besteht darin, im 1. Schritt (First Pass) eine Zeitmigration (-> Crossline-Migration) und im 2. Schritt (Second Pass) eine iterative 2D-Tiefenmigration durchzuführen. Diese Variante wird in dieser Arbeit näher untersucht. Dabei werden zwei verschiedene Methoden zur Realisierung einer Crossline-Migration (First Pass) für ein Two Pass-Verfahren miteinander verglichen. Zuvor soll jedoch der prinzipielle Ablauf dieser Variante erläutert werden.

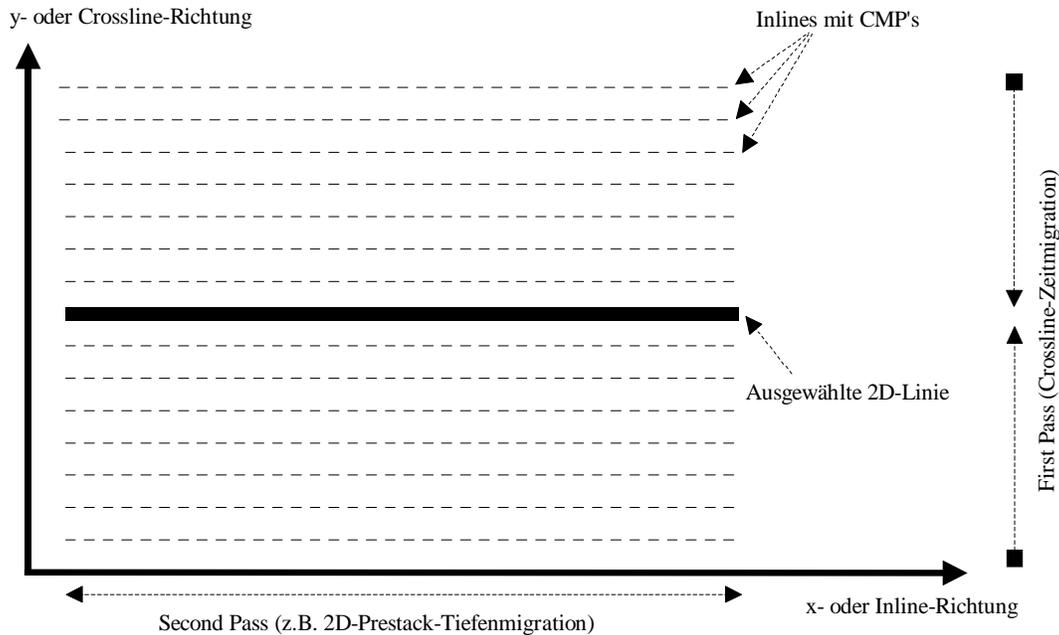


Abb. 2.2: Prinzip einer 3D-Prestack-Migration als Two Pass-Verfahren. Im First Pass wird in y- (Crossline-) Richtung eine Crossline-Migration auf eine vorher ausgewählte 2D-Linie, die in Inline-Richtung liegt, durchgeführt. Entlang dieser Inline liegen anschließend nur noch 2D-Prestack-Daten ohne 3D-Seiteneffekte vor. Im Second Pass werden diese Daten wie normale 2D-Prestack-Daten behandelt und können einer iterativen 2D-Prestack-Tiefenmigrationsanalyse zur Ableitung eines 2D- / 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes unterzogen werden.

Prinzipieller Ablauf einer 3D-Prestack-Migration (Two Pass) :

- Eine 2D-Linie (z.B. in x-Richtung oder Inline-Richtung) wird aus dem 3D-Datenvolumen ausgewählt.
- Im **1. Schritt (First Pass)** wird zunächst auf alle 3D-seismischen Daten in y-Richtung (oder Crossline-Richtung) eine partielle Zeitmigration (**Crossline-Migration**) durchgeführt. Jede der 3D-seismischen Zeitreihen wird entsprechend dem jeweils verwendeten Crossline-Migrationsverfahren dabei mindestens einmal prozessiert und auf die ausgewählte 2D-Linie (Inline) „projiziert“. Damit sollen durch destruktive Interferenz sämtliche 3D-Seiteneffekte entlang der ausgewählten 2D-Linie (Inline) eliminiert worden sein. Es ist zu erwarten, daß entlang der 2D-Linie (Inline) nach der Crossline-Migration durch konstruktive Interferenz nur noch ungestapelte 2D-Daten (2D-Prestack-Daten) vorliegen (Abb. 2.2).
- Im **2. Schritt (Second Pass)** wird die Menge aller auf der 2D-Linie vorhandenen Daten und der auf die 2D-Linie projizierten Daten nach CMP-Punkten und Offsets sortiert und nach eventuellen Korrekturen wie normale ungestapelte 2D-Daten ohne 3D-Seiteneffekte behandelt. Eine 2D-Prestack-Tiefenmigrations-Analyse (z.B. nach der 2D-Fokussierungsanalyse; Jeannot, 1986 u. 1994) auf diese 2D-Daten ergibt eine 2D-Tiefensektion und ein 2D-Makrogeschwindigkeitsfeld. Beide Sektionen stellen einen vertikalen Schnitt durch das geologische 3D-Struktur-Modell bzw. durch das

3D-Makrogeschwindigkeitsmodell dar. Durch Interpolation mehrerer 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder kann ein 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld erzeugt werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im wesentlichen mit der Herleitung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes unter Anwendung einer 3D-Prestack-Migration (Two Pass). Das 3D-Makrofeld wird für eine anschließende vollständige 3D-Poststack-Tiefenmigration eingesetzt wird. Der prinzipielle Ablauf des Two Pass-Verfahrens wird in Abb. 2.3 gezeigt.

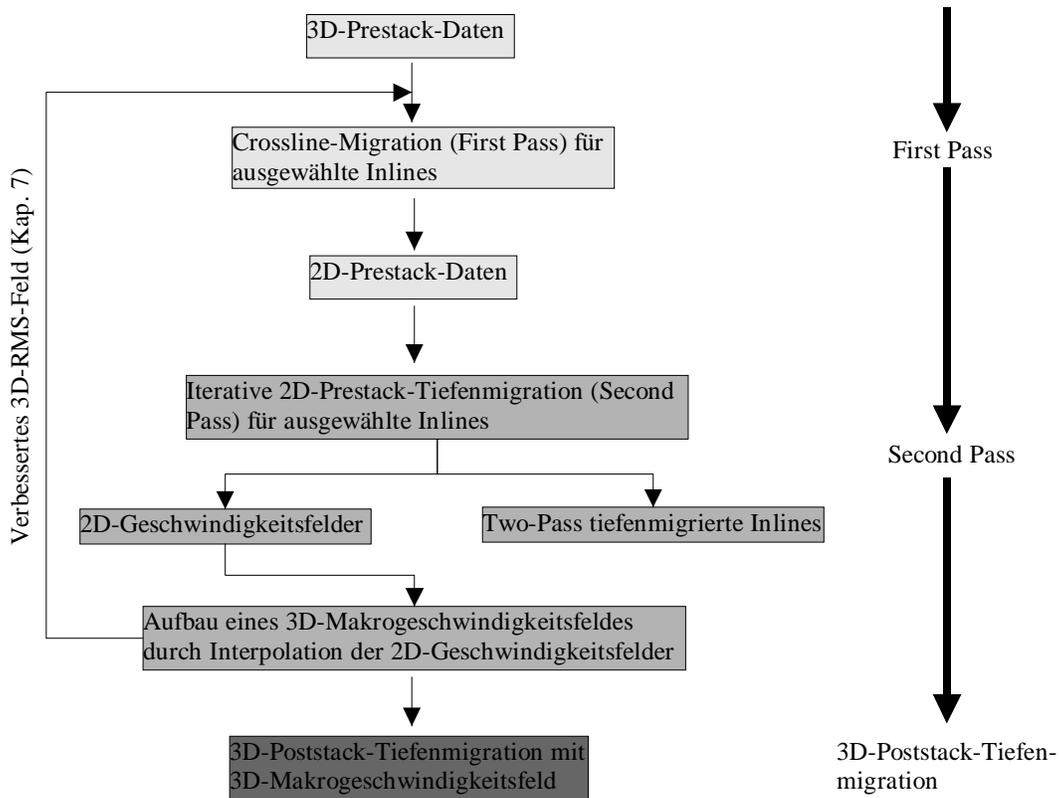


Abb. 2.3: Herleitung eines 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes mit Hilfe des Two Pass-Verfahrens.

Übersicht über die 3D-Prestack-Migrationsverfahren (Two Pass-Verfahren)

Einige Vorarbeiten und Verfahren sind in den letzten Jahren in der geowissenschaftlichen Literatur vorgestellt worden. Die Methoden kann man dabei hinsichtlich der Anwendung mit und ohne DMO in zwei Klassen einteilen:

Klasse I: Die 3D-Daten werden mit 3D-DMO vorbehandelt (vgl. Canning, Gardner, 1996; Ferber, 1994; Ferber et al., 1996).

Klasse II: Die 3D-Daten werden ohne 3D-DMO prozessiert (vgl. Devaux, Gardner, Rampersad, 1996).

All diese Verfahren haben gemeinsam, daß sie vom theoretischen Gesichtspunkt her nur

exakt sind, wenn eine konstante Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund gegeben ist. In dieser Arbeit wird jeweils ein Vertreter beider Klassen vorgestellt und untersucht. Von den DMO-freien Verfahren wird dies das Verfahren von Devaux et al. (1996) sein. Von den DMO behafteten Verfahren wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte CMMO-Verfahren vorgestellt, untersucht und mit dem anderen Verfahren verglichen.

3 Crossline-Migrationsmethode I mit Anwendung des DMO-Verfahrens (CMMO-Verfahren)

In diesem Kapitel wird eine neue Crossline-Migrationsmethode (Crossline-Migration to Multiple Offset bzw. CMMO-Verfahren) entwickelt, um 3D-Prestack-Daten zeitlich in der sogenannten Crossline-Richtung (First Pass) zu migrieren. In der dazu orthogonalen Richtung, der sogenannten Inline-Richtung, werden dann 2D-Prestack-Daten vorliegen, die frei von jeglichen 3D-Seiteneffekten sind. Diese besitzen somit für nachfolgende Prozessingschritte (Second Pass) nur noch Informationen, die wirkliche Informationen von 2D-Sektionen sind. Damit haben diese Daten keine fehlerverursachenden 3D-Seiteneffekte mehr, die z.B. eine genaue Herleitung eines 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes zumindest teilweise unmöglich machen würden.

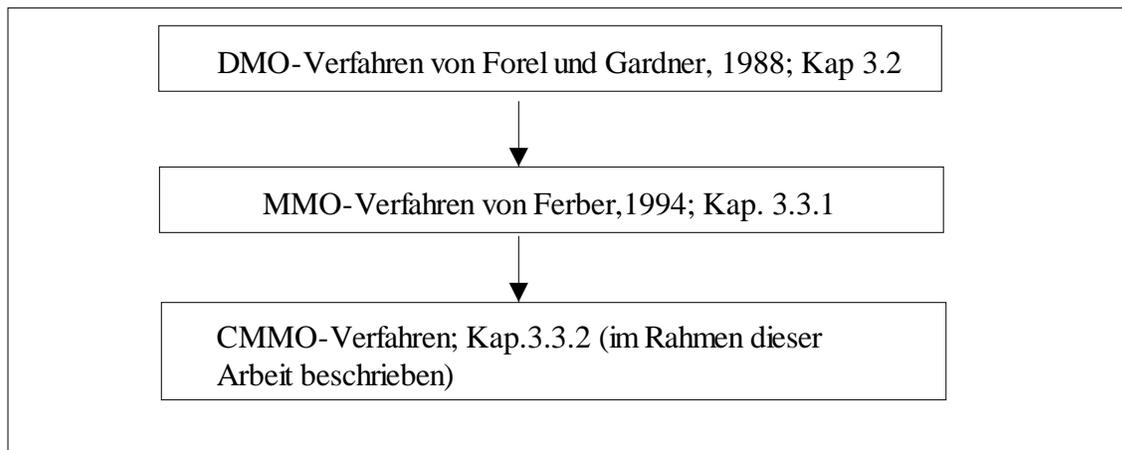


Abb. 3.1: Die Entstehung des CMMO-Verfahrens

Da das hier entwickelte CMMO-Verfahren eine Weiterentwicklung des speziellen DMO-(Dip-Move-Out-) Verfahrens nach Forel und Gardner (1988) und des MMO-(Migration to Multiple Offset) Prozesses (Ferber, 1994) ist (Abb. 3.1), werden zunächst diese beiden Verfahren beschrieben. Besonders das Forel-Gardner DMO-Verfahren wird eingehend untersucht. Dabei werden u.a. ein eigener Anti-Aliasing DMO-Operator und ein eigener inverser DMO-Operator entwickelt. Diese werden später beim CMMO-Prozeß ihre praktische Anwendung finden (Kap. 5 und 6).

3.1. Überblick über die DMO-Verfahren

Zunächst wird ein kurzer Überblick über das eigentliche Ziel des DMO-Prozesses gegeben, um dann die Besonderheit der Forel-Gardner-DMO Methode gegenüber allen anderen DMO-Varianten hervorzuheben. Aus diesen Besonderheiten leitet sich letzten Endes auch das CMMO-Verfahren ab.

Wozu werden DMO-Verfahren benötigt ?

In der Seismik unterscheidet man zwei Ansätze, um aus Zero-Offset-Daten unter Anwendung einer Poststack-Migration ein Abbild der Untergrundstruktur zu erhalten (Ristow, 1988):

1. Der ältere konventionelle Ansatz (-> Stapeln -> Poststack-Migration)
 - Normal-Move-Out-(NMO-) Korrektur mit Stapelgeschwindigkeiten
 - Stapeln der Prestack-Daten (-> CMP-Stack)
 - Migration nach dem Stapeln (Poststack-Migration)

2. Der DMO-Ansatz (-> DMO -> Stapeln -> Poststack-Migration)
 - NMO-Korrektur mit RMS-Geschwindigkeiten
 - DMO
 - Stapeln der DMO-prozessierten Daten
(evtl. mit neu ermittelten Stapel-Geschwindigkeiten)
 - Migration nach dem Stapeln (Poststack-Migration)

Das DMO-Verfahren ist entwickelt worden, um die Probleme [z.B.: „Conflicting-Dip-Problem“ und „Lateral-Smearing-Problem“: Berkhout, (1985), Hale, (1992)] des konventionellen Stapelprozesses (Normal-Move-Out-(NMO-)Korrektur und abschließendes Stapeln von CMP-Gathern) zu umgehen und so eine möglichst zuverlässige Zero-Offset-Sektion zu erzeugen.

Das DMO-Verfahren wurde im Laufe der Zeit von verschiedenen Autoren mit unterschiedlichen Bezeichnungen in die angewandte Seismik eingeführt, wie z.B. DEVILISH (Judson et al., 1978), Offset Continuation (Bolondi et al., 1982), Prestack Partial-Migration (PSPM) (Yilmaz et al., 1979) und Dip-Move-Out (Hale, 1983).

Im allgemeinen hat sich aber der Begriff Dip-Move-Out (kurz DMO) durchgesetzt.

Der DMO-Prozeß kann die Qualität seismischer Daten in vielfacher Weise verbessern (Deregowski, 1986, Hale, 1994):

1. Durch Stapelung der DMO-prozessierten Daten soll eine möglichst zuverlässige Zero-Offset-Sektion erzeugt werden. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für den Folgeprozeß der Poststack-Migration zur Erzeugung eines Bildes des Untergrundes mit guter lateraler Auflösung gegeben.

2. Bei der konventionellen Stapelung ohne DMO tritt bei nicht horizontal gelagerten Schichten das „Lateral Smearing-Problem“ auf: Reflexionsuntergrundpunkte für eine CMP-Familie sind bei geneigten Horizonten „verschmiert“, d.h., der Reflexionspunkt der Zero-Offset-Spur ist um einen bestimmten Betrag vom wirklichen Reflexionspunkt der gemessenen Spur entfernt. Diese laterale Verschmierung der Reflexionspunkte im Untergrund wird durch den DMO-Prozeß rückgängig gemacht. Dadurch werden nur Reflexionseinsätze von demselben Reflexionspunkt im Untergrund gestapelt.

3. Nach dem DMO-Prozessing kann und soll eine erneute Stapelgeschwindigkeitsanalyse durchgeführt werden. Diese neu ermittelten Stapelgeschwindigkeiten sind im allgemeinen kleiner als die ursprünglichen, neigungsabhängigen Geschwindigkeiten, die ohne DMO ermittelt werden. Die Dip-Abhängigkeit dieser Stapelgeschwindigkeiten ist somit eliminiert worden. Die nach dem DMO-Prozeß ermittelten Geschwindigkeiten können für einen anschließenden Migrationsprozeß

günstig benutzt werden.

4. Ein weiteres Problem bei der konventionellen Stapelung ist das „Conflicting-Dip-Problem“, d.h., es gibt keine einheitliche Stapelgeschwindigkeit für zwei sich kreuzende Ereignisse in einer Stapelsektion. Die Stapelgeschwindigkeiten sind neigungsabhängig, deshalb wirkt der konventionelle Stapelprozeß wie ein Dip-Filter, d.h. Reflektoren mit einer bestimmten Neigung werden verbessert, jedoch auf Kosten einer Verschlechterung von Reflektoren, die eine andere Neigung (Dip) haben. Der DMO-Prozeß löst dieses Problem, indem er neigungsunabhängige Stapelgeschwindigkeiten generiert.

Die konventionelle Abfolge des DMO-Prozesses sieht folgendermaßen aus:

1. NMO ⇒ 2. DMO ⇒ 3. Stapeln.

Im folgenden wird ausschließlich ein spezielles DMO-Verfahren (Forel und Gardner, 1988) beschrieben und für die weiteren Untersuchungen verwendet, welches diesen konventionellen DMO-Abfolgeprozeß teilweise vertauscht:

1. DMO ⇒ 2. NMO ⇒ 3. Stapeln.

Durch die Vertauschung von NMO- und DMO-Prozeß bieten sich interessante, neuartige Möglichkeiten der Weiterentwicklung und Anwendung an. Diese basieren darauf, daß ungestapelte, DMO prozessierte Daten generiert werden, ohne daß a priori irgendwelche Geschwindigkeitsinformationen in diesen DMO-Prozeß hineinfließen müssen. Verfahren, welchen diesen Umstand ausnutzen, sind z.B. das MMO-Verfahren (vgl. Ferber, 1994 und Kap. 3.3.1) und der CMMO-Prozeß (vgl. Kap. 3.3.2).

Diese Methoden (DMO, MMO und CMMO) haben jedoch eines gemeinsam: Aufgrund ihrer Herleitung setzen sie voraus, daß die Geschwindigkeit im Untergrund konstant sein muß. Bisherige Erfahrungen und Analysen haben allerdings gezeigt, daß in den meisten Fällen, wenn vertikale und laterale Geschwindigkeitsvariationen moderat sind, der DMO-Prozeß relativ unempfindlich auf Geschwindigkeitsänderungen reagiert (z.B. Hale, 1992).

3.2. Das Forel-Gardner DMO-Verfahren

Dieser DMO-Prozeß ermöglicht, im Gegensatz zu vielen anderen DMO-Verfahren, zunächst einen geschwindigkeitsunabhängigen DMO-Prozeß und einen anschließenden geschwindigkeitsabhängigen NMO-Prozeß.

Der Hauptnachteil des Forel-Gardner-DMO-Verfahrens besteht im räumlichen Aliasing-Problem der DMO-Impuls-Antwort (Hale, 1992) (vgl. Kap. 3.2.1 und 5.1.2). Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß es sehr effizient auf 3D-Surveys angewandt werden kann, in denen unregelmäßige Verteilungen entlang der CMP-Achse auftreten und Offsets und Azimute stark variieren. Dieser große Vorteil des Forel-Gardner DMO-Verfahrens wirkt sich auch positiv auf das CMMO-Verfahren aus, wenn es z.B. um die Aufnahmegeometrie eines 3D-Surveys geht (Kap. 5.1.1).

Die Arbeitsweise des Forel-Gardner-DMO in der 3D-Seismik:

In der 3D-Seismik ist eine seismische Zeitreihe durch den Schuß-Empfänger-Vektor, d.h. durch Länge (Offset $2 \cdot h$) und Richtung (Azimutalwinkel φ) in einem kartesischen Koordinatensystem gekennzeichnet (Abb. 3.2).

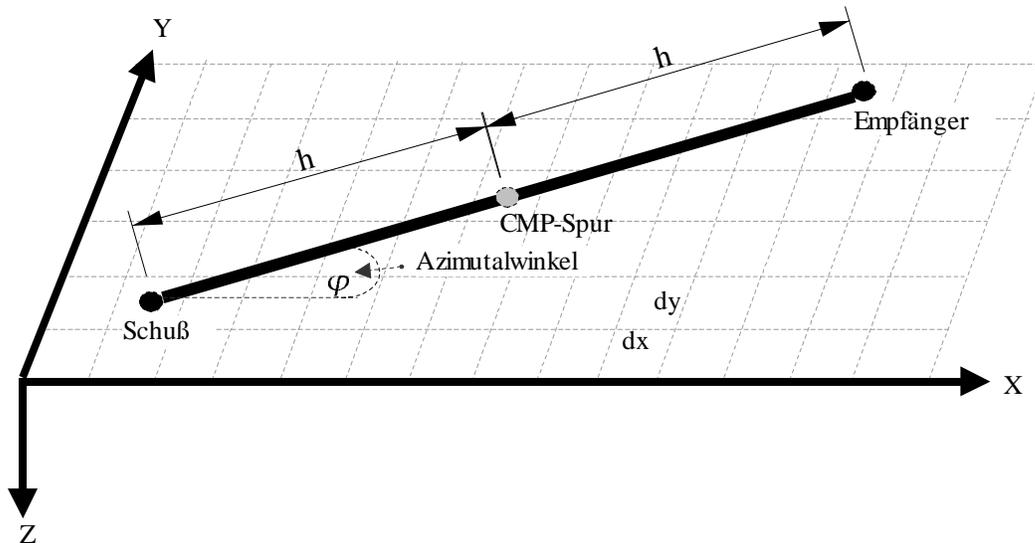


Abb. 3.2: Eine CMP-Spur ist im 3D-Fall durch seinen Azimutalwinkel φ , durch den Abstand von Schuß und Empfänger (Offset) und seine CMP-Koordinaten vollständig bestimmt. Das Meßgebiet wird dabei in Bins ($dx \cdot dy$) aufgeteilt.

Beim Forel-Gardner DMO-Prozeß werden die Daten zunächst nach CMP's vorsortiert. Es wird nun so vorgegangen, daß die einzelnen Impulsantworten einer CMP (Input)-Spur nur in Richtung des Schuß-Empfänger-Vektors innerhalb des zugehörigen Offset-Bereiches (also zwischen Schuß und Empfänger) verteilt werden dürfen. Die gemessene seismische Spur mit der Laufzeit t wird um eine bestimmte Entfernung b entlang des Schuß-Empfänger-Vektors verschoben (Abb. 3.3).

Dabei bekommt die CMP-Spur:

1. eine neue CMP-Koordinate,
2. einen neuen Offset und
3. sie erfährt zusätzlich eine zeitliche Stauchung.

Der neue Offset k ist nach Forel und Gardner (1988) folgendermaßen definiert:

$$k^2 = h^2 - b^2, \quad (3.1)$$

mit: h = halber Abstand Schuß-Empfänger bzw. halber Offset,
 b = Entfernung der DMO-Spur von der gemessenen CMP-Spur entlang des Schuß-Empfänger-Vektors.

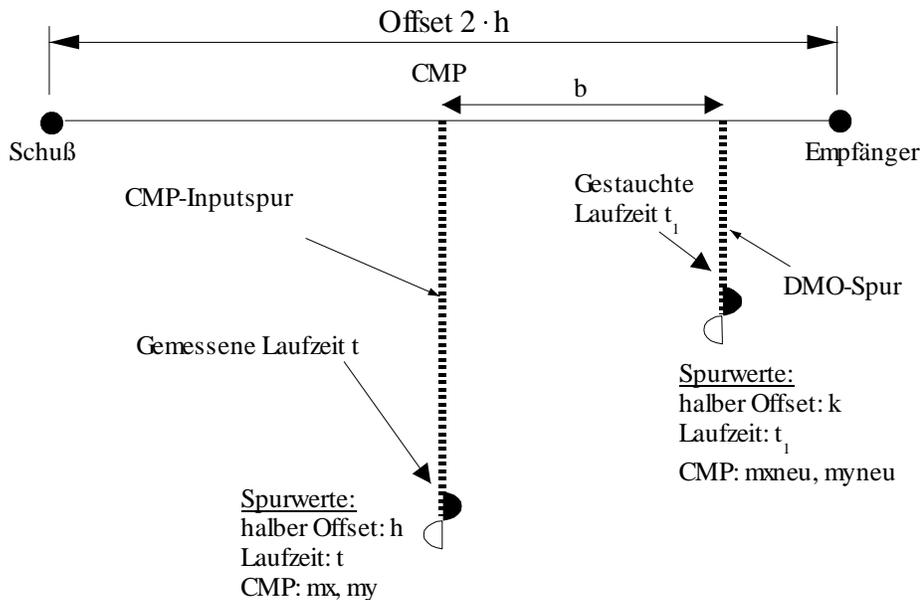


Abb. 3.3: Prinzip des Forel-Gardner DMO. Eine CMP-Spur wird um eine Entfernung b entlang der Verbindungslinie Schuß-Empfänger verschoben. Dabei erfährt sie eine Stauchung und erhält einen neuen Offset k und eine neue CMP-Koordinate.

Die gestauchte Laufzeit t_1 ergibt sich aus folgender Formel (Forel und Gardner, 1988):

$$t_1 = t \cdot \left(\frac{k}{h} \right) \quad , \quad (3.2)$$

dabei bedeuten: t = gemessene Laufzeit,
 t_1 = gestauchte Laufzeit t nach Anwenden des DMO-Prozesses,
 h = halber Abstand Schuß-Empfänger bzw. halber Offset,
 k = neuer halber Offset der DMO-korrigierten Spur.

Kreuzen mehrere Schuß-Empfänger-Verbindungslinien den neu generierten CMP-Punkt, so wird jede gemessene CMP-Spur um eine bestimmte Entfernung b auf diesen neuen CMP verschoben, bekommt einen neuen Offset k und jedes Sample erhält entsprechend Gleichung (3.2) eine neue gestauchte Zeit t_1 (Abb. 3.4). Auf diese Weise entsteht an dem neuen CMP nach Forel und Gardner (1988) ein DMO-Gather bzw. ein Offset-(k -) Laufzeit-(t_1 -)Gather mit folgender Beziehung zwischen der gestauchten Zeit t_1 und der Zero-Offset-Zeit t_0 :

$$t_0^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot k^2}{v^2} \quad , \quad (3.3)$$

mit t_0 = Zero-Offset-Zeit,
 $v = v_{\text{Stack}} =$ Stapelgeschwindigkeit.

Mit der Stapelgeschwindigkeit v_{Stack} können die Spuren dieses Gathers nun NMO-korrigiert und zu einer Zero-Offset-Spur gestapelt werden. Zu beachten ist hier, daß die Geschwindigkeit v_{Stack} unabhängig von jeglicher Reflektorneigung ist. Das bedeutet, daß v_{Stack} der Mediumsgeschwindigkeit (im konstanten Geschwindigkeitsfall) bzw. der RMS-Geschwindigkeit (im nicht konstanten Geschwindigkeitsfall) entspricht.

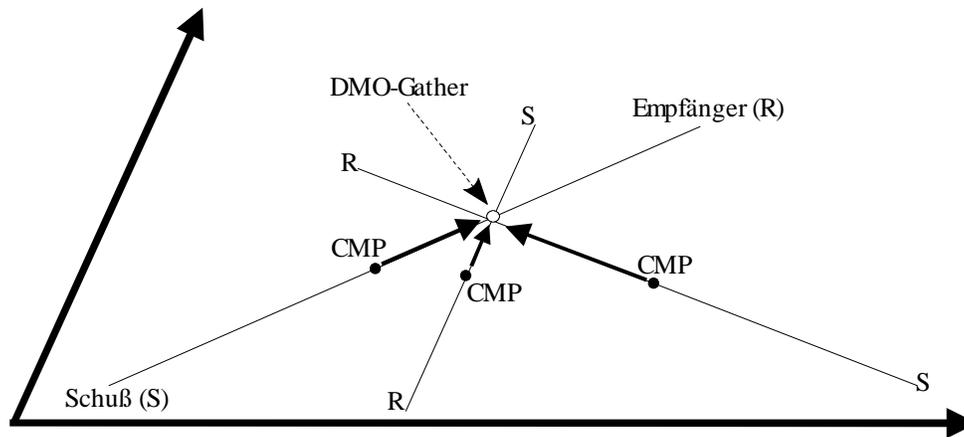


Abb. 3.4: Mehrere Schuß-Empfänger-Linien kreuzen den gleichen Punkt. Jede CMP-Spur wird auf diesen neuen CMP verschoben und es entsteht ein DMO-korrigiertes CMP-Gather, welches mit einer bestimmten Stapelgeschwindigkeit korrigiert und zu einer Zero-Offset-Spur gestapelt werden kann.

3.2.1. Der DMO-Operator und das räumliche Aliasing-Problem

Anschaulich darstellen kann man den DMO-Operator, indem entlang einer Verbindungslinie Schuß-Empfänger die einzelnen Impulse einer CMP-Inputspur auf mehrere benachbarte Outputspuren mit entsprechenden Zeitstauchungen verteilt werden (DMO-Impulsantwort). Dazu wird die CMP-Inputspur nach der Forel-Gardner-Methode um mehrere verschiedene b entlang der Verbindungslinie verschoben.

Die DMO-Impulsantwort liegt entlang einer Ellipse, die durch folgende Gleichung beschrieben wird:

$$\frac{(t_1)^2}{(t)^2} + \frac{b^2}{h^2} = 1 \quad , \quad (3.4)$$

dabei bedeuten: t = gemessene Gesamtlaufzeit (Schuß-Empfänger),
 t_1 = durch das Forel-Gardner DMO-gestauchte Laufzeit t ,
 b = Abstand von der CMP-Inputspur entlang der Verbindungslinie
 Schuß-Empfänger,
 h = halber Abstand Schuß-Empfänger bzw. halber Offset.

Eine Umstellung dieser Gleichung (3.4) nach t_1 ergibt mit Gleichung (3.1) die schon bekannte Formel für die Stauchung der CMP-Inputspur beim Forel-Gardner DMO-Verfahren:

$$t_1 = \sqrt{t^2 \cdot \left(1 - \frac{b^2}{h^2}\right)} = t \cdot \left(\frac{k}{h}\right) \quad . \quad (3.5)$$

Auf diese Weise erzeugte DMO-Operatoren können jedoch ein unterschiedlich starkes räumliches Aliasing zeigen. Nach Hale (1992) kann die Intensität des räumlichen Aliasings qualitativ danach bewertet werden, indem horizontale Reflexionsantworten nach Anwendung des DMO-Prozesses betrachtet werden. Der DMO-Prozess darf nämlich keinerlei Einfluß auf horizontale Reflexionen haben. Generierte DMO-

Impulsantworten der Originalimpulse werden bei dieser Überprüfung entlang der CMP-Achse aufsummiert. Wenn keinerlei Aliasing auf die Daten gewirkt hat, so muß die Summierung identisch mit den Originalimpulsen bzw. mit der CMP-Inputspur sein.

In Abb. 3.5 und 3.6 sind verschiedene DMO-Operatoren für unterschiedliche Offsets entlang der Verbindungslinie Schuß-Empfänger, die nach dem Forel-Gardner DMO-Verfahren (vgl. Abb. 3.3) erzeugt wurden, wiedergegeben. Zusätzlich werden die CMP-Inputspur und die Output-Spur, die sich nach der Summation entlang der CMP-Achse ergibt, gezeigt. Deutlich erkennbar sind die durch das räumliche Aliasing entstandenen Effekte. Die Inputspur ist, wie aus der Outputspur ersichtlich ist, nicht wiederhergestellt worden. Die Impulse in den Flanken der DMO-Operatoren löschten sich bei der Summierung nicht gegenseitig aus.

Eine einfache erste Möglichkeit, um das räumliche Aliasing zu verhindern bzw. zu mindern, besteht darin, das konstante Verschiebungsintervall Δb zu verkleinern (Abb. 3.7 mit $\Delta b = 10$ m). In Abb. 3.7 ist wie in Abb. 3.5 aus der gleichen Inputspur mit einem Offset von 3000 m derselbe DMO-Operator erzeugt worden, allerdings mit einem wesentlich kleinerem Inkrement Δb . Dadurch wurden mehr DMO-Spuren generiert. Die horizontale Summation entlang der CMP-Achse zeigt weniger Artefakte als das entsprechende Ergebnis in Abb. 3.5. Dieser Vorteil wird jedoch mit einer starken Zunahme der Rechenzeit erkaufte, da 5 mal so viele Spuren erzeugt werden müssen.

Anmerkung: Die DMO-Operatortests wurden nicht entlang der gesamten theoretisch erzeugbaren DMO-Ellipse durchgeführt. Anhand der Herleitung des DMO-Operators wird nämlich deutlich, daß nicht der gesamte Operator erzeugt werden muß, ohne daß Informationen verloren gehen (Forel und Gardner, 1988). Vielmehr liefern zeitliche Ereignisse entlang der CMP-Inputspur, die später als ein bestimmtes t auftreten, keinen konstruktiven Beitrag mehr zum DMO-Prozeß. Nach Forel und Gardner (1988) gilt:

$$t = \frac{2 \cdot h^2}{(v \cdot b_{\max})} \quad , \quad (3.6)$$

mit v = Geschwindigkeit,
 b_{\max} = maximal notwendige Verschiebung b zur Erzeugung des DMO-Operators.

Die DMO-Ellipse muß also für ein bestimmtes t nur bis zu einem bestimmten $b = b_{\max}$ realisiert werden. Durch Berücksichtigung dieser Operatorlimitierung kann zum einen Rechenzeit gespart werden, was im 3D-Fall sehr wichtig ist. Zum anderen würde bei Nicht-Beachtung von Gleichung (3.6) zusätzlicher Noise generiert werden. Die Operatorbeschränkung ist nach (3.6) um so größer, je höher die Geschwindigkeit, je größer die Laufzeit t und je kleiner der Offset ($2 \cdot h$) ist.

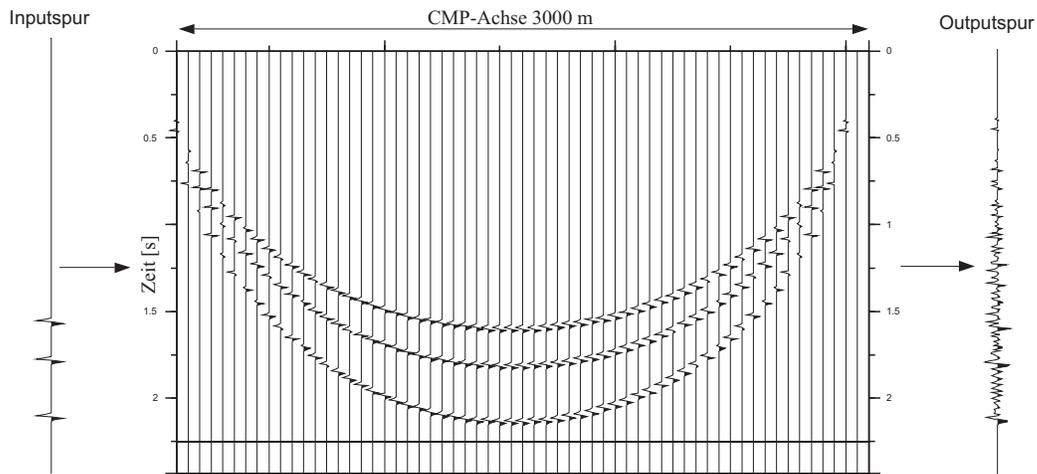


Abb. 3.5: DMO-Operator mit Aliasing. Die Inputspur mit Offset = 3000 m wird beim Summieren entlang der CMP-Achse nicht wiederhergestellt. $\Delta b = 50$ m.

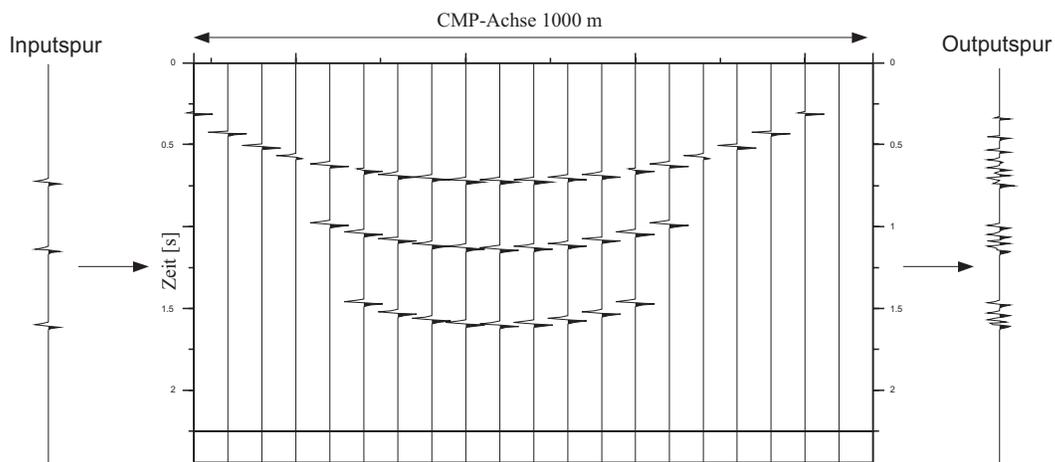


Abb. 3.6: DMO-Operator mit Aliasing. Die Inputspur mit Offset = 1000 m wird beim Summieren entlang des Operators nicht wiederhergestellt. $\Delta b = 50$ m.

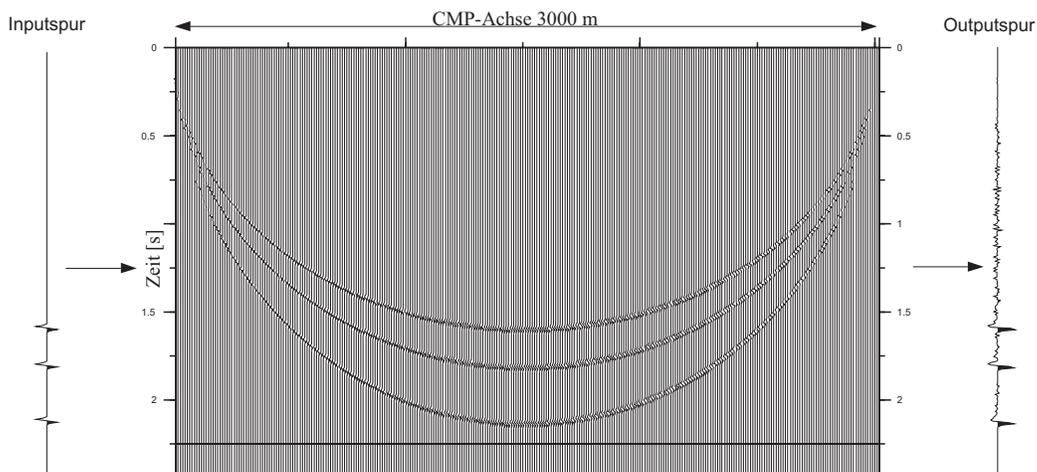


Abb. 3.7: DMO-Operator mit wenig Aliasing. Durch Wahl eines kleineren $\Delta b = 10$ m wird das räumliche Aliasing gemindert. Die Rechenzeiten erhöhen sich jedoch beträchtlich.

In allen folgenden Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, bei denen das DMO-Verfahren verwendet wurde, ist diese Regel zum Teil mitberücksichtigt worden, indem die Operatorbeschränkung nur für die kleinste anzunehmende Geschwindigkeit v (z.B. $v =$ Wassergeschwindigkeit ≈ 1500 m/s) vom untersuchten Untergrundmodell berücksichtigt wurde. Da das Forel-Gardner DMO-Verfahren als geschwindigkeitsunabhängiges Verfahren eingesetzt wird und die Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund als unbekannt anzusehen ist, kann lediglich diese kleinste anzunehmende Geschwindigkeit für die Operatorlimitierung genutzt werden. Die Limitierung entlang der gezeigten DMO-Operatoren ist für eine Geschwindigkeit von $v = 1500$ m/s gut erkennbar (z.B. Abb. 3.6). Das Aliasing-Problem ist damit zwar reduziert, aber noch nicht völlig gelöst worden.

3.2.2. Entwicklung einer Lösung für das räumliche Aliasing-Problem

Eine effiziente Möglichkeit, um räumliches Aliasing zu verhindern, besteht darin, daß Samples zwischen benachbarten DMO-korrigierten Spuren bei einem konstanten Verschiebungsintervall Δb der CMP-Inputspur um mehrere $n \cdot \Delta b$ nur einen Laufzeit-Unterschied haben dürfen, der maximal dem zeitlichen Samplingintervall (dt) der CMP-Inputspur sein darf. Folgende Bedingung muß also erfüllt sein:

$$|\delta t_i - \delta t_{(i-1)}| = \Delta(\delta t) \leq dt \quad , \quad (3.7)$$

mit $dt =$ zeitliches Samplingintervall,
 $\delta t_i =$ die einzelnen Zeitverschiebungen,
 $\Delta(\delta t) =$ Absolutwert der Differenzen von benachbarten Zeitverschiebungen.

Diese Anti-Aliasing-Bedingung kann mit dem Forel-Gardner DMO –Verfahren im CMP-Zeit-Bereich folgendermaßen realisiert werden:

1. Jede CMP-Inputspur wird n -mal entlang der Verbindungslinie Schuß-Empfänger entsprechend dem Forel-Gardner DMO-Verfahren verschoben. Es entstehen also n -DMO korrigierte Spuren.
2. Für die Entfernung b zur CMP-Inputspur gilt: $b = j \cdot \Delta b$ ($j = 1, n$), wobei Δb ein konstantes Verschiebungsintervall entlang der Verbindungslinie Schuß-Empfänger darstellt und $b \leq h$ ($h =$ halber Offset) ist.
3. Die zeitliche Verschiebung ($t - t_1$) eines Inputsamples mit der Zeit t auf der CMP-Inputspur zwischen benachbarten Spuren des DMO-Operators darf maximal gleich dem Samplingintervall dt sein. Es gilt Gleichung (3.7).

Ein CMP-Inputsample mit der Zeit t und das entsprechend DMO-korrigierte Sample mit der Zeit t_1 haben einen Laufzeitunterschied von:

$$t - t_1 = \delta t = i \cdot dt \quad , \quad (3.8)$$

mit $dt =$ Samplingintervall entlang der Spuren,
 $t =$ Zeit entlang der CMP-Inputspur,
 $t_1 =$ Zeit entlang der DMO-korrigierten Spur.

Mit der DMO-Gleichung (3.2) folgt dann aus Gleichung (3.8):

$$t = t \cdot \left(\frac{k}{h} \right) + i \cdot dt \quad . \quad (3.9)$$

Für eine bestimmte Entfernung $b = j \cdot \Delta b$ gibt es dann ein Intervall b_{\min} und b_{\max} entlang der CMP-Achse mit: $b_{\min} = (b - \Delta b)$ und $b_{\max} = b$.

Mit $k^2 = h^2 - b^2$ folgt dann aus Gleichung (3.9):

$$t_{\min} = \frac{h \cdot i \cdot dt}{h - \sqrt{h^2 - b_{\max}^2}} \quad \text{und} \quad (3.10)$$

$$t_{\max} = \frac{h \cdot i \cdot dt}{h - \sqrt{h^2 - b_{\min}^2}} \quad . \quad (3.11)$$

Die beiden Gleichungen (3.10) und (3.11) bedeuten nichts anderes, als daß für alle möglichen DMO-Verschiebungen ($i \cdot dt$) entlang der CMP-Inputspur für ein festes b mit den Intervallgrenzen b_{\min} bzw. b_{\max} ein Fenster mit t_{\min} bzw. t_{\max} existiert, welches abgegriffen, um $i \cdot dt$ verschoben und auf die DMO-korrigierte Spur projiziert werden kann. Auf diese Weise ist gewährleistet, daß keine Verschiebungen zwischen benachbarten Spuren entlang des DMO-Operators auftreten, die größer als das Samplingintervall $1 \cdot dt$ sind. Verschiebungen, die kleiner als $1 \cdot dt$ sind, können dagegen weiterhin entsprechend Gleichung (3.2) bearbeitet werden. Dadurch wird das Verfahren beschleunigt.

In den Abb. 3.8 und 3.9 sind die gleichen Operatoren wie in den Abb. 3.5 und 3.6 dargestellt, nachdem sie mit dieser Anti-Aliasing Methode erzeugt wurden. Eine Summation entlang der CMP-Achse zeigt, daß die Inputspur nahezu wiederhergestellt wird und der Operator sehr wenig räumliches Aliasing aufweist. Die Bedingung zum Überprüfen von räumlichen Aliasing-Effekten (Hale, 1992) ist sehr gut erfüllt. Außerdem arbeitet dieses soeben beschriebene Verfahren sehr schnell.

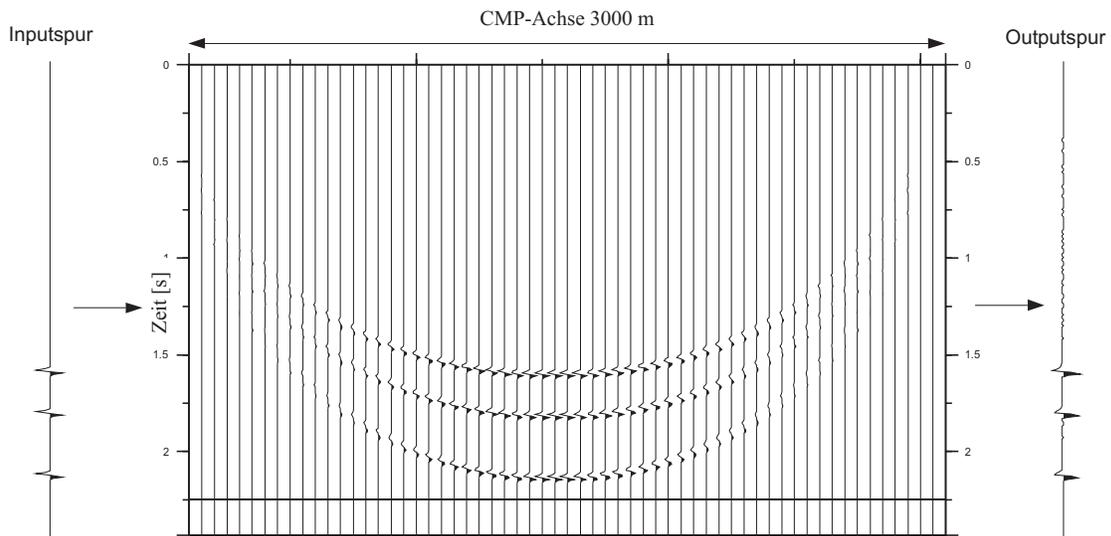


Abb. 3.8: DMO-Operator ohne Aliasing. Beim Summieren entlang des Operators entspricht die Outputspur der Inputspur. $\Delta b = 50$ m.

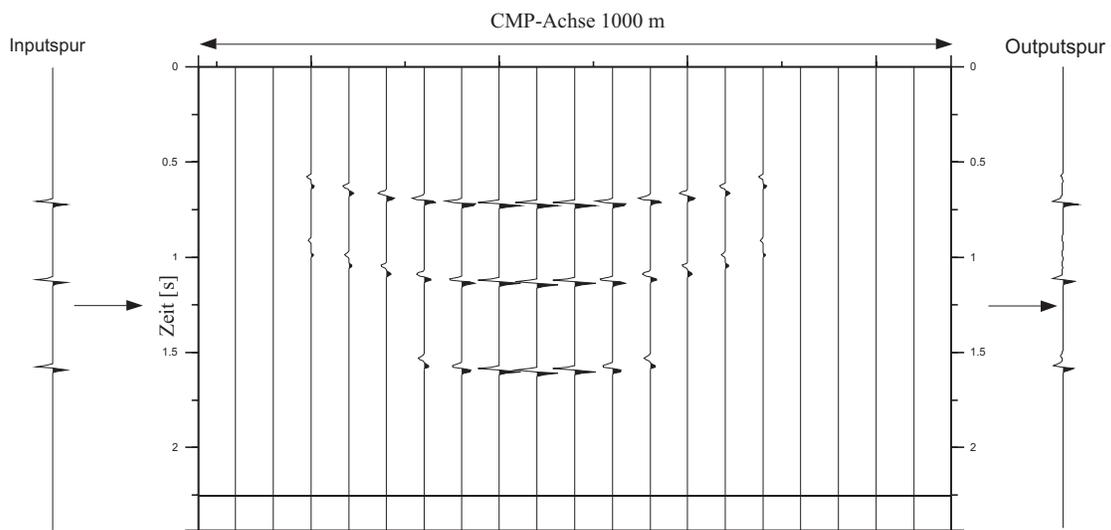


Abb. 3.9: DMO-Operator ohne Aliasing. Beim Summieren entlang des Operators entspricht die Outputspur der Inputspur. $\Delta b = 50$ m.

3.2.3. Entwicklung eines inversen DMO-Operators

Um Daten, auf die das DMO-Verfahren angewendet worden ist, wieder in normale Prestack-Daten zu überführen, muß ein *inverser* DMO-Prozeß (DMO^{-1}) benutzt werden. Ein inverser DMO-Operator macht die DMO-Effekte wieder rückgängig und ist im Rahmen der verschiedenen Entwicklungen von unterschiedlichen Autoren angewandt worden (z.B.: Ronen, 1987, Liner und Cohen, 1988, Canning, 1993, Canning und Gardner, 1996). Um dieses bestmöglich zu erreichen, darf auch der inverse DMO-Operator kein räumliches Aliasing erzeugen. Damit muß auch ein inverser DMO-Operator den Aliasing-Test aus den beiden vorangegangenen Kapiteln bestehen. Im folgenden wird der entsprechende inverse Anti-Aliasing-Operator aus Kap. 3.2.2 entwickelt.

Für die inverse Verschiebung eines Inputsamples gilt wieder folgende Anti-Aliasing-Bedingung:

$$t - t_1 = \delta t = i \cdot dt. \quad (3.8)$$

Die DMO-Gleichung (3.2) sieht im inversen DMO-Fall folgendermaßen aus:

$$t = t_1 \cdot \left(\frac{h}{k}\right), \quad (3.12)$$

mit t = Zeit entlang der CMP-Inputspur,
 t_1 = Zeit entlang der DMO-korrigierten Spur.

Es folgt dann aus den Gleichungen (3.8) und (3.12):

$$t_1 = t_1 \cdot \left(\frac{h}{k}\right) - i \cdot dt. \quad (3.13)$$

Für eine bestimmte Entfernung $b = j \cdot \Delta b$ gibt es ein Intervall mit b_{\min} und b_{\max} :

$$b_{\min} = (b - \Delta b) \text{ und } b_{\max} = b.$$

Mit $k^2 = h^2 - b^2$ folgt dann:

$$t_{1\min} = \frac{i \cdot dt}{\frac{h}{\sqrt{h^2 - b_{\max}^2}} - 1} \quad \text{und} \quad (3.14)$$

$$t_{1\max} = \frac{i \cdot dt}{\frac{h}{\sqrt{h^2 - b_{\min}^2}} - 1}. \quad (3.15)$$

Um den inversen DMO-Operator auf eine DMO-prozessierte Spur anzuwenden, wählt man eine bestimmte Entfernung b mit dem Intervall b_{\min} bzw. b_{\max} , greift das entsprechende Fenster mit $t_{1\min}$ bzw. $t_{1\max}$ auf der DMO-Spur ab und verschiebt dieses auf die neu erzeugte DMO-freie Spur mit der Zeit t .

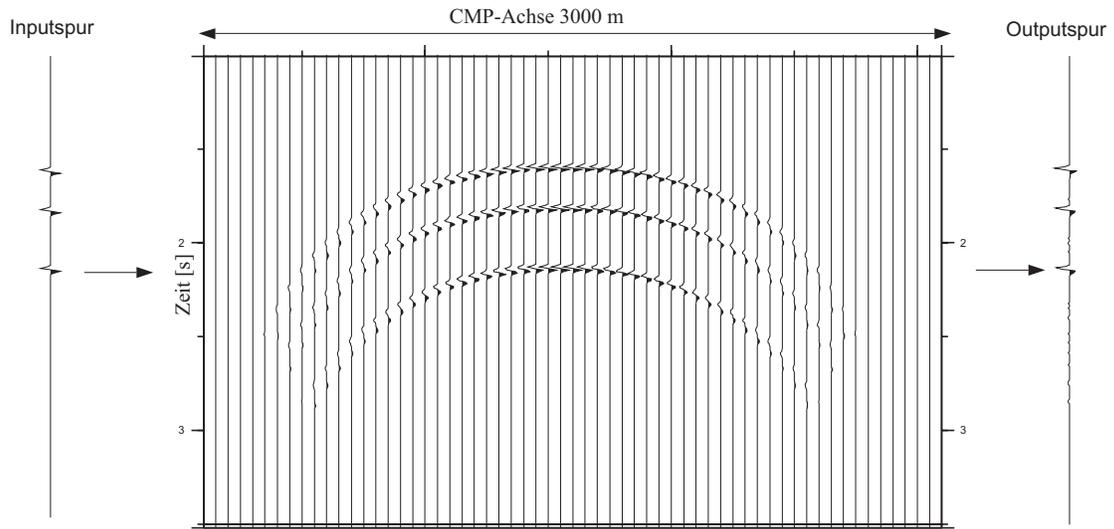


Abb. 3.10: Inverser DMO-Operator ohne Aliasing. Beim Summieren entlang des Operators entspricht die Outputspur der Inputspur. $\Delta b = 50$ m.

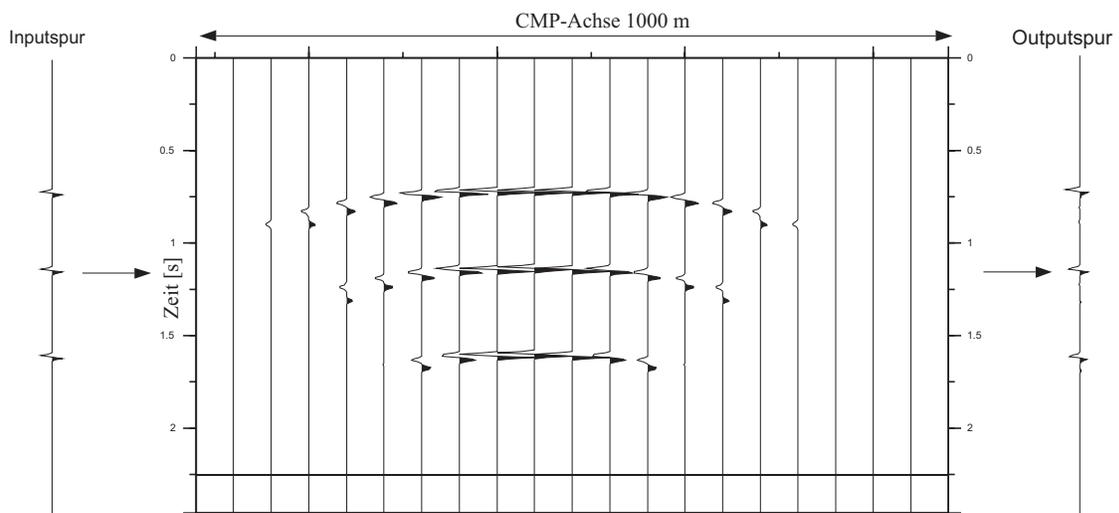


Abb. 3.11: Inverser DMO-Operator ohne Aliasing. Beim Summieren entlang des Operators entspricht die Outputspur der Inputspur. $\Delta b = 50$ m.

In Abb. 3.10 und 3.11 ist dieser inverse DMO-Operator auf zwei Inputspuren angewandt und dem Aliasing-Test unterzogen worden. Auch hier zeigt die Summation entlang des Operators kaum Aliasingeffekte und ist vergleichbar mit den Ergebnissen der Abb. 3.8 bzw. 3.9.

3.3 Herleitung eines Crossline-Migrationsverfahrens aus dem MMO-Verfahren

Hauptziel des im Rahmen dieser Arbeit behandelten Two Pass-Prozesses ist die Ableitung eines 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes (vgl. Kap. 2.2.2). In diesem Kapitel wird die Herleitung einer neuen eigenen Crossline-Migrationsmethode beschrieben.

Ferber (1994) entwickelte auf der Grundlage des Forel-Gardner-DMO-Verfahrens (1988) ein vollständiges 3D-Zeitmigrations-Verfahren für ungestapelte Daten (3D-Prestack-Daten). Dieses Verfahren wird nach Ferber (1994) mit MMO (**M**igration to **M**ultiple **O**ffset) bezeichnet. Aus diesem MMO-Verfahren wird in dieser Arbeit durch eine Modifikation das neue Crossline-Migrationsverfahren CMMO (**C**rossline-**M**igrations to **M**ultiple **O**ffset) hergeleitet. Zunächst wird deshalb das MMO-Verfahren kurz beschrieben.

3.3.1 Beschreibung des MMO-Verfahrens

Das MMO-Verfahren (Ferber, 1994) baut auf dem Forel-Gardner-DMO-Verfahren auf. Ebenso wie dieses DMO-Verfahren benötigt das MMO-Verfahren keine Geschwindigkeitsinformationen. 3D-Prestack-Daten werden durch den MMO-Prozeß vollständig 3D-zeitmigriert und liegen anschließend als ungestapelte, vollständig zeitmigrierte 3D-Daten vor. Auch dieses Verfahren gilt ebenso wie der DMO-Prozeß vom theoretischen Standpunkt her nur für Untergrundmedien mit einer konstanten Geschwindigkeit.

Die mathematische Herleitung des MMO-Verfahrens wird bei Ferber (1994) gegeben. Wir beschränken uns im folgenden auf eine anschauliche Beschreibung des Verfahrens. Die Vorgehensweise bei dieser Methode ist ganz ähnlich wie beim Forel-Gardner-DMO-Verfahren. Zunächst wird eine CMP-Inputspur entsprechend der Forel-Gardner-Methode DMO-korrigiert und anschließend zusätzlich noch einmal richtungsunabhängig verschoben (Abb. 3.12 b). Beim DMO-Prozeß (Abb. 3.12 a) ist nur eine Verschiebung entlang der Verbindungslinie Schuß-Empfänger erlaubt.

Eine CMP-Inputspur liefert nach dem MMO-Prozeß mehrere zeitmigrierte Outputspuren mit unterschiedlichen Offsets (deshalb der Name: Migration to Multiple Offset). In Abb. 3.12 sind das DMO- und das MMO-Verfahren in ihrer unterschiedlichen Anwendungstechnik gegenübergestellt.

Der alte Offset k der DMO-korrigierten Spur wird beim MMO-Prozeß durch einen neuen Offset l am neuen CMP-Punkt ersetzt. Werden sehr viele DMO-korrigierte Spuren auf diesen neuen CMP verschoben und über den gleichen Offset l summiert, so entsteht durch konstruktive und destruktive Interferenz ein zeitmigriertes, ungestapeltes MMO-Gather mit folgender Beziehung zwischen der DMO-korrigierten Zeit t_1 und der zeitmigrierten Zeit t_i nach Ferber (1994):

$$t_i^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot l^2}{v^2}, \quad (3.16)$$

dabei bedeuten: t_1 = gestauchte Zeit nach dem DMO-Prozeß,
 t_i = 3D-zeitmigrierte Laufzeit,
 l^2 = MMO-Offset = $k^2 + r^2 = h^2 - b^2 + r^2$ (Ferber, 1994),
 v = Migrationsgeschwindigkeit.

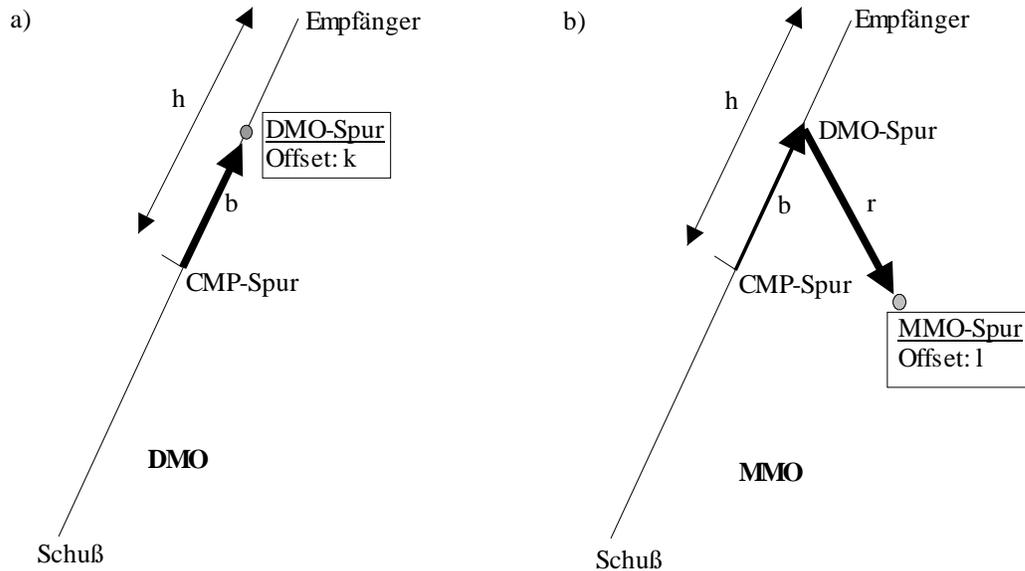


Abb. 3.12 a und b: Abb. a) zeigt das DMO-Verfahren. Eine CMP-Spur mit dem Offset $2 \cdot h$ wird um die Strecke b verschoben. Die Spur wird dabei zeitlich gestaucht und bekommt einen neuen Offset k . In Abb. b) wird das Prinzip des MMO-Prozesses gezeigt. Die DMO-korrigierte Spur wird dabei zusätzlich richtungsunabhängig um die Strecke r auf einen beliebigen CMP-Punkt verschoben. Die MMO-Spur erhält einen neuen Offset l .

Wird im 3D-Fall ein solch generiertes MMO-Gather nach (3.16) einer NMO-Korrektur unterzogen und entlang des Offsets l gestapelt, so ergibt sich eine vollständig 3D-zeitmigrierte Spur am neuen CMP. Die dabei ermittelten Geschwindigkeiten stellen Migrationsgeschwindigkeiten dar (Ferber, 1994).

Wird der MMO-Prozeß zur Geschwindigkeitsanalyse auf sehr viele CMP's (Velocity Analysis CMP's oder VACMP's) eines 3D-Meßgebietes angewandt, so entstehen an allen ausgewählten VACMP's ungestapelte, vollständig 3D-zeitmigrierte MMO-Gather. Eine anschließende Geschwindigkeitsanalyse dieser MMO-Gather entsprechend Gleichung (3.16) liefert dann Migrationsgeschwindigkeiten für verschiedene Zeiten t_i an jedem VACMP. Durch Interpolation der ermittelten Geschwindigkeiten zwischen den VACMP's kann dann ein 3D-Migrationsgeschwindigkeitsfeld erzeugt werden.

Es bestehen jedoch mehrere Probleme hinsichtlich der Ableitung von Migrationsgeschwindigkeiten bzw. Makrogeschwindigkeitsfeldern beim MMO-Prozeß:

1. Für das MMO-Verfahren wird zum gegebenen 3D-Datenvolumen eine sehr große Datenmenge erzeugt und prozessiert. Dadurch steigt der Rechenzeitaufwand so stark an, daß das Verfahren dann nur für einige ausgewählte CMP's (VACMP's) innerhalb

des 3D-Meßgebietes zur Geschwindigkeitsanalyse genutzt werden kann. Dadurch wird die Genauigkeit des Makrogeschwindigkeitsfeldes gemindert.

2. Das MMO-Verfahren basiert auf der Annahme einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund. Sind die Geschwindigkeitsveränderungen jedoch zu groß, so liefert der MMO-Prozeß ungenaue Ergebnisse.
3. Die gefundenen Migrationsgeschwindigkeiten basieren auf einer vollständigen 3D-Zeitmigration und werden deshalb ohne Berücksichtigung von Brechungseffekten an Schichtgrenzen ermittelt.
4. Das abgeleitete 3D-Migrationsgeschwindigkeitsfeld ist in Abhängigkeit der Zeit und nicht der Tiefe abgeleitet worden und ist somit für ein 3D-Tiefenmigrationsverfahren nur bedingt verwendbar.

Es wird in dieser Arbeit im folgenden gezeigt, daß das CMMO-Verfahren die Nachteile 1 - 4 teilweise oder ganz kompensieren kann.

3.3.2 Beschreibung und Herleitung des CMMO-Verfahrens

Das CMMO-Verfahren (**Crossline-Migration to Multiple Offset**) ist, wie später auch durch die Ergebnisse deutlich wird, eine wesentliche Modifizierung des MMO-Verfahrens (vollständige 3D-Zeitmigration) zu einer Crossline-Migrationsmethode (partielle Zeitmigration). Die 3D-Prestack-Daten werden dabei nur in Crossline-Richtung migriert. Der CMMO-Prozeß arbeitet ohne Angaben von Geschwindigkeiten. Beim CMMO-Prozeß handelt es sich wie beim MMO-Prozeß um einen Mehrspurprozeß, d.h., daß jedes Inputsample mehrere Outputsamples mit verschiedenen Offsets erzeugt.

Wird beim MMO-Verfahren der Verschiebungsvektor r nach Anwendung des DMO-Prozesses auf 3D-Prestack-Daten nur in einer bestimmten, zuvor definierten Raumrichtung (Crossline-Richtung) erlaubt, so liegen anschließend 2D-zeitmigierte Prestack-Daten entlang einer oder mehrerer 2D-Linien (Inlines) vor. Diese 2D-Linien (Inlines) liegen senkrecht zur Crossline-Richtung (vgl. Abb. 2.2, Kap. 2.2.2). Sämtliche 3D-Seiteneffekte sind durch die Crossline-Migration von diesen Inlines eliminiert worden. Die crossline-migrierten Daten liegen entlang der einzelnen Inlines in sogenannten CMMO-Gathern vor.

In der folgenden Abb. 3.13 sind der prinzipielle Ablauf des MMO-Prozesses und des CMMO-Prozesses für die Entstehung eines MMO-Gathers bzw. eines CMMO-Gathers gegenübergestellt.

Werden die gleiche Anzahl von MMO-Gathern bzw. CMMO-Gathern erzeugt, so ist der Rechenzeitaufwand beim CMMO-Verfahren deutlich geringer, da beim CMMO-Verfahren wesentlich weniger Spuren prozessiert werden müssen als beim MMO-Verfahren (vgl. Abb. 3.13). Bei der CMMO-Methode werden die Daten jedoch nur in der Crossline-Richtung zeitmigriert, wohingegen das MMO-Verfahren vollständig 3D-zeitmigierte Daten liefert.

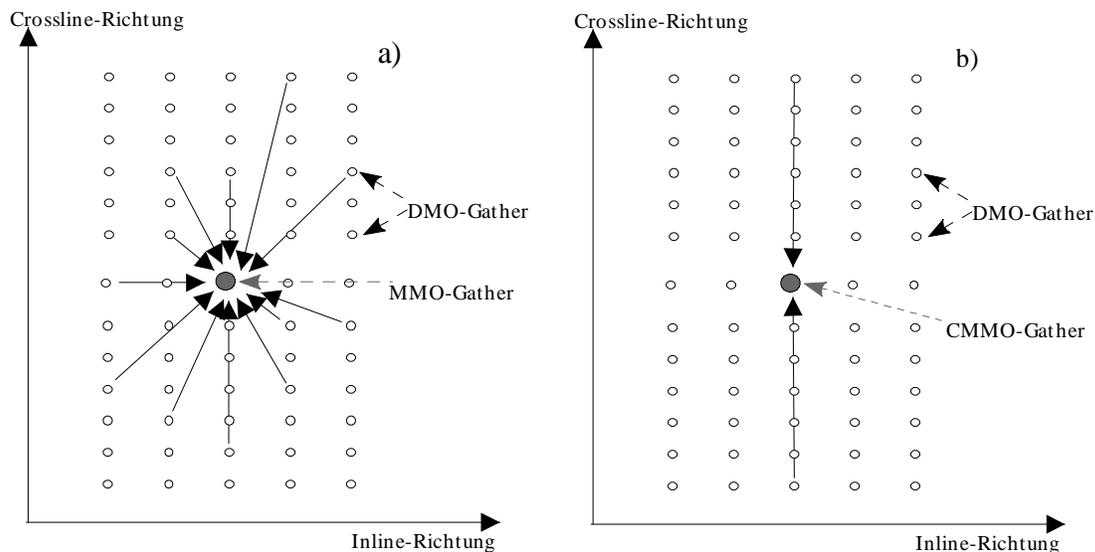


Abb. 3.13 a und b: In Abb. a) wird die Erzeugung eines MMO-Gathers dargestellt. Sämtliche Spuren von zuvor generierten DMO-Gathern liefern einen Beitrag zum MMO-Gather. In Abb. b) wird ein CMMO-Gather erzeugt. Nur DMO-Spuren, die entlang der Crossline-Richtung liegen, liefern einen Beitrag zum CMMO-Gather.

Wird das CMMO-Verfahren für die Crossline-Migration (First Pass) in Verbindung mit einer 2D-Tiefenmigrationsanalyse in Inline-Richtung (Second Pass) eingesetzt, ist dieses Two Pass-Verfahren (siehe Kap. 2.2.2) dem MMO-Prozeß (One Pass-Zeitmigrations-Verfahren) an Genauigkeit deutlich überlegen. Das liegt vor allem daran, daß bei diesem Two Pass-Prozeß eine partielle Zeitmigration und eine Tiefenmigration kombiniert werden. Besonders bei lateralen Geschwindigkeitsänderungen (z.B. bei stark geneigten Reflektoren) in Inline-Richtung liefert die Two Pass-Methode wesentlich bessere Ergebnisse, da bei lateralen Geschwindigkeitsänderungen Zeitmigrationen nicht mehr in der Lage sind, Reflektoren und Diffraktoren lagerichtig abzubilden (Yilmaz, 1994).

Im folgenden wird die unterschiedliche Wirkungsweise des MMO- und des CMSO-Verfahrens auf schon DMO-prozessierte Daten anhand zweier geometrischer Betrachtungen in den Abb. 3.14 und 3.15 weiter verdeutlicht:

Die Wirkungsweise beim MMO-Verfahren auf DMO-korrigierte Daten:

Abb. 3.14 zeigt im linken Teil ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem. Innerhalb der grau gekennzeichneten x-z-(2D-)Ebene liegt ein Diffraktionspunkt D. Die Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund ist konstant. An der Lokation des CMP₂ befindet sich ein schon, entsprechend dem Forel-Gardner DMO, erzeugtes 3D-DMO-Gather. Die darin enthaltenen Daten besitzen nur Informationen vom Diffraktionspunkt D. Im rechten Teil der Abbildung ist ein Schnitt entlang der 2D-Ebene dargestellt, die durch die Punkte CMP₁, CMP₂ und D aufgespannt wird. Zu beachten ist in diesem Modell, daß sich der Diffraktor D genau unterhalb des CMP₁-Punktes befindet. Z_i stellt den Abbildungsstrahl (image ray) vom CMP₁ zum Diffraktionspunkt D dar.

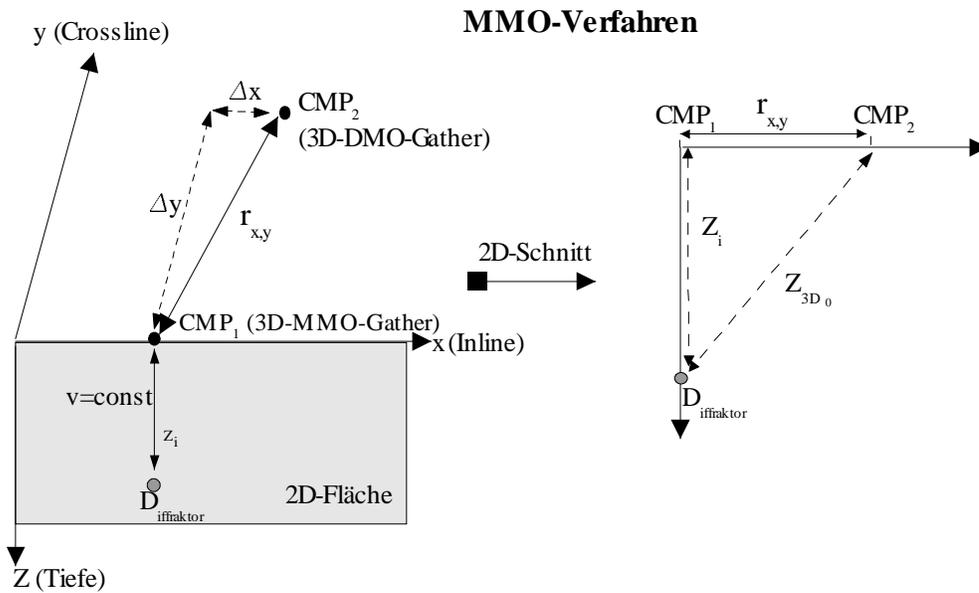


Abb. 3.14: Beim MMO-Verfahren werden die 3D-DMO-Spuren am CMP_2 entlang einer beliebigen Raumrichtung r verschoben. Das Ergebnis am CMP_1 sind schließlich Hyperbeln, die nach Anbringen von NMO-Korrekturen und anschließendem Stapelprozeß vollständig 3D-zeitmigierte Daten liefern.

Wird eine Spur des 3D-DMO-Gathers am CMP_2 entsprechend der MMO-Methode genau auf den CMP_1 verschoben, so ergibt sich aus Abb. 3.14:

$$z_{3D_0}^2 = z_i^2 + r_{x,y}^2, \quad (3.17)$$

wobei z_{3D_0} = 3D-zero-Offset Strahl vom CMP_2 zum Diffraktionspunkt D ,
 z_i = Abbildungsstrahl vom CMP_1 zum Diffraktor D ,
 $r_{x,y}$ = richtungsunabhängiger Verschiebungsvektor beim MMO-Verfahren.

Mit $z_{3D_0} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_{3D_0}$ und $z_i = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_i$ gilt dann:

$$t_{3D_0}^2 = t_i^2 + \frac{4 \cdot r_{x,y}^2}{v^2}, \quad (3.18)$$

wobei t_{3D_0} = Zweiweglaufzeit des 3D-Zero-Offset-Strahls vom CMP_2 nach D ,
 t_i = Zweiweglaufzeit des Abbildungsstrahles z_i vom CMP_1 nach D ,
 v = konstante Mediumsgeschwindigkeit.

Für die beim DMO-Prozeß erzeugten Spuren im 3D-DMO-Gather am CMP_2 gilt nach dem Forel-Gardner-DMO-Verfahren:

$$t_1^2 = t_{3D_0}^2 + \frac{4 \cdot k^2}{v^2}, \quad (3.3)$$

mit k = DMO-Offset,

t_1 = gestauchte Zeit nach dem DMO-Prozeß,
 $t_{3D_0} = t_0$ = 3D-Zero-Offset-Zeit.

Einsetzen der Gleichung (3.18) in (3.3) ergibt die folgende Beziehung zwischen t_1 und t_i :

$$t_i^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot (k^2 + r_{x,y}^2)}{v^2} \quad (3.19)$$

Ferber (1994) führte für die Summe $k^2 + r^2$ einen neuen Offset l^2 ein, so daß gilt:

$$t_i^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot l^2}{v^2} \quad (3.20)$$

Gleichung (3.20) beschreibt, daß durch Anwenden der MMO-Technik (Verschieben einer DMO-korrigierten Spur auf einen neuen CMP und Neudefinition des Offsets) eine DMO-Spur vollständig 3D-zeitmigriert wird. Die einzelnen Spurbeiträge liegen entsprechend Gleichung (3.20) entlang von Hyperbeln. Werden diese Hyperbeln einer NMO-Korrektur und einer Stapelgeschwindigkeitsanalyse unterzogen, so ergeben sich nach (3.20) Migrationsgeschwindigkeiten.

Die Wirkungsweise beim CMMO-Verfahren auf DMO-korrigierte Daten:

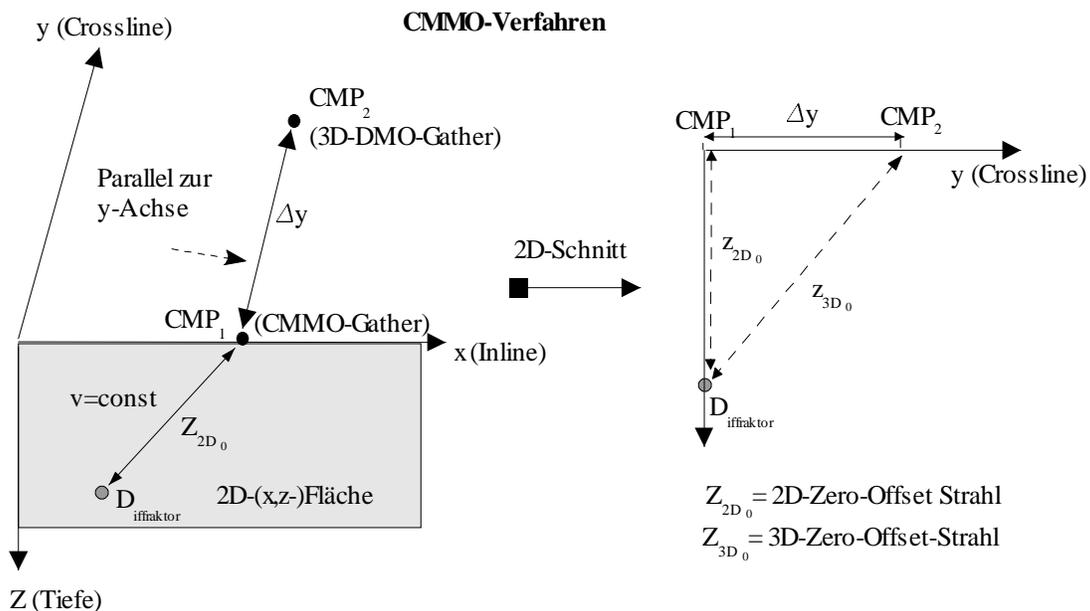


Abb. 3.15: Beim CMMO-Verfahren werden die 3D-DMO-Spuren nur in Crossline-Richtung verschoben. Am CMP_1 liegen schließlich in Inline-Richtung Hyperbeln vor, die nach NMO-Korrektur und anschließendem Stapelprozeß 2D-Zero-Offset-Daten liefern würden.

Abb. 3.15 zeigt links ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem. Innerhalb der 2D-(xz-) Ebene befindet sich ein Diffractionspunkt D. Die Geschwindigkeit ist konstant. An der Lokation des CMP_2 befindet sich ein 3D-DMO-Gather. Die darin enthaltenen Daten besitzen nur Informationen vom Diffractionspunkt D. Zu beachten ist hier, daß sich der Diffractionspunkt D irgendwo innerhalb der x-z- (2D-)Ebene befinden

kann. Im rechten Teil der Abbildung ist eine 2D-Ebene dargestellt, die durch die Punkte CMP_1 , CMP_2 und D aufgespannt wird. Der MMO-Verschiebungsvektor $r_{x,y}$ aus Abb. 3.14 hat von seinen beiden Komponenten nur noch den y -Anteil übrig, die x -Komponente ist gleich Null. Es erfolgt also nur eine Verschiebung in y -(crossline-)Richtung. Aus Abb. 3.15 folgt dann:

$$z_{3D_0}^2 = z_{2D_0}^2 + \Delta y^2 \quad , \quad (3.21)$$

mit z_{3D_0} = 3D-zero-Offset Strahl vom CMP_2 zum Diffraktionspunkt D ,
 z_{2D_0} = 2D-zero-Offset Strahl vom CMP_1 zum Diffraktor D entlang der 2D-Fläche,
 Δy = Verschiebungsabstand von CMP_1 nach CMP_2 .

Mit $z_{3D_0} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_{3D_0}$ und $z_{2D_0} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_{2D_0}$ folgt dann weiter:

$$t_{3D_0}^2 = t_{2D_0}^2 + \frac{4 \cdot \Delta y^2}{v^2} \quad , \quad (3.22)$$

wobei t_{3D_0} = Zweiweglaufzeit des 3D-Zero-Offset-Strahls vom CMP_2 nach D ,
 t_{2D_0} = Zweiweglaufzeit des 2D-Zero-Offset-Strahls vom CMP_1 nach D ,
 v = konstante Mediumsgeschwindigkeit.

Für Spuren im DMO-korrigierten Gather am CMP_2 gilt nach dem Forel-Gardner-DMO:

$$t_1^2 = t_{3D_0}^2 + \frac{4 \cdot k^2}{v^2} \quad , \quad (3.3)$$

mit k = DMO-Offset
 t_1 = gestauchte Zeit nach dem DMO-Prozeß,
 $t_{3D_0} = t_0$ = 3D-Zero-Offset-Zeit.

Aus den Gleichungen (3.22) und (3.3) folgt für die Beziehung zwischen t_1 und t_{2D_0} :

$$t_{2D_0}^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot (k^2 + \Delta y^2)}{v^2} \quad . \quad (3.23)$$

Im Vergleich zum MMO-Prozeß entsteht damit entlang der Inline-Richtung bei einer Verschiebung um Δy aus einem 3D-DMO-Gather am CMP_2 ein 2D-DMO-Gather am CMP_1 . Die einzelnen Spurbeiträge liegen dann gemäß der Gleichung (3.23) entlang von Hyperbeln. Es ist eine 2D-DMO-Spur mit den richtigen 2D-Informationen vom Diffraktor D entstanden. Eine anschließende NMO-Korrektur und ein Stapelprozeß ergeben eine 2D-Zero-Offset-Spur.

Wird der 2D-DMO-Effekt von den CMMO-prozessierten Daten eliminiert, z.B. durch ein inverses DMO-Verfahren (DMO^{-1} -Verfahren), so entstehen 2D-Prestack-Daten. Auf diese Daten kann dann im darauffolgenden Second Pass eine iterative 2D-Tiefenmigrationsanalyse inklusive einer Geschwindigkeitsanalyse angewandt werden, um ein 2D-Makrogeschwindigkeitsfeld abzuleiten, welches auf Daten beruht, die frei von 3D-Seiteneffekten sind (vgl. Abb. 2.3).

Folgende Vorteile, die zum Teil im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch deutlicher herausgearbeitet werden, hat das CMMO-Verfahren gegenüber dem MMO-Verfahren zur Ermittlung eines Makrogeschwindigkeitsfeldes:

1. Das CMMO-Verfahren benötigt eine deutlich geringere Rechenzeit als das MMO-Verfahren, da wesentlich weniger Daten für die gleiche Anzahl von MMO- bzw. CMMO-Gathern prozessiert werden müssen.
2. Es kann folgendes angenommen werden: Sind vertikale und / oder laterale Geschwindigkeitsvariationen überwiegend nur in x-Inline-Richtung vorhanden und sind die Geschwindigkeitsänderungen in y-Crossline-Richtung nicht zu stark, so sind günstige Voraussetzungen für eine Crossline-Migration nach der CMMO-Methode gegeben. Diese Annahmen werden in Kap. 5.2 weitgehend bestätigt.
3. Nach dem CMMO-Verfahren kann im Second Pass eine herkömmliche iterative 2D-Tiefenmigrationsanalyse einschließlich einer Geschwindigkeitsanalyse (z.B. 2D-Fokussierungsanalyse, Jeannot et al., 1986 und 1994) auf die 2D-Daten in Inline-Richtung angewandt werden. Da eine Tiefenmigration Brechungen an Schichtgrenzen berücksichtigt, wird ein Makrogeschwindigkeitsfeld in Abhängigkeit der Tiefe erzeugt, welches in der Inline-Richtung auch laterale Geschwindigkeitsvariationen erlaubt.
4. Mit der CMMO-Methode erhält man für jedes 2D-Profil mit einer klassischen 2D-Seismogramm-Bearbeitung ein 2D-Makrogeschwindigkeitsfeld $v(x, z)$. Die Summe aller 2D-Makrofelder ergibt ein 3D-Makrofeld in Abhängigkeit von der Tiefe.

4 Crossline-Migrationsmethode II ohne Anwendung des DMO-Verfahrens (CMSO-Verfahren)

In diesem Kapitel wird ein anderes Crossline-Migrationsverfahren vorgestellt, welches im wesentlichen auf einer Idee von Devaux et al. (1996) basiert. Bei dieser Methode handelt es sich, im Gegensatz zur CMMO-Methode, um einen Single-Offset-Prozeß, bei dem jedes Input-Sample nur ein einzelnes Output-Sample produziert. Auch werden im Gegensatz zum CMMO-Prozeß die Daten nicht mit einem geschwindigkeitsunabhängigen DMO-Prozeß vorbehandelt. Bei diesem Verfahren muß vielmehr ein 3D-Geschwindigkeitsmodell (z.B.: 3D-RMS-Modell) für die Durchführung der Crossline-Migration bekannt sein. Basierend auf der Idee von Devaux et al. (1996) wurde ein eigener, flexibler Algorithmus entwickelt (siehe Anhang A), der es ermöglichte, dieses Verfahren im praktischen Einsatz zu benutzen und gegebenenfalls Verbesserungen vorzunehmen (z.B. Kap. 5.1.1).

Bei dieser Methode liefert jedes Input-Sample nur ein Sample als Output mit einem veränderten Offset und veränderter Laufzeit. Deshalb wurde in Anlehnung und zur Unterscheidung an das CMMO-Verfahren der Name CMSO (**C**rossline-**M**igration to **S**ingle **O**ffset) gewählt. In dieser Arbeit wird das CMSO-Verfahren mit dem CMMO-Verfahren hinsichtlich der gemeinsamen und spezifischen Vor- und Nachteile untersucht. Am Ende der Untersuchungen stehen Kriterien, unter welchen (daten)technischen Voraussetzungen und geologischen Gegebenheiten eines der beiden Verfahren bevorzugt werden sollte, um möglichst zuverlässige Ergebnisse nach der Crossline-Migration zu erhalten.

4.1 Beschreibung des CMSO-Verfahrens

In Abb. 4.1 ist ein gemessenes Sample zum Zeitpunkt t einer 3D-Meßreihe vorgegeben, wobei S der Schußpunkt, R der Empfängerpunkt und M der CMP-Punkt ist. Die geologische Struktur, die einem gemessenen Wert entspricht, ist durch ein Ellipsoid mit S und R als Brennpunkte gegeben. Der Weg von S nach R über einen Reflexionspunkt des Ellipsoides ist konstant $= v \cdot t$, wobei v eine konstante Geschwindigkeit und t die Gesamtlaufzeit vom Schuß zum Empfänger ist. Ein vertikaler 2D-Schnitt mit einer definierten vorgegebenen Lage und Richtung (Winkel: φ) durch das Ellipsoid ist durch eine Ellipse mit den Brennpunkten S' und R' gegeben. Der Abstand $S'R'$, der neue CMP-Mittelpunkt M' und die neue Konstante $v \cdot t'$ können aus geometrischen Beziehungen errechnet werden (siehe Anhang A).

Mit anderen Worten:

Gegeben sind: $M, S, R, t, 2 \cdot h, \varphi$ (3D-Zeitreihe).

Gesucht werden: $M', S', R', t', 2 \cdot h'$ (2D-Zeitreihe).

(Erklärungen der Abkürzungen siehe Abb. 4.1).

Ein 3D-Amplitudenwert für den Zeitpunkt t mit den entsprechenden 3D-Parametern wird auf einen 2D-Amplitudenwert mit dem Zeitwert t' mit den entsprechenden 2D-Parametern abgebildet.

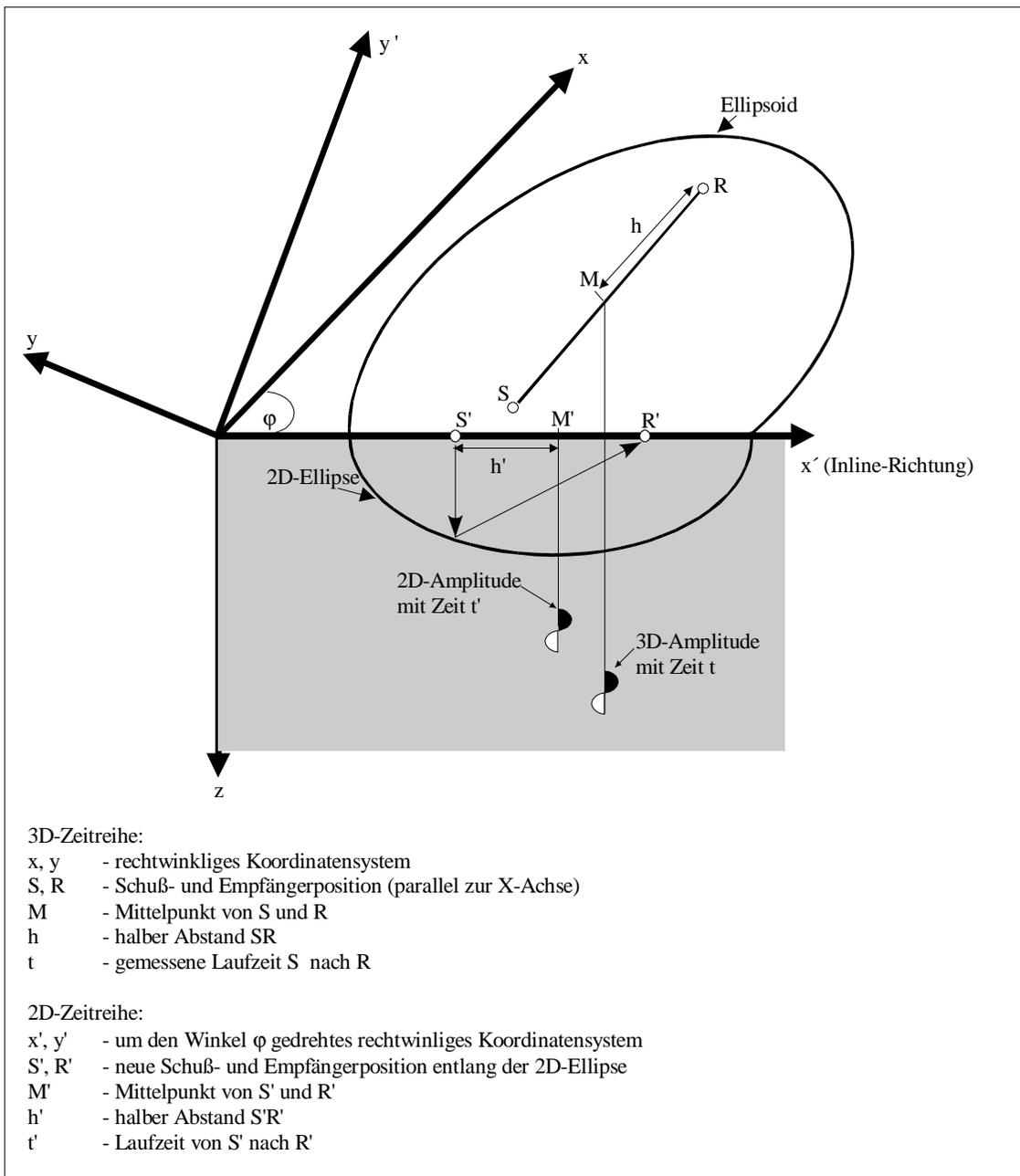


Abb. 4.1: Prinzipbild der 3D-Prestack-Migration (Two Pass) nach Devaux et al., 1996. Eine gemessene 3D-Amplitude mit der Zeit t wird in eine 2D-Amplitude mit der Zeit t' transformiert. Die Zeit t' entspricht der Laufzeit entlang einer 2D-Ellipse, die einen vertikalen Schnitt entlang der ausgewählten Inline durch das 3D-Ellipsoid darstellt.

Bei dem CMSO-Verfahren wird somit direkt aus den gegebenen 3D-Inputparametern (M, h, φ) und der Laufzeit t mit Hilfe eines vorgegebenen Geschwindigkeitsmodelles die Crossline-Migration durchgeführt. Aus den gegebenen 3D-Inputparametern werden mit Hilfe des hergeleiteten Algorithmus (Anhang A) die 2D-Parameter (M', h', t') berechnet (Abb. 4.1). Anschließend erfolgt in Inline-Richtung im Second Pass eine 2D-Tiefenmigrationsanalyse der crossline-migrierten Daten.

Abb. 4.2 zeigt zum Abschluß der theoretischen Einführung in den CMMO- und CMSO-

Prozeß einen schematischen Überblick der unterschiedlichen Datenverarbeitung beider Verfahren. Im folgenden Kap. 5 werden beide Verfahren anhand unterschiedlicher synthetischer 3D-Prestack-Datensätze hinsichtlich verschiedener Problemstellungen untersucht. In Kap. 5.2 wird schließlich die Anwendbarkeit der beiden Verfahren auf verschiedene 3D-Untergrundmodelle getestet, in denen vertikale und / oder laterale Geschwindigkeitsvariationen bestehen. Mit den aus Kap. 5 gewonnenen Ergebnissen ist es dann möglich, beide Verfahren für den effizienten Einsatz auf einen realen 3D-Datensatz zu bewerten.

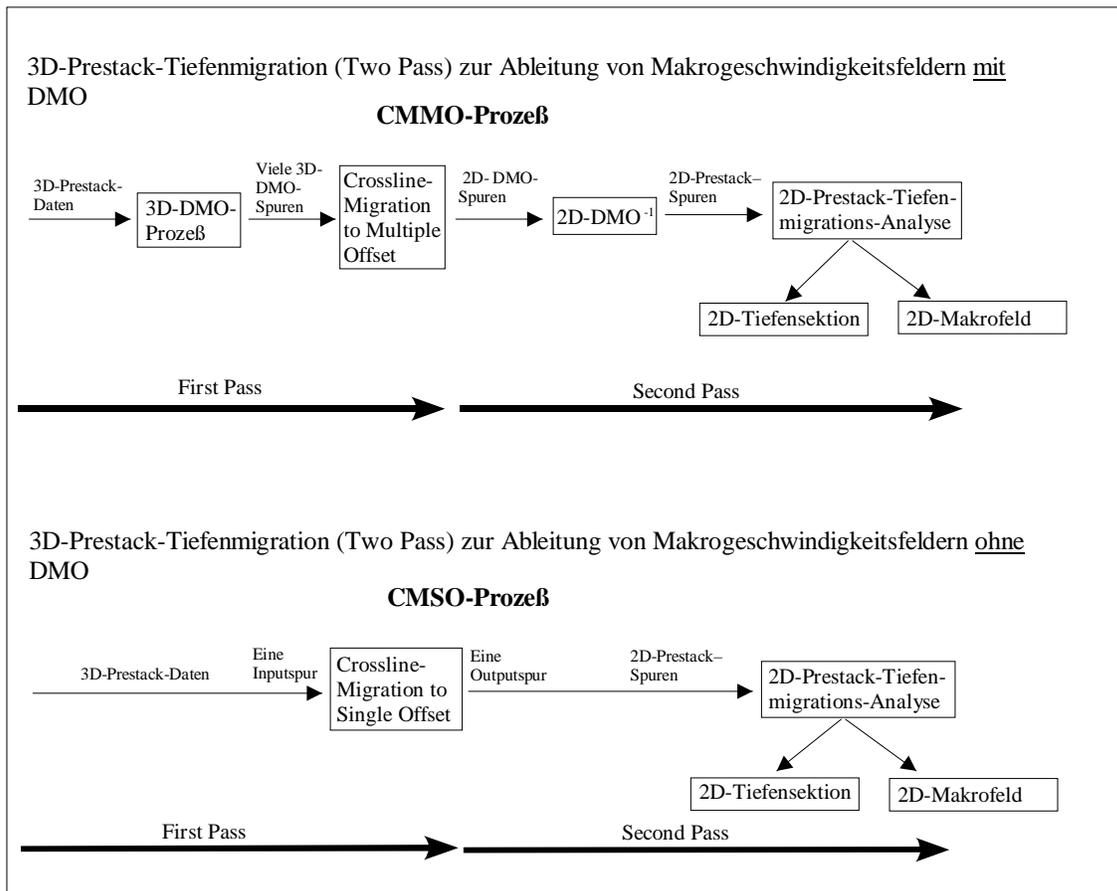


Abb. 4.2.: Die Prozessingfolge beim CMMO- und CMSO-Verfahren. Beide Verfahren generieren letztendlich 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder und 2D-Tiefensektionen, die nach der iterativen Ableitung der Makrofelder entstanden sind. Aus mehreren parallelen 2D-Makrogeschwindigkeitsfeldern kann durch Interpolation ein 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld erzeugt werden (in dieser Abb. nicht dargestellt).

5 Untersuchungen der beiden Crossline-Migrationsverfahren anhand synthetischer 3D-Beispiele

In diesem Kapitel werden das CMMO-Verfahren und das CMSO-Verfahren in ihrer Wirkungsweise und Anwendbarkeit hinsichtlich verschiedener Problemstellungen untersucht. Ziel dieser Untersuchungen soll sein, in bestimmten Situationen die Vor- und Nachteile der beiden unterschiedlichen Crossline-Migrationsverfahren herauszuarbeiten, um diese schließlich effektiv und effizient auf reale 3D-Prestack-Datensätze anwenden zu können.

Zunächst wird anhand eines einführenden synthetischen 3D-Beispiels die Wirkungsweise der Crossline-Migration mit dem CMSO- bzw. CMMO-Verfahren vorgestellt. Dabei werden typische Verfahrensmerkmale der einzelnen Verfahren deutlich werden.

Anschließend wird in Kap. 5.1.1 ein möglicher Einfluß von stark variierenden Azimutalverteilungen der Schuß-Empfänger-Aufstellungen in der 3D-Aufnahmegeometrie eines Meßgebietes auf die Ergebnisse des CMSO- und des CMMO-Prozesses untersucht. Es wird u.a. deutlich werden, daß das CMSO-Verfahren im Falle von sehr großen Variationen in den Azimuten von Schuß-Empfänger-Aufstellungen nicht mehr in der Lage ist, genügend große Offsets zu generieren. Dieser Nachteil kann u.U. behoben werden, jedoch ist dieses mit einer Zunahme von Verfahrensnoise verbunden.

In Kap. 5.1.2 wird ein räumliches Aliasing-Problem behandelt, das bei der Crossline-Migration eines 3D-Prestack-Volumens mit dem CMMO- und dem CMSO-Prozess auftreten kann, wenn z.B. zwischen den Inlines des 3D-Inputdatensatzes ein zu großer Abstand in Crossline-Richtung besteht. Dieses Problem kann vor allem die Datenqualität für kleinere Laufzeiten stark verschlechtern. Die hier erhaltenen Ergebnisse finden ihre praktische Anwendung auf das Prozessieren eines realen 3D-Datensatzes in Kap. 7.

Das CMMO-Verfahren arbeitet im First Pass als vollkommen geschwindigkeitsunabhängiges Verfahren (Kap. 3.3.2). Das CMSO-Verfahren benötigt im Gegensatz dazu zur Durchführung der Crossline-Migration ein gegebenes 3D-Geschwindigkeitsfeld (RMS-Geschwindigkeiten). Der Einfluß auf den CMSO-Prozess durch zu kleine oder zu große RMS-Geschwindigkeiten ist Gegenstand des Kap. 5.1.3. Auch die hier erhaltenen Erkenntnisse werden beim Prozessieren des realen 3D-Datensatzes in Kap. 7 Anwendung finden, wenn der reale 3D-Datensatz schließlich mit zwei unterschiedlich genauen 3D-RMS-Feldern crossline-migriert wird.

Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Crossline-Migrationsmethoden arbeiten vom theoretischen Ansatz her nur korrekt für Untergrundmedien mit einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung. Deshalb waren die bisher durchgeführten spezifischen Untersuchungen auf den konstanten Geschwindigkeitsfall beschränkt. Eine Crossline-Migration findet ihren praktischen Nutzen auf reale 3D-Prestack-Datensätze jedoch vor allem dann, wenn komplizierte geologische 3D-Verhältnisse eine komplette 3D-Tiefenmigration erfordern (siehe Kap. 2). Das in einem solchen Fall benötigte 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld kann mit Hilfe der Crossline-Migrationsmethode mittels eines Two Pass-Verfahrens aus den 3D-Prestack-Daten erzeugt werden. Bei

komplizierten geologischen Untergrundstrukturen kann jedoch nicht mehr davon ausgegangen werden, daß eine konstante Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund vorliegt. In Kap. 5.2 werden deshalb der Einfluß von nicht konstanten Geschwindigkeitsverteilungen im Untergrund auf die Ergebnisse des CMMO-Verfahrens und des CMSO-Verfahrens untersucht. Dabei werden synthetische 3D-Prestack-Datensätze von 3D-Untergrundmodellen mit unterschiedlich stark variierenden vertikalen und / oder lateralen Geschwindigkeitsvariationen mit beiden Crossline-Methoden unabhängig bearbeitet. Die erhaltenen Ergebnisse stellen schließlich Abschätzungen darüber dar, wie stark Geschwindigkeiten nach Richtung und Größe variieren dürfen, damit beide Verfahren noch effizient arbeiten.

Zur Durchführung der im Rahmen dieser Arbeit angewandten Crossline-Migrationsverfahren (CMSO- und CMMO-Methode) standen eigene entwickelte Computer-Programme zur Verfügung. Dadurch war es möglich, in den folgenden Untersuchungen flexibel auf die unterschiedlichen Problemanforderungen zu reagieren und ggf. Verbesserungen bei der Umsetzung der Verfahren vorzunehmen.

Neben diesen eigenen Computer-Programmen zur Durchführung der Crossline-Migration stand das kommerzielle Softwarepaket *Sirius 3D* der Firma GXT, Houston (USA) zur Verfügung. Das Sirius 3D-Programm beinhaltet im wesentlichen ein Two Pass-Verfahren, wobei die Crossline-Migration (First Pass) weitgehend äquivalent mit der Methode von Devaux et al., (1996) bzw. mit dem CMSO-Prozeß ist. Einige der folgenden Beispiele einer Crossline-Migration wurden zusätzlich zu Vergleichszwecken mit dem Sirius 3D-Paket durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die Ergebnisse des eigenen CMSO-Programmes sehr gut mit denen der Crossline-Migration des Sirius-3D-Paketes übereinstimmten. Da letztendlich das Sirius 3D-Paket in Kap. 7 auf einen realen 3D-Prestack-Datensatz im Rahmen eines vollständigen Two Pass-Verfahrens genutzt wurde, konnten in den folgenden synthetischen Versuchen durch den Einsatz des eigenen Computer-Programmes wertvolle Informationen für einen effizienten Einsatz der Sirius 3D-Software gewonnen werden. Das eigene CMSO-Programm war bei der Zahl und Art der Parameterwahl flexibler als die Sirius 3D-Software und erlaubte bei den Anwendungen einen tieferen Einblick zur Lösung von theoretischen und praktischen Fragestellungen.

5.1 Untersuchungen von CMMO- und CMSO-Verfahren im konstanten Geschwindigkeitsfall

Zur Generierung der synthetischen 3D-Modelle in Kap. 5.1 wurde ein selbst entwickeltes Programm benutzt. Mit Hilfe dieses Programmes lassen sich die Laufzeiten in 3D-Untergrundmedien mit einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung für beliebig viele, frei wählbare Liniendiffraktoren und beliebige Schuß-Empfänger-Konfigurationen an der Meßoberfläche berechnen. Zur Berechnung der Laufzeiten wurde folgende Formel verwendet (z.B. Forel und Gardner, 1988):

$$t = \frac{\sqrt{(RN + SM)^2 + NM^2}}{v} \quad , \quad (5.1)$$

mit RN = Lot vom Empfänger auf den Liniendiffraktor,
 SM = Lot vom Schußpunkt auf den Liniendiffraktor,
 v = Geschwindigkeit.

Die Verwendung von Liniendiffraktoren im 3D-Fall (Forel und Gardner, 1988 und 1996) hat gegenüber Reflektoren den Vorteil einer schnellen Laufzeitberechnung und einer sehr guten Anschaulichkeit hinsichtlich des Einflusses und der Eliminierung von 3D-Seiteneffekten. Im 2D-Fall sind die Liniendiffraktoren äquivalent zu 2D-Reflektoren. Die nach Gleichung (5.1) berechneten Laufzeiten wurden in allen Beispielen mit einem Wavelet von einer Signallänge mit 40 ms abgefaltet. Als Output lieferte das Datengenerierungsprogramm SEG-Y-Daten mit einer Spurlänge von 9 s und einem Samplingintervall von $dt = 8$ ms entlang der synthetisch generierten Spuren.

Sämtliche Rechnungen in diesem Kap. 5 wurden entweder auf einer Sun sparc ultra 1 mit 170 Mhz-Prozessor und 1 GB Hauptspeicher oder auf einer Sun sparc ultra 4 mit 296 Mhz-Prozessor und 4 GB Hauptspeicher durchgeführt.

Modellbeispiel I:

Das erste 3D-Modellbeispiel I besitzt an der Oberfläche ein Meßgebiet mit einer Ausdehnung von 2 km x 2 km in Inline- (x-) und Crossline- (y-) Richtung (Abb. 5.1). Dieses besteht aus 41 Inlines mit jeweils 81 CMP-Punkten. Jeder dieser CMP's wird durch 60 Schuß-Empfängerpaare mit einem Offset von 50 m bis 3000 m überdeckt. Sämtliche Schuß-Empfängeraufstellungen liegen parallel zur x-Achse, d.h., die Azimutalverteilung ist konstant: $\varphi = 0^\circ$ (vgl. Abb. 3.2). Die Geschwindigkeit im Untergrund beträgt 2500 m/s. In diesem befinden sich 7 unterschiedlich geneigte und verteilte Liniendiffraktoren (Tab. 5.1). Für die ausgewählte Inline 21 ($y = 1000$ m) (Abb. 5.1) wurde im folgenden je eine Crossline-Migration mit den verschiedenen Crossline-Migrationsverfahren durchgeführt.

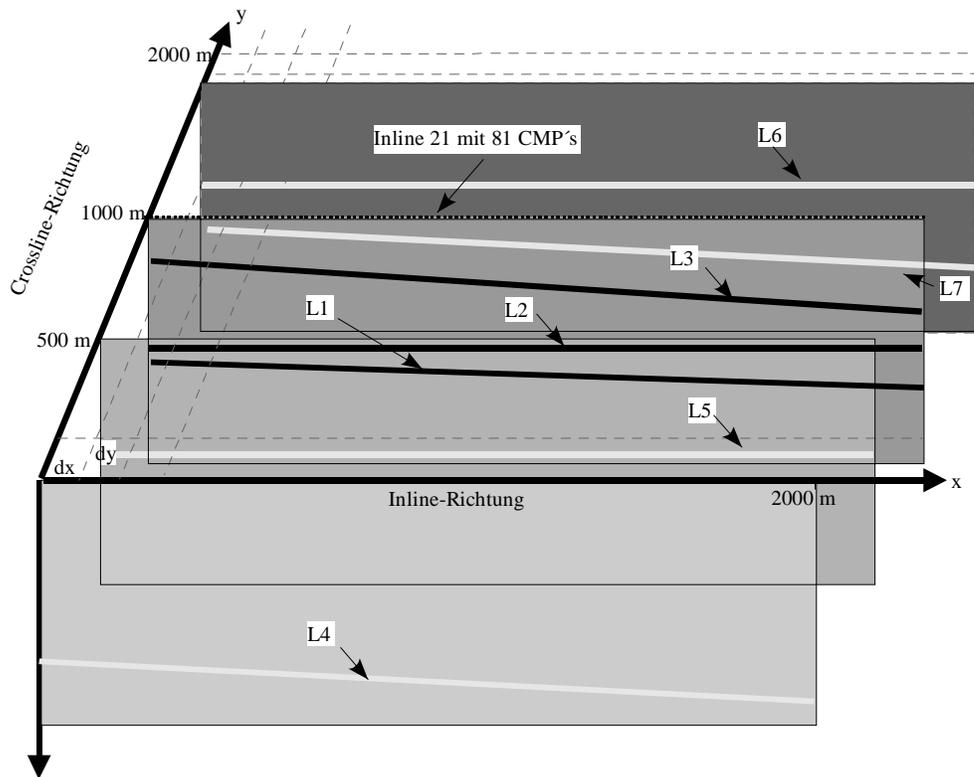


Abbildung 5.1: Modellbeispiel I: Prinzipskizze des verwendeten 3D-Modells.

Zusammenfassung der Modellparameter für Modellbeispiel I:

- $dx = 25$ m (Binabstand in x-Richtung)
- $dy = 50$ m (Binabstand in y-Richtung)
- $y_{\min} = 0 - 2000$ m (Ausdehnung in y-Richtung)
- $x_{\min} = 0 - 2000$ m (Ausdehnung in x-Richtung)
- $v = \text{const.} = 2500$ m/s (Geschwindigkeit im Untergrundmedium)
- 7 Liniendiffraktoren (siehe Tab. 5.1)

Aufnahmekonfiguration der Meßanordnung an der Oberfläche:

- Inlines: 41
- Abstand benachbarter Inlines: 50 m
- Anzahl CMP-Gather pro Inline: 81 mit einem Inkrement von 25 m
- 1 CMP-Gather: 60 Spuren mit Offset von $h_{\min} = 50$ m bis $h_{\max} = 3000$ m; Inkrement $\Delta h = 50$ m
- Azimut der einzelnen Schuß-Empfänger Aufstellungen $\varphi = \text{const} = 0^\circ$
- Sampleanzahl n_s pro CMP-Spur: 1125
- Samplingintervall dt : 8 ms

Für die Anfangspunkte $[A(x, y, z)]$ und die Endpunkte $[B(x, y, z)]$ der 7 Liniendiffraktoren galten folgende Parameter:

<i>Liniendiffraktor</i>	<i>Ax</i> [m]	<i>Ay</i> [m]	<i>Az</i> [m]	<i>Bx</i> [m]	<i>By</i> [m]	<i>Bz</i> [m]	<i>Neigung in</i> <i>Inline-</i> <i>Richtung</i>	<i>2D-Reflexion: Inline</i> <i>21</i>
L1	0	1000	1000	2000	1000	2155	30°	X
L2	0	1000	2600	2000	1000	2600	0°	X
L3	0	1000	3000	2000	1000	3768	21°	X
L4	0	0	4000	2000	0	5155	30°	3D-Seiteneffekt
L5	0	500	2500	2000	500	2500	0°	3D-Seiteneffekt
L6	0	1750	3000	2000	1750	3000	0°	3D-Seiteneffekt
L7	0	1750	4500	2000	1750	5433	25°	3D-Seiteneffekt

Tabelle 5.1: Anfangs- (A) und Endpunkte (B) der 7 Liniendiffraktoren aus Modellbeispiel I.

Die Liniendiffraktoren L1 - L3 liegen innerhalb der 2D-Ebene (Tab. 5.1), welche die Inline 21 ($y = 1000$ m) mit der Tiefenachse aufspannt. Sie stellen für diese Inline die einzigen 2D-Reflektoren dar. Alle anderen Liniendiffraktoren werden in den CMP-Gathern, die entlang der Inline 21 liegen, als 3D-Seitenreflexionen registriert.

Entsprechend den Modellparametern wurden für dieses Modell I 3321 CMP's mit insgesamt 199260 3D-Prestack-Spuren generiert. Die Größe des Outputfiles betrug ca. 946 Mbyte im SEG-Y-Format. Die Rechenzeit zur Generierung der CMP-Spuren lag bei ca. 13 Minuten.

In Abb. 5.2 sind die synthetisch generierten 3D-Prestack-Daten von 5 CMP-Gathern entlang der Inline 21 abgebildet. Deutlich sind die Reflexionshyperbeln, die von den 7 Liniendiffraktoren stammen, zu erkennen. Die Reflexionsereignisse L4 - L7 stellen für die Inline 21 3D-Seiteneffekte dar und werden nun mittels der beiden Crossline-

Migrationsmethoden aus den Prestack-Daten eliminiert.

In Abb. 5.3 ist zunächst das Ergebnis der Inline 21 für 5 CMP's nach Anwenden der Crossline-Migration mit dem Sirius 3D-Paket zu sehen. In Abb. 5.4 ist das entsprechende Ergebnis mit dem eigenen Programm zur Durchführung des CMSO-Prozesses wiedergegeben. Zwischen beiden Ergebnissen sind keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Sämtliche 3D-Seitenreflexionen der Inline 21, die von den 4 Liniendiffraktoren L4 - L7 stammen, sind vollständig eliminiert worden. Ausschließlich die 2D-Reflexionshyperbeln der Liniendiffraktoren L1 - L3 sind erhalten geblieben. Aus den 3D-Prestack-Daten der Inline 21 sind damit 2D-Prestack-Daten entstanden. Die Crossline-Migrationsmethode CMSO benötigt zur Durchführung ein gegebenes 3D-RMS-Geschwindigkeitsfeld (Kap. 4), deshalb wurde in beiden Beispielen (Abb. 5.3 und 5.4) ein konstantes und für das 3D-Untergrundmodell exakte 3D-RMS-Feld mit $V_{\text{RMS}} = 2500$ m/s vorgegeben.

Levin (1971) zeigte, daß für gemessene CMP-Gather, bei geneigten Reflektoren in Medien mit konstanter Geschwindigkeitsverteilung, die NMO-Geschwindigkeit der Reflexionshyperbel nach folgender Gleichung berechnet werden kann:

$$v_{\text{NMO}} = \frac{v}{\cos(\alpha)} \quad , \quad (5.2)$$

mit v = Mediumsgeschwindigkeit,
 α = Neigungswinkel des Reflektors.

Für die crossline-migrierten 2D-Spuren im CMP-Gather nach Durchführung des CMSO-Verfahrens gilt folgende Gleichung für die Hyperbel-Laufzeitkurve:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{4 \cdot h^2}{v_{\text{NMO}}^2} \quad , \quad (5.3)$$

mit t = 2D-Laufzeit,
 t_0 = Zero-Offset-Zeit,
 $2 \cdot h$ = Offset.

Zur Kontrolle der crossline-migrierten Daten wurden diese NMO-korrigiert. Eine NMO-Korrektur der crossline-migrierten CMP-Gather aus Abb. 5.4 ist in Abb. 5.5 dargestellt. Die NMO-Geschwindigkeiten für die jeweiligen Reflexionshyperbeln der 3 Liniendiffraktoren wurden entsprechend Gleichung (5.2) berechnet. Alle Ereignisse in den crossline-migrierten Gathern liegen horizontal entlang der richtigen t_0 -Zeit.

In Abb. 5.6 ist das Ergebnis der Crossline-Migration für die Inline 21 nach dem CMMO-Verfahren zu sehen. Auch hier sind sämtliche 3D-Seitenreflexionen entlang der Inline eliminiert worden. Im Gegensatz zu den Ergebnissen des CMSO-Verfahrens ist jedoch bei den crossline-migrierten Daten des CMMO-Verfahrens zu erkennen, daß die Amplituden kleiner Offsets abgeschwächt und größerer Offsets verstärkt wurden. Dieser Effekt verstärkt sich noch mit zunehmender Laufzeit. Ein solches „Abschwächen“ von kleineren Offset-Amplituden ist für den CMMO-Prozeß verfahrenstechnisch bedingt und bei allen noch folgenden Ergebnissen des CMMO-Prozesses zu beobachten.

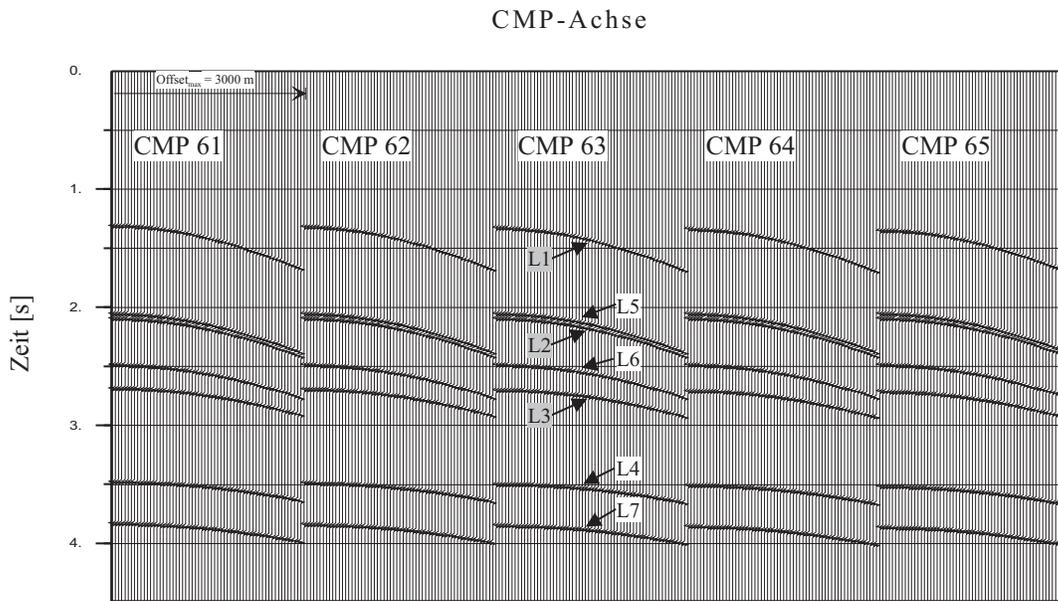


Abb. 5.2: Synthetisch generierte CMP-Gather 61 - 65 entlang der Inline 21 aus Modellbeispiel I. Die 2D-Reflexionen für diese Inline sind grau unterlegt. Jedes CMP-Gather besteht aus 60 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 50$ m.

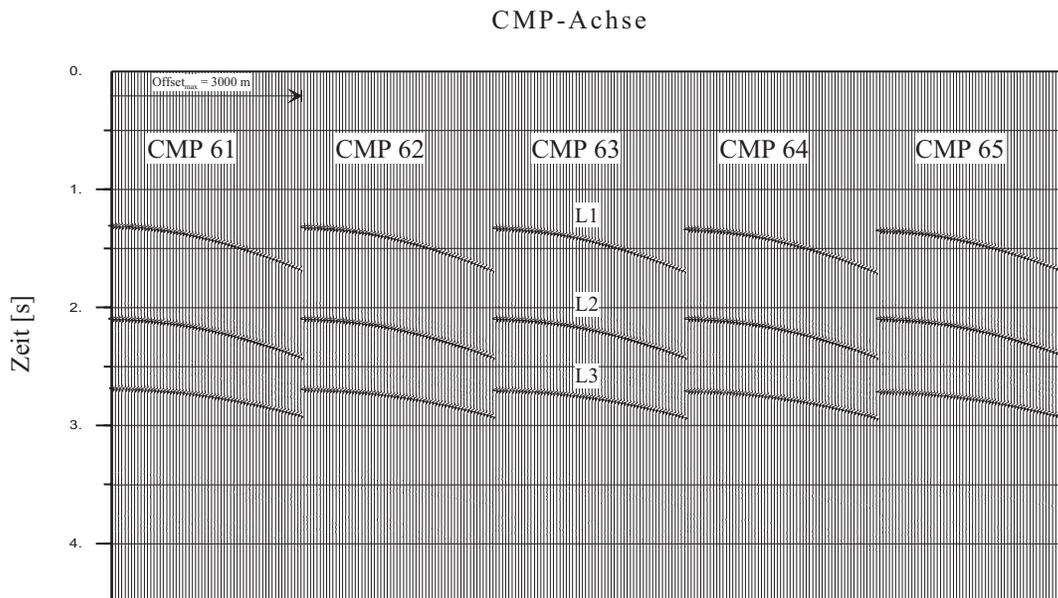


Abb. 5.3: CMP-Gather 61 - 65 entlang der Inline 21 aus Modellbeispiel I nach Anwenden der Crossline-Migration mit dem Sirius-Programm. Es sind nur noch 2D-Reflexionen der Liniendiffraktoren L1, L2 und L3 erhalten geblieben.

CMP-Achse

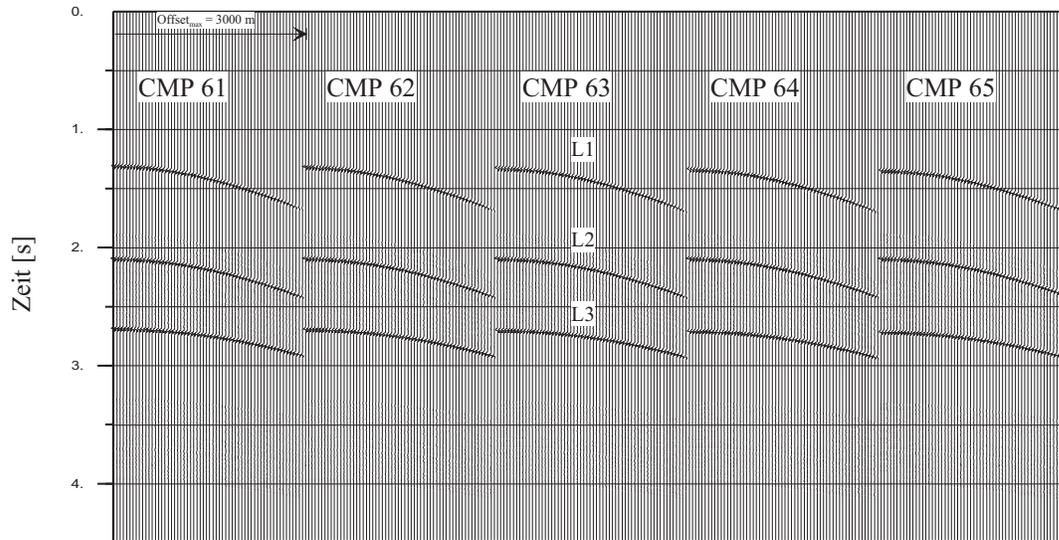


Abb. 5.4: CMP-Gather 61 - 65 nach Anwenden des CMSO-Prozesses auf Modellbeispiel I. Die 3D-Seiteneffekte für die Inline 21 sind eliminiert worden. Die Reflexionshyperbeln der Liniendiffraktoren L1, L2 und L3 sind dagegen erhalten.

CMP-Achse

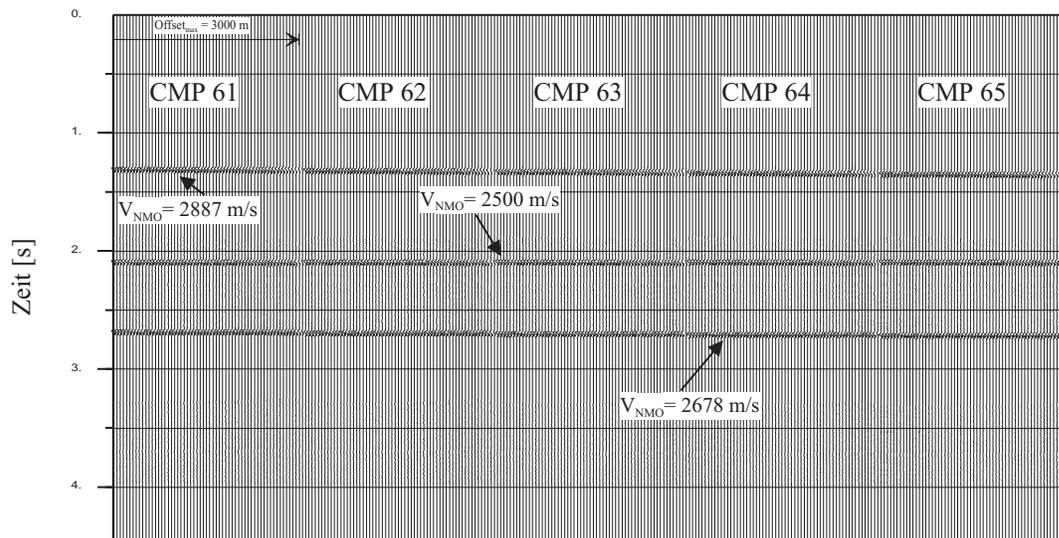


Abb. 5.5: NMO-korrigierte CMSO-Gather aus Abb. 5.4. Die drei Reflexionshyperbeln haben eine unterschiedliche NMO-Geschwindigkeit, die von der jeweiligen Reflektorsteigung abhängt.

Das Abschwächen der Amplituden für kleinere Offsetbereiche beruht auf einer Operatorlimitierung, die mit zunehmender Laufzeit beim Forel-Gardner-DMO-Prozeß (vgl. Kap. 3.2.1) auftritt. Nach Gleichung (3.6):

$$b_{\max} = \frac{2 \cdot h^2}{v \cdot t} , \quad (3.6)$$

wird der DMO-Operator mit zunehmender Zeit t „schmäler“ bzw. b_{\max} kleiner. Da b_{\max} kleiner wird, werden beim DMO-Prozeß auch immer weniger kleinere Offsets k gemäß Gleichung (3.1): $k^2 = h^2 - b^2$ generiert. Dieser Effekt wirkt sich entsprechend auf den Offsetbereich [$= k^2 + \Delta y^2$; vgl. Gleichung (3.23)] der CMMO-prozessierten Daten aus.

Im Gegensatz zu den CMSO-prozessierten Daten sind CMMO-Daten zusätzlich noch mit einem DMO-Prozeß behaftet (vgl. Abb. 4.2). Der auf den 2D-Daten vorhandene DMO-Effekt wird deutlich, wenn die 2D-Reflexionshyperbeln der CMMO-Gather ebenfalls einer NMO-Korrektur unterzogen werden. Da es sich bei den CMMO-Daten um ungestapelte DMO-prozessierte Daten handelt, fällt die Neigungsabhängigkeit der NMO-Geschwindigkeit aus Gleichung (5.2) weg (vgl. Kap. 3.1). Deshalb müssen alle Ereignisse in den CMMO-Gathern für dieses Beispiel mit einer einheitlichen NMO-Geschwindigkeit von 2500 m/s korrigiert werden. Abb. 5.7 zeigt, daß sich mit dieser NMO-Geschwindigkeit alle 3 Reflexionshyperbeln auf eine horizontale Laufzeitkurve richtig korrigieren lassen.

Um den DMO-Effekt aus den CMMO bearbeiteten Daten zu beseitigen, muß zusätzlich ein inverser 2D-DMO-Prozeß (DMO^{-1}) auf die Daten wirken (vgl. Abb. 4.2). Ein solcher inverser DMO-Prozeß wurde in Kap. 3.2.3 hergeleitet. Das Ergebnis der Anwendung dieses inversen DMO-Operators auf die CMMO-prozessierten Daten der Inline 21 zeigt die Abb. 5.8. Eine anschließende NMO-Korrektur (Abb. 5.9) dieser Gather macht deutlich, daß der DMO-Effekt eliminiert worden ist. Die NMO-Geschwindigkeiten weisen nun die gleiche Dip-Abhängigkeit auf wie im CMSO-Beispiel (vgl. Abb. 5.5). Allerdings ist eine starke Zunahme von Verfahrensnoise zu beobachten, der typisch für den hier verwendeten inversen DMO-Operator ist.

Die Ergebnisse der beiden getesteten Methoden machen deutlich, daß diese im konstanten Geschwindigkeitsfall und bei der in diesem Beispiel gewählten Aufnahmeconfiguration korrekt arbeiten und die erwarteten Ergebnisse liefern. Darüber hinaus ist auch zu erkennen, daß das CMMO-Verfahren gegenüber dem CMSO-Verfahren mehr Noise produziert und die Amplituden der kleineren Offsetbereiche abschwächt. Das CMMO-Verfahren enthält automatisch den DMO-Prozeß und erzeugt aus einer gegebenen seismischen Spur sehr viele neue seismische Spuren (vgl. Kap. 3.3). Durch Superposition all dieser generierten seismischen Spuren ergibt sich die Wirkung des CMMO-Prozesses. Es entstehen daher mehr Noise und stärkere Signalverzerrungen als beim CMSO-Prozeß, der einen Einspurprozeß darstellt (vgl. Kap. 4), wobei aus einer gegebenen seismischen Spur nur eine neue seismische Spur erzeugt wird.

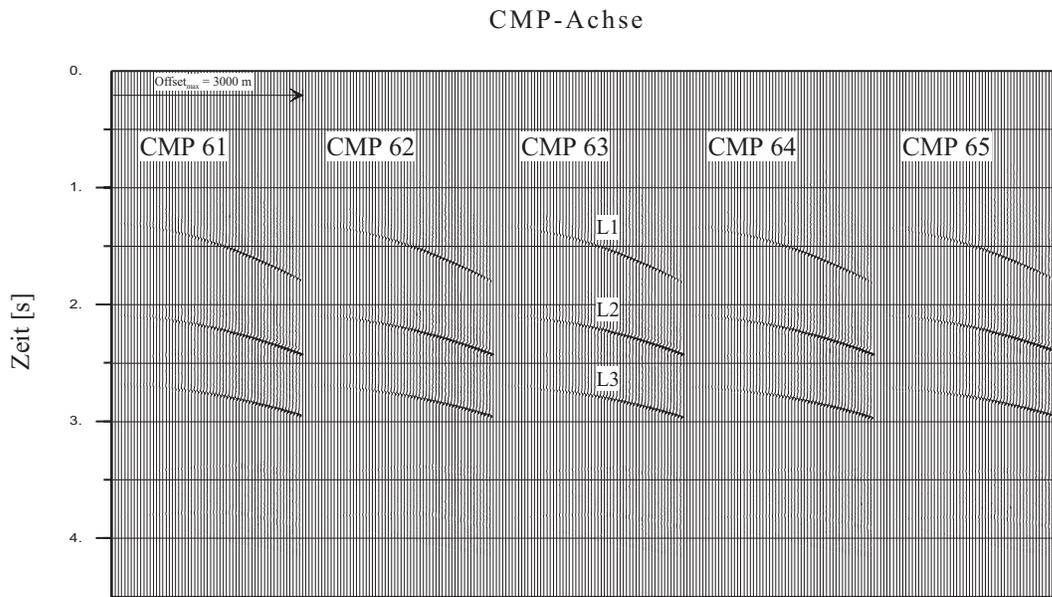


Abb. 5.6: CMMO-Gather 61 - 65 entlang der Inline 21 nach Anwenden des CMMO-Prozesses auf Modellbeispiel I. Nur noch die 2D-Reflexionshyperbeln der Liniendiffraktoren L1, L1, L3 sind erhalten geblieben. Die 3D-Seitenreflexionen sind eliminiert worden.

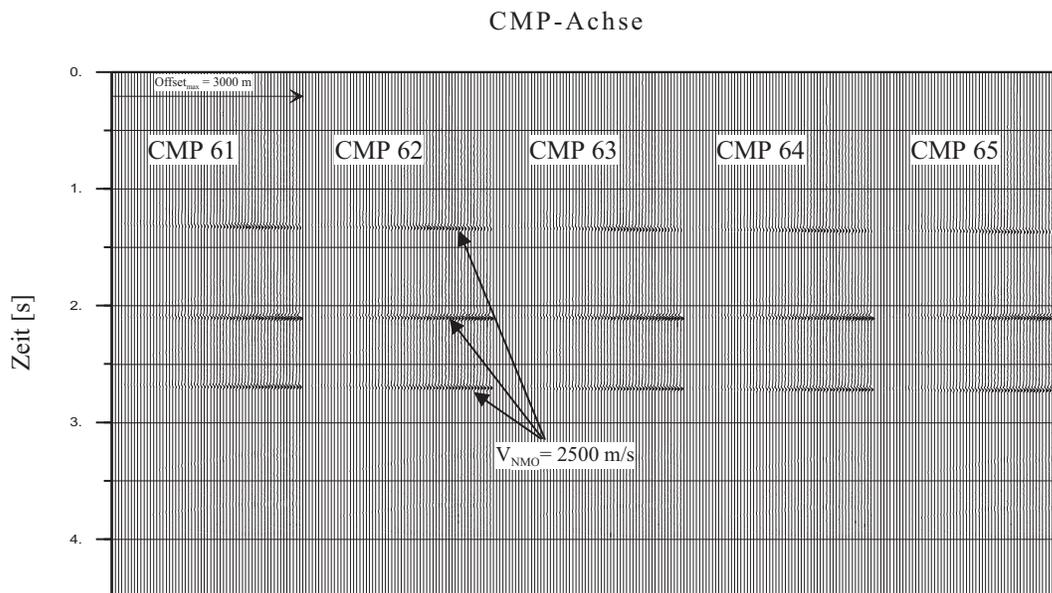


Abb. 5.7: NMO-korrigierte CMMO-Gather aus Abb. 5.6. Alle Ereignisse lassen sich mit einer einheitlichen Geschwindigkeit korrigieren. Die NMO-Geschwindigkeit ist nicht neigungsabhängig, da die Daten nach dem CMMO-Verfahren noch mit einem DMO-Prozeß behaftet sind.

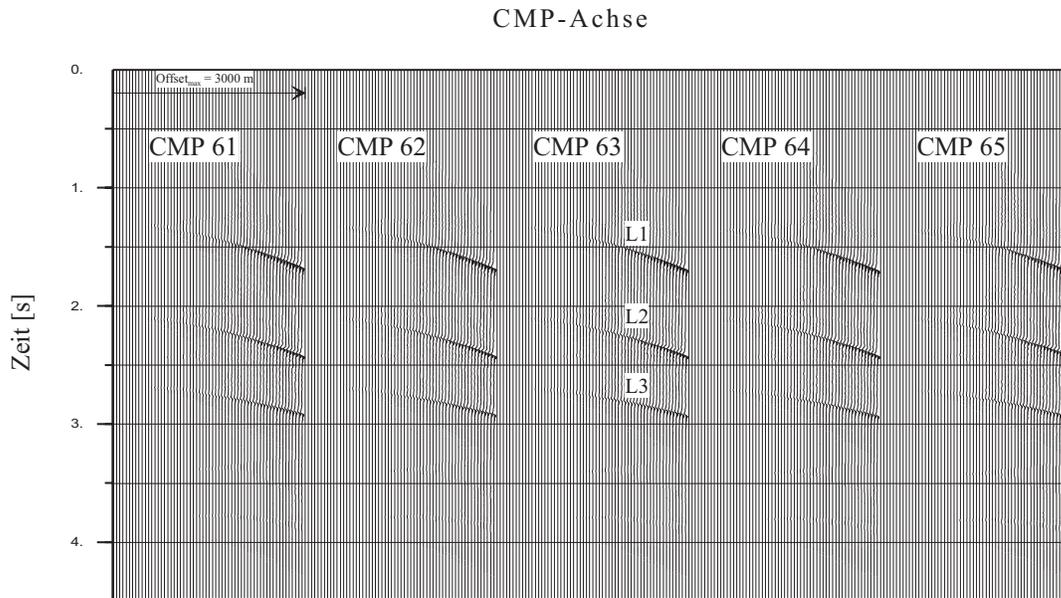


Abb. 5.8: CMMO-Gather aus Abb. 5.6 nach Anwenden eines inversen 2D-DMO-Prozesses.

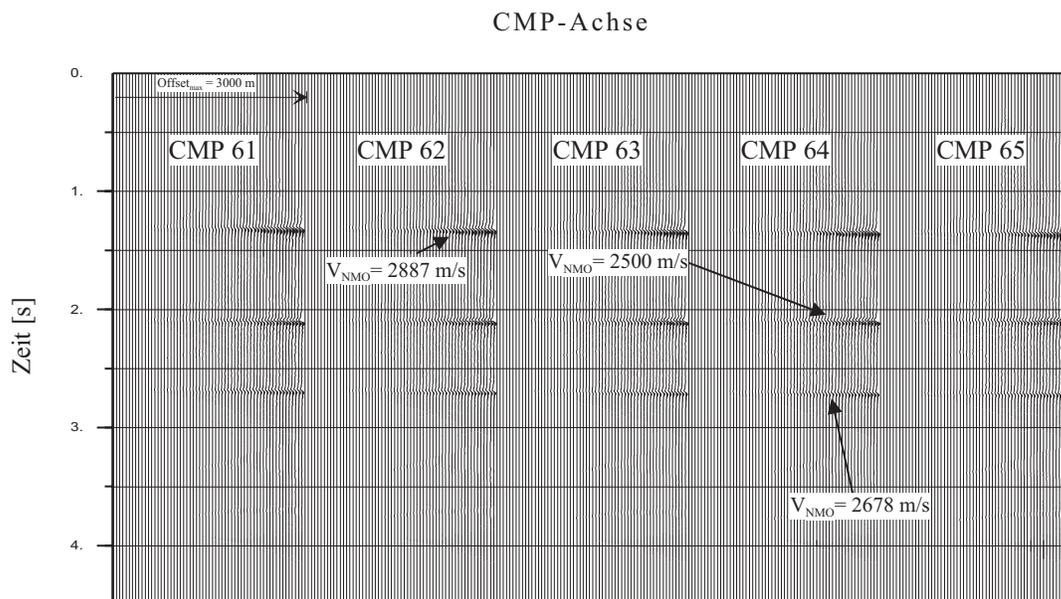


Abb. 5.9: NMO-Korrektur auf die Gather der Abb. 5.8. Der inverse 2D-DMO-Prozess hat die CMMO-Spuren wieder in normale 2D-Prestack-Daten überführt. Die NMO-Geschwindigkeiten sind jetzt wieder neigungsabhängig.

Aus diesem Grund ist die Rechenzeit beim CMMO-Prozeß höher als beim CMSO-Prozeß (in den durchgeführten Versuchen mit den eigenen Programmen ca. Faktor 20). Die Anwendung des inversen DMO-Operators verschlechtert die Datenqualität nach dem CMMO-Prozeß weiterhin, da das inverse 2D-DMO-Verfahren ebenfalls Verfahrensnoise produziert.

5.1.1 Der Einfluß der Aufnahmegeometrie im 3D-Fall

In diesem Kapitel werden zunächst gleichmäßig verteilte stark variierende Azimutalverteilungen in der Aufnahmegeometrie eines 3D-Meßgebietes simuliert. Anhand von 2 unterschiedlichen Modellbeispielen wird untersucht, ob variierende große Azimutalwinkel in den Schuß-Empfänger-Aufstellungen einen Einfluß auf die Ergebnisse des CMMO- bzw. CMSO-Verfahrens haben. Anschließend wird in einem weiteren kurzen Modellbeispiel gezeigt, daß das Fehlen eines bestimmten Offsetbereiches im 3D-Prestack-Inputdatensatz durch das CMMO-Verfahren teilweise rückgängig gemacht werden kann. In allen Modellbeispielen dieses Kapitels ist das gleiche Untergrundmodell wie im vorherigen Kap. 5.1 verwendet worden (siehe Abb. 5.1). Lediglich die Aufnahmegeometrie zur Erzeugung des 3D-Prestack-Inputdatensatzes an der Oberfläche wurde entsprechend der jeweiligen Zielsetzung geändert.

In den folgenden 2 Beispielen (Modell II a und II b) wurde für das Modell I (Abb. 5.1) der Azimutalwinkel φ (vgl. Abb. 3.2) der einzelnen Schuß-Empfänger-Verbindungslinien mittels eines Zufallsgenerators im Datengenerierungsprogramm verändert. Die beiden folgenden Modellbeispiele II a bzw. II b unterscheiden sich voneinander nur hinsichtlich des maximal gewählten Azimutalwinkels φ_{\max} . Für Modellbeispiel II a wurde ein $\varphi_{\max} = 45^\circ$ gewählt, in Modell II b ein $\varphi_{\max} = 90^\circ$. In Abb. 5.10 a und 5.10 b ist die Häufigkeitsverteilung der generierten Azimute aller Schuß-Empfängeraufstellungen in den 3D-Inputdatensätzen der beiden Modelle II a bzw. II b dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Häufigkeiten aller zufällig generierten Azimute in den beiden Modellen nur jeweils innerhalb einer kleinen Bandbreite schwankt, d.h., es liegt eine sehr gleichmäßige Azimutalverteilung der verschiedenen Winkel vor und kein Azimutalwinkel ist in den Modellbeispielen besonders bevorzugt worden.

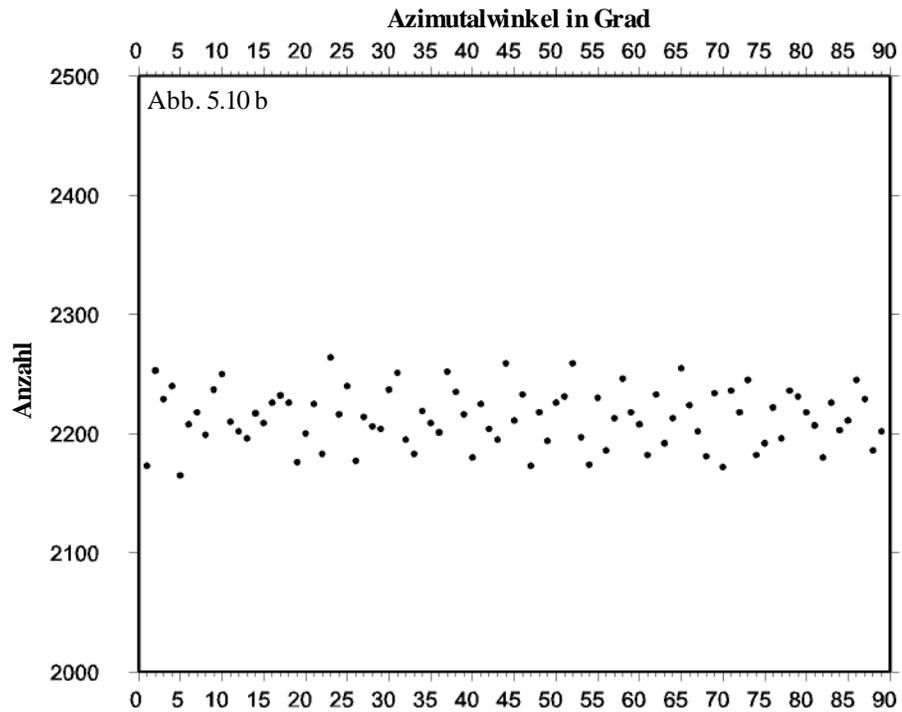
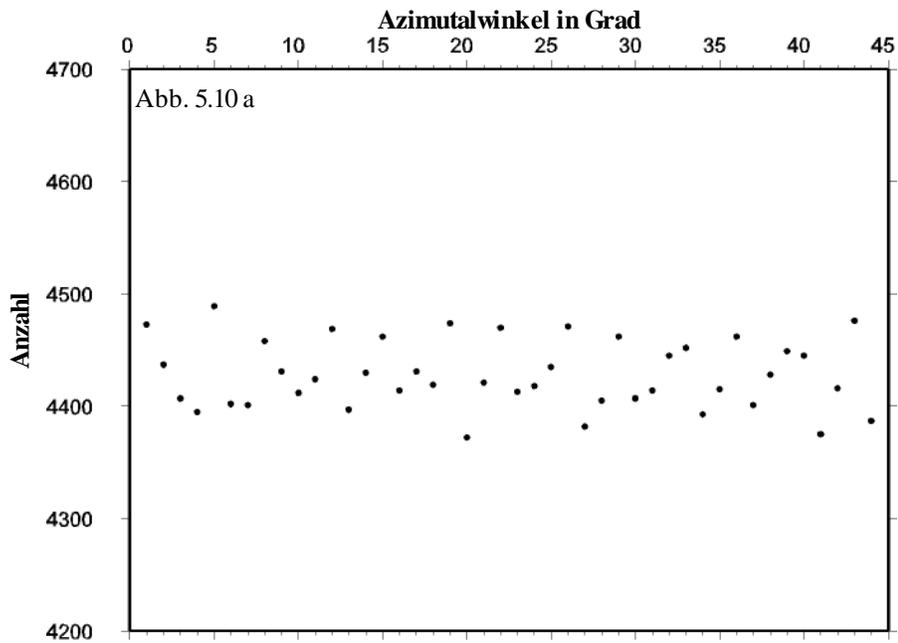


Abbildung 5.10 a und b: Häufigkeitsverteilung der Schuß-Empfänger-Azimute des gesamten 3D-Prestack-Inputdatensatzes der Modellbeispiele II a ($\varphi_{\max} = 45^\circ$) und II b ($\varphi_{\max} = 90^\circ$). In beiden Modellen liegt eine sehr gleichmäßige Verteilung hinsichtlich der Azimute vor.

Ergebnisse des Modellbeispiels II a :

In Abb. 5.11 a und 5.11 b sind die Ergebnisse des Modellbeispiels II a ($\varphi_{\max} = 45^\circ$) nach dem CMMO- und dem CMSO-Verfahren entlang der Inline 21 dargestellt. Die Resultate zeigen zunächst, daß beide Verfahren in der Lage sind, die richtigen 2D-Informationen aus den 3D-Inputdaten zu erzeugen und die 3D-Seiteneffekte zu eliminieren (es sind nur noch 2D-Informationen der Liniendiffraktoren L1, L2 und L3 erhalten geblieben).

Die CMMO-Gather (Abb. 5.11 a) zeigen keinerlei Besonderheiten, die auf eine unterschiedliche Azimutalverteilung zurückzuführen wären. Das Ergebnis ist mit dem Resultat des CMMO-Prozesses aus dem Einführungsbeispiel Modell I (vgl. Abb. 5.6) visuell nicht unterscheidbar, bei dem eine konstante Azimutalverteilung mit $\varphi = 0^\circ$ vorgegeben war.

Das Ergebnis des CMSO-Prozesses (Abb. 5.11 b) zeigt im Vergleich zu dem entsprechenden Resultat des Modellbeispiels I (vgl. Abb. 5.4) deutliche Unterschiede hinsichtlich des Informationsgehaltes der crossline-migrierten Daten. Die Amplituden der größeren Offsets werden z.T. nur sehr schwach abgebildet. Die variierenden Azimutalwinkel des 3D-Inputdatensatzes haben damit einen Einfluß auf das Ergebnis des CMSO-Prozesses. Nach Abb. 5.11 b sieht es aus, als wenn das Abschwächen der größeren Offsets um so stärker auftritt, je kleiner die Laufzeit t und je größer die Neigung des jeweiligen Reflektors ist (vgl. Tab. 5.1). Außerdem hat der Processingnoise zugenommen (vgl. Abb. 5.4).

Ergebnisse des Modellbeispiels II b:

In den Abb. 5.12 a und 5.12 b sind die Ergebnisse des CMMO- bzw. CMSO-Prozesses des Modellbeispiels II b dargestellt. Im Gegensatz zu Modell II a treten hier noch größere Azimute ($\varphi_{\max} = 90^\circ$) in den 3D-Inputdaten auf. Die Abb. 5.12 a und 5.12 b bestätigen weitgehend die Ergebnisse des Modellversuchs II a. Die Azimutalverteilung der 3D-Inputdaten hat keinen sichtbaren Einfluß auf das Ergebnis des CMMO-Verfahrens gehabt. Die Begründung hierfür liegt darin, daß der CMMO-Prozeß einen Mehrspuroffset-Prozeß darstellt, bei dem die Generierung von 2D-Offsets unabhängig von der Azimutalverteilung der 3D-Inputdaten ist.

Der CMSO-Prozeß schwächt dagegen die Amplituden der großen Offsets erneut deutlich ab. Dieser Effekt ist im Vergleich zum vorhergehenden Beispiel noch weiter verstärkt worden (vgl. Abb. 5.11 b und 5.12 b). Mit größer gewordenem maximalen Azimutalwinkel verschiebt sich das Abschwächen bestimmter Offsetbereiche immer weiter zu kleineren Offsetbereichen hin.

Als Ergebnis dieser beiden und weiterer entsprechender Modellversuche kann somit festgehalten werden, daß eine unterschiedlich stark variierende Azimutalverteilung keinen wesentlichen Einfluß auf das CMMO-Verfahren hat.

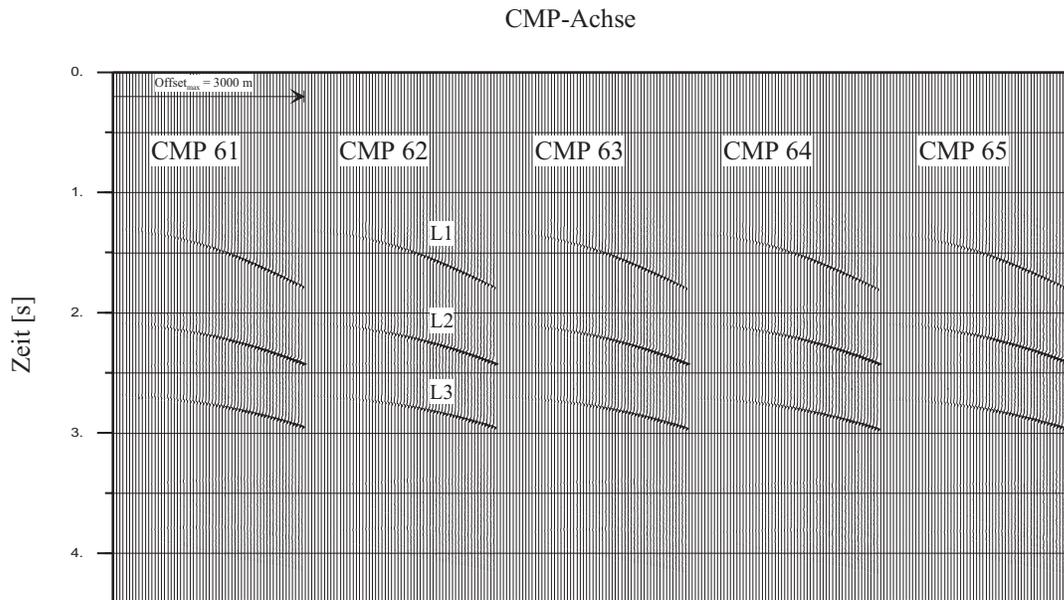


Abb. 5.11 a: CMMO-Gather des Modellbeispiels II a ($\varphi_{\max} = 45^\circ$). Die Ergebnisse zeigen keinerlei Besonderheiten, die auf eine unterschiedlich stark variierende Azimutverteilung in den 3D-Prestack-Inputdaten zurückzuführen sind (vgl. Abb. 5.6).

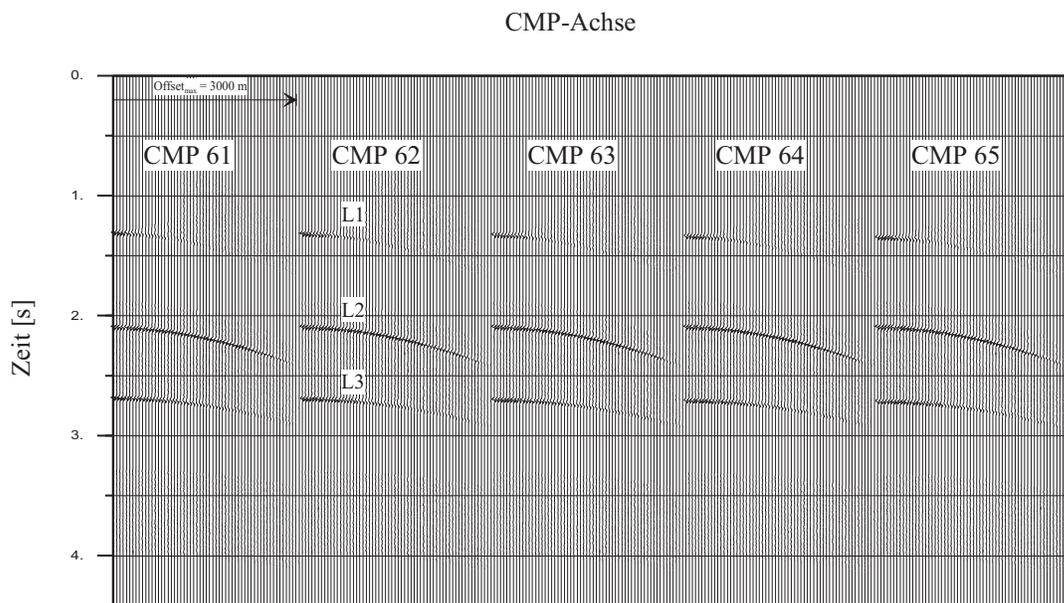


Abb. 5.11 b: CMSO-Gather des Modellbeispiels II a ($\varphi_{\max} = 45^\circ$). Größere Offsetbereiche werden schwächer abgebildet als in Modellbeispiel I (vgl. Abb. 5.4), bei dem die 3D-Inputdaten eine konstante Azimutverteilung von $\varphi = 0^\circ$ hatten.

CMP-Achse

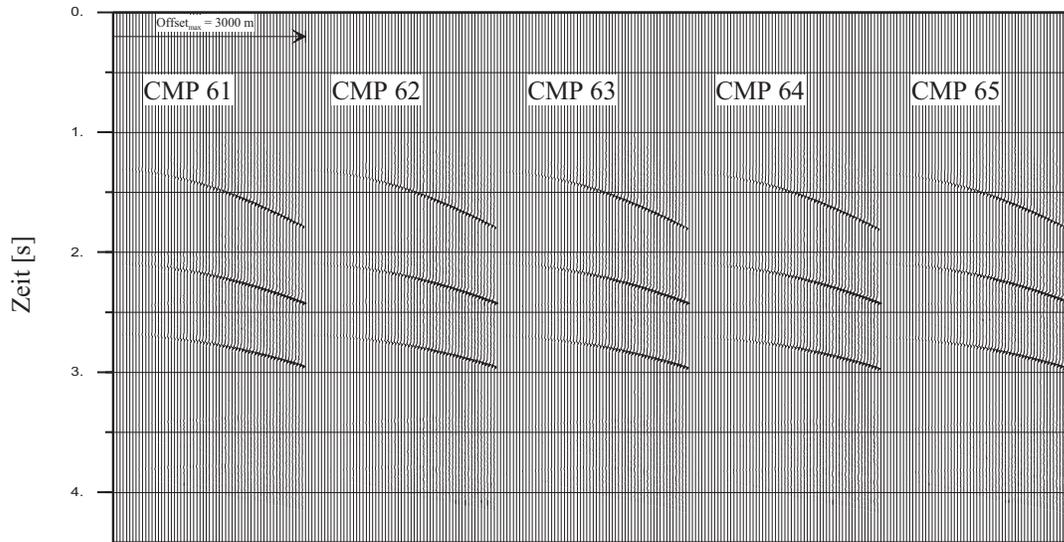


Abb. 5.12 a: CMMO-Gather des Modellbeispielles II b ($\varphi_{\max} = 90^\circ$). Die Ergebnisse zeigen auch in diesem Beispiel keinerlei Besonderheiten, die auf eine unterschiedlich stark variierende Azimutverteilung in den 3D-Inputdaten zurückzuführen sind (vgl. Abb. 5.6).

CMP-Achse

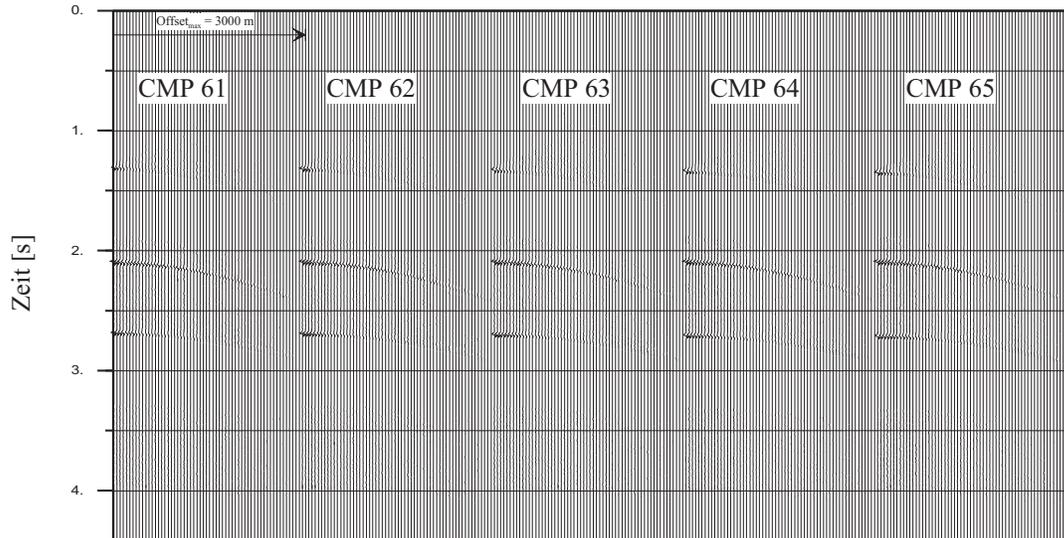


Abb. 5.12 b: CMSO-Gather des Modellbeispielles II b ($\varphi_{\max} = 90^\circ$). Es werden nur noch sehr kleine Offsetbereiche deutlich abgebildet. Dieser Effekt hat im Vergleich zu Modellbeispiel II a weiter zugenommen (vgl. Abb. 5.11 b).

Beim CMSO-Verfahren werden dagegen größere Offsetbereiche abgeschwächt, und zwar um so stärker, je größer die Reflektorneigung ist, je kleiner die Laufzeit und je größer der Azimutalwinkel φ ist. Die Erklärung für die letzten beiden Punkte wird im folgenden gegeben:

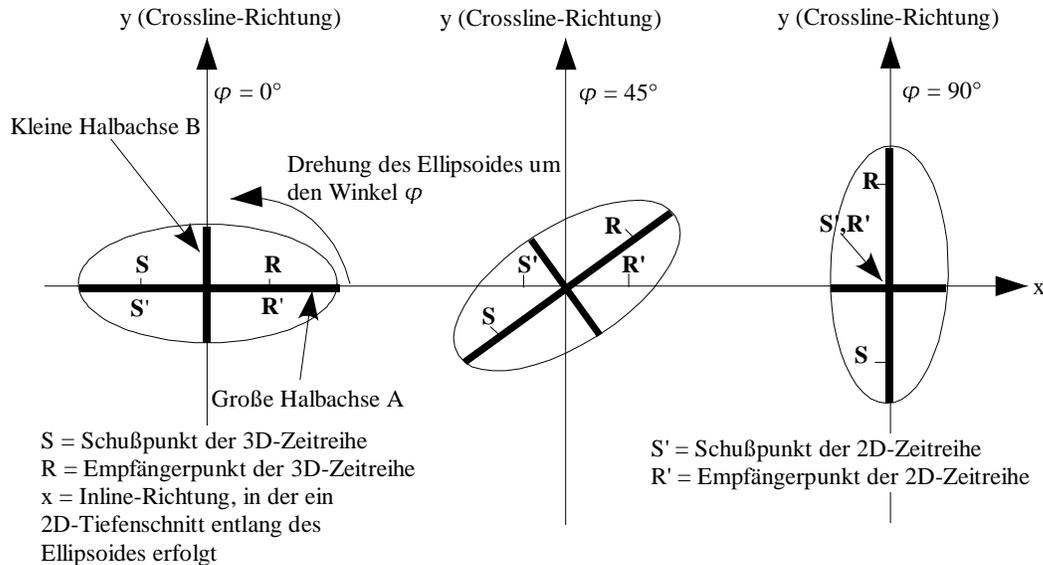


Abb. 5.13: Aufsicht auf ein entsprechend dem CMSO-Verfahren konstruiertes Ellipsoid (vgl. Abb. 4.1). In der Inline-Richtung x erfolgt jeweils nach der CMSO-Methode ein 2D-Schnitt zur Generierung einer 2D-Zeitreihe aus einer 3D-Zeitreihe (vgl. Kap. 4.1). Von den Parametern der Zeitreihen interessiert in dieser Abb. nur der Offset. In der linken Darstellung beträgt der Drehwinkel 0° , der Offset der 2D-Zeitreihe ist gleich dem der 3D-Zeitreihe. In der mittleren Darstellung erfolgte eine Drehung des Ellipsoides um 45° . Die zugehörige 2D-Schuß-Empfänger-Konfiguration (S' und R') für einen 2D-Tiefenschnitt entlang der x -Achse weist einen geringeren Offset auf. In der rechten Darstellung ist das Ellipsoid um 90° gedreht worden. S' und R' liegen nun auf einem Punkt. Der zugehörige Offset der 2D-Zeitreihe ist Null.

In Abb. 5.13 ist für eine gegebene Schuß-Empfänger-Aufstellung (S , R) entsprechend der Herleitung für das CMSO-Verfahren die Aufsicht auf das zugehörige 3D-Ellipsoid zu sehen (vgl. Abb. 4.1). Der CMP-Punkt der Schuß-Empfänger-Aufstellung befindet sich im Koordinatenursprung $m_x = m_y = 0$. Die x -Achse stellt die gewünschte Inline-Richtung dar, in der die 3D-Zeitreihe zu einer 2D-Zeitreihe mit den zugehörigen 2D-Parametern transformiert werden soll (vgl. Kap. 4.1). Interessieren soll nur der Offset der neuen 2D-Schuß-Empfänger-Aufstellung (S' , R') in Inline-Richtung. Im linken Teil der Abb. 5.13 sind die 3D-Positionen S , R und die 2D-Positionen S' , R' nach Anwenden des CMSO-Verfahrens identisch ($\varphi = 0^\circ$). Der Offset der 2D-Zeitreihe ist maximal und gleich dem Offset der 3D-Zeitreihe. Wird die Schuß-Empfänger-Aufstellung der 3D-Zeitreihe um $\varphi = 45^\circ$ (Azimutalwinkel) gegenüber der Inline-Richtung gedreht, so verkleinert sich der Abstand (Offset) von S' und R' (mittlerer Teil Abb. 5.13). Im rechten Teil der Abb. 5.13 wird schließlich eine 2D-Zeitreihe aus einem um $\varphi = 90^\circ$ gedrehten Ellipsoid konstruiert. S' und R' liegen nun auf einem Punkt. Der 2D-Offset ist gleich null. Es ist eine Zero-Offset Spur in Inline-Richtung entstanden. Anhand dieser Betrachtung soll deutlich werden, daß mit ansteigendem Azimutalwinkel φ einer 3D-Schuß-Empfänger-Aufstellung gegenüber der Inline-Richtung das CMSO-Verfahren in Inline-

Richtung gegenüber dem Offset der 3D-Zeitreihe nur kleine 2D-Offsets generieren kann.

Dies wird im folgenden durch Rechnung genauer untersucht. Entsprechend den Formeln für das CMSO-Verfahren (Anhang A) wurden für 91 gegebene 3D-Schuß-Empfänger-Aufstellungen (ähnlich Abb. 5.13) mit einem Azimut φ zwischen 0° und 90° die entsprechenden 2D-Aufstellungen in Inline-Richtung berechnet. Die Modellparameter für die 3D-Aufstellung sind in Tab. 5.2 wiedergegeben:

CMP: mx; my	0 m; 0 m
Offset: $2 \cdot h$	3000 m
Geschwindigkeit: v	2500 m/s
t_{input}	0.1 - 8 s
Azimut: φ	$0^\circ - 90^\circ$

Tab. 5.2 Modellparameter der 3D-Zeitreihen, die in Inline-Richtung $\varphi = 0^\circ$ mit dem CMSO-Verfahren zu 2D-Zeitreihen korrigiert wurden.

Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist in Abb. 5.14 dargestellt. Für verschiedene Inputzeiten t (0 - 8 s mit $dt = 0.1$ s) der 3D-Zeitreihen wurde der neue halbe Offset h der jeweiligen 2D-Zeitreihe entlang der x-(Inline-)Achse berechnet. Die minimal mögliche Inputzeit für dieses Modellbeispiel ist aufgrund der gewählten Modellparameter für das Ellipsoid auf 1.3 s beschränkt [siehe Anhang A: z.B. Gleichung (A 19)]. Anhand der Abb. 5.14 wird deutlich, daß beim CMSO-Prozeß mit kleinerer Inputzeit t und mit größer werdendem Azimut φ , 2D-Offsets in Inline-Richtung immer kleiner werden. Bei einem Azimut gegenüber der Inline-Richtung von 90° erreichen die Offsets für alle Zeiten t den Wert 0. Schuß und Empfänger der 2D-Zeitreihe liegen auf einem Punkt. Es ist eine 2D-Zero-Offset-Spur entstanden. Ein 2D-Tiefenschnitt durch das Migrations-Ellipsoid beim CMSO-Verfahren entlang der Inline-Achse würde in diesem Fall einen Halbkreis ergeben.

Als Ergebnis kann damit für das CMSO-Verfahren folgendes festgehalten werden:

Bildet die gewünschte Inline-Richtung einen Azimutalwinkel $\varphi \neq 0^\circ$ mit den Schuß-Empfängeraufstellungen des 3D-Inputdatensatzes, so können in Inline-Richtung nur 2D-Prestack-Spuren erzeugt werden, die einen kleineren Offset haben als die 3D-Spuren des Inputdatensatzes. Die resultierenden 2D-Offsets sind dabei um so kleiner, je größer der Azimut φ und je kleiner die Inputzeit t der 3D-Zeitreihe sind.

In den synthetischen Beispielen wurde eine Azimutalverteilung von $\varphi = 0^\circ - 45^\circ$ bzw. von $\varphi = 0^\circ - 90^\circ$ gewählt. Durch den verhältnismäßig hohen Anteil von größeren Azimuten im Inputdatensatz wurden verhältnismäßig mehr kleinere als größere 2D-Offsets generiert (vgl. auch Abb. 5.14). Deshalb sind die großen Offsetbereiche in den CMSO-Ergebnissen stark abgeschwächt. Es wurde eine einfache Lösung entwickelt, die diesen Effekt reduzieren kann. Jedoch wird dadurch eine Zunahme von Verfahrensnoise in Kauf genommen. Dieser einfache Lösungsansatz wird im folgenden kurz erläutert:

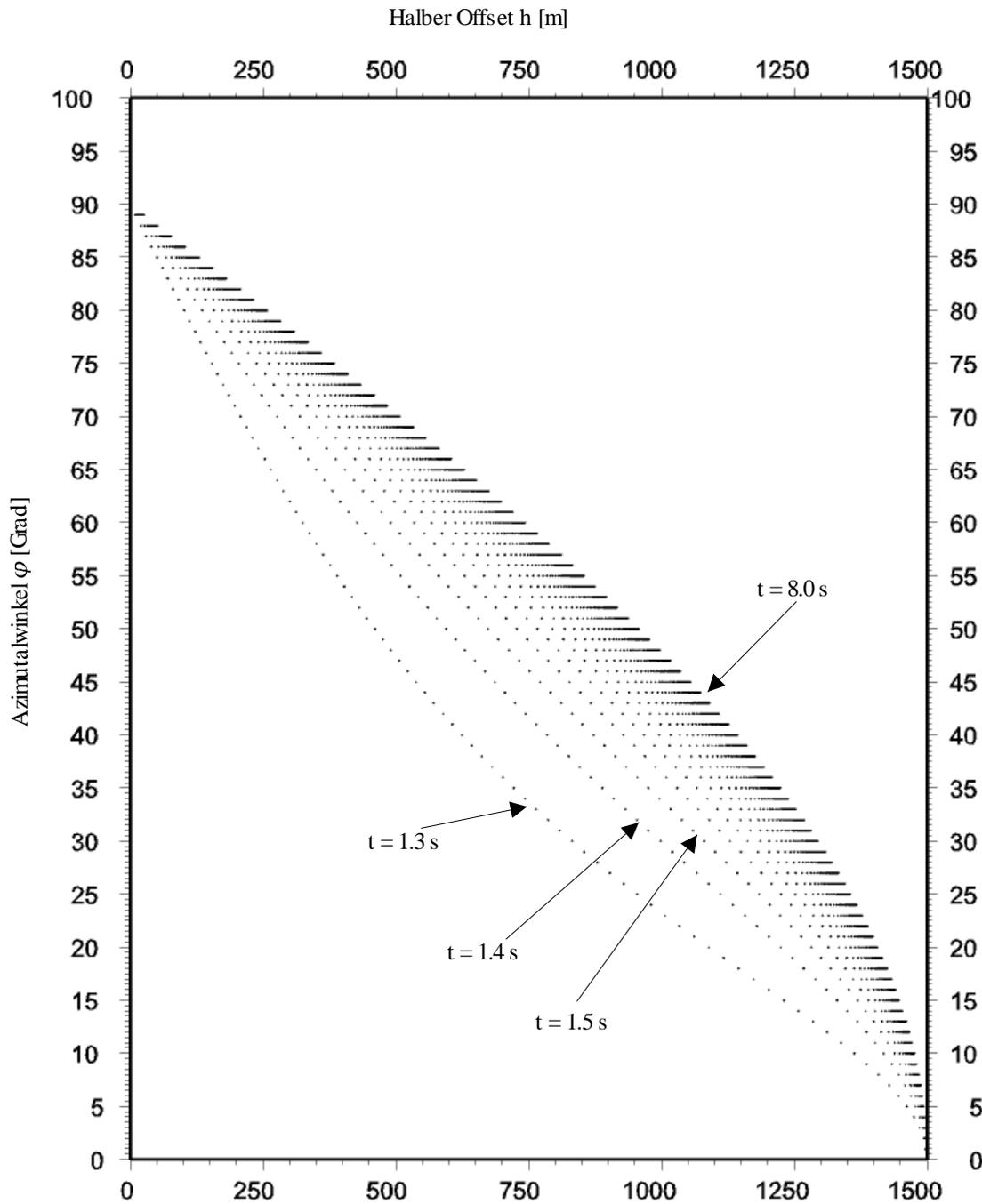


Abb. 5.14: Für 91 3D-Zeitreihen mit unterschiedlichem Azimut φ (0° - 90°) gegenüber der Inline-Richtung wurde entsprechend dem CMSO-Prozeß für verschiedene Zeiten t der neue halbe Offset h der zugehörigen 2D-Zeitreihe berechnet.

Ausgehend von der Abb. 5.14 wird durch einen maximal erlaubten Azimut φ (z.B. 20°) gegenüber der Inline-Richtung bestimmt, welche 3D-Inputdaten noch einen Beitrag zu den crossline-migrierten 2D-Daten liefern dürfen. Dadurch wird sichergestellt, daß durch den CMSO-Prozeß bei einer gleichmäßigen Offsetverteilung und bei einer großen Variation von Azimuten im 3D-Inputdatensatz nur 2D-Daten mit einer Offsetverteilung erzeugt werden, die „ungefähr“ der des Inputdatensatzes entspricht und große

Offsetbereiche nicht wesentlich „benachteiligt“ werden.

Das Modellbeispiel II b ($\varphi_{\max} = 90^\circ$) wurde mit dieser „einschränkenden“ Bedingung wiederholt. Es wurde ein maximal erlaubter Azimut $\varphi = 20^\circ$ gewählt. Das Ergebnis ist in Abb. 5.15 dargestellt. Im Vergleich zu Abb. 5.12 b sind nun auch größere Offsets vor allen Dingen für größere Laufzeiten deutlich zu erkennen. Allerdings hat auch der Processingnoise stark zugenommen.

Abschließend wird in diesem Kapitel ein weiteres Modellbeispiel II c gezeigt, bei dem der Einfluß eines 3D-Inputdatensatzes mit einem fehlendem Offsetbereich auf die Ergebnisse des CMMO- bzw. CMSO-Verfahrens kurz untersucht wird. Geklärt werden soll, ob die beiden Verfahren in der Lage sind, den fehlenden Offsetbereich zu (re-)generieren. Das Modell II c entspricht genau dem Modell I (Abb. 5.1 u. Tab. 5.1). Allerdings fehlt in allen (Input-)CMP-Gathern der Offsetbereich von $h = 1800$ m - 2400 m. Die Ergebnisse des CMMO- und des CMSO-Verfahrens sind in Abb. 5.16 a und 5.16 b entlang der Inline 21 dargestellt. Das CMMO-Verfahren ist in der Lage gewesen, den fehlenden Offsetbereich fast vollständig wiederherzustellen (Abb. 5.16 a). Das CMSO-Verfahren kann dagegen nur einen sehr viel geringeren Offsetbereich rekonstruieren (Abb. 5.16 b).

Als Ergebnis kann deshalb weiterhin festgehalten werden, daß der CMMO-Prozeß im Gegensatz zum CMSO-Prozeß in der Lage ist, fehlende Offsetbereiche in den Inputdaten nach der Crossline-Migration in den 2D-Daten teilweise wieder auszufüllen.

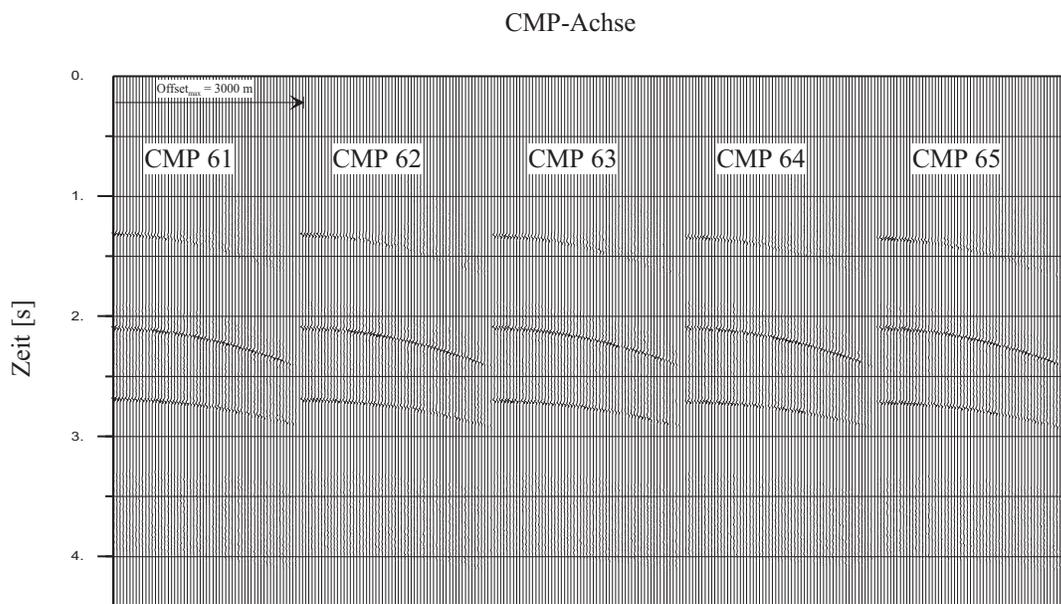


Abb. 5.15: CMSO-Gather des Modellbeispiels II b ($\varphi_{\max} = 90^\circ$) nach Anwenden eines CMSO-Verfahrens mit einem maximal erlaubten Azimut von $\varphi_{\max} = 20^\circ$. Es werden nun auch teilweise große Offsetbereiche abgebildet, allerdings hat der Processingnoise zugenommen (vgl. Abb. 5.12 b).

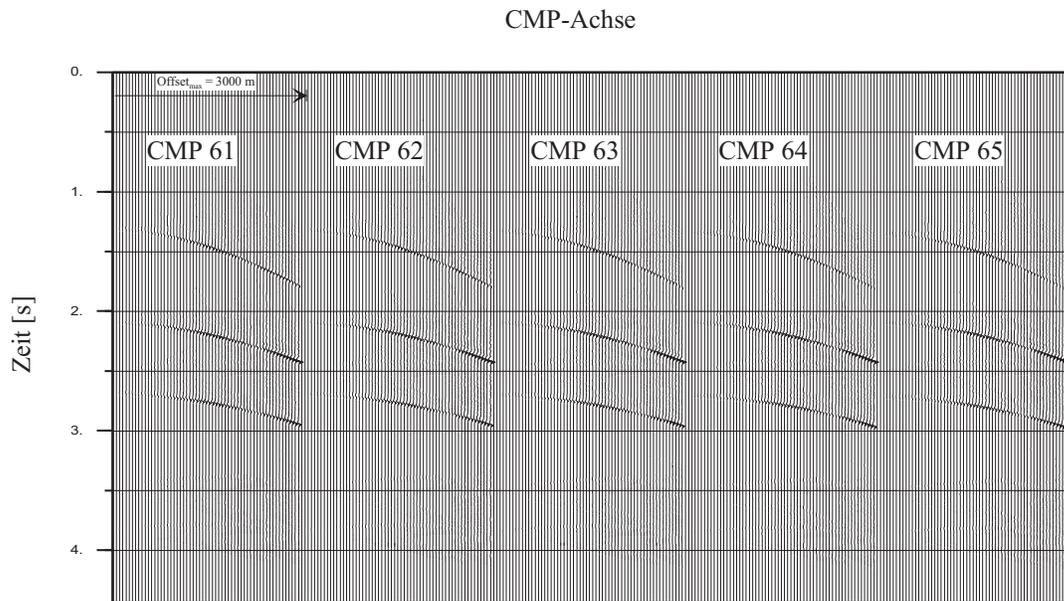


Abb. 5.16 a: CMMO-Gather aus Modellbeispiel II c. Die fehlenden Offsetbereiche (1800 m - 2400 m) in den Inputdaten können durch den CMMO-Prozeß fast vollständig wiederhergestellt werden.

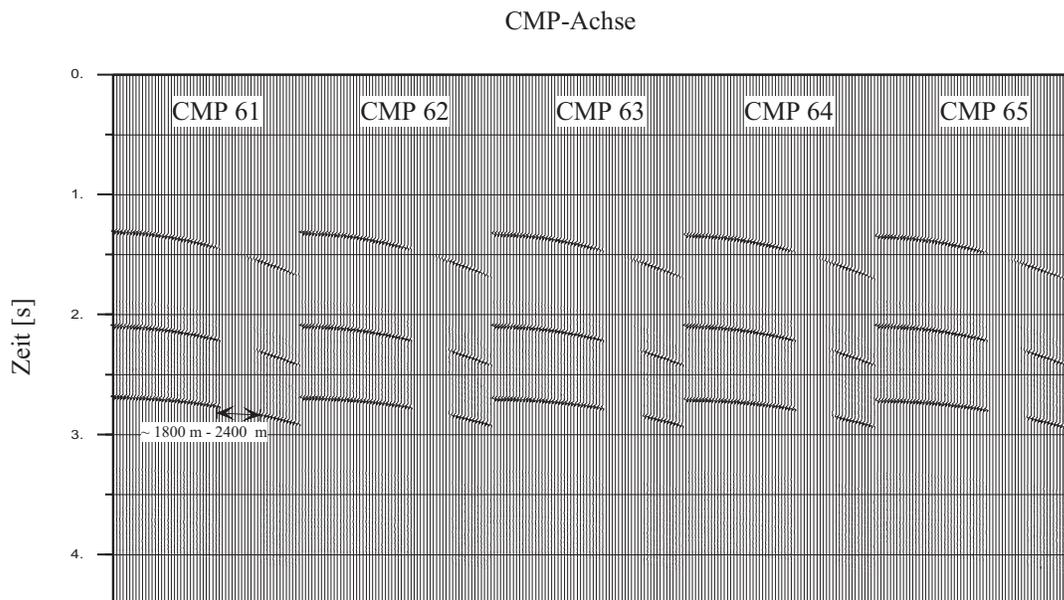


Abb. 5.16 b: CMSO-Gather aus Modellbeispiel II c. Die fehlenden Offsetbereiche (1800 m - 2400 m) in den Inputdaten können gar nicht oder nur kaum durch den CMSO-Prozeß wiederhergestellt werden.

5.1.2 Das räumliche Aliasing-Problem beim CMMO- und CMSO-Verfahren

Aliasing ist eine Eigenschaft aller diskreten Systeme, egal ob die Abtastung (Sampling) in der Zeit, im Raum oder in einer anderen Dimension, wie z.B. der Frequenz erfolgt ist. Das räumliche Aliasing beruht allgemein auf einer zu großen Laufzeitdifferenz zwischen 2 benachbarten Spuren für ein zeitlich ausgedehntes abgetastetes Signal.

In diesem Kapitel wird ein räumlicher Aliasing-Effekt beschrieben, der entlang der Crossline-Richtung bei der Crossline-Migration auftreten kann, wenn z.B. der Abstand benachbarter Inlines zu groß ist. Dieser räumliche Aliasing-Effekt betrifft beide hier behandelten Crossline-Verfahren. Es entstehen z.B. bei Nichtbeachtung des Aliasing-Theorems nach der Crossline-Migration kohärente Störsignale, die sich als „Streifenmuster“ im Ergebnis deutlich zeigen (siehe z.B. Kap. 6).

Es wird anhand neuer spezifischer Betrachtungen für den konstanten Geschwindigkeitsfall geklärt werden, wann beim Crossline-Migrationsprozeß räumliches Aliasing auftritt und wie es ggf. vermieden wird. Dabei werden die wichtigsten einflußnehmenden Parameter in der Meßkonfiguration eines 3D-Meßgebietes, in den seismischen 3D-Daten und bei dem Crossline-Migrationsprozeß herausgearbeitet. Es werden zunächst 2 theoretische Fälle unterschieden, bei denen für das CMMO- und CMSO-Verfahren Formeln zur Abschätzung dieses Problems hergeleitet werden.

1.Fall: Räumliches Aliasing beim CMMO-Verfahren und in einem „Sonderfall“ des CMSO-Prozesses:

Wir betrachten die geometrische Figur des Crossline-Migrationsoperators. Es handelt sich dabei um eine 2D-Darstellung entlang eines Tiefenschnittes in Crossline-Richtung.

Vor dem eigentlichen CMMO-Prozeß liegen 3D-DMO-korrigierte Spuren (entsprechend dem Forel-Gardner DMO-Verfahren, Kap. 3.2) vor. Die 3D-DMO-Spuren werden anschließend durch den CMMO-Prozeß zu 2D-DMO-Spuren korrigiert (Kap. 3.3.2). An einem DMO-korrigierten CMP-Gather auf den der CMMO-Prozeß in Crossline-Richtung angewandt wird, stellt die geometrische Figur entlang eines Längsschnittes, von dem aus ein gemessener Impuls stammen kann, immer einen Halbkreis um das jeweilige CMP-Gather dar (Abb. 5.17). Dies wird im folgenden anhand der CMMO-Gleichung (3.23) gezeigt:

Für die CMMO-migrierten Daten gilt (vgl. Kap. 3.3.2):

$$t_{2D_0}^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot k^2}{v^2} - \frac{4 \cdot \Delta y^2}{v^2}, \quad (3.23)$$

mit t_{2D_0} = 2D-Zero-Offset-Zeit (Zweiweglaufzeit) nach dem Stapelprozeß von CMMO Daten,
 t_1 = gestauchte Zeit nach dem 3D-DMO-Prozeß,
 k = DMO-Offset,
 Δy = Verschiebungsstrecke der 3D-DMO-Spur in Crossline-Richtung.

Einsetzen der Gleichung (3.3):

$$t_0^2 = t_1^2 - \frac{4 \cdot k^2}{v^2} \quad , \quad (3.3)$$

mit $t_0 = 3\text{D-Zero-Offset-Zeit (Zweiweglaufzeit)}$

in Gleichung (3.23) ergibt:

$$t_{2D_0}^2 = t_0^2 - \frac{4 \cdot \Delta y^2}{v^2} \quad . \quad (3.23b)$$

Multiplikation von Gleichung (3.23 b) mit der halben Geschwindigkeit $v/2$ ergibt dann die Länge der Zero-Offset-Strahlen für die Zweiweglaufzeiten t_{2D_0} bzw. t_0 :

$$z_{2D_0}^2 = z_{3D_0}^2 - \Delta y^2 \quad , \quad (3.23c)$$

mit $z_{2D_0} = 2\text{D-Zero-Offset-Strahl}$,
 $z_{3D_0} = 3\text{D-Zero-Offset-Strahl}$.

Die Gleichung (3.23) bedeutet, daß der Crossline-Migrationsoperator in Crossline-Richtung für verschiedene Entfernungen $\pm i \cdot \Delta y$ einem Halbkreis entspricht (vgl. Abb. 5.17).

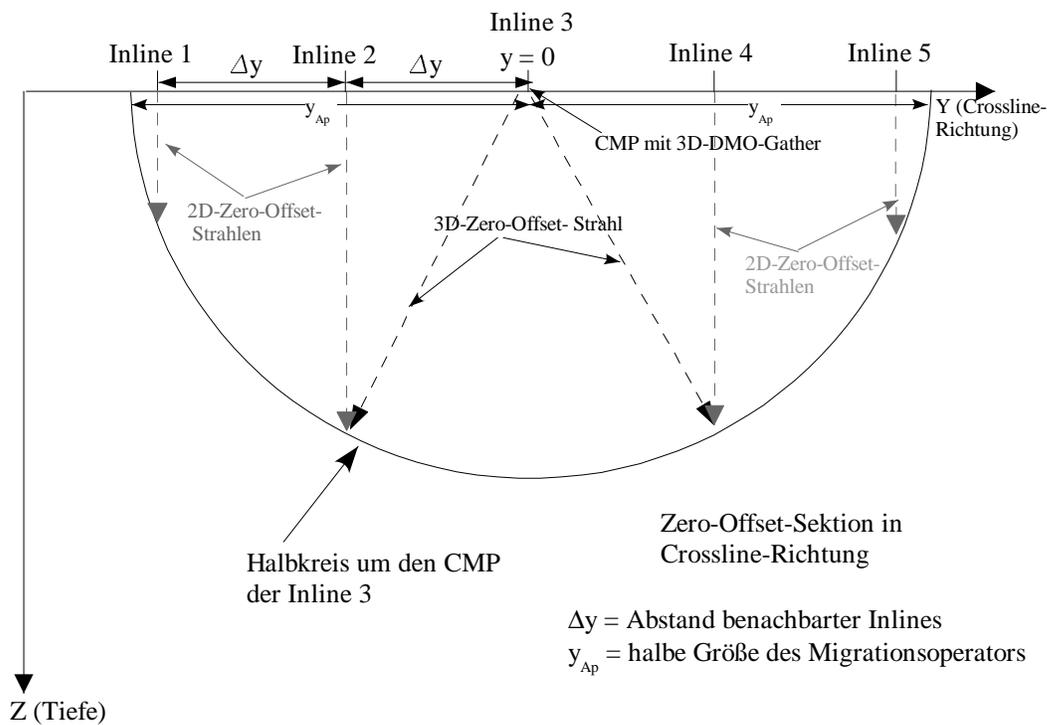


Abb. 5.17: 2D-Tiefenschnitt entlang der Crossline-Richtung beim CMMO-Verfahren. Die geologische Struktur eines gemessenen Impulses beschreibt entlang der Crossline-Richtung einen Halbkreis. Δy gibt den Abstand benachbarter Inlines an.

Ein solcher halbkreisförmiger Operator in Crossline-Richtung kann auch beim CMSO-Verfahren entstehen und zwar dann, wenn die Verbindungslinie Schuß-Empfänger der

gemessenen 3D-Spur entlang der Inline-Richtung liegt (siehe z.B. Abb. 5.13, linker Teil) und mit dieser einen Azimut $\varphi = 0^\circ$ bildet. In diesem Fall ergibt ein 2D-Tiefenschnitt durch das „CMSO“-Ellipsoid (Abb. 4.1) in Crossline-Richtung einen Halbkreis, da ein gemessener Impuls nur von einem Punkt entlang dieses Halbkreises stammen kann. Entlang der Crossline-Richtung liegen der Schuß und Empfänger auf demselben Punkt. Dieser „Sonderfall“ beim CMSO-Verfahren kann in der Praxis z.B. in der Seeseismik annähernd erreicht werden, wenn das „cable feathering“ nur sehr klein ist und die Crossline-Richtung senkrecht zu den gemessenen Linien (Sail lines) gewählt wird.

In der folgenden Betrachtung zur Abschätzung des räumlichen Aliasings gehen wir also von einem halbkreisförmigen Operator in Crossline-Richtung aus:

Für diesen gilt dann für den „Sonderfall“ des CMSO- und für alle Fälle des CMMO-Verfahrens:

$$\frac{y_{Ap}^2}{B^2} + \frac{z^2}{B^2} = 1 \quad , \quad (5.4)$$

mit B = Halbachse bzw. Radius z.B. um die Inline 3 (Abb. 5.17),
 z = Tiefe,
 y_{Ap} = halbe Größe des Migrationsoperators bzw. halbe Migrationsapertur

Umstellen der Gleichung (5.4) nach z ergibt:

$$z = B \cdot \sqrt{1 - \frac{y_{Ap}^2}{B^2}} \quad . \quad (5.5 \text{ a})$$

Mit der Zweiweglaufzeit $t = 2 \cdot z / v$ gilt dann:

$$t = \frac{2}{v} \cdot B \cdot \sqrt{1 - \frac{y_{Ap}^2}{B^2}} \quad . \quad (5.5 \text{ b})$$

Die Steigung entlang des Crossline-Migrationsoperators gibt an, wie groß der Laufzeitunterschied Δt (time shift) für 2 benachbarte Spuren bei einem festen Inkrement Δy ist. Für die Steigung $\delta t / \delta y$ gilt dann:

$$\left| \frac{\delta t}{\delta y} \right| = \frac{2}{v} \cdot \frac{B \cdot 2 \cdot y_{Ap} \cdot \frac{1}{B^2}}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{y_{Ap}^2}{B^2}}} = \frac{4}{v^2} \cdot \frac{y_{Ap}}{t} \quad . \quad (5.6)$$

Für die höchste zulässige Frequenz f_{\max} eines 2D-Migrationsoperators gilt (z.B. nach Lumley et al., 1994):

$$f_{\max} \leq \frac{1}{2 \cdot \Delta t} = \frac{1}{2 \cdot \frac{\delta t}{\delta y} \cdot \Delta y} \quad , \quad (5.7)$$

mit Δy = Abstand benachbarter Inlines,
 Δt = time-shift des Operators zwischen 2 benachbarten Inlines,

f_{\max} = maximale Frequenz ohne Aliasing.

Einsetzen von Gleichung (5.6) in (5.7) ergibt dann für Δy :

$$\Delta y \leq \frac{v^2 \cdot t}{8 \cdot f_{\max} \cdot y_{Ap}} \quad (5.8)$$

Diese Gleichung beschreibt, daß das konstante Inkrement Δy zwischen benachbarten Inlines um so größer sein darf, je größer v und t und je kleiner die Frequenz und die halbe Größe y_{Ap} des Migrationsoperators sind.

2.Fall: Räumliches Aliasing im allgemeinen CMSO-Fall:

Im allgemeinen CMSO-Fall liegt die Verbindungslinie Schuß-Empfänger nicht entlang der Inline-Richtung, sondern bildet mit dieser einen Winkel (Azimut) $\varphi \neq 0^\circ$ (Abb. 5.13). Ein 2D-Schnitt durch das Ellipsoid in Crossline-Richtung ergibt nun keinen Halbkreis mehr. Vielmehr wird die geologische Struktur, von dem ein gemessenes Ereignis stammen kann, durch eine 2D-Ellipse in Crossline-Richtung beschrieben.

Es gilt somit folgende Gleichung für den Crossline-Migrationsoperator (vgl. Abb. 4.1):

$$\frac{y_{Ap}^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} = 1 \quad (5.4 a)$$

Wird für diesen Fall wiederum die Steigung $|\delta t / \delta y|$ berechnet, so ergibt sich schließlich:

$$|\frac{\delta t}{\delta y}| = \frac{2}{v} \cdot \frac{B \cdot 2 \cdot y_{Ap} \cdot \frac{1}{A^2}}{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{y_{Ap}^2}{A^2}}} = \frac{4}{v^2} \cdot \frac{y_{Ap}}{t} \cdot \frac{B^2}{A^2} \quad (5.9)$$

Mit Gleichung (5.7) folgt dann für den maximal erlaubten Abstand Δy benachbarter Inlines im allgemeinen CMSO-Fall:

$$\Delta y \leq \frac{v^2 \cdot t}{8 \cdot f_{\max} \cdot y_{Ap}} \cdot \frac{A^2}{B^2} \quad (5.10)$$

Gleichung (5.10) entspricht genau Gleichung (5.8) multipliziert um den Faktor A^2/B^2 . Da nach bekannten geometrischen Bedingungen $A^2/B^2 \geq 1$ gelten muß, ist diese Abschätzung weniger „scharf“ als in Gleichung (5.8). Sind die Bedingungen z.B. hinsichtlich des Abstandes benachbarter Inlines aus Gleichung (5.8) erfüllt, so sind die Bedingungen aus (5.10) ebenfalls erfüllt.

Synthetische Modellbeispiele zum räumlichen Aliasing-Effekt:

Im folgenden werden 3 synthetische 3D-Datensätze aus 3 verschiedenen Modellbeispielen genommen, um die räumlichen Aliasing Effekte, die z.B. durch einen zu

großen Abstand benachbarter Inlines bei der Crossline-Migration auftreten können, anschaulich darzustellen.

Die 3 Modellbeispiele III a - c bestehen jeweils aus 5 horizontalen, nicht geneigten Reflektoren. Im Gegensatz zu den bisher behandelten Modellen handelt es sich hier um Reflektoren und nicht um Liniendiffraktoren. Es gibt keine 3D-Seiteneffekte. Die 3 Modelle unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Aufnahmegeometrie an der Oberfläche nur durch einen unterschiedlichen Abstand benachbarter Inlines. In Tab. 5.3 sind die wichtigsten Modellparameter für die Modellbeispiele III a - c wiedergegeben.

<i>Parameter</i>	<i>Modell III a</i>	<i>Modell III b</i>	<i>Modell III c</i>
Modellausdehnung in x (Inline), y (Crossline), z (Tiefe)	0 - 2000 m, 0 - 2000 m, 0 - 4000 m,	0 - 2000 m 0 - 2000 m, 0 - 4000 m,	0 - 2000 m 0 - 2000 m, 0 - 4000 m,
Anzahl der Inlines	81	41	21
Anzahl CMP's pro Inline	81	81	81
Anzahl Spuren pro CMP	60	60	60
Offsetbereich	50-3000 m	50-3000 m	50-3000 m
Abstand benachbarter Inlines	25 m	50 m	100 m
Samples ns pro Spur	1125	1125	1125
Samplingintervall dt	8 ms	8 ms	8 ms
Crossline-migrierte Inline	Nr. 41; y = 1000m	Nr. 21; y = 1000m	Nr. 11; y = 1000m

Tabelle 5.3: Modellparameter der Modellbeispiele III a - c. Hervorgehoben sind die Unterschiede in den einzelnen Modellen. Alle anderen Parameter sind für die Modelle einheitlich.

Die Mediumsgeschwindigkeit in den benutzten Modellen war konstant und betrug $v = 2500$ m/s. Die 5 Reflektoren in den 3 Modellen hatten außerdem folgende konstante Tiefenwerte: Reflektor 1: 500 m, Reflektor 2: 700 m, Reflektor 3: 1000 m, Reflektor 4: 1500 m, Reflektor 5: 2000 m.

Auf diese 3 Modelle ist im folgenden der CMMO- bzw. der CMSO-Prozeß auf die jeweilige Inline mit der y-Koordinate = 1000 m (siehe Tab. 5.3) angewandt worden. Aufgrund der Modellausdehnung in y-Richtung (2000 m) und der gewählten Analyse-Inline (y = 1000 m) beträgt der maximale ganze Apertur-Bereich, in dem der Crossline-Migrationsoperator wirken kann, für alle Beispiele 2000 m (Abb. 5.18).

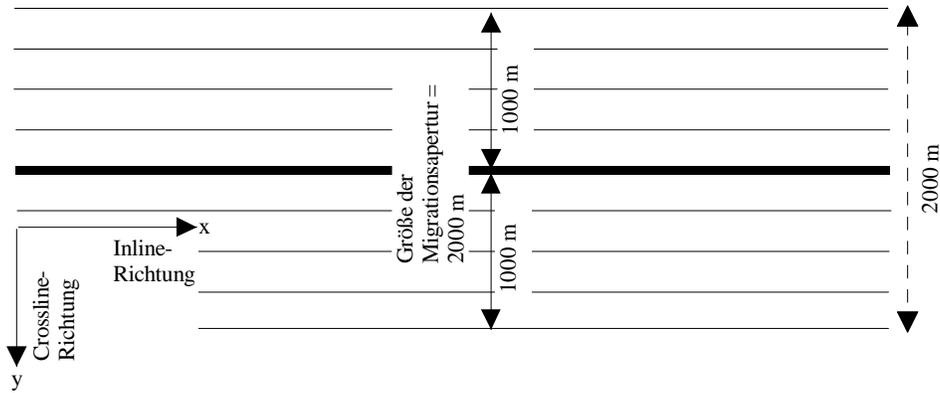


Abb. 5.18: Darstellung des maximalen Bereichs, in dem der Crossline-Migrationsoperator wirken kann. In den Modellbeispielen III a - c ist dieser Bereich durch die maximalen Modelldimensionen in y-Richtung vorgegeben. Er beträgt maximal 2000 m.

Abb. 5.19 a - c zeigt das Ergebnis eines Stapelprozesses von jeweils 5 crossline-migrierten CMMO-Gathern aus den 3 Modellen III a - c. Der Effekt einer Zunahme des räumlichen Aliasings mit wachsendem Inline-Abstand ist in den 3 Abbildungen gut zu erkennen. Besonders bei einem Inline-Abstand von 100 m (Abb. 5.19 c) sind die stärksten Aliasingeffekte zu beobachten. In den Abb. 5.20 a - c sind die entsprechenden gestapelten Gather nach Durchführung des CMSO-Verfahrens auf die 3 Modelle III a - c dargestellt. Auch hier zeigt sich, daß mit zunehmendem Inline-Abstand die räumlich bedingten Aliasing-Effekte stark zugenommen haben. Die Aliasing-Effekte nehmen mit zunehmender Zeit deutlich ab. Sämtliche crossline-migrierten und gestapelten Gather für die gerechneten Beispiele zeigen jedoch Aliasing-Effekte. Lediglich die gestapelten Spuren der Modelle III a und III b zeigen für größere Laufzeiten bessere Ergebnisse aufgrund des geringeren Abstands benachbarter Inlines (vgl. Tab. 5.3). Die gefundenen praktischen Ergebnisse entsprechen den theoretischen Abschätzungen, die man erhält, wenn die gegebenen Modellparameter für die 3 getesteten Modelle in Gleichung (5.8) eingesetzt werden:

$$\Delta y \leq \frac{v^2 \cdot t}{8 \cdot f_{\max} \cdot y_{Ap}} \quad (5.8)$$

Es wird im folgenden zur Abschätzung des Auftretens von räumlichen Aliasing-Effekten nur Gleichung (5.8) verwendet, da diese eine „schärfere Bedingung“ darstellt, als Gleichung (5.10). Außerdem handelt es sich bei den 3 Modellbeispielen III a - c um den oben dargestellten 1. Fall.

In Tab. 5.4 sind die entsprechend Gleichung (5.8) maximal erlaubten Inline-Abstände für verschiedene Zeiten t eingetragen. Als halbe Migrationsapertur wurde der Wert $y_{Ap} = 1000$ m eingesetzt. Da das Samplingintervall der seismischen Spuren $dt = 8$ ms beträgt, gilt für die maximal erlaubte Frequenz f_{\max} entsprechend dem zeitlichen Aliasing-Gesetz:

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \cdot dt} = 62.5 \text{ Hz} \quad (5.11)$$

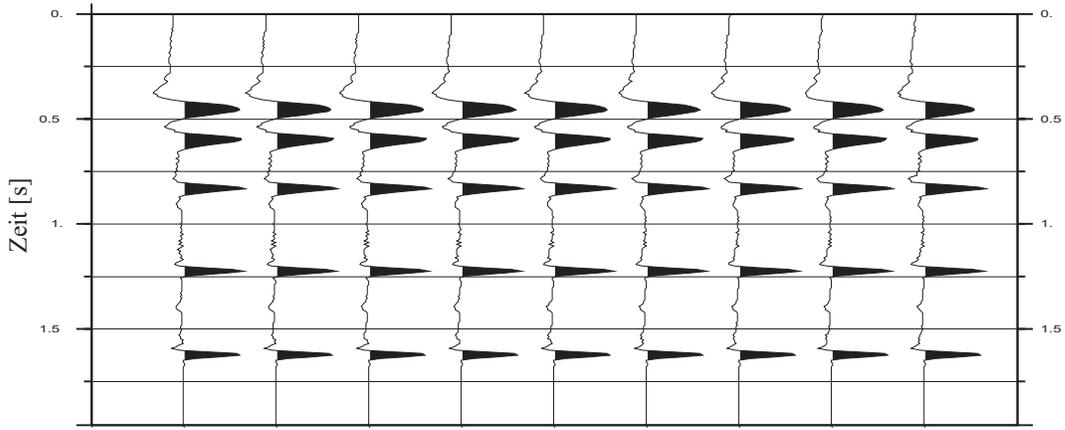


Abb. 5.19 a: 11 CMMO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 41 aus Modell III a (Inline-Abstand: 25 m).

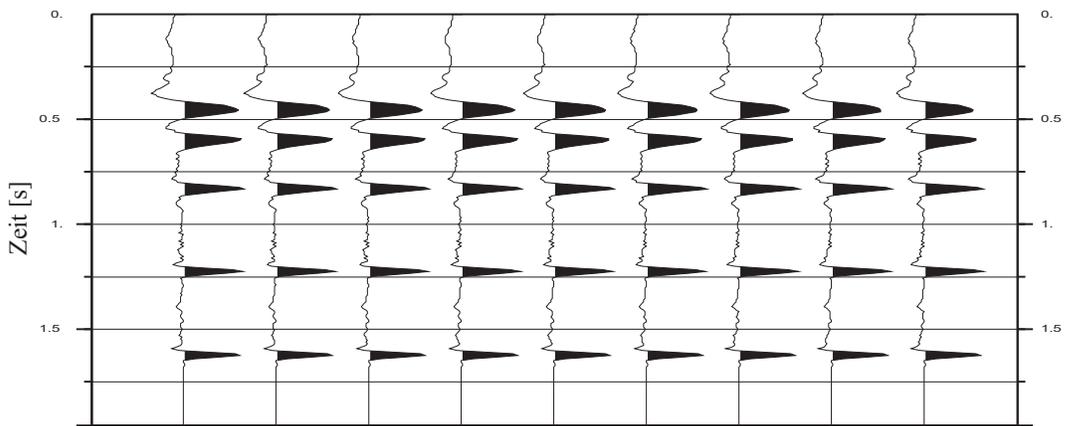


Abb. 5.19 b: 11 CMMO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 21 aus Modell III b (Inline-Abstand: 50 m).

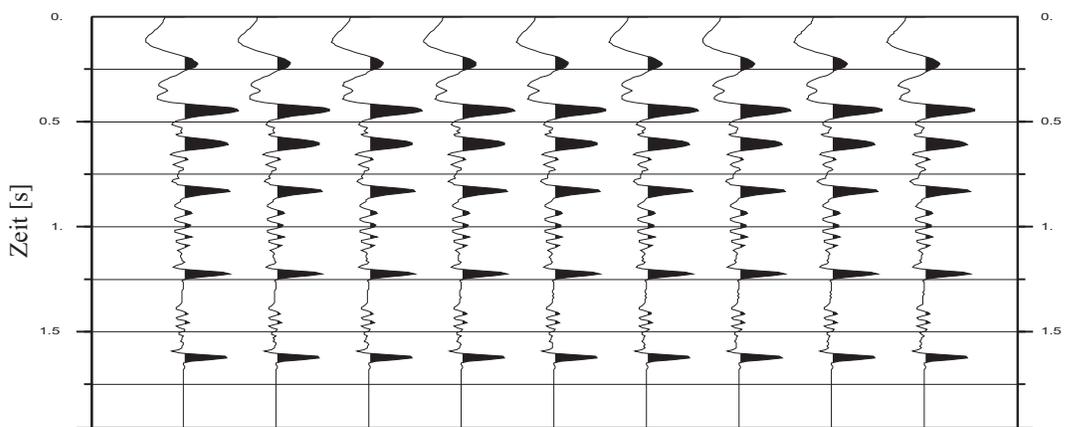


Abb. 5.19 c: 11 CMMO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 21 aus Modell III c (Inline-Abstand: 100 m).

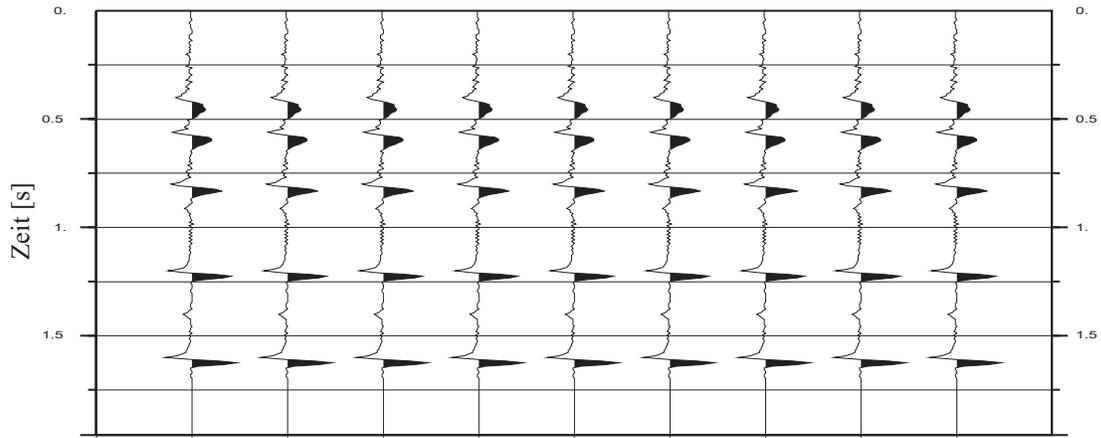


Abb. 5.20 a: 11 CMSO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 41 aus Modell III a (Inline-Abstand: 25 m).

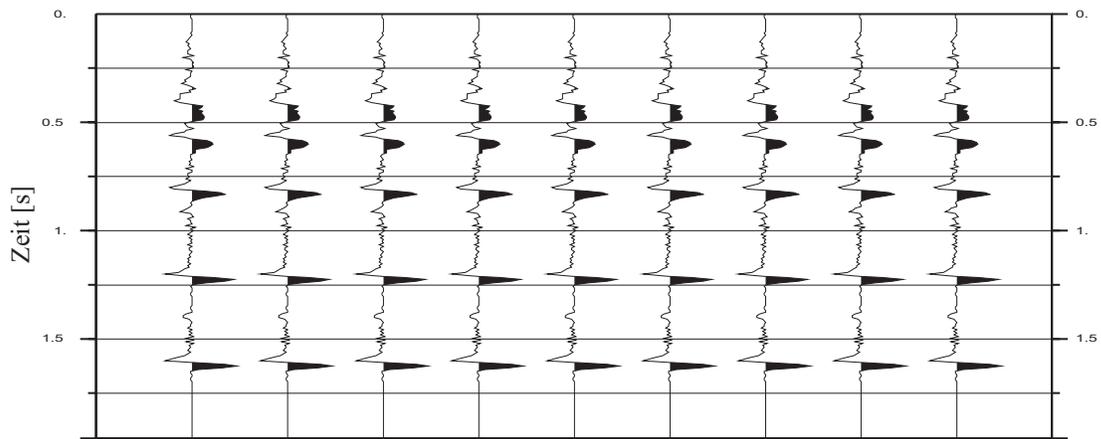


Abb. 5.20 b: 11 CMSO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 21 aus Modell III b (Inline-Abstand: 50 m).

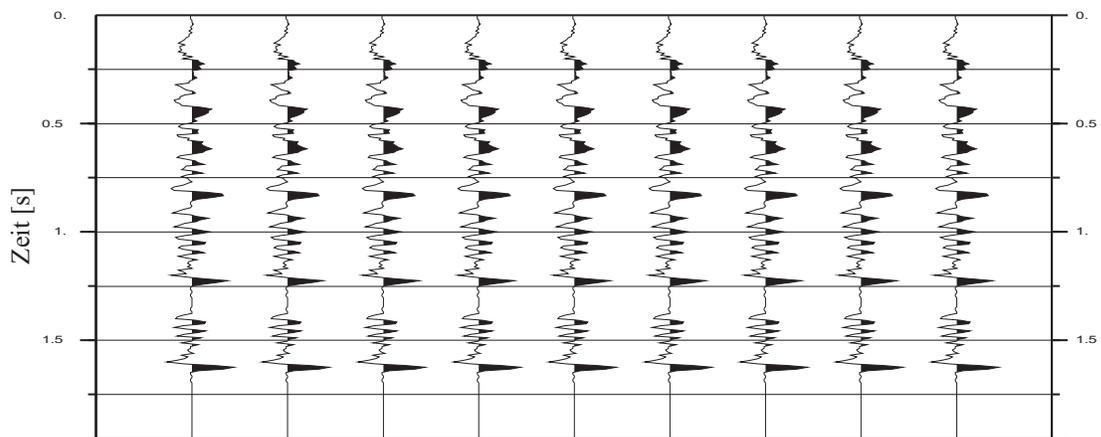


Abb. 5.20 c: 11 CMSO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 11 aus Modell III c (Inline-Abstand: 100 m).

Zweiweglaufzeit t [s]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
Abstand benachbarter Inlines: Δy [m]	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0

Tab. 5.4: Entsprechend Gleichung (5.8) maximal erlaubter Abstand zwischen benachbarten Inlines für die gezeigten Modellbeispiele III a - c.

Anhand der Tabelle 5.4 wird deutlich, daß für keine der durchgeführten synthetischen Modellbeispiele das räumliche Aliasing-Gesetz nach Gleichung (5.8) voll erfüllt ist. Lediglich Modell III a mit $\Delta y = 25$ m kommt für die berechneten größeren Zeiten t annähernd in den erlaubten Bereich.

Aufgrund der Formel (5.8) wird auch deutlich, daß neben der Geschwindigkeit v , der Zeit t und der Frequenz f_{\max} , auch die Aperturgröße $2 \cdot y_{Ap}$ des Migrationsoperators entscheidend für das Auftreten von räumlichen Aliasing-Effekten ist. Mit wachsender Operatorgröße wird der nach Gleichung (5.8) geforderte Inline-Abstand immer weiter verkleinert. Günstig zur Vermeidung von räumlichen Aliasing-Effekten wirkt sich dagegen aus, wenn die Geschwindigkeit mit der Tiefe steigt und die maximale Frequenz abnimmt.

Ein effektiver Weg zur Vermeidung oder Einschränkung von räumlichen Aliasing-Effekten ist es, den Migrationswinkel des Crossline-Migrationsoperators einzuschränken (Abb. 5.20 d). Der Migrationswinkel ist dabei folgendermaßen definiert:

$$\tan \beta = \frac{y_{Ap}}{z} = \frac{y_{Ap}}{v \cdot t} \quad , \quad (5.12)$$

mit β = Migrationswinkel,
 y_{Ap} = halbe Migrationsapertur,
 z = Tiefe.

Durch die Festlegung eines maximalen Migrationswinkels bleibt die rechte Seite der Gleichung (5.8) konstant. Es wird damit für alle möglichen Werte von t und y ein konstantes Δy erzeugt. Für kleinere Tiefen wird der maximale Bereich y , in dem der Migrationsoperator wirken kann, eingeschränkt. Für größere Tiefen wird dagegen der Migrationsoperator vergrößert (Abb. 5.20 d). Da im allgemeinen für geringere Tiefen 3D-Seiteneffekte von weit entfernten Ereignissen weniger stark auftreten als es für größere Tiefen der Fall ist, sollte sich eine solche Einschränkung kaum oder gar nicht auf das eigentliche Ergebnis der Crossline-Migration, nämlich der Beseitigung von 3D-Seiteneffekten, auswirken.

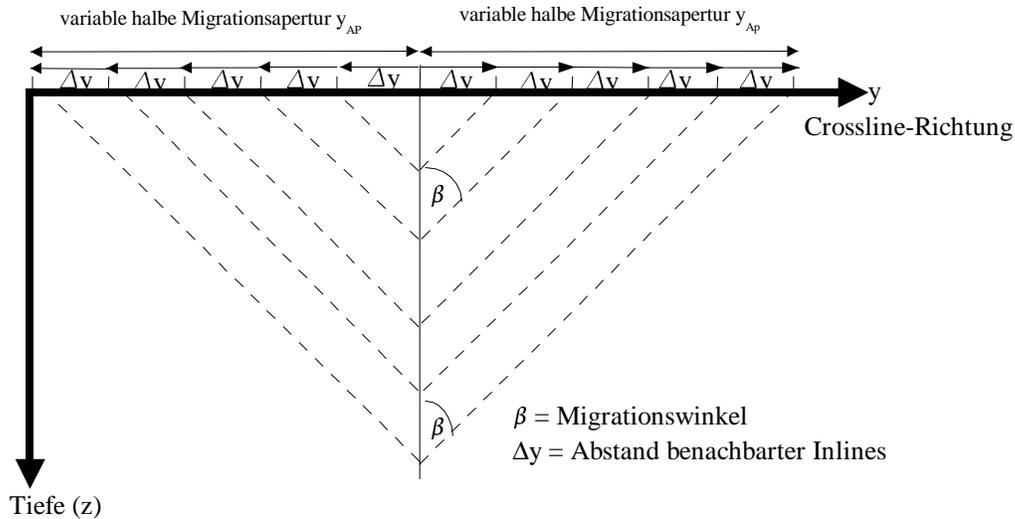


Abb. 5.20 d: Durch Festlegen eines maximalen z.B. für alle Tiefen konstanten Migrationswinkels β kann der räumliche Aliasing-Effekt vermindert bzw. vermieden werden. Für kleine Tiefen wird dadurch der Bereich, in dem der Migrationsoperator wirken kann verkleinert, für größere Tiefen vergrößert.

Für die 3 Modelle III a - c wurde mit dem CMMO- bzw. dem CMSO-Verfahren unter Beschränkung des maximalen Migrationswinkels $\beta = 21.8^\circ$ eine erneute Crossline-Migration durchgeführt. In Tab. 5.5 sind für verschiedene Zeiten t entsprechend Gleichung (5.8) die maximale halbe Größe y_{Ap} des Migrationsoperators bei einem Migrationswinkel von $\beta_{max} = 21.8^\circ$ eingetragen. Der maximal erlaubte Abstand Δy benachbarter Inlines, liegt nun für alle Zeiten t konstant bei 25 m (vgl. Tab. 5.4).

Zweiweg-laufzeit t [s]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
halber Migrations-operator y_{Ap} [m]	200.0	300.0	400.0	500.0	600.0	700.0	800.0
Abstand benachbarter Inlines Δy [m]	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0

Tab. 5.5: Entsprechend Gleichung (5.8) errechnete, noch erlaubte Parameterwerte für y_{Ap} und Δy bei einem maximalen Migrationswinkel von $\beta = 21.8^\circ$

Das Ergebnis der gestapelten crossline-migrierten Daten mit einem maximalen Migrationswinkel $\beta = 21.8^\circ$ ist für beide Verfahren in den Abb. 5.21 a - c und Abb. 5.22 a - c dargestellt. Im Gegensatz zu den Abb. 5.19 a - c bzw. Abb. 5.20 a - c zeigen die Resultate bei eingeschränktem Migrationswinkel für das CMMO- und das CMSO-Verfahren eine deutliche Verbesserung in allen 3 Modellbeispielen III a - c. In den Abb. 5.21 a und 5.22 a sollten nach Gleichung (5.8) die räumlichen Aliasing-Effekte beseitigt sein.

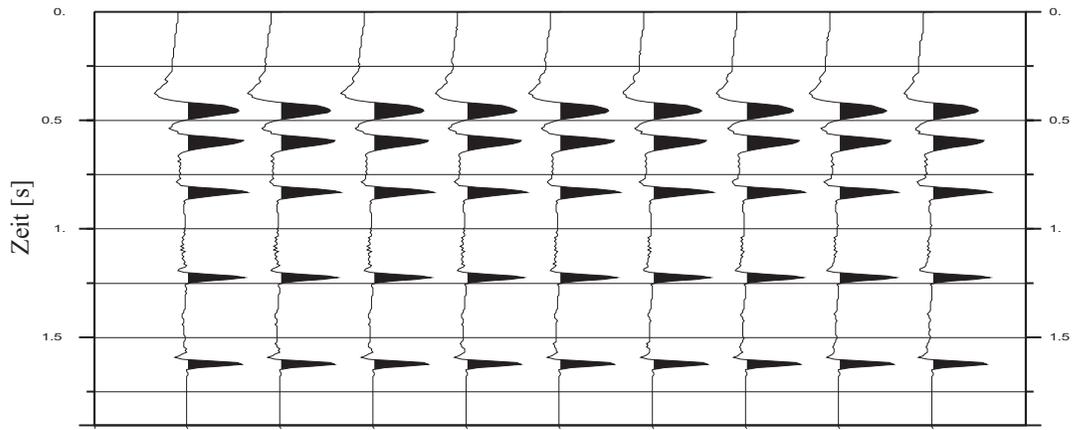


Abb. 5.21 a: 11 CMMO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 41 des Modellbeispiels III a (Inline-Abstand: 25 m) unter Anwendung eines 21.8° Migrationsoperators (vgl. Abb. 5.19 a).

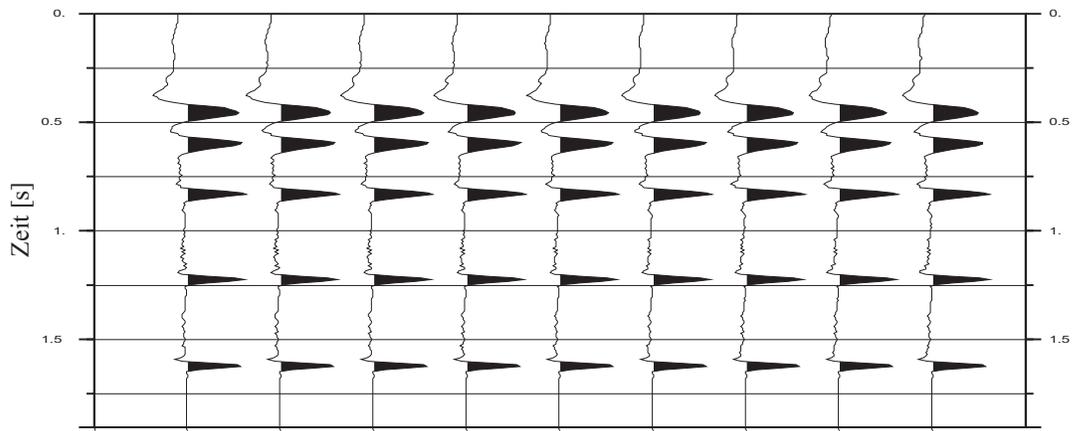


Abb. 5.21 b: 11 CMMO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 21 des Modellbeispiels III b (Inline-Abstand: 50 m) unter Anwendung eines 21.8° Migrationsoperators (vgl. Abb. 5.19 b).

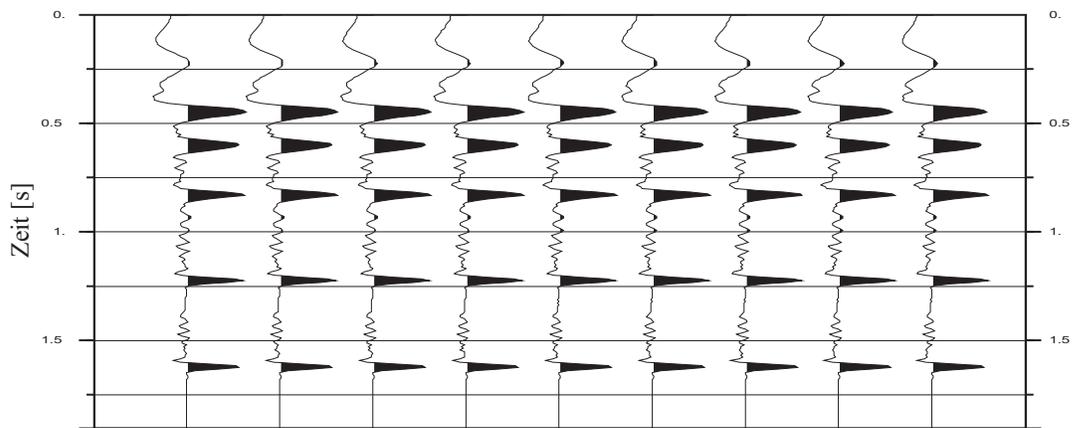


Abb. 5.21 c: 11 CMMO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 11 des Modellbeispiels III c (Inline-Abstand: 100 m) unter Anwendung eines 21.8° Migrationsoperators (vgl. Abb. 5.19 c).

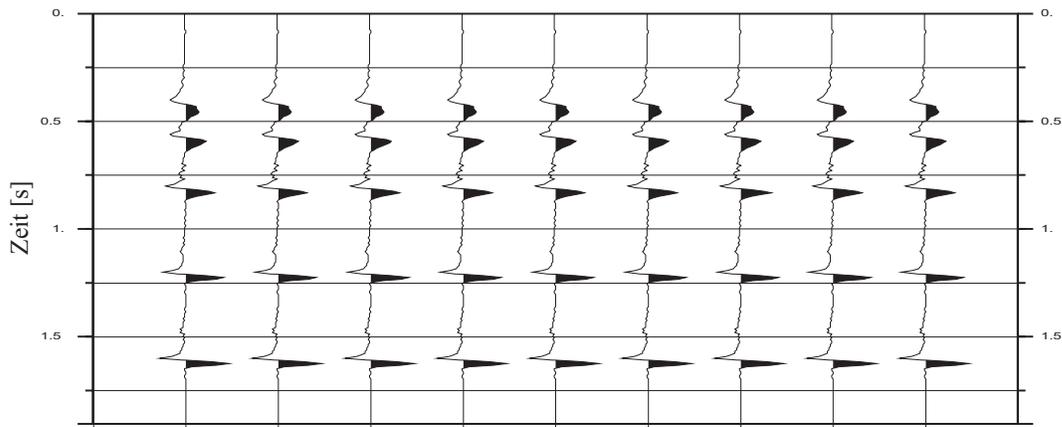


Abb. 5.22 a: 11 CMSO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 41 des Modellbeispiels III a (Inline-Abstand: 25 m) unter Anwendung eines 21.8° Migrationsoperators (vgl. Abb. 5.20 a).

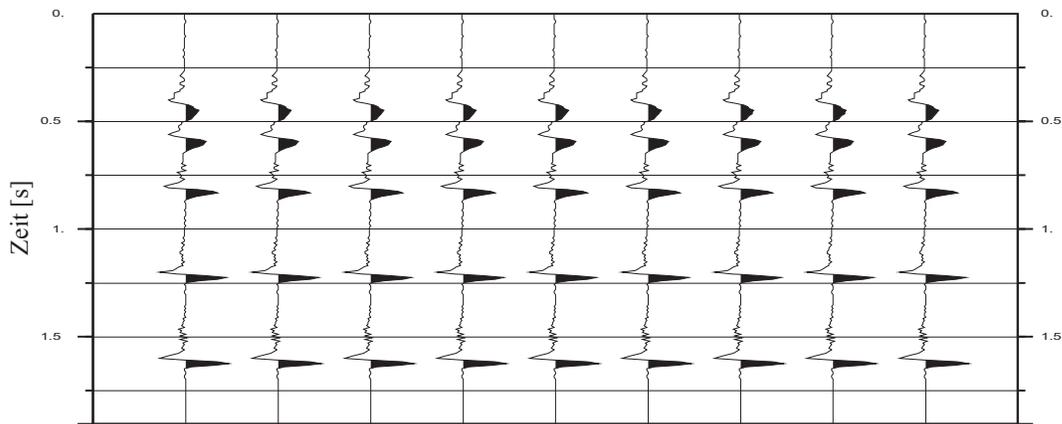


Abb. 5.22 b: 11 CMSO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 21 des Modellbeispiels III b (Inline-Abstand: 50 m) unter Anwendung eines 21.8° Migrationsoperators (vgl. Abb. 5.20 b).

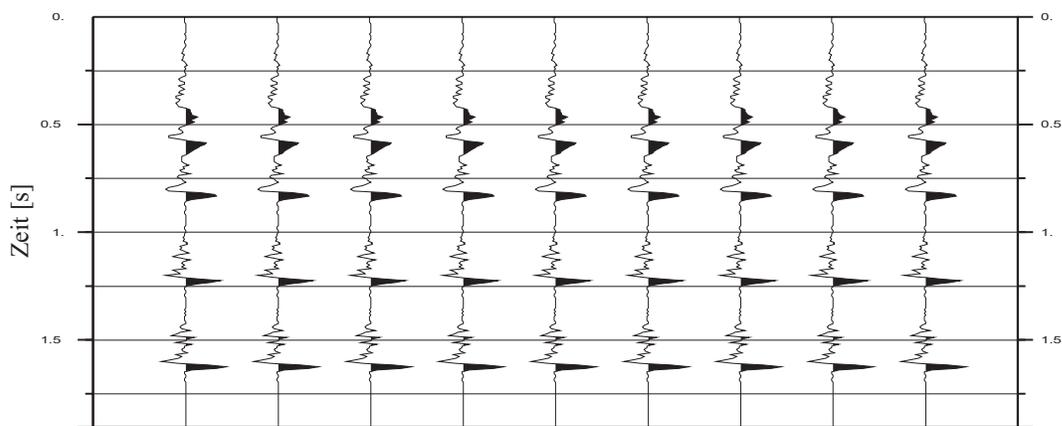


Abb. 5.22 c: 11 CMSO-migrierte und gestapelte Gather entlang der Inline 11 des Modellbeispiels III c (Inline-Abstand: 100 m) unter Anwendung eines 21.8° Migrationsoperators (vgl. Abb. 5.20 c).

Die hier gewonnenen Erkenntnisse werden in Kap. 7 genutzt, um bei der Crossline-Migration eines realen 3D-Datensatzes die räumlich bedingten Aliasing-Effekte zu minimieren. Da der Inline-Abstand in diesem realen Datensatz 100 m beträgt, würden bei Nichtbeachtung der Erkenntnisse entsprechend Gleichung (5.8) starke räumliche Aliasing-Effekte auftreten und das Ergebnis der Crossline-Migration in Frage stellen.

5.1.3 Auswirkungen des 3D-RMS-Feldes beim CMSO-Verfahren

Das CMSO-Verfahren benötigt zur Durchführung ein 3D-RMS-Geschwindigkeitsfeld (vgl. Kap. 4.1). Mit Hilfe des vorgegebenen RMS-Geschwindigkeitsfeldes wird das benötigte 3D-Ellipsoid im Zeitbereich konstruiert und die 2D-Ellipse entlang der gewünschten Inline berechnet (vgl. Abb. 4.1). In diesem Kapitel werden 3D-RMS-Felder mit unterschiedlich prozentualen Abweichungen vom bekannten richtigen RMS-Feld benutzt, um zu zeigen, wie sich zu klein und zu groß gewählte RMS-Geschwindigkeiten auf das Migrations-Ergebnis beim CMSO-Prozeß auswirken können. Die durchgeführten Untersuchungen beziehen sich alle auf den konstanten Geschwindigkeitsfall. Bevor die Auswirkungen von ungenauen RMS-Feldern beim CMSO-Prozeß anhand synthetisch generierter Modellbeispiele untersucht werden, wird das Problem mittels einer grafischen Lösung analysiert. Dadurch können die anschließenden Ergebnisse der synthetischen Modellrechnungen z. T. anschaulich erklärt werden.

a) Grafische Auswertung der Migrationsergebnisse beim CMSO-Verfahren mit richtigen und falschen RMS-Geschwindigkeiten:

Im folgenden wird der Crossline-Migrationsoperator beim CMSO-Verfahren für den Fall betrachtet, bei dem sämtliche Schuß-Empfängerazimute φ aller 3D-Inputspuren eines 3D- Modells in Inline-Richtung liegen ($\varphi = 0$). In diesem Fall beschreibt der Crossline-Migrationsoperator entlang eines 2D-Tiefenschnittes in Crossline-Richtung einen Halbkreis (vgl. Kap. 5.1.2). Schuß und Empfänger der zugehörigen 3D-Aufstellung haben in Crossline-Richtung dieselbe y-Koordinate (vgl. Abb. 5.13 links). Entlang der Crossline-Richtung ist ihr Abstand (Offset) gleich Null. Betrachtet wird ein Diffraktionspunkt im Untergrund entlang eines solchen 2D-Tiefenschnittes (Abb. 5.23). Zur Konstruktion des halbkreisförmigen Crossline-Migrationsoperators werden an der Oberfläche an den Positionen my_i nur Informationen von diesem Diffraktionspunkt registriert. Um jedes dieser Positionen my_i wird entsprechend der gemessenen Laufzeit ein Halbkreis (Migrationsoperator) gezeichnet, der die geologische Struktur wiedergibt, von dem aus ein gemessener Impuls stammen kann (Abb. 5.23).

Die additive Überlagerung aller Operatoren (Superposition) in Crossline-Richtung gibt dann das Ergebnis einer Crossline-Migration grafisch wieder. Bei einer richtig gewählten Geschwindigkeit zur Konstruktion der Migrationsoperatoren, schneiden sich alle Operatoren in einem gemeinsamen Untergrundpunkt. Dieser Schnittpunkt stellt die richtige Lokation des Diffraktionspunktes dar. Für zu klein oder zu groß gewählte Geschwindigkeiten schneiden sich die Operatoren nicht mehr in einem gemeinsamen Punkt. Im folgenden wird dieses Prinzip dazu verwendet, um Aussagen darüber treffen zu können, wie sich falsche Geschwindigkeitswerte auf das Ergebnis der Crossline-Migration beim CMSO-Verfahren auswirken können:

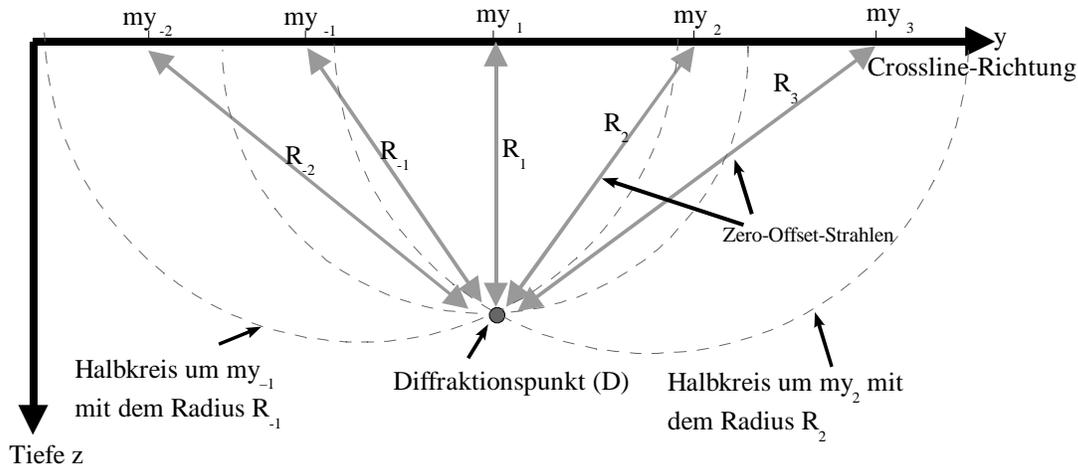


Abb. 5.23: Die geologische Struktur, die von einem an der Oberflächenposition my_i gemessenen Diffraktionspunkt D stammt, beschreibt einen Halbkreis um die jeweilige Position my_i . Ein solcher Fall entsteht z.B. beim CMSO-Prozeß, wenn alle Schuß-Empfängerverbindungslien im 3D-Inputdatensatz senkrecht zur Crossline-Richtung liegen (vgl. Abb. 5.13 links). Die Superposition vieler solcher Halbkreise beschreibt in diesem Fall das Ergebnis einer Crossline-Migration.

Ein gegebener Diffraktionspunkt D entlang eines Tiefenschnittes in Crossline-Richtung hat die Koordinaten (D_{iffy} und D_{iffz}). Die Geschwindigkeit v_{Medium} ist konstant. Die Laufzeit eines an der Oberfläche my_i registrierten Impulses ergibt sich nach folgender Formel:

$$t = \frac{2 \cdot \sqrt{(my_i - D_{iffy})^2 + D_{iffz}^2}}{v_{Medium}}, \quad (5.13)$$

mit v_{Medium} = konstante Geschwindigkeit,
 t = gemessene Zweiweglaufzeit des Zero-Offset-Strahls.

Beim CMSO-Verfahren wird das 3D-Migrationsellipsoid (Abb. 4.1) mit der vorgegebenen RMS-Geschwindigkeit berechnet. In dem hier betrachteten Sonderfall des CMSO-Verfahrens entspricht der Crossline-Migrationsoperator einem Halbkreis um den Meßpunkt my_i mit einem Radius R_i . Für diesen gilt:

$$R_i = \frac{v_{RMS} \cdot t}{2}. \quad (5.14)$$

In den folgenden Modellbetrachtungen handelt es sich ausschließlich um den konstanten Geschwindigkeitsfall. Deshalb ist die korrekte v_{RMS} Geschwindigkeit zur Konstruktion des richtigen Migrationsoperators gleich der Mediumsgeschwindigkeit v_{Medium} .

Die Gleichungen (5.12) und (5.13) werden nun dazu benutzt, um für 2 Modelle A und B, die Superposition aller Crossline-Migrationsoperatoren grafisch zu berechnen. Dabei werden 3 verschiedene Fälle unterschieden:

1. Fall: $v_{RMS} = v$,

2. Fall: $v_{RMS} < v$,
3. Fall: $v_{RMS} > v$.

1. Fall ($v_{RMS} = v$):

In den Abb. 5.24 a und 5.24 b ist die Superposition der Crossline-Migrationsoperatoren der 2 Modelle A und B grafisch dargestellt. Die Operatoren wurden mit der richtigen v_{RMS} Geschwindigkeit konstruiert. Die beiden Modelle A und B unterschieden sich nur durch die Tiefe D_{diffz} ihres Diffraktionspunktes voneinander. Vorgegeben waren folgende Modell-Parameter (Tab. 5.6):

	<i>Modell A</i>	<i>Modell B</i>
D_{diffy}, D_{diffz} [m]	0, 3500	0, 1000
v_{Medium} [m/s]	2500	2500
my_{min}, my_{max} [m]	-4000, 4000	-4000, 4000

Tab. 5.6 Parameter der Modelle A und B zur grafischen Lösung der Superposition der Crossline-Migrationsoperatoren beim CMSO-Verfahren.

Zusätzlich sind in den Abb. 5.24 a und 5.24 b die jeweils an der Oberfläche registrierte Laufzeit-Kurve (rot) vom Diffraktionspunkt D für verschiedene my_i -Positionen eingezeichnet. Die Abbildungen zeigen, daß die Superposition aller Operatoren genau den richtigen Diffraktionspunkt D ergibt. Sämtliche Operatoren haben in ihm ihren gemeinsamen Schnittpunkt. Würde es sich um gemessene seismische Spuren handeln, so ergäbe sich für alle anderen möglichen Punkte im Untergrund durch destruktive Überlagerung eine Auslöschung. Lediglich an der Lokation des Diffraktionspunktes (D_{diffy}, D_{diffz}) würde sich das richtige Ergebnis konstruktiv überlagern und abgebildet werden.

2. Fall ($v_{RMS} < v$):

In diesem Fall wurde die Geschwindigkeit v_{RMS} beim CMSO-Prozeß zu klein gewählt. Es wurden wiederum die 2 Modelle A und B verwendet (Tab. 5.6). Die RMS-Geschwindigkeit betrug $v_{RMS} = 1000$ m/s und war damit um 60% geringer als die korrekte Mediumsgeschwindigkeit. Die Abb. 5.25 a und 5.25 b stellen die grafischen Ergebnisse dar. Zusätzlich ist wiederum die an der Oberfläche gemessene Diffraktionshyperbel eingezeichnet. Die Abb. 5.25 a und b zeigen, daß die Halbkreise (diese sind in den Abbildungen verzerrt dargestellt, da eine unterschiedliche Achsenskalierung gewählt wurde) nicht mehr einen gemeinsamen Schnittpunkt haben. Statt dessen gibt es eine gemeinsame Enveloppe aller Halbkreise, die durch eine nach unten gebogene Laufzeitkurve dargestellt wird. Diffraktionshyperbel und Enveloppe liegen sehr eng beieinander, das heißt, daß die Wirkungsweise der Migration wegen der kleinen Migrationsgeschwindigkeit sehr gering ist. Je kleiner die Geschwindigkeit, um so weniger werden die Daten durch die Migration verändert. Bei einer Crossline-Migration von seismischen 3D-Daten ist deshalb beim CMSO-Prozeß mit einer zu klein gewählten RMS-Geschwindigkeit damit zu rechnen, daß 3D-Seiteneffekte innerhalb eines größeren Bereiches entlang der Crossline-Richtung nicht mehr beseitigt werden können. Es würde allerdings Verfahrensnoise entstehen (Abb. 5.25 a und b).

Die Größe des Bereiches, in dem die Crossline-Migration keine 3D-Effekte mehr beseitigen kann, müßte mit wachsender Laufzeit noch vergrößert werden (vgl. 5.25 a

und b).

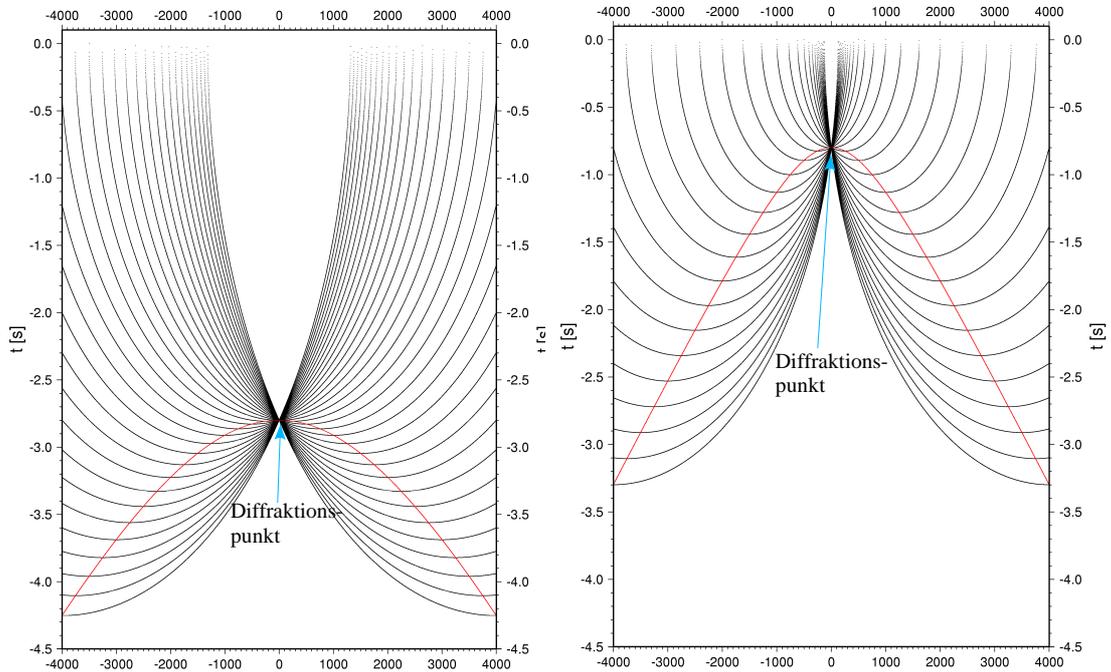


Abb. 5.24 a und b: Superposition von Crossline-Migrationsoperatoren, die mit der richtigen Geschwindigkeit konstruiert wurden ($v_{\text{Medium}} = v_{\text{RMS}}$). Alle Operatoren haben ihren gemeinsamen Schnittpunkt in dem Diffraktionspunkt. Die rote Kurve entspricht der Zero-Offset-Laufzeitkurve vom Diffraktionspunkt.

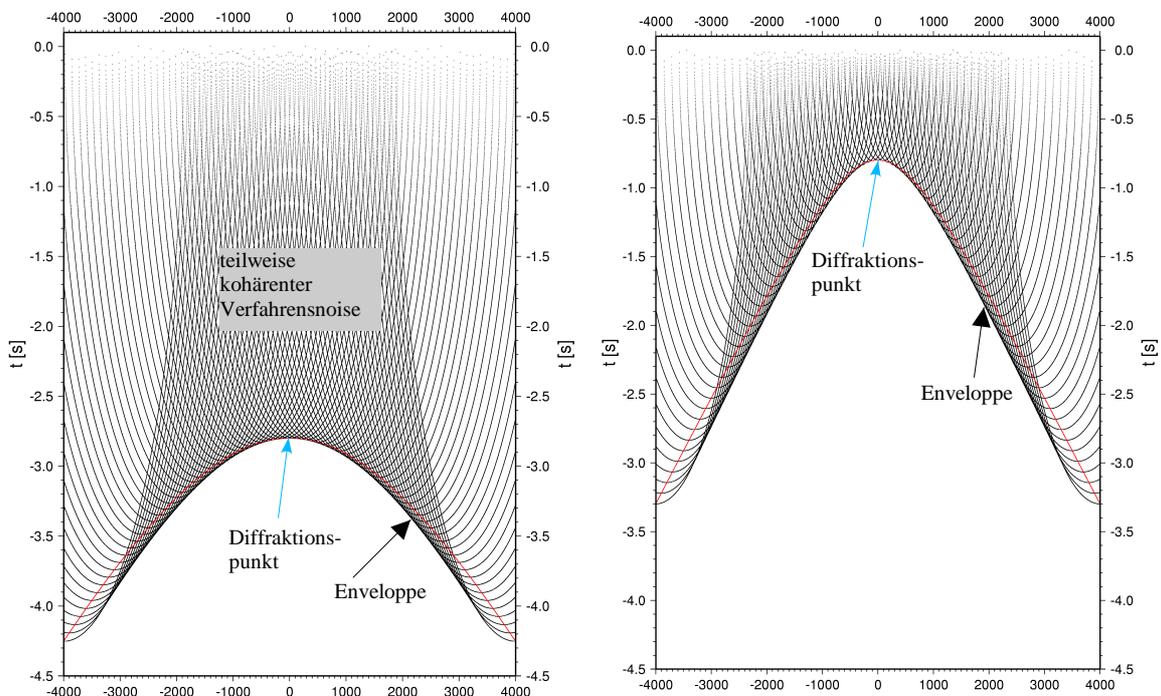


Abb. 5.25 a und b: Superposition von Crossline-Migrationsoperatoren, die mit einer zu kleinen Geschwindigkeit konstruiert worden ($v_{\text{Medium}} > v_{\text{RMS}}$). Die Operatoren haben mehrere Schnittpunkte, die sich entlang der Enveloppe anordnen.

3. Fall ($v_{RMS} > v$):

Die Modellversuche A und B wurden mit einer zu großen RMS-Geschwindigkeit von $v_{RMS} = 4000$ m/s gerechnet. Das Ergebnis ist in den Abb. 5.26 a und b dargestellt. Auch in diesem Fall gibt es keinen gemeinsamen Schnittpunkt der einzelnen Migrationsoperatoren. Die Enveloppe aller Kreise zeigt eine nach oben gekrümmte Laufzeitkurve. Im Gegensatz zu den Abb. 5.25 a und b ist die Abweichung zwischen dieser Enveloppe und der gemessenen Diffraktionshyperbel sehr viel größer. Deshalb müßten sich beim CMSO-Prozeß bei einer zu groß gewählten RMS-Geschwindigkeit die 3D-Seiteneffekte besser eliminieren lassen, als es bei zu klein gewählten RMS-Geschwindigkeiten der Fall ist.

Ferner ist allerdings zu bedenken, daß bei zu groß gewählten RMS-Geschwindigkeiten der schon bekannte räumliche Aliasing-Effekt (Kap. 5.1.2) nachteilig auf das Migrationsergebnis wirkt. Werden nämlich zur Konstruktion des Migrationsoperators zu große Geschwindigkeitswerte benutzt, so wird dadurch der konstruierte Migrationsoperator y_{Ap} vergrößert und somit der Einfluß von räumlichen Aliasingeffekten bei der Crossline-Migration verstärkt [vgl. Gleichung (5.8)].

Zusammenfassend läßt sich aus der grafischen Lösung ableiten, daß das CMSO-Verfahren bei zu klein gewählten RMS-Geschwindigkeiten weniger in der Lage ist, 3D-Effekte zu eliminieren. Dieser Effekt dürfte sich im Fall von zu groß gewählten Geschwindigkeiten wesentlich schwächer auswirken. Jedoch ist in diesem Fall mit einer Zunahme von räumlichem Aliasing zu rechnen.

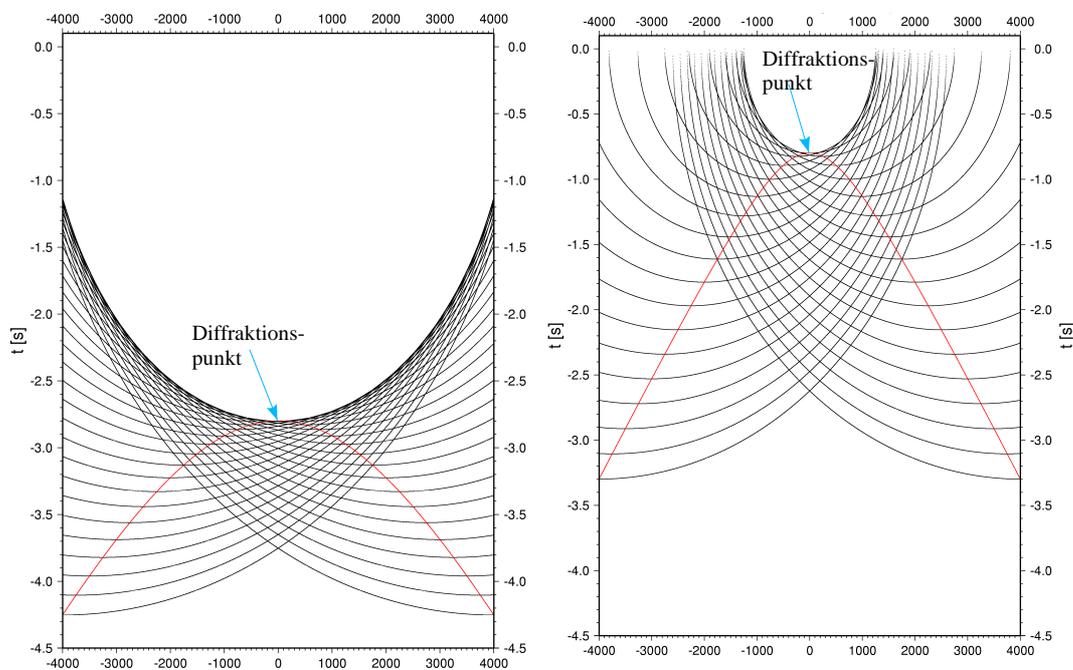


Abb. 5.26 a und b: Superposition von Crossline-Migrationsoperatoren, die mit einer zu großen Geschwindigkeit konstruiert wurden ($v_{Medium} < v_{RMS}$). Die Operatoren haben mehrere Schnittpunkte, die sich entlang der Enveloppe anordnen.

b) Rechnungen mit mehreren synthetischen 3D-Modellen:

Als Testmodell wurde das Modellbeispiel I (Kap. 5.1) verwendet. Die Inline 21 wurde mit Hilfe der CMSO-Methode crossline-migriert. Das optimale Crossline-Migrationsergebnis ergibt sich bei einer RMS-Geschwindigkeit von 2500 m/s (vgl. Abb. 5.4). In den folgenden Beispielen wurden zu kleine und zu große RMS-Geschwindigkeiten benutzt, um die vorhandenen 3D-Seiteneffekte (Abb. 5.2 und Tab. 5.1) mit Hilfe des CMSO-Prozesses zu beseitigen. Die Abb. 5.27 a - c stellen das Crossline-Migrationsergebnis bei zu klein gewählten RMS-Geschwindigkeiten ($v_{\text{RMS}} = 2250 \text{ m/s} - 1750 \text{ m/s}$) dar. Mit abnehmender falscher RMS-Geschwindigkeit ist in den 3 Abbildungen eine deutliche Zunahme von Processingnoise besonders für kleinere Laufzeiten zu beobachten. In Abb. 5.27 a ($v_{\text{RMS}} = 2250 \text{ m/s}$) konnten noch alle 4 Seitenreflektoren gut eliminiert werden (vgl. Abb. 5.2). Der Processingnoise ist noch relativ schwach. In Abb. 5.27 b ($v_{\text{RMS}} = 2000 \text{ m/s}$) sind Seitenreflexionen erhalten geblieben und der Processingnoise hat stark zugenommen. In Abb. 5.27 c ($v_{\text{RMS}} = 1750 \text{ m/s}$) konnte keine der Seitenreflexionen durch den CMSO-Prozeß mehr eliminiert werden. Im Vergleich zum Inputdatensatz haben sich die Laufzeiten der erhalten gebliebenen 3D-Effekte leicht vergrößert (vgl. Abb. 5.2). Diese Erscheinung ist wahrscheinlich auf die Form der Enveloppe bei zu klein gewählten Geschwindigkeiten zurückzuführen (vgl. Abb. 5.25 a und b). Die wirklichen 2D-Effekte sind davon im wesentlichen unberührt gebliebenen.

Die Untersuchungen für die Modellbeispiele zeigen, daß mit wachsender Abweichung vom optimalen RMS-Feld hin zu kleineren falschen RMS-Geschwindigkeiten, das CMSO-Verfahren nicht mehr in der Lage ist, Seiteneffekte zu beseitigen. Die gefundenen Ergebnisse entsprechen den Resultaten der grafischen Lösungen.

In den Abb. 5.28 a - d sind die Crossline-Migrationsergebnisse bei zu groß gewählten RMS-Geschwindigkeiten dargestellt. Insgesamt können die 3D-Seitenreflexionen noch relativ gut eliminiert werden. Selbst bei einer um 50% erhöhten RMS-Geschwindigkeit (Abb. 5.28 d) sind die Seitenreflektoren z.T. noch eliminiert worden. Der Seitenreflektor L5 ist aufgrund seiner geringsten Entfernung von der Inline 21 erhalten geblieben. Die nicht mehr eliminierten 3D-Informationen der Seitenreflexionen sind im Vergleich zum Inputdatensatz zu kleinen Laufzeiten hin verschoben worden (vgl. Abb. 5.2). Diese Erscheinung stimmt mit der Form der Enveloppe bei zu groß bestimmten Geschwindigkeiten überein (vgl. Abb. 5.26 a und b). Die wirklichen 2D-Effekte entlang der Inline 21 sind davon im wesentlichen unberührt geblieben. Auch hier stimmen die Ergebnisse der grafischen Lösungen mit den Ergebnissen der Modellversuche gut überein.

Für die Praxis lassen sich aus den hier gewonnenen Ergebnissen folgende Schlußfolgerungen für einen effektiven Einsatz des CMSO-Prozesses hinsichtlich der geforderten RMS-Geschwindigkeiten folgern:

1. Die v_{RMS} -Geschwindigkeit ist bei Unsicherheit etwas zu erhöhen.
2. Wenn die für das CMSO-Verfahren benutzten RMS-Geschwindigkeiten nicht mehr als z.B. 5% - 10% von den korrekten RMS-Geschwindigkeiten abweichen, ist ein möglicher Fehlereinfluß durch den CMSO-Prozeß eher als gering zu betrachten.

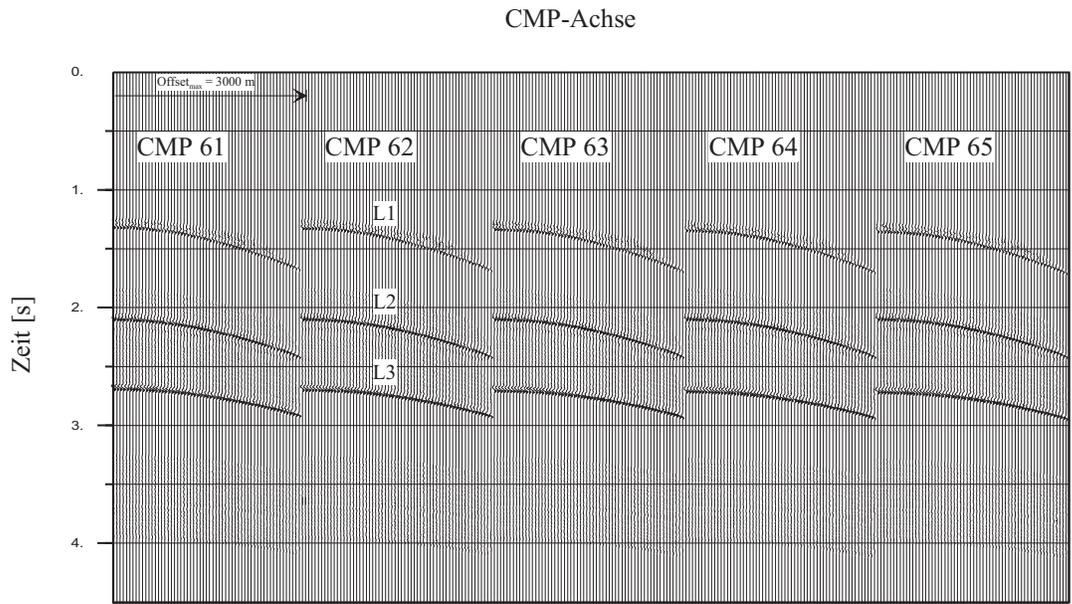


Abb. 5.27 a: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispiels I (vgl. Abb. 5.2). Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 10% ($v_{\text{RMS}} = 2250$ m/s) zu klein (vgl. Abb. 5.4).

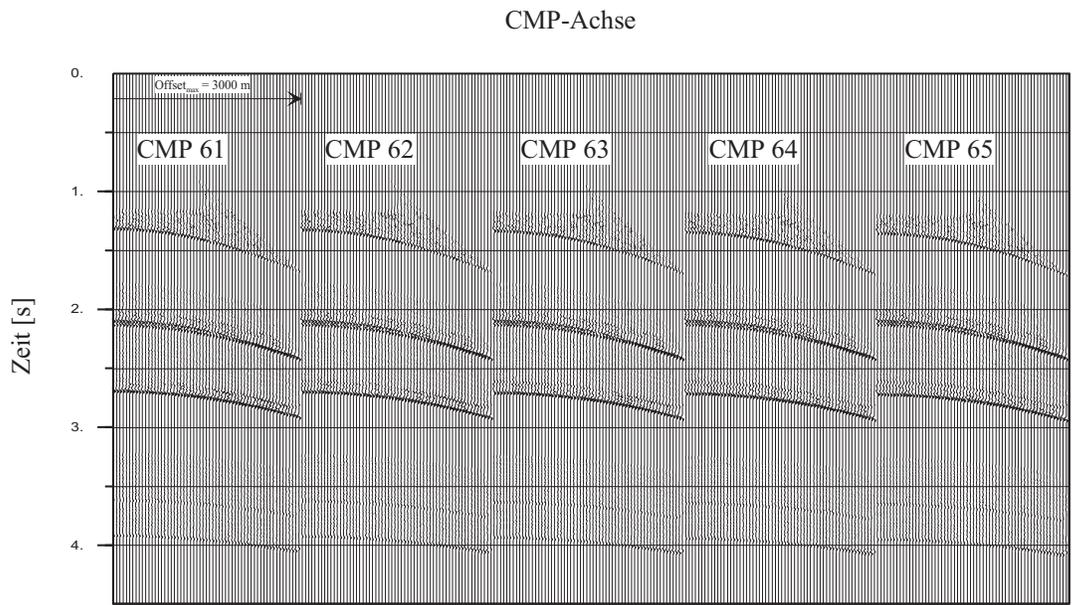


Abb. 5.27 b: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispiels I. Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 20% ($v_{\text{RMS}} = 2000$ m/s) zu klein (vgl. Abb. 5.2 und 5.4).

CMP-Achse

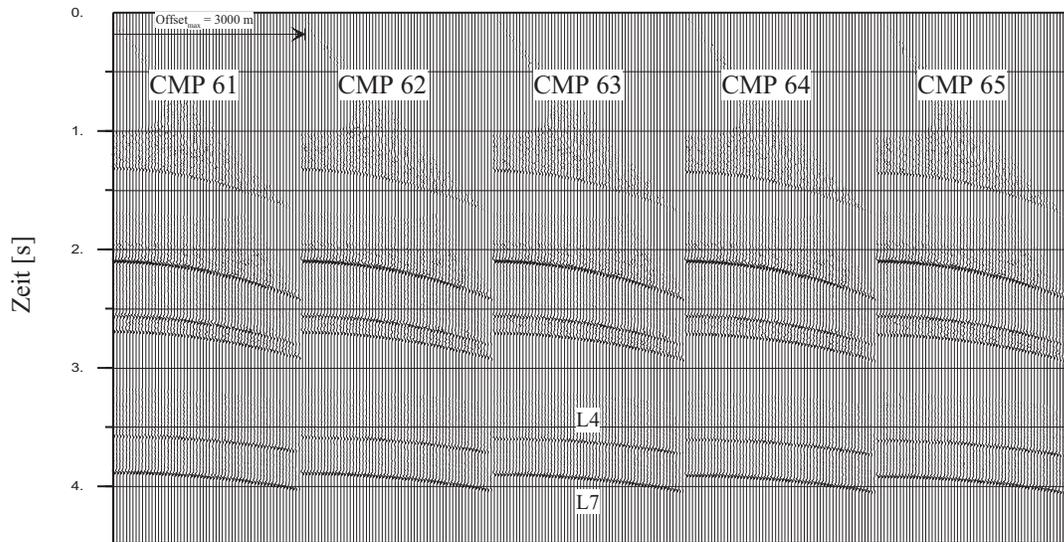


Abb. 5.27 c: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispiels I. Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 30% ($v_{\text{RMS}} = 1750$ m/s) zu klein (vgl. Abb. 5.2 und 5.4).

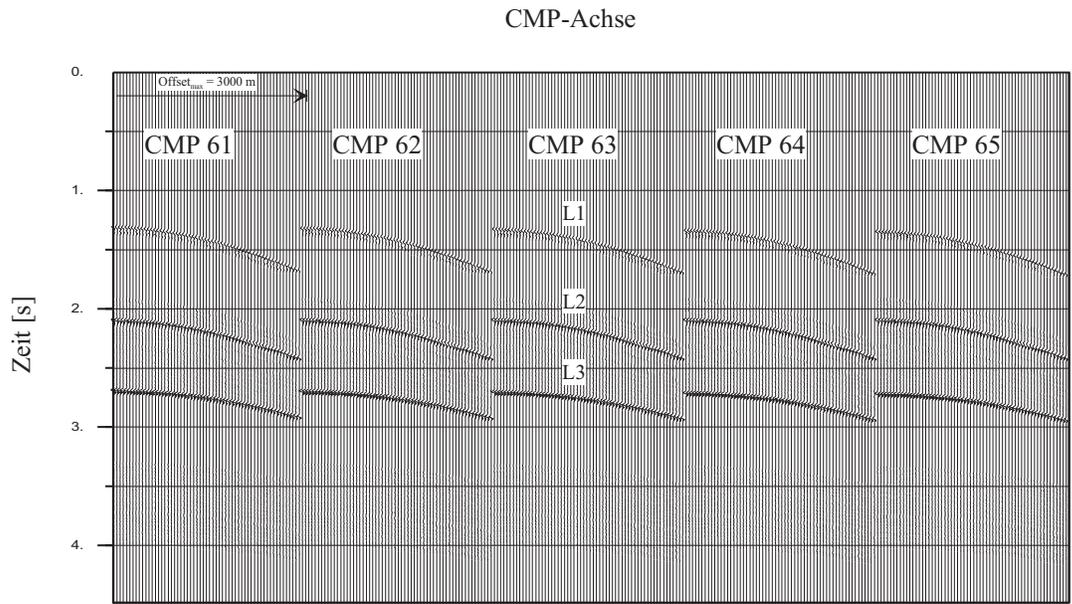


Abb. 5.28 a: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispielles I (vgl. Abb. 5.2). Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 10% ($v_{\text{RMS}} = 2750$ m/s) zu groß (vgl. Abb. 5.4).

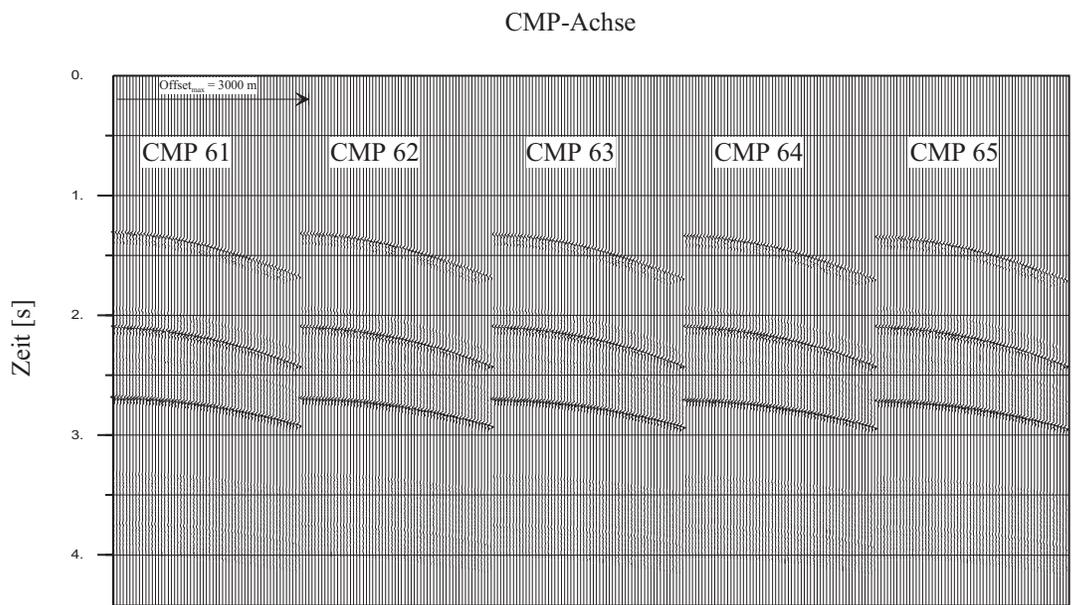


Abb. 5.28 b: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispielles I. Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 20% ($v_{\text{RMS}} = 3000$ m/s) zu groß (vgl. Abb. 5.2 und 5.4).

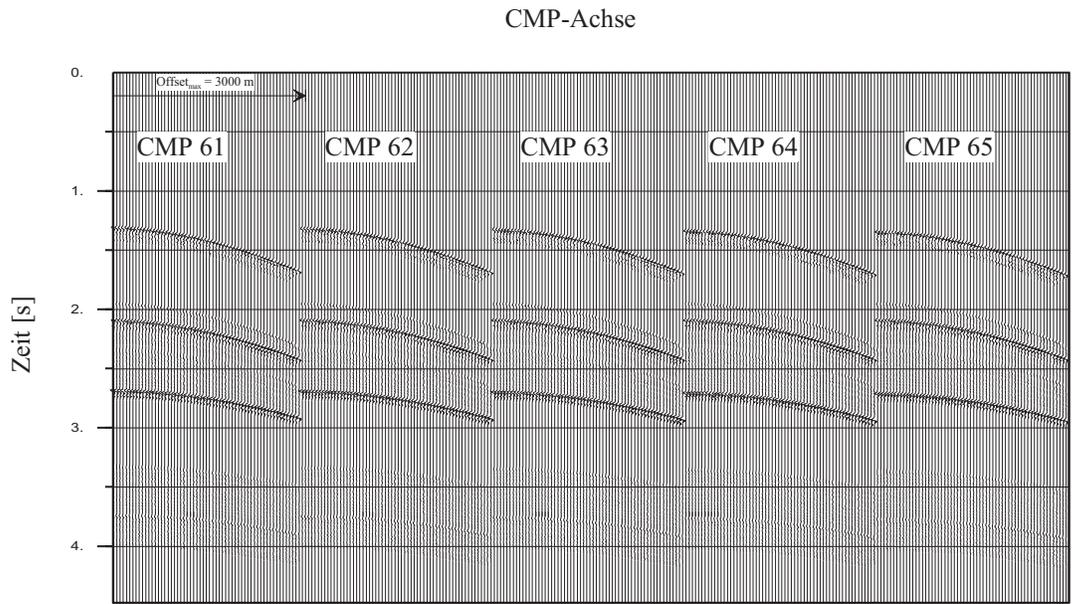


Abb. 5.28 c: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispiels I. Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 30% ($v_{\text{RMS}} = 3250$ m/s) zu groß (vgl. Abb. 5.2 und 5.4).

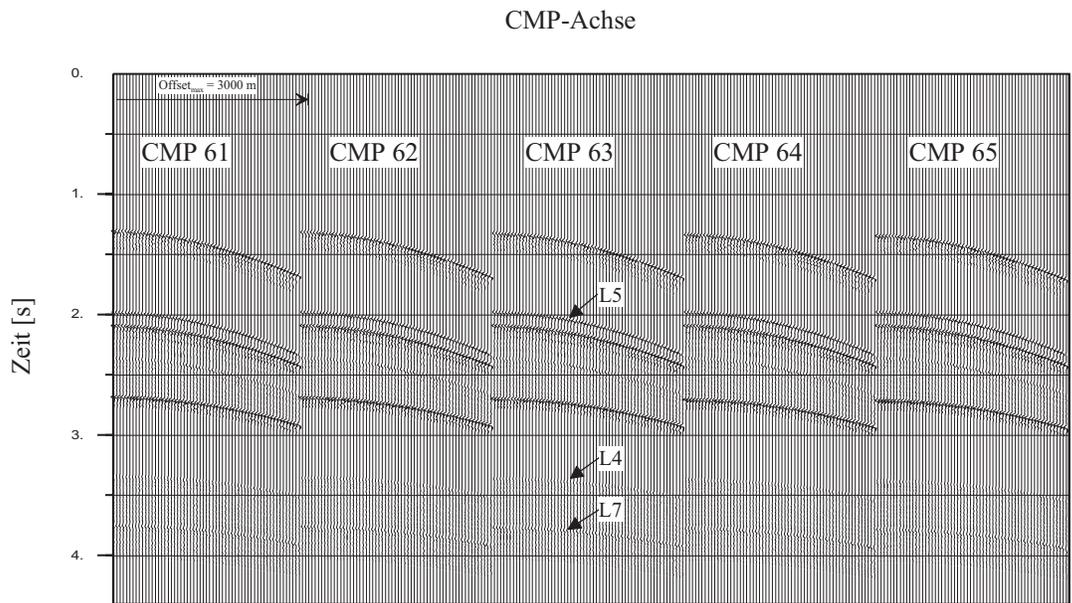


Abb. 5.28 d: Crossline-Migration mit dem CMSO-Verfahren auf die Inline 21 des Modellbeispiels I. Die vorgegebene RMS-Geschwindigkeit war um 50% ($v_{\text{RMS}} = 3750$ m/s) zu groß (vgl. Abb. 5.2 und 5.4).

Das beobachtete Ergebnis, bei dem sich 3D-Effekte, z.B. bei wesentlich zu klein gewählten RMS-Geschwindigkeiten, nicht mehr eliminieren lassen und dabei gleichzeitig die Laufzeiten dieser 3D-Effekte im Vergleich zu den unbearbeiteten 3D-Prestack-Daten vergrößert haben, wohingegen die Laufzeiten der 2D-Effekte im wesentlichen unberührt geblieben sind, könnte folgendermaßen genutzt werden (vgl. z.B. Abb. 5.27 c): Ohne irgendwelche Informationen über das 3D-RMS-Feld zu besitzen, sollte es möglich sein, in seismischen 3D-Daten vorhandene 3D-Effekte von 2D-Effekten visuell separierbar zu machen. Für die Durchführung des CMSO-Verfahrens müßte dafür eine wesentlich zu kleine RMS-Geschwindigkeit benutzt werden. 3D-Effekte sollten dann in den crossline-migrierten Daten eine größere Laufzeit besitzen, als es in den nicht crossline-migrierten Daten der Fall ist. Die 2D-Effekte dürften sich hinsichtlich ihrer Laufzeit nicht verändert haben.

5.2 Die Auswirkungen von variablen Geschwindigkeiten auf die Crossline-Migrationsverfahren

Bisher wurden das CMMO- und das CMSO-Verfahren lediglich für den konstanten Geschwindigkeitsfall untersucht. In diesem Kapitel werden nun beide Verfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf Untergrundmedien getestet, bei denen eine variable Geschwindigkeitsverteilung vorliegt. Dabei sollte folgende Fragestellung näher untersucht werden:

Wie stark dürfen vertikale und / oder laterale Geschwindigkeiten im 3D-Untergrund variieren, damit die einzelnen Crossline-Verfahren noch richtig interpretierbare Ergebnisse liefern können?

Um diese Frage zu klären, wurden eine Reihe von 3D-Modellversuchen mit vertikalen $v(z)$ und lateralen $v(x, y, z)$ Geschwindigkeitsvariationen durchgeführt. Das Resultat ist schließlich eine Abschätzung darüber, wann beide Verfahren im nicht-konstanten Geschwindigkeitsfall noch effektiv eingesetzt werden können.

Die Laufzeitberechnung für die folgenden 3D-Modelle zur Generierung synthetischer 3D-Datensätze wurde mit einem eigenen 3D-Ray-tracing-Programm durchgeführt. Das Programm errechnet für beliebige Schuß-Empfängerkonfigurationen an der Meßoberfläche und gegebene Geschwindigkeitsfunktionen $v(x, y, z)$ die Laufzeiten (Schußpunkt-Diffraktionspunkt-Empfängerpunkt) für frei wählbare Diffraktionspunkte im 3D-Untergrund. Für die Laufzeit-Berechnungen wurden in den folgenden Beispielen ausschließlich Diffraktionspunkte gewählt, um die Rechenzeiten des 3D-Ray-tracing-Programmes gering zu halten.

Zur Berechnung der Laufzeiten durch das 3D-Ray-tracing-Programm wird ein 3D-Volumen, welches dem 3D-Untergrundmedium entspricht, innerhalb eines 3D-kartesischen Koordinatensystems in möglichst viele kleine Volumeneinheiten ($\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$) aufgeteilt. Für einen gegebenen Diffraktionspunkt und ein gegebenes 3D-Geschwindigkeitsfeld $v(x, y, z)$ wird von dem Schußpunkt S die Laufzeit t_1 zu jedem dieser Volumeneinheiten berechnet. Befindet sich in einer Volumeneinheit ein Diffraktionspunkt, so wird die Laufzeit t_1 gespeichert. Anschließend erfolgt entsprechend die Laufzeitberechnung für t_{II} vom Empfängerpunkt R zu demselben Diffraktionspunkt.

Beide Laufzeiten (t_I und t_{II}) werden addiert und ergeben die Gesamtlaufzeit t . Die dabei zurückgelegten Strahlenwege und die Brechung an Geschwindigkeitsgrenzen werden mit Hilfe des Brechungsgesetzes nach Snellius berechnet. Die Laufzeitberechnung wird um so genauer, je kleiner die Volumeneinheiten ($\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$) gewählt werden. Allerdings steigen dadurch auch die Rechenzeiten stark an. Für die folgenden Beispiele wurde eine Größe von $\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z = 20 \text{ m} \cdot 20 \text{ m} \cdot 20 \text{ m}$ verwendet. Tests hatten ergeben, daß mit diesen Einstellungen die Rechenzeiten gering gehalten und dabei die erforderlichen Genauigkeiten für die Laufzeitberechnung erzielt werden konnten.

5.2.1 $v(z)$ -Geschwindigkeitsvariationen

Es wurden verschiedene 3D-Modellbeispiele gerechnet, in denen eine vertikale $v(z)$ -Geschwindigkeitsvariation im 3D-Untergrund vorgegeben war. Die Resultate der Crossline-Migrationen mit dem CMMO- bzw. CMSO-Verfahren auf diese Modellbeispiele zeigten für beide Verfahren vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in den getesteten $v(z)$ -Fällen. Eines dieser Ergebnisse (Modellbeispiel IV) wird im folgenden vorgestellt.

Das Modellbeispiel IV hatte die in Tabelle 5.7 dargestellten Parameterwerte (vgl. auch Abb. 5.29).

Modellausdehnung in x-(Inline-) Richtung	0 m - 5000 m
Modellausdehnung in y-(Crossline-) Richtung	0 m - 1000 m
Modellausdehnung in z (Tiefe)	0 m - 7000 m
Gittergrößen ($\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$)	20 m · 20m · 20m
Anzahl Inlines	21
Abstand benachbarte Inlines	50 m
CMP-Bereich in x-Richtung	CMP x_{\min} = 1500 m CMP x_{\max} = 3500 m Inkrement Δ CMP x = 50 m
Anzahl CMP-Gather pro Inline	41
1 CMP-Gather	30 Spuren mit einem Offset von $2 \cdot h_{\min} = 100 \text{ m}$ bis $2 \cdot h_{\max} = 3000 \text{ m}$; Inkrement $\Delta h = 100 \text{ m}$
Azimut φ der einzelnen Schuß-Empfänger-Aufstellungen	Const. = 0°

Tab 5.7: Parameterwerte für die Berechnung von 3D-Modellen mit dem eigenen Ray-tracing-Programm

Im 3D-Untergrund befanden sich 6 Diffraktionspunkte mit folgenden Parametern:

Diffraktionspunkt (D) Nr.	D_{ifx}	D_{ify}	D_{ifz}	2D-Effekt für Inline Nr. 11 ($y = 500 \text{ m}$)
1	1800	500	2300	x
2	2200	500	3500	x
3	2900	500	4500	x
4	1500	100	3000	

Diffraktionspunkt (D) Nr.	D_{ifx}	D_{ify}	D_{ifz}	2D-Effekt für Inline Nr. 11 ($y = 500 \text{ m}$)
5	2700	0	4500	
6	3500	900	4500	

Tab. 5.8: Parameterwerte von 6 Diffraktionspunkten. Nur die Diffraktionspunkte D1, D2, D3 erzeugen für die Inline Nr. 11 2D-Reflexionen.

Die Geschwindigkeitsverteilung $v(z)$ variierte in diesem Beispiel nur mit der Tiefe z und ist anhand der Abb. 5.29 ersichtlich. Sämtliche gemessenen Ereignisse an der Meßoberfläche stammen ausschließlich von diesen 6 Diffraktionspunkten. Auf die 41 CMP-Gather der Inline 11 wurden das CMMO- und das CMSO-Verfahren angewandt. Die Diffraktionspunkte D4, D5 und D6 stellen für diese Inline 3D-Seiteneffekte dar. In Abb. 5.30 a werden 10 synthetisch generierte CMP-Gather entlang der Inline 11 vor Anwendung der Crossline-Migration gezeigt. Die Ergebnisse der Crossline-Migrationsverfahren mit den eigenen Programmen sind in den Abb. 5.30 b und 5.30 c dargestellt. In Abb. 5.30 d wird zusätzlich das Ergebnis der CMSO-Methode mit dem Sirius 3D-Paket gezeigt.

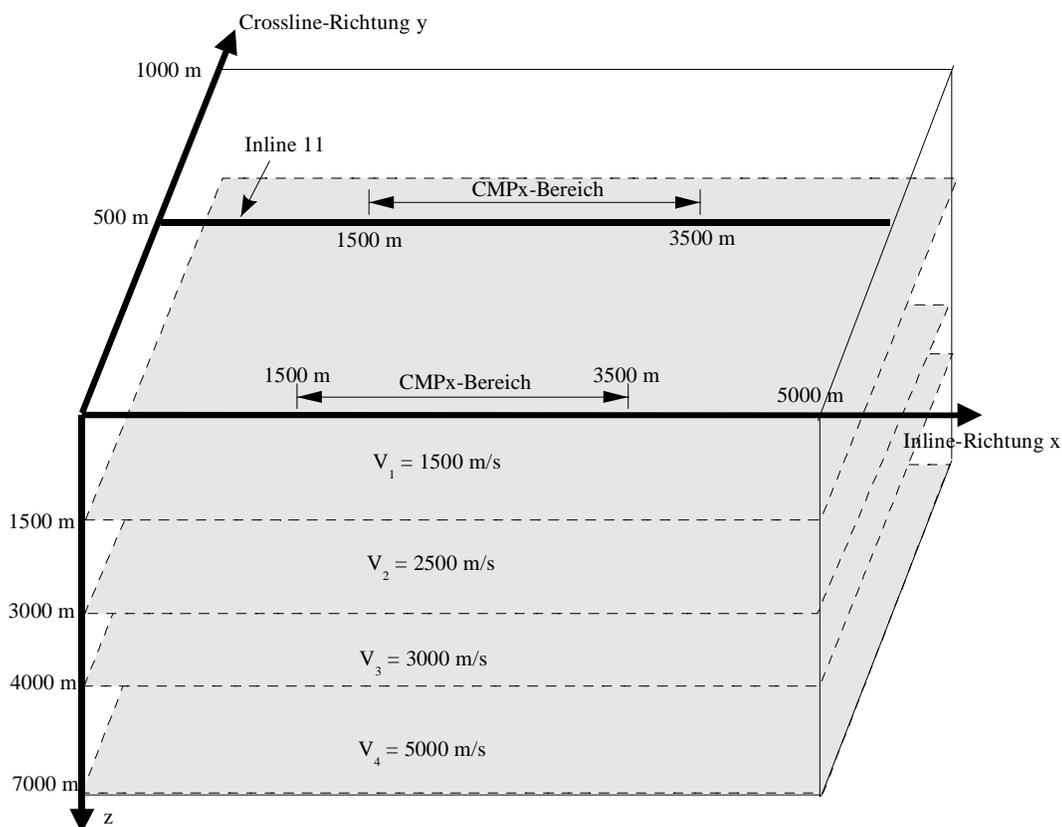


Abb. 5.29 Prinzipdarstellung des 3D-Modellbeispiels IV mit einer Geschwindigkeitsverteilung $v(z)$. Die Geschwindigkeit variiert nur mit der Tiefe z . Eingezeichnet sind im Untergrund die Geschwindigkeitsschichten von deren Grenzen jedoch keine Reflexionen gemessen werden. Sämtliche gemessenen Ereignisse an der Meßoberfläche stammen ausschließlich von 6 Diffraktionspunkten (Tab. 5.8), die in dieser Abb. nicht eingezeichnet sind.

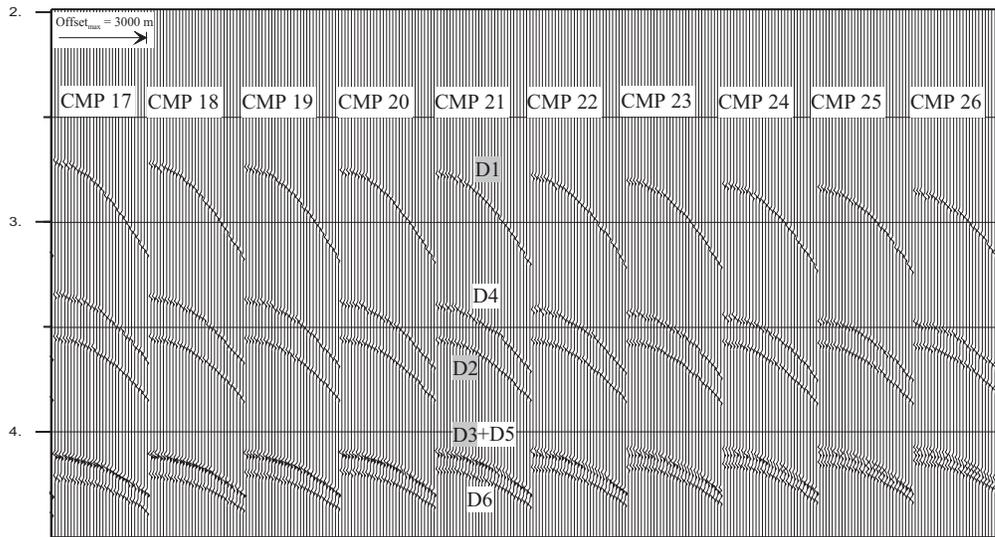


Abb. 5.30 a: 10 CMP-Gather des 3D-Prestack-Inputdatensatzes entlang der Inline 11 aus Modellbeispiel IV mit $v(z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die Reflexionsereignisse D1, D2 und D3 sind 2D-Effekte. Alle anderen Reflexionsereignisse sind für diese Inline Seiteneffekte. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 100$ m.

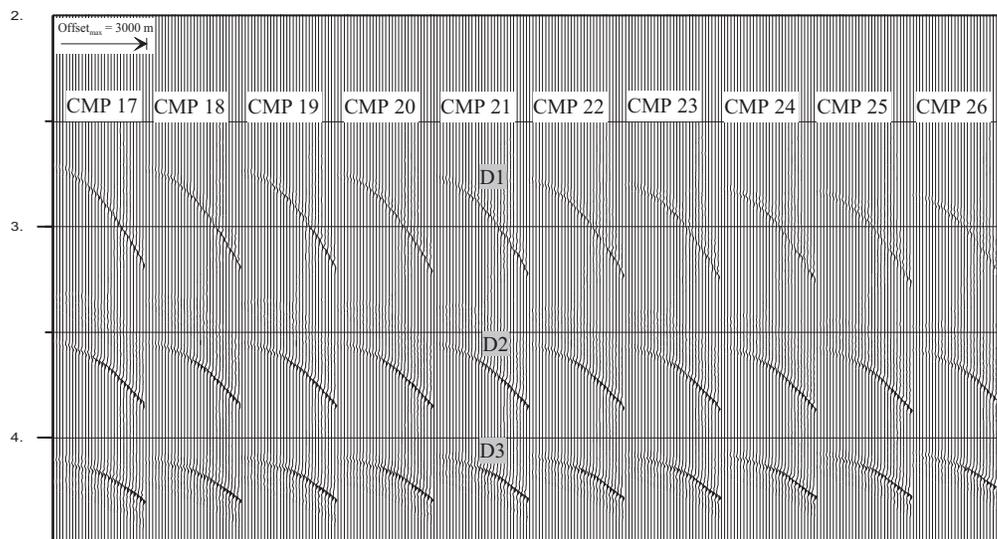


Abb. 5.30 b: Ergebnis des CMMO-Prozesses aus Modellbeispiel IV mit $v(z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die richtigen 2D-Informationen sind erhalten geblieben. Die Seiteneffekte konnten eliminiert werden.

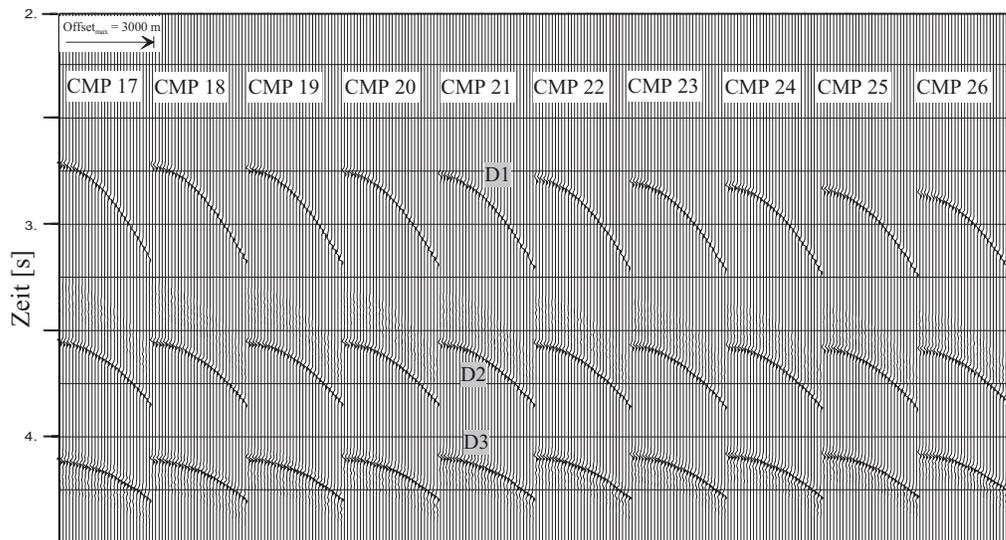


Abb. 5.30 c: Ergebnis des CMSO-Prozesses (eigenes Programm) aus Modellbeispiel IV mit $v(z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die richtigen 2D-Informationen sind erhalten geblieben. Die Seiteneffekte konnten eliminiert werden.

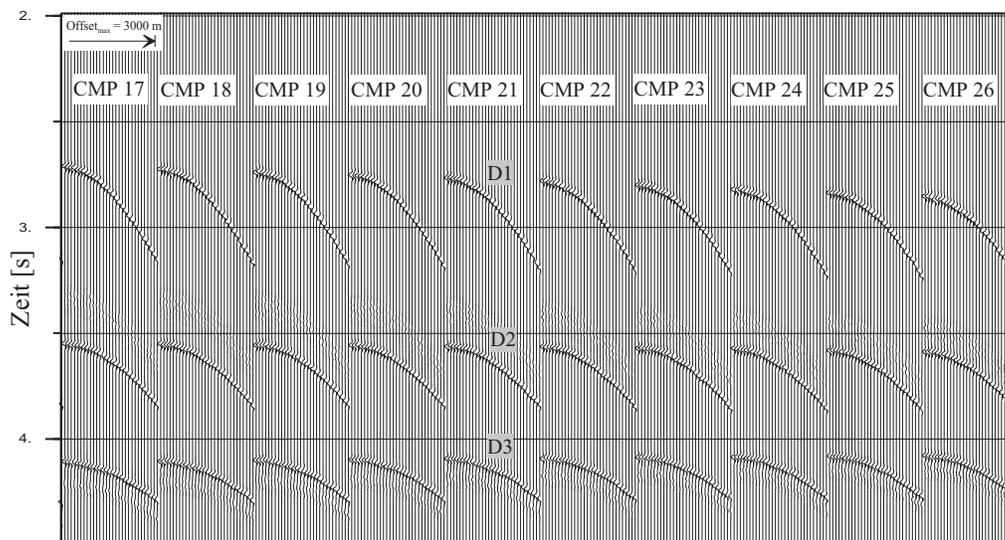


Abb. 5.30 d: Ergebnis des CMSO-Prozesses (Sirius-Programm) aus Modellbeispiel IV mit $v(z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die richtigen 2D-Informationen sind erhalten geblieben. Die Seiteneffekte konnten eliminiert werden.

Die maximale Größe der Migrationsapertur wurde für alle Verfahren durch die Dimensionierung des 3D-Modells in y-(Crossline-) Richtung automatisch vorgegeben und betrug deshalb maximal 1000 m. Trotz dieser relativ kleinen Migrationsapertur konnten in allen 3 Abbildungen die 3D-Seiteneffekte gut eliminiert werden. Die richtigen 2D-Ereignisse sind erhalten geblieben. Damit zeigen die Resultate, daß beide Crossline-Migrationsmethoden (CMMO und CMSO) richtige Ergebnisse für dieses $v(z)$ -Modellbeispiel liefern. Auch alle weiteren durchgeführten Versuche mit verschiedenen $v(z)$ -Modellen zeigten, daß bei vertikalen Geschwindigkeitsvariationen sowohl der CMMO-Prozeß als auch der CMSO-Prozeß richtige Ergebnisse liefern und 3D-Effekte eliminieren können. Als Ergebnis dieser Versuche kann somit festgehalten werden, daß die hier untersuchten Crossline-Migrationsmethoden, welche von der Migrationstechnik her Zeitmigrationsverfahren sind, im Fall $v = v(z)$ korrekte Ergebnisse liefern.

5.2.2 $v(x, z)$ Geschwindigkeitsvariationen

Es wurden verschiedene 3D-Modelle mit vertikalen und lateralen Geschwindigkeitsvariationen $v(x, z)$ generiert. Dabei wurden die Geschwindigkeitsvariationen durch verschieden geneigte Geschwindigkeitsschichten, aber mit jeweils konstanter Geschwindigkeit, realisiert. Es gilt näherungsweise:

$$\frac{\Delta v}{\Delta x} = v_x = \tan(\alpha) \cdot \frac{\Delta v}{\Delta z} = \tan(\alpha) \cdot v_z \quad , \quad (5.15)$$

mit $\alpha =$ Neigung des Reflektors,
 $\Delta v / \Delta x = v_x =$ lateraler Gradient der Geschwindigkeit in x-Richtung,
 $\Delta v / \Delta z = v_z =$ vertikaler Gradient der Geschwindigkeit in z-Richtung.

Der Faktor $\tan(\alpha)$ gibt damit an, um wieviel die laterale Variation der Geschwindigkeit größer ist als die vertikale Variation der Geschwindigkeit. Im folgenden wird unter „starker“ lateraler Variation der Geschwindigkeit ein großer Faktor $\tan(\alpha)$ und umgekehrt verstanden.

Die lateralen Geschwindigkeitsveränderungen traten in dem $v(x, z)$ -Modellbeispiel nur entlang der x-bzw. Inline-Richtung auf. Dargestellt wird das Ergebnis des Modellbeispiels V mit einer $v(x, z)$ -Geschwindigkeitsverteilung. Die verwendeten Modellparameter entsprachen denen aus Tab. 5.7. Das Untergrundmodell bestand aus 6 Diffraktionspunkten (Tab. 5.8). Alle gemessenen Ereignisse an der Oberfläche stammten ausschließlich von diesen Diffraktoren. Die Geschwindigkeitsverteilung $v(x, z)$ im Untergrund ist in Abb. 5.31 dargestellt.

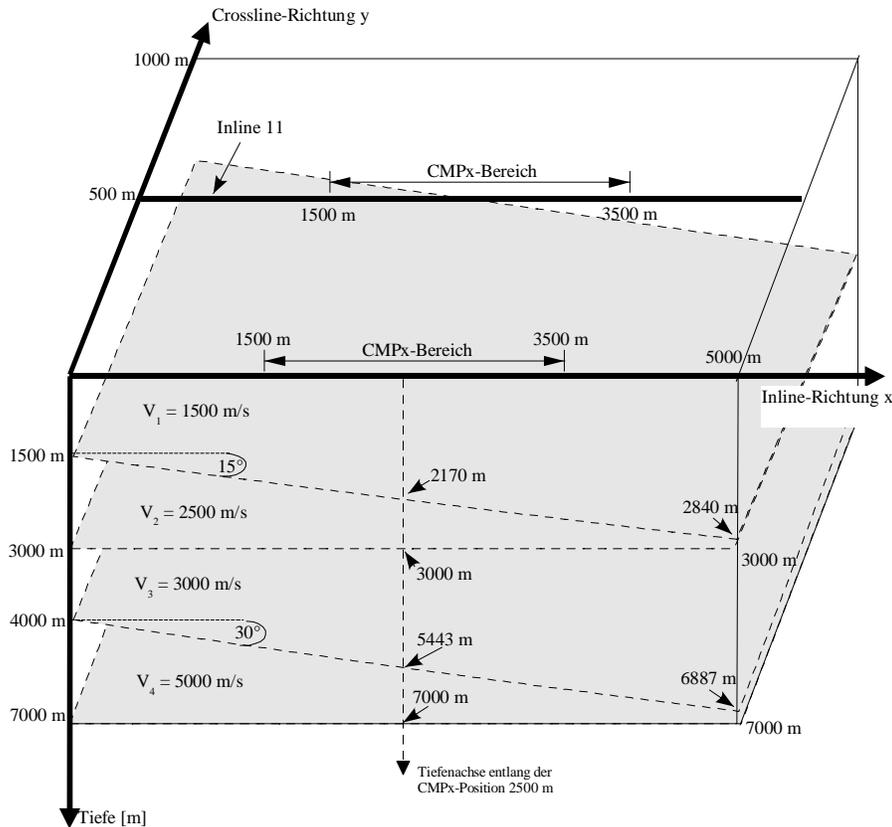


Abb. 5.31: Prinzipdarstellung des 3D-Modellbeispiels V mit einer Geschwindigkeitsverteilung $v(x, z)$. Die Geschwindigkeit variiert in der Tiefe und in Inline-Richtung. Eingezeichnet sind die Geschwindigkeitsschichten von deren Grenzen jedoch keine Reflexionen errechnet werden. Sämtliche gemessenen Ereignisse an der Meßoberfläche stammen ausschließlich von 6 Diffraktionspunkten (Tab. 5.8), die in dieser Abb. nicht eingezeichnet sind.

In Abb. 5.32 a sind 10 CMP-Gather des 3D-Prestack-Datensatzes dargestellt. Die Ergebnisse der Crossline-Migrationen mit dem CMMO- und CMSO-Verfahren zeigen die Abb. 5.32 b - d. Zur Durchführung des CMSO-Prozesses wurde das genaue bekannte 3D-RMS-Feld berücksichtigt.

Alle crossline-migrierten Daten zeigen, daß auch im $v(x, z)$ -Fall die 3D-Seiteneffekte gut eliminiert werden konnten. Deutlich erhalten geblieben sind die 2D-Effekte, die entlang der Tiefenebene von Inline 11 stammen.

Weitere Crossline-Migrationsergebnisse mit verschiedenen $v(x, z)$ -Modellbeispielen zeigten, daß sowohl für den CMMO-Prozeß als auch für den CMSO-Prozeß diese Ergebnisse bestätigt werden konnten.

Insgesamt kann deshalb festgehalten werden, daß die beiden hier untersuchten Crossline-Migrationsverfahren auch im Fall von lateral variierenden Geschwindigkeiten $v = v(x, z)$ die geforderten Ergebnisse liefern, solange diese Geschwindigkeitsvariationen in Inline-Richtung auftreten.

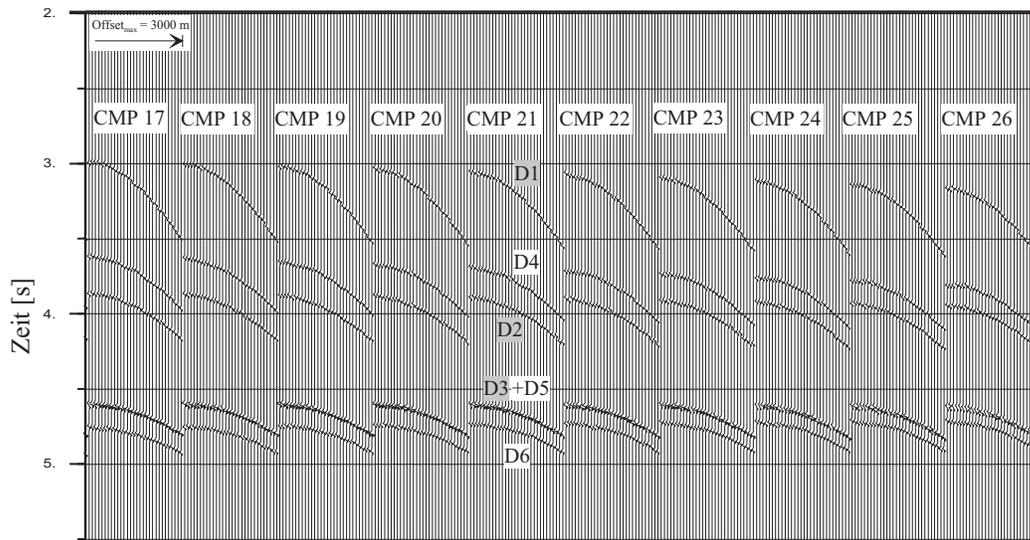


Abb. 5.32 a: 10 CMP-Gather entlang der Inline 11 des 3D-Prestack-Inputdatensatzes aus Modellbeispiel V mit $v(x, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die Reflexionsereignisse D1, D2 und D3 sind 2D-Effekte. Alle anderen sind Seiteneffekte. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 100$ m.

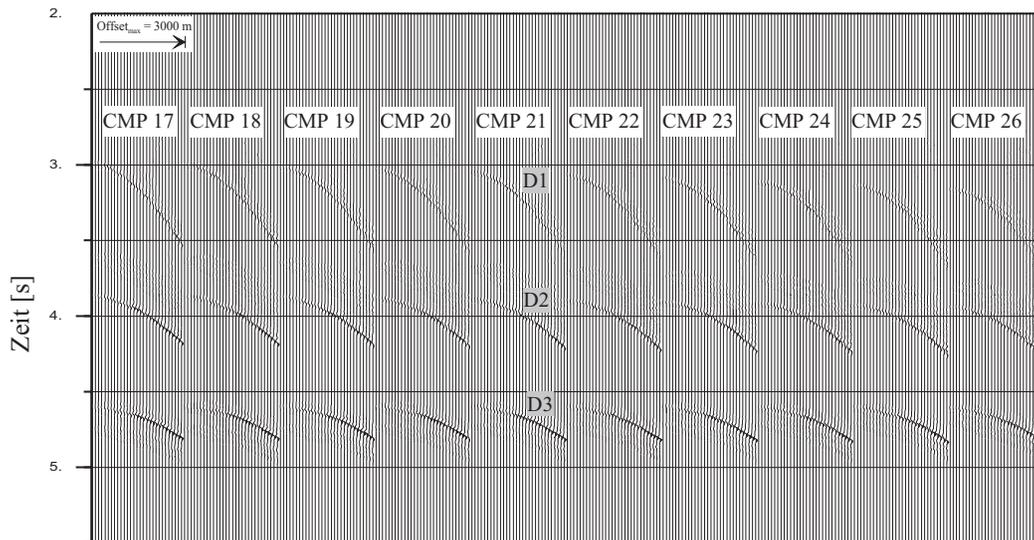


Abb. 5.32 b: Ergebnis des CMMO-Prozesses aus Modellbeispiel V mit $v(x, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die richtigen 2D-Informationen sind erhalten geblieben. Die Seiteneffekte konnten eliminiert werden.

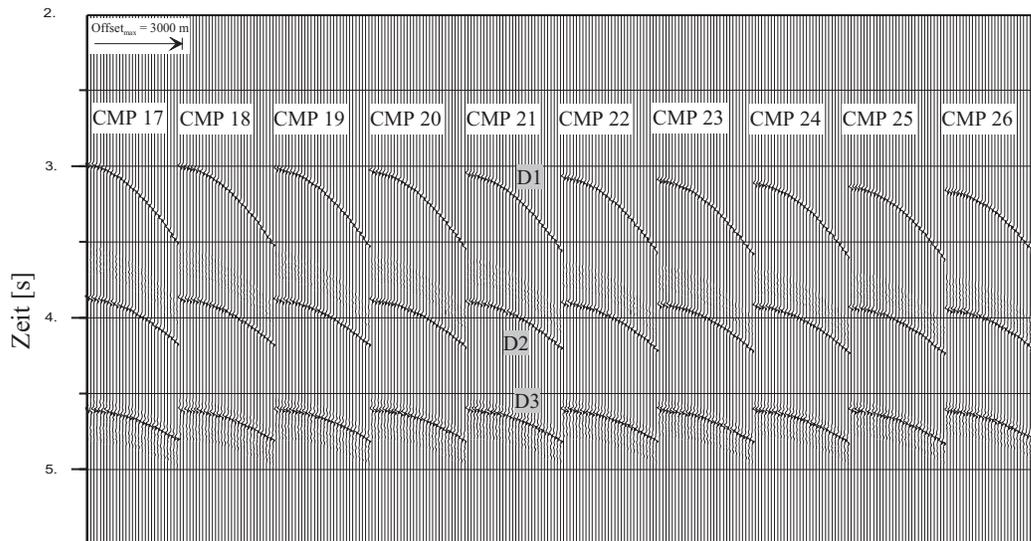


Abb. 5.32 c: Ergebnis des CMSO-Prozesses (eigenes Programm) aus Modellbeispiel V mit $v(x, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die richtigen 2D-Informationen sind erhalten geblieben. Die Seiteneffekte konnten eliminiert werden.

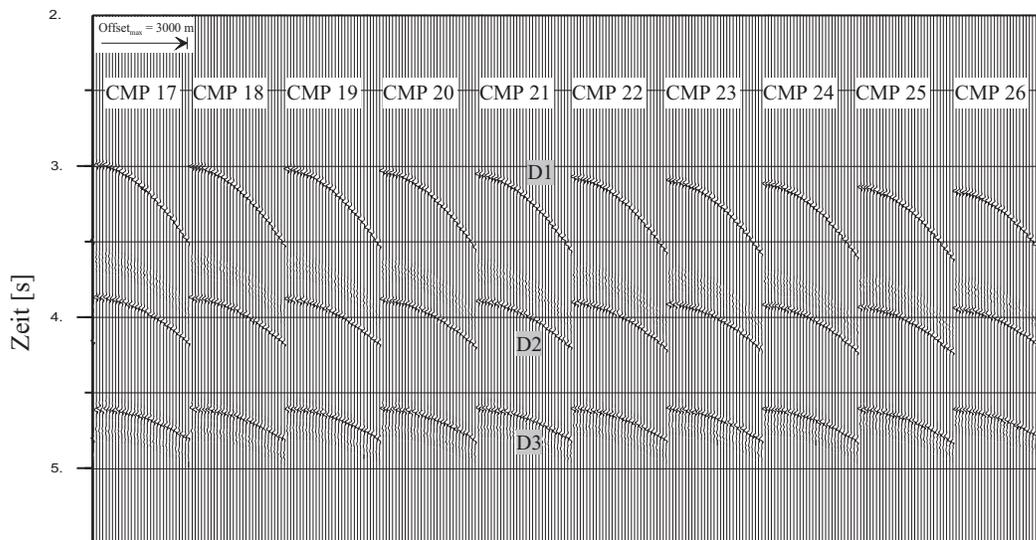


Abb. 5.32 d: Ergebnis des CMSO-Prozesses (Sirius-Programm) aus Modellbeispiel V mit $v(x, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die richtigen 2D-Informationen sind erhalten geblieben. Die Seiteneffekte konnten eliminiert werden.

5.2.3 $v(y, z)$ - und $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsvariationen

Für das folgende Modellbeispiel VI galten wiederum die Modell-Parameter entsprechend Tab. 5.7 bzw. Tab. 5.8. Die zugehörige Geschwindigkeitsvariation im 3D-Untergrund variierte diesmal jedoch nur entlang der y - (Crossline-) Achse mit der Tiefe und ist in Abb. 5.33 entlang eines Crossline-Schnittes wiedergegeben. In Inline-Richtung traten bei diesem Modell keine lateralen Geschwindigkeitsvariationen auf.

Auf die 3D-Prestack-Daten der Inline 11 wurden das CMMO-Verfahren und das CMSO-Verfahren angewandt. Für den CMSO-Prozeß wurde das genaue bekannte 3D-RMS-Geschwindigkeitsfeld berücksichtigt.

In Abb. 5.34 a sind die 3D-Reflexionsantworten in 10 CMP-Gathern entlang der Inline 11 abgebildet. In den Abb. 5.34 b - d sind die Ergebnisse der Crossline-Migrationen mit dem CMMO- bzw. CMSO-Verfahren dargestellt. Die crossline-migrierten Daten zeigen für beide Crossline-Verfahren ähnliche Ergebnisse: die Reflexionshyperbeln der 2D-Ereignisse konnten gar nicht oder nur noch sehr schlecht abgebildet werden (z.B. vom Diffraktor D3). Die 3D-Seiteneffekte konnten nur sehr unzureichend (z.B. von D6) eliminiert werden. Der Prozessingnoise hat in allen Darstellungen Abb. 5.34 b - d stark zugenommen.

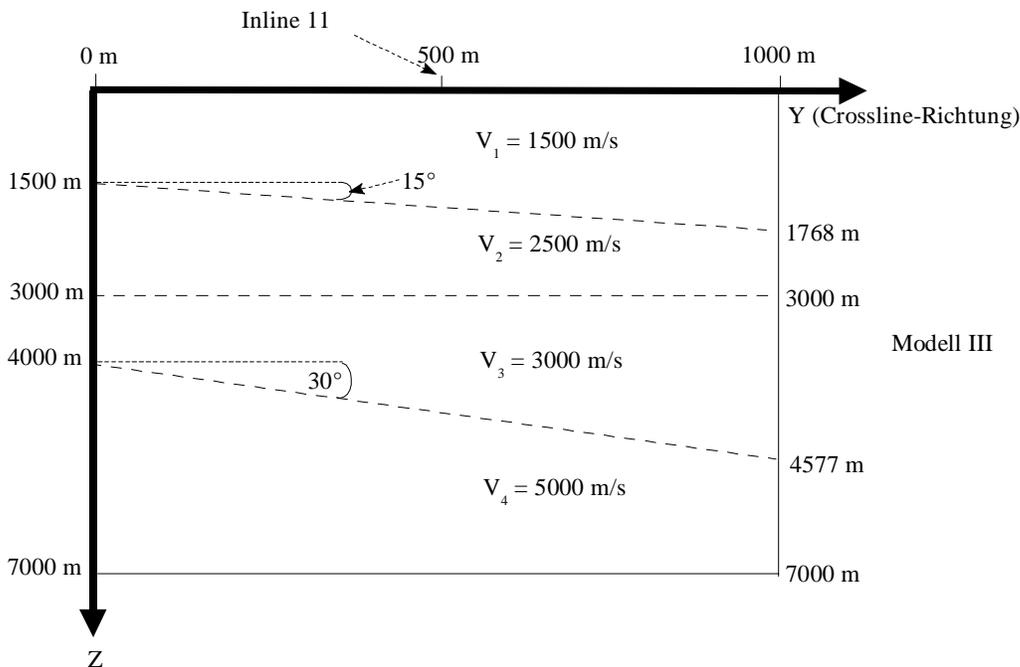


Abb. 5.33: Schnitt entlang der Crossline-Richtung für das getestete 3D-Modell VI. Die Geschwindigkeiten variieren lateral nur in Crossline-Richtung $v = v(y, z)$.

Die Ergebnisse zeigen, daß beim Auftreten von starken lateralen Geschwindigkeitsvariationen (nach Abb. 5.33) dieses Modellversuches VI in Crossline-Richtung keines der hier behandelten Crossline-Migrationsverfahren in der Lage ist, die richtigen Ergebnisse zu erzeugen.

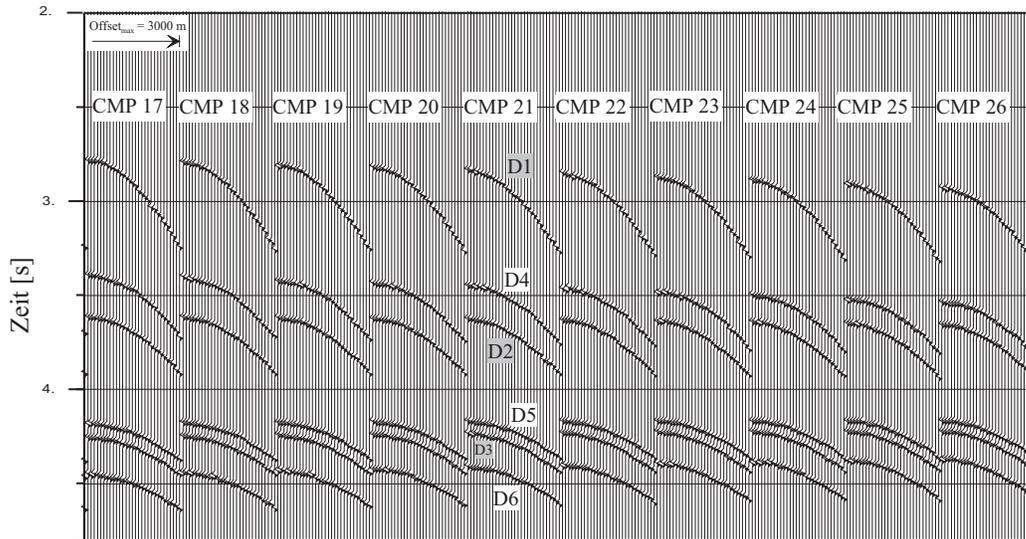


Abb. 5.34 a: 10 CMP-Gather des 3D-Prestack-Inputdatensatzes aus Modellbeispiel VI mit $v(y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die Reflexionsereignisse D1, D2 und D3 sind 2D-Effekte für diese Inline 11. Alle anderen sind Seiteneffekte. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 100$ m.

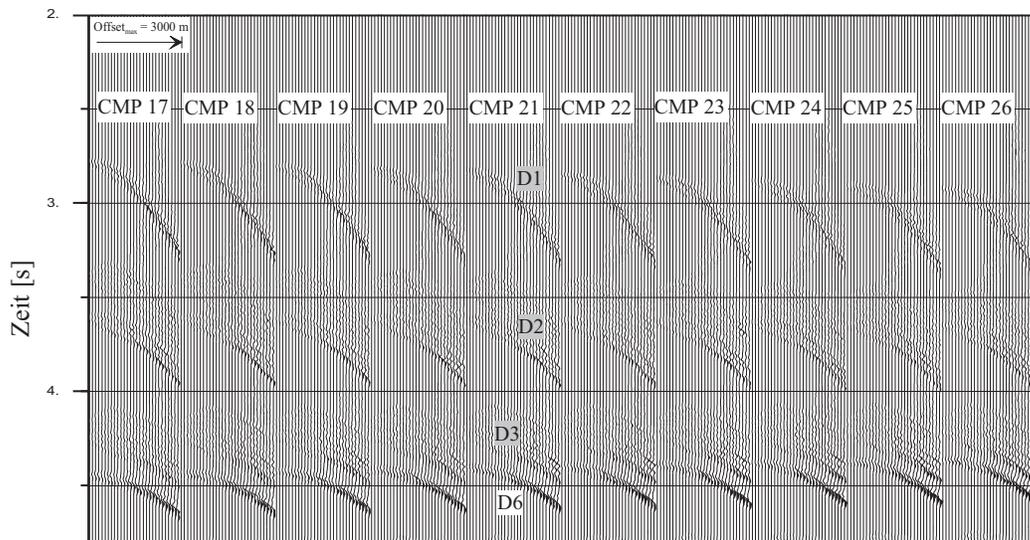


Abb. 5.34 b: Ergebnis des CMMO-Prozesses Modellbeispiel VI mit $v(y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Die 2D-Informationen können nur sehr ungenau abgebildet werden. Die Seiteneffekte konnten nur unvollkommen oder gar nicht (z.B. D6) eliminiert werden. Der Verfahrensnöise hat stark zugenommen.

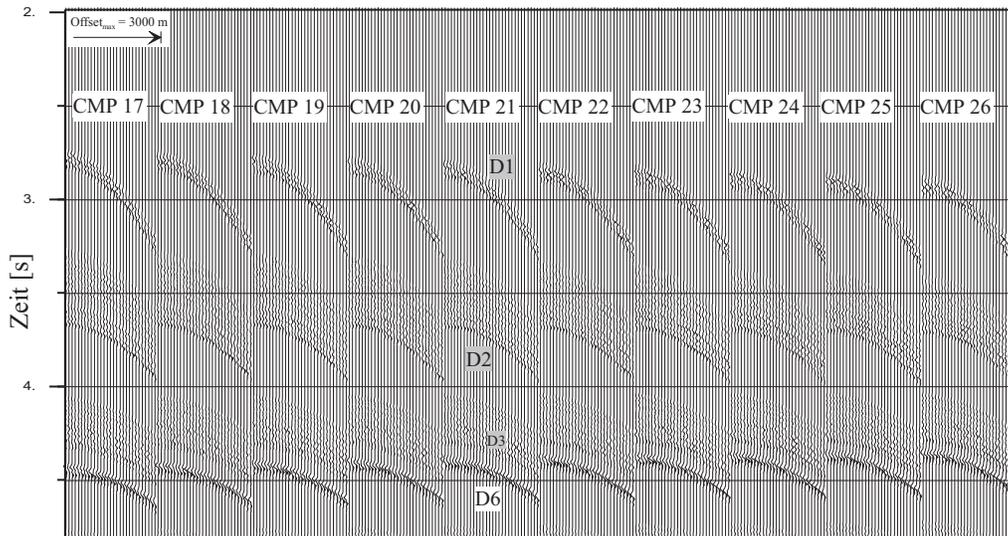


Abb. 5.34 c: Ergebnis des CMSO-Prozesses (eigenes Programm) aus Modellbeispiel VI mit $v(y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Ebenso wie beim CMMO-Verfahren konnten die 2D-Informationen nur sehr ungenau abgebildet werden. Die Seiteneffekte konnten nur unvollkommen oder gar nicht (z.B. D6) eliminiert werden. Der Prozessingnoise hat stark zugenommen.

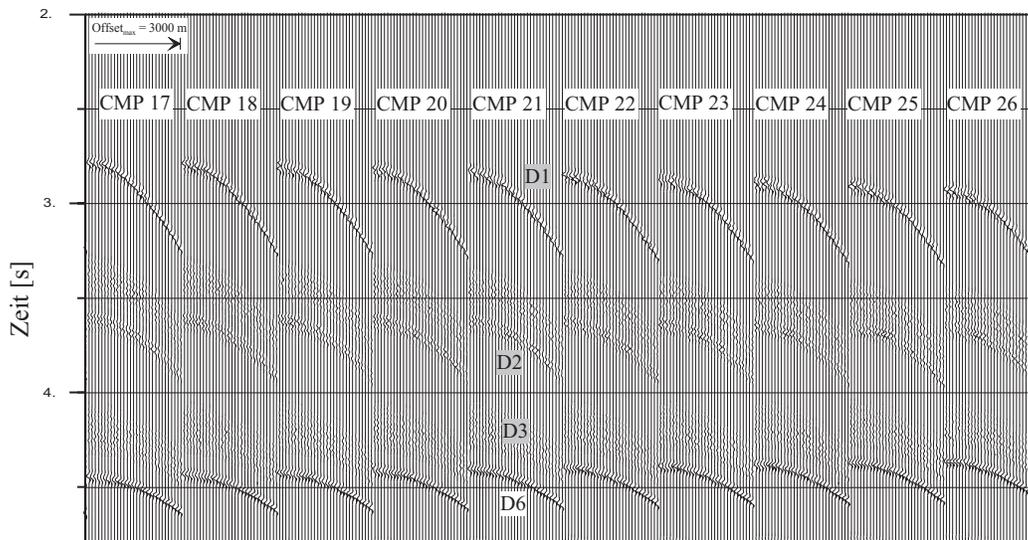


Abb. 5.34 d: Ergebnis des CMSO-Prozesses (Sirius Programm) aus Modellbeispiel VI mit $v(y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell. Auch hier konnten die 2D-Informationen nur sehr ungenau abgebildet werden. Die Seiteneffekte konnten nur unvollkommen oder gar nicht (z.B. D6) eliminiert werden. Es ist starker Prozessingnoise zu erkennen.

In diesem Modellbeispiel waren die lateralen Geschwindigkeitsänderungen in y- (Crossline-) Richtung zu stark. Deshalb soll die Frage geklärt werden, ob bei „geringeren“ lateralen Geschwindigkeitsvariationen in y-Richtung die Crossline-Verfahren noch zulässige Ergebnisse liefern können. Um diese Frage beantworten zu können, wurden 3 weitere Modellversuche (Modell VII bis IX) gerechnet. Ausgangsmodell hierfür war ein Modell entsprechend den Tab. 5.7 und Tab. 5.8. Dazu wird zusätzlich das oben gezeigte 3D-Geschwindigkeitsmodell $v(x, z)$ des Modellbeispiels V (Abb. 5.31) betrachtet: Dieses Geschwindigkeitsmodell wurde für die folgenden drei neu durchgeführten Modellversuche zusätzlich so verändert, daß auch in y-Richtung unterschiedlich starke laterale Geschwindigkeitsvariationen auftraten. Es wurden dafür drei verschiedene Geschwindigkeitsmodelle $v(x, y, z)$ mit vertikaler und lateraler Variation in y- und x-Richtung vorgegeben. Die lateralen Geschwindigkeitsänderungen in y-Richtung wurden in diesen Modellen von einem Geschwindigkeitsmodell zum anderen in ihrer Intensität abgeschwächt. Hintergrund für die Wahl von schwächer werdenden lateralen Geschwindigkeitsvariationen in Crossline-Richtung ist dabei gewesen, daß reale 3D-seismische Daten möglichst so aufgenommen werden sollten, daß die Inline-Richtung senkrecht zur Streichrichtung der vorherrschenden Geologie im Untergrund verläuft. In Crossline-Richtung sind dann in solchen Fällen weniger starke laterale Geschwindigkeitsvariationen zu erwarten. Um unterschiedlich starke laterale Geschwindigkeitsvariationen in y-Richtung zu erhalten, wurden für diese drei Geschwindigkeitsmodelle deshalb zusätzlich zu den Geschwindigkeitsvariationen entlang der Inline-Richtung (Abb. 5.31) in Crossline-Richtung Geschwindigkeitsschichten erzeugt, die für das erste Geschwindigkeitsmodell $v(x, y, z)$ um 10° (vgl. Abb. 5.35), für das zweite um 5° und das dritte um 2° geneigt waren. Die zugehörigen Intensitäten dieser lateralen Geschwindigkeitsvariationen in y-Richtung werden im folgenden mit „stark“ (10°), „mittel“ (5°) und „gering“ (2°) beschrieben. Mit diesen 3 Geschwindigkeitsmodellen wurden 3 neue Modelle VII, VIII und IX erzeugt.

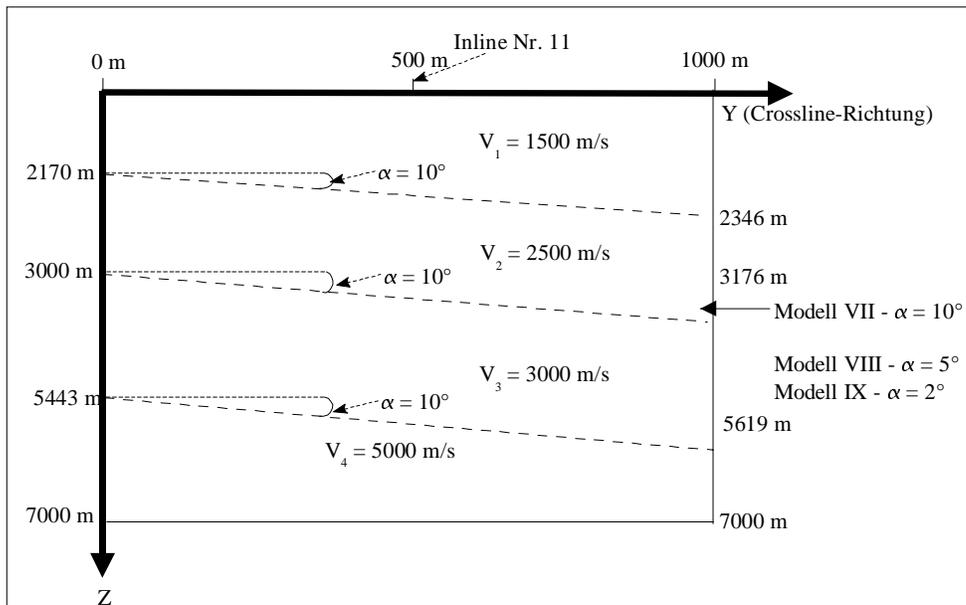


Abb. 5.35: 2D-Tiefenschnitt entlang der Crossline-Richtung an der CMPx-Position = 2500 m (vgl. Abb. 5.31) für das Modellbeispiel VII mit einer Geschwindigkeitsverteilung $v = v(x, y, z)$. Die „Geschwindigkeitsschichten“ sind bei diesem Modell VII in Crossline-Richtung um 10° geneigt.

Die Ergebnisse der Crossline-Migrationen auf diese drei Modelle sind in den Abb. 5.36 - 5.38 dargestellt. Für den CMSO-Prozeß wurden jeweils das korrekte bekannte 3D-RMS-Geschwindigkeitsfeld berücksichtigt. Beide Crossline-Migrationsverfahren zeigen in allen Beispielen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die verschiedenen $v(x, y, z)$ -Modelle ähnliche Resultate:

- Bei starken lateralen Geschwindigkeitsvariationen $v(x, y = \text{„stark“}, z)$ nach Modell VII in Crossline-Richtung können beide Verfahren nicht die richtigen Ergebnisse liefern (Abb. 5.36 a - d). Es konnten weder die 2D-Reflexionen befriedigend abgebildet werden, noch konnten die 3D-Effekte entfernt werden. Starker Processingnoise überlagert die Ergebnisse. Die hier gefundenen Ergebnisse entsprechen denen der Abb. 5.34 a - d, bei denen das Modellbeispiel VI mit einer Geschwindigkeitsverteilung $v(y, z)$ gerechnet wurde.
- Bei mittleren lateralen Geschwindigkeitsvariationen $v(x, y = \text{„mittel“}, z)$ (Modell VIII) in y-Richtung sehen die Crossline-Migrationsergebnisse deutlich besser aus (Abb. 5.37 a - d). Die richtigen 2D-Reflexionen sind erhalten geblieben. Die Seitenreflexionen konnten jedoch nur zum Teil (z.B. D6) ausgelöscht werden.
- Bei geringen lateralen Geschwindigkeitsvariationen $v(x, y = \text{„gering“}, z)$ nach Modell IX in y- Richtung (Abb. 5.38 a - d), zeigen die Crossline-migrierten CMP-Gather die besten Ergebnisse der getesteten 3 Modellbeispiele $v(x, y, z)$. Sämtliche 2D-Ereignisse konnten gut abgebildet werden. Die 3D-Effekte konnten dagegen fast vollständig eliminiert werden.

Als Ergebnis dieser letzten drei Untersuchungen mit einem Geschwindigkeitsmodell $v(x, y = \text{variabel}, z)$ kann deshalb festgehalten werden, daß die Crossline-Migrationsverfahren nur bei geringen lateralen Geschwindigkeitsänderungen in Crossline-Richtung effizient eingesetzt werden können, damit 2D-Effekte noch richtig abgebildet und 3D-Effekte eliminiert werden können. Mit zunehmender lateraler Geschwindigkeitsvariation in y-(Crossline-) Richtung können 3D-Seiteneffekte nicht mehr eliminiert werden und auch 2D-Ereignisse werden in zunehmendem Maße nicht mehr richtig abgebildet. Der Processingnoise wird immer stärker zunehmen. Treten mittlere bis starke laterale Geschwindigkeitsvariationen in y-(Crossline-) Richtung auf, so kann deshalb eine 3D-Prestack-Migration (Two Pass) nur ungenügende und falsche Ergebnisse liefern.

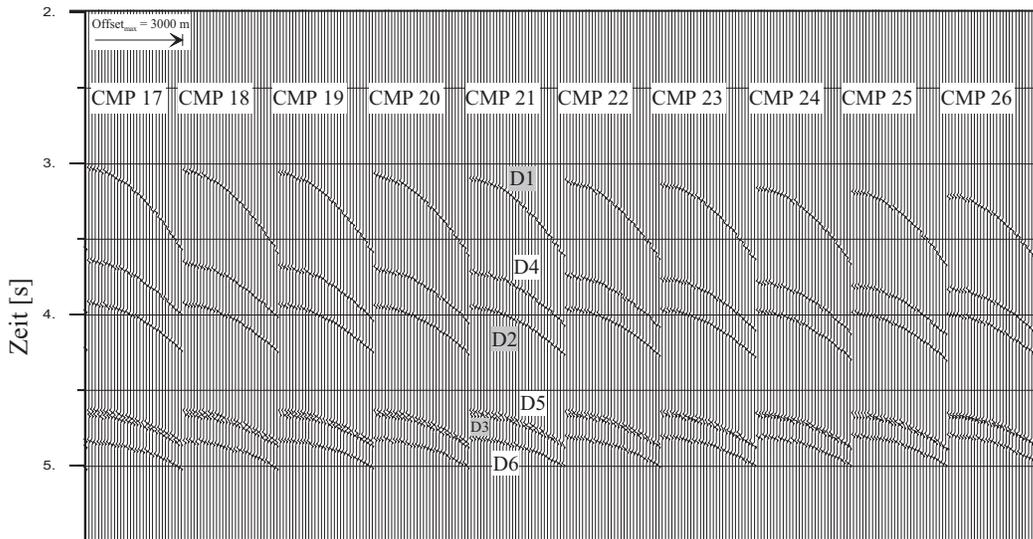


Abb. 5.36 a: 10 CMP-Gather des 3D-Prestack-Inputdatensatzes aus Modellbeispiel VII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "starker" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die Reflexionsereignisse D1, D2 und D3 sind 2D-Effekte. Alle anderen sind Seiteneffekte. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 100$ m.

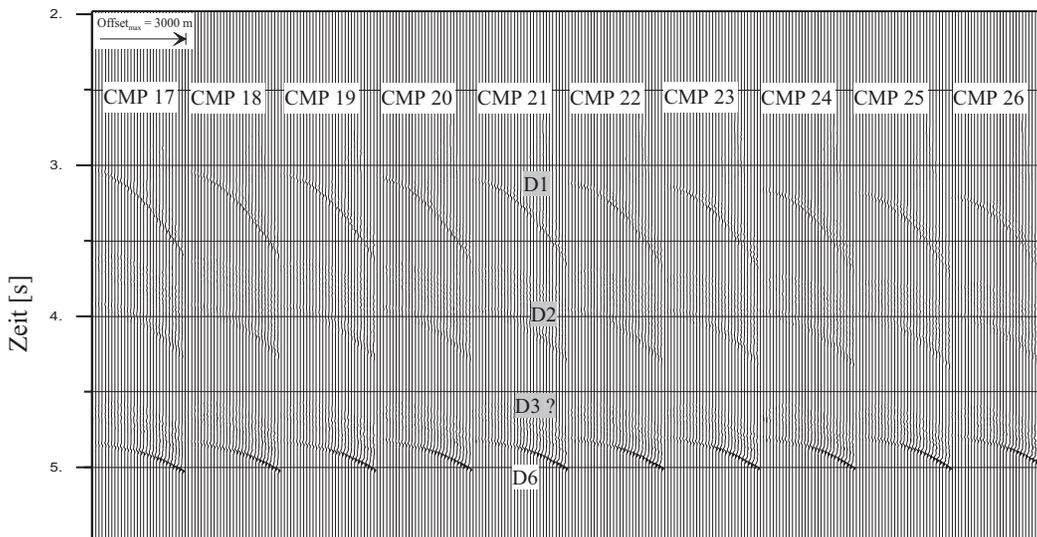


Abb. 5.36 b: Ergebnis des CMMO-Prozesses aus Modellbeispiel VII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "starker" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten nur sehr schlecht abgebildet werden (z.B. D3?). Die Seiteneffekte sind z.T. vollkommen erhalten geblieben (z.B. D6).

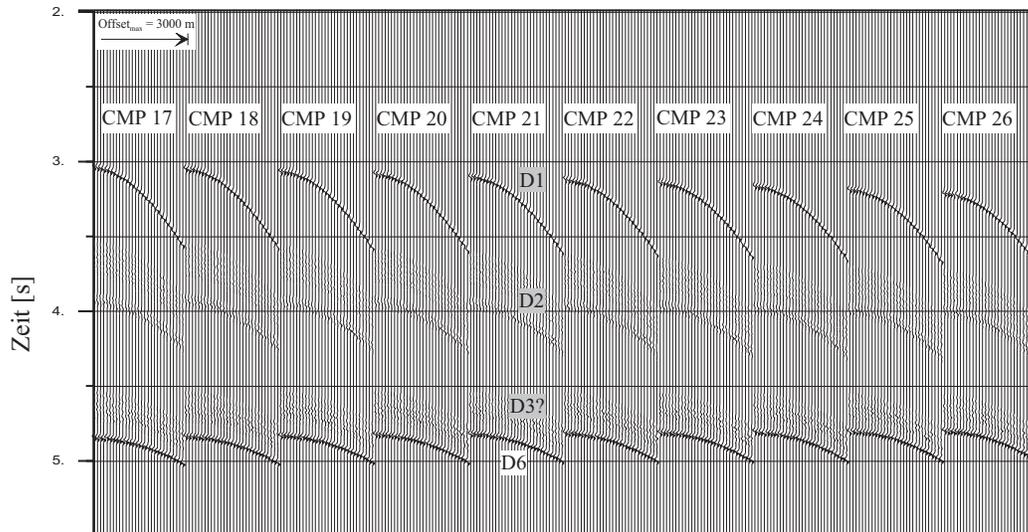


Abb. 5.36 c: Ergebnis des CMSO-Prozesses (eigenes Programm) aus Modellbeispiel VII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "starker" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten nur sehr schlecht abgebildet werden (z.B. D3). Die Seiteneffekte sind z.T. vollkommen erhalten geblieben (z.B. D6). Die Ergebnisse sind mit denen des CMMO-Beispiels in Abb. 5.36 b vergleichbar.

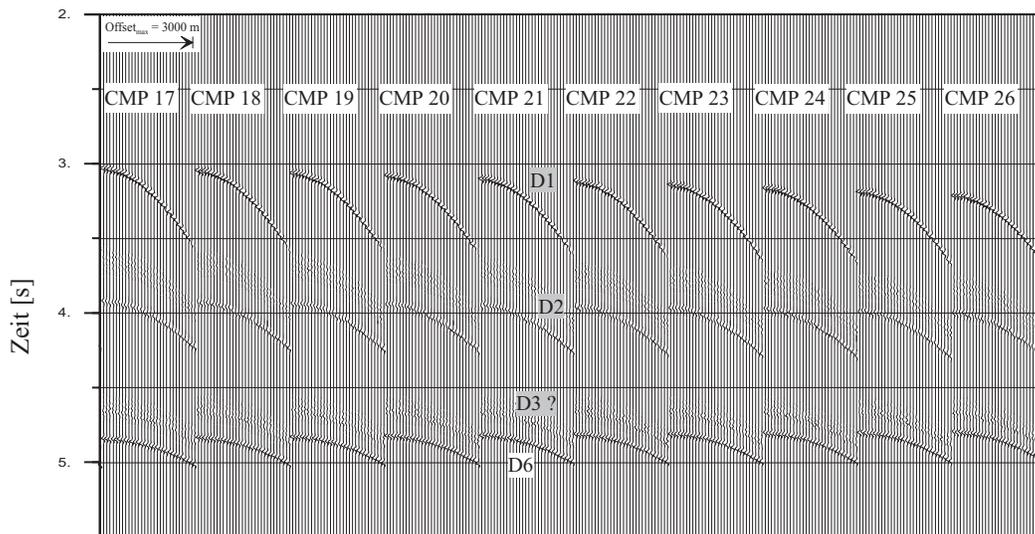


Abb. 5.36 d: Ergebnis des CMSO-Prozesses (Sirius-Programm) aus Modellbeispiel VII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "starker" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten nur sehr schlecht abgebildet werden (z.B. D3). Die Seiteneffekte sind z.T. vollkommen erhalten geblieben (z.B. D6). Die Ergebnisse sind mit denen der Abb. 5.36 b und c vergleichbar.

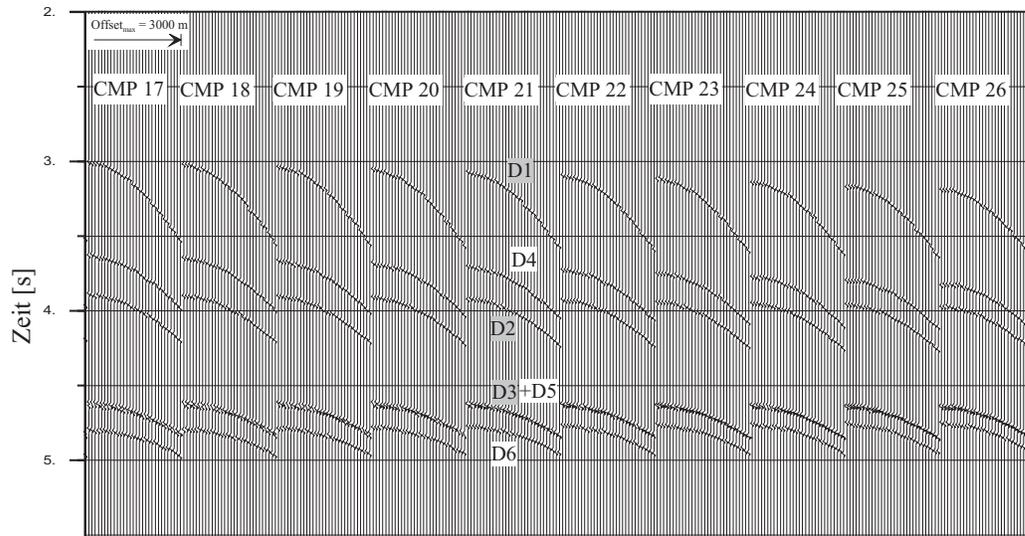


Abb. 5.37 a: 10 CMP-Gather des 3D-Prestack-Inputdatensatzes aus Modellbeispiel VIII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "mittlerer" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die Reflexionsereignisse D1, D2 und D3 sind 2D-Effekte. Alle anderen sind Seiteneffekte. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 100$ m.

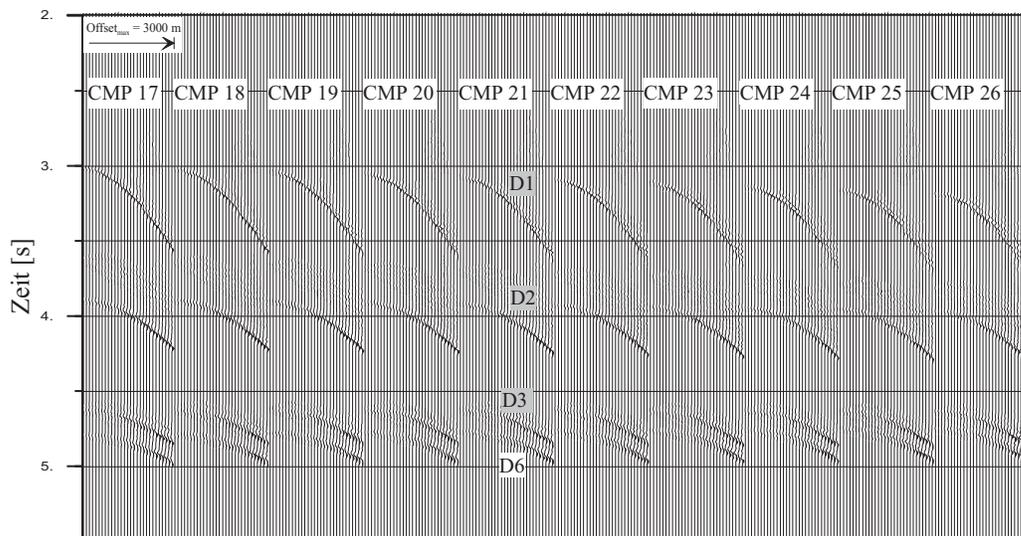


Abb. 5.37 b: Ergebnis des CMMO-Prozesses aus Modellbeispiel VIII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "mittlerer" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten besser abgebildet (z.B. D3) als in Abb. 5.36 b. Die Seiteneffekte wurden besser eliminiert als in Abb. 5.36 b (z.B. D6).

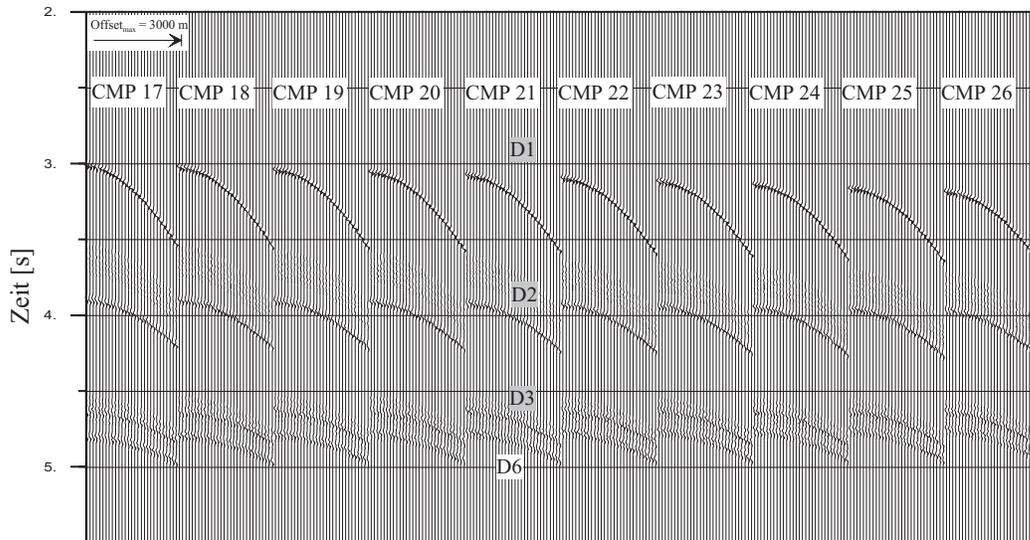


Abb. 5.37 c: Ergebnis des CMSO-Prozesses (eigenes Programm) aus Modellbeispiel VIII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "mittlerer" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten ebenso wie im CMMO-Beispiel (Abb. 5.37 b) besser abgebildet (vgl. Abb. 5.36 c). Die Seiteneffekte wurden auch besser eliminiert als in Abb. 5.36 c (z.B. D6).

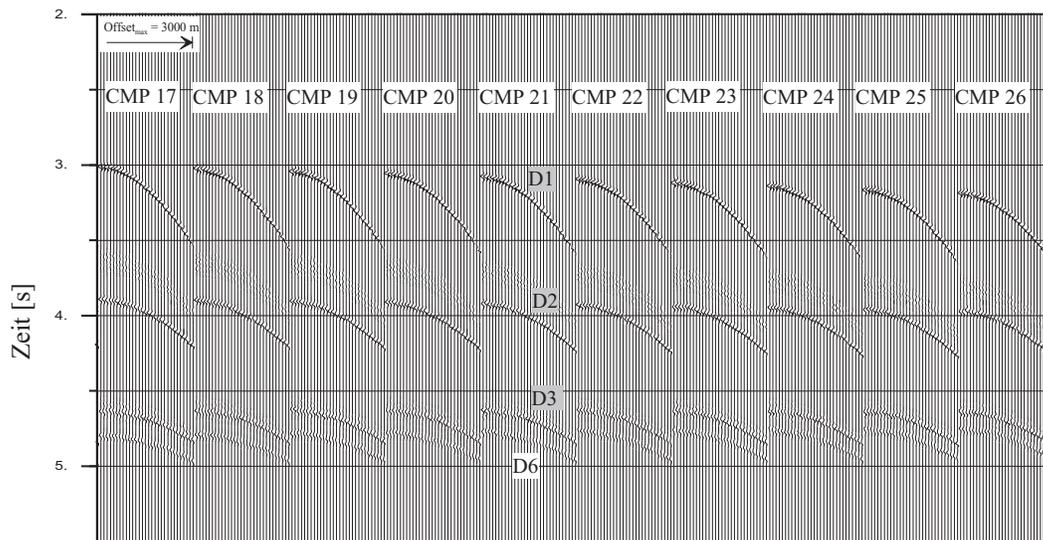


Abb. 5.37 d: Ergebnis des CMSO-Prozesses (Sirius-Programm) aus Modellbeispiel VIII mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "mittlerer" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y - (Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten besser abgebildet (vgl. Abb. 5.36 d). Die Seiteneffekte wurden stärker eliminiert als in Abb. 5.36 d (z.B. D6).

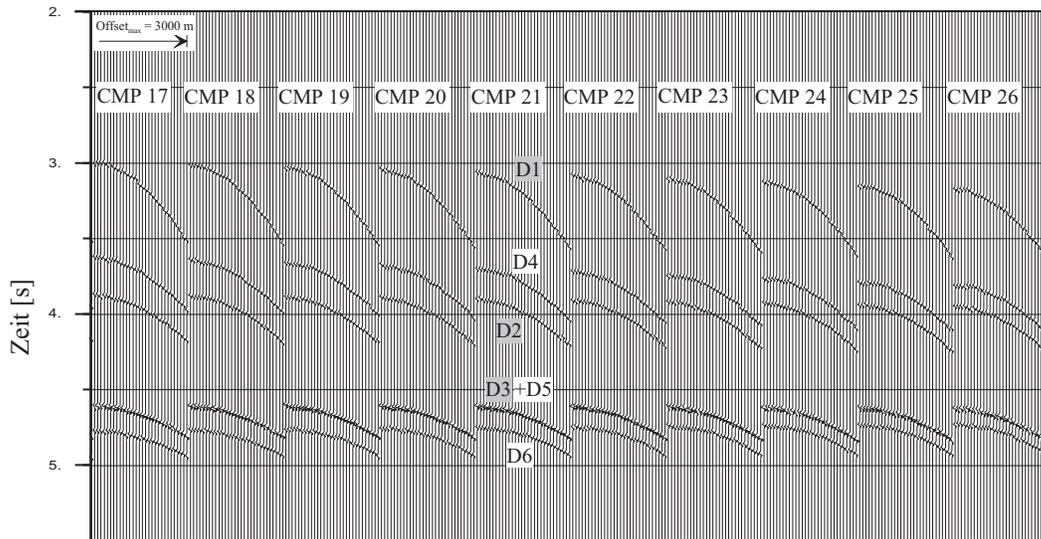


Abb. 5.38 a: 10 CMP-Gather des 3D-Prestack-Inputdatensatzes aus Modellbeispiel IX mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "schwacher" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y -(Crossline-Richtung). Die Reflexionsereignisse D1, D2 und D3 sind 2D-Effekte. Alle anderen sind Seiteneffekte. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Inkrement $\Delta h = 100$ m.

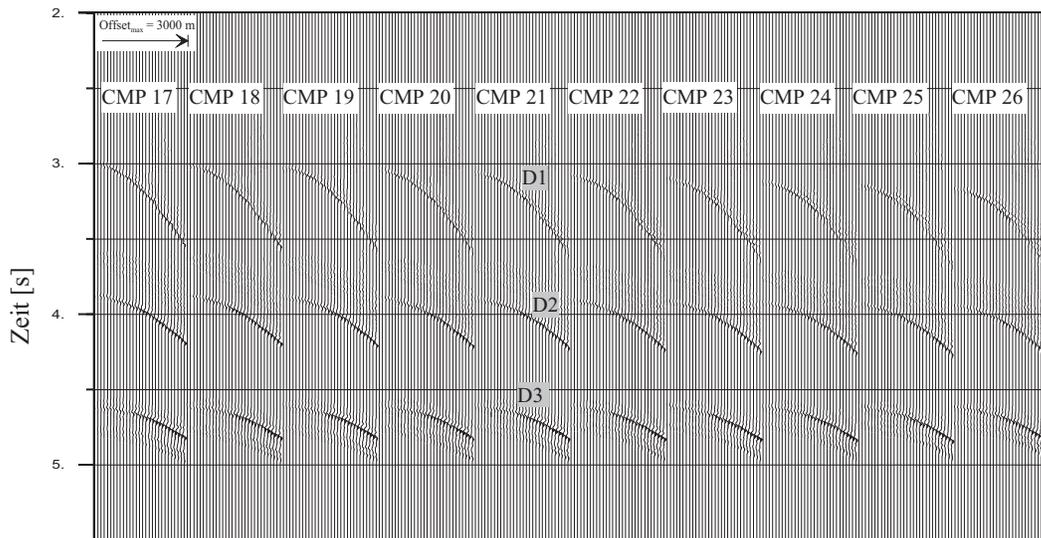


Abb. 5.38 b: Ergebnis des CMMO-Prozesses aus Modellbeispiel IX mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "schwacher" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y -(Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten gut abgebildet werden (vgl. Abb. 5.36 b und 5.37 b). Die 3D-Seiteneffekte konnten fast vollständig eliminiert werden.

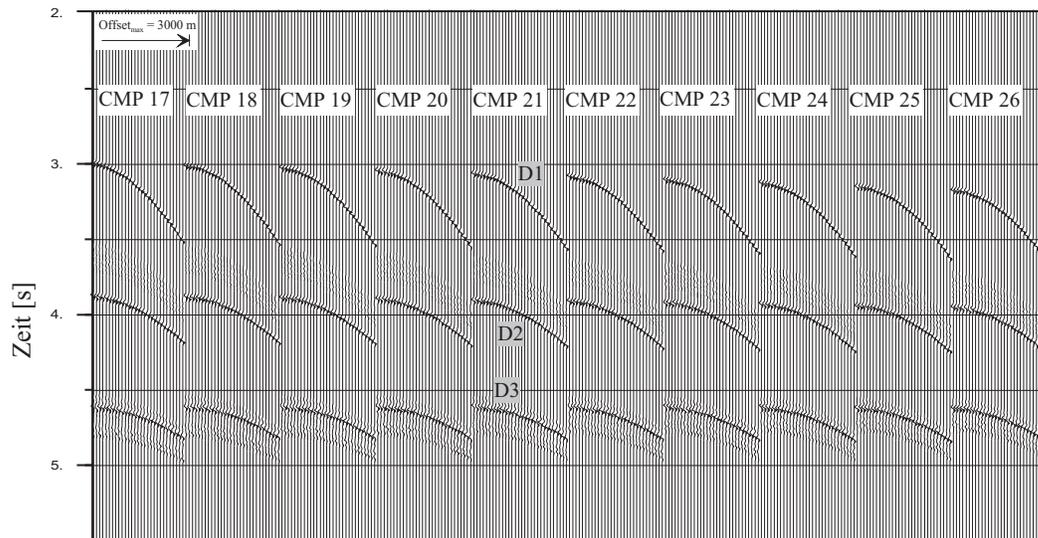


Abb. 5.38 c: Ergebnis des CMSO-Prozesses (eigenes Programm) aus Modellbeispiel IX mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "schwacher" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y-(Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten gut abgebildet werden (vgl. Abb. 5.36 c und 5.37 c). Die 3D-Seiteneffekte konnten wesentlich besser eliminiert werden.

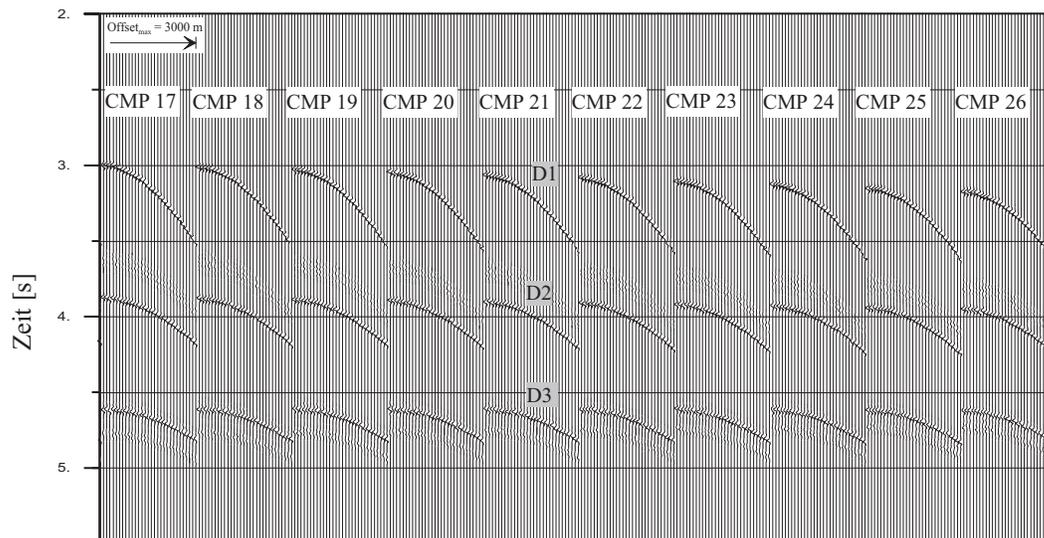


Abb. 5.38 d: Ergebnis des CMSO-Prozesses (Sirius-Programm) aus Modellbeispiel IX mit $v(x, y, z)$ -Geschwindigkeitsmodell und "schwacher" lateraler Geschwindigkeitsvariation in y-(Crossline-Richtung). Die 2D-Informationen konnten gut abgebildet werden (vgl. Abb. 5.36 d und 5.37 d). Die 3D-Seiteneffekte konnten wesentlich besser eliminiert werden.

Am Schluß werden sämtliche Ergebnisse aus den Unterkapiteln des Kap. 5 zusammengefaßt:

<i>Thema</i>	<i>CMSO-Methode</i>	<i>CMMO-Methode</i>
Allgemeine Merkmale:	<ul style="list-style-type: none"> ● Liefert crossline-migrierte 2D-Prestack-Daten ohne Seiteneffekte. ● Einspuroffsetprozeß: Ein 3D-Inputsampl liefert ein 2D-Outputsampl. ● Benötigt zur Durchführung ein 3D-RMS-Feld. ● Produziert wenig Verfahrensnoise. ● Sehr schnelles Verfahren. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Liefert crossline-migrierte 2D-DMO-Daten ohne Seiteneffekte. ● Mehrspuroffsetprozeß: Ein 3D-Inputsampl liefert mehrere 2D-Outputsamples mit unterschiedlichen Offsets ● Geschwindigkeitsfeld nicht notwendig. ● Produziert mehr Verfahrensnoise als der CMSO-Prozeß. ● Im Vergleich zum CMSO-Prozeß ca. 20 mal langsamer.
Einflußnahme von unterschiedlichen Azimutalverteilungen in den 3D-S-E-Aufstellungen auf die Ergebnisse der Crossline-Migration:	Zunehmende Beschränkung des maximalen Offsetbereiches in 2D-Ergebnissen gegenüber maximalem Offsetbereich in den 3D-Inputdaten wird um so stärker, je größer der Azimutalwinkel gegenüber der Inline-Richtung variiert.	Es zeigen sich keine sichtbaren Einflüsse auf die Ergebnisse.
Fehlen bestimmter Offsetbereiche in den 3D-Prestack-Inputdaten auf das Ergebnis der Crossline-Migration:	Fehlende Offsetbereiche können nur schwach oder gar nicht wiederhergestellt werden.	Fehlende Offsetbereiche können fast vollständig wiederhergestellt werden.
Auftreten von räumlichen Aliasingeffekten in crossline-migrierten 2D-Daten:	<p>Effekte bei crossline-migrierten Daten:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Signalzerstörung. ● Produktion von kohärentem Noise. ● Auftreten von „Streifenmustern“. <p>Räumliche Aliasingeffekte treten besonders für geringe Tiefen und kleine Geschwindigkeiten auf.</p> <p>Mögliche Maßnahmen zur Vermeidung / Minderung von räumlichen Aliasingeffekten:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Einschränken der maximalen Größe des Crossline-Migrationsoperators. 	Siehe CMSO-Verfahren.

<i>Thema</i>	<i>CMSO-Methode</i>	<i>CMMO-Methode</i>
	<ul style="list-style-type: none"> ● Reduzierung der maximalen Frequenz der 3D-Inputdaten. ● Abstand benachbarter Inlines in gemessenen 3D-Daten sollte möglichst gering sein. Sind die Inlineabstände zu groß, so können unter gewissen Voraussetzungen durch eine Interpolation neuer Inlines die Aliasingeffekte gemindert werden. Allerdings steigt dadurch das 3D-Prestack-Datenvolumen und die Rechenzeiten für die Crossline-Migration stark an. 	Siehe CMSO-Verfahren.
Anforderungen an die Genauigkeiten des 3D-RMS-Feldes beim CMSO-Prozeß:	<p>Zu kleine RMS-Geschwindigkeiten bewirken, daß 3D-Seiteneffekte nicht mehr eliminiert werden können.</p> <p>Zu große RMS-Geschwindigkeiten (z.B. $\leq 1.1 v_{RMS}$) zeigen keine sichtbaren nachteiligen Auswirkungen hinsichtlich der Eliminierung von Seiteneffekten. Allerdings werden räumliche Aliasingeffekte leicht verstärkt.</p> <p>Fazit: Im Zweifelsfalle sollten etwas zu große RMS-Geschwindigkeiten gewählt werden, um Seiteneffekte sicher beseitigen zu können.</p>	Entfällt, da der CMMO-Prozeß keine Geschwindigkeitsinformationen benötigt.
Einsatzmöglichkeiten der Crossline-Migrationsverfahren im Fall von nicht-konstanten Geschwindigkeiten: <ul style="list-style-type: none"> ● Vertikale Geschwindigkeitsvariationen: $v(z)$-Fall. ● Laterale und vertikale Geschwindigkeitsvariationen in Inline-Richtung: $v(x,z)$-Fall. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Verfahren liefert in allen durchgeführten Versuchen richtige Ergebnisse. ● Verfahren liefert auch bei „starken“ lateralen Geschwindigkeitsvariationen in allen durchgeführten Versuchen richtige Ergebnisse. 	Es konnten keine methodisch bedingten Unterschiede hinsichtlich der Einsatzfähigkeit im nicht-konstanten Geschwindigkeitsfall zum CMSO-Prozeß gefunden werden. Deshalb: siehe CMSO-Prozeß.

<i>Thema</i>	<i>CMSO-Methode</i>	<i>CMMO-Methode</i>
<ul style="list-style-type: none"> ● Laterale und vertikale Geschwindigkeitsvariationen in Crossline-Richtung: $v(y,z)$- Fall bzw. $v(x, y, z)$- Fall. 	<ul style="list-style-type: none"> ● „Starke“ laterale Geschwindigkeitsvariationen: Verfahren liefert falsche Ergebnisse. Es können weder 3D-Effekte eliminiert noch 2D-Ereignisse richtig abgebildet werden. ● „Mittlere“ laterale Geschwindigkeitsvariationen: in bestimmten Fällen könnte der Einsatz möglich sein ; Verfahren sollte auf Eignung getestet werden. ● „Geringe“ laterale Geschwindigkeitsvariationen: Verfahren kann richtige Ergebnisse liefern. 	

Tab. 5.9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Kap. 5.

6 Anwenden der Crossline-Migrationsverfahren auf die Inline eines realen 3D-Prestack-Datensatzes

Die Anwendung des CMSO-Prozesses und des CMMO-Prozesses auf einen realen 3D-Prestack-Datensatz ist Gegenstand des Kap. 6. Bei dem realen 3D-Datensatz handelt es sich um 3D-Daten, die ein Meßgebiet von ca. 15 km (Crossline-Richtung) x 30 km (Inline-Richtung) überdecken. Er wurde am aktiven Kontinentalrand vor Costa Rica aufgenommen und besteht aus 154 Inlines mit einem Abstand von 100 m zueinander. Eine dieser Inlines wurde ausgewählt und jeweils mit dem CMMO-Verfahren bzw. CMSO-Verfahren crossline-migriert. Eine genauere Beschreibung des 3D-Prestack-Datensatzes erfolgt in Kap. 7, wo die Ergebnisse eines 3D-Prestack-Migrations-Verfahrens (Two Pass) vorgestellt werden. Ziel dieses Kap. 6 ist es, die unterschiedlichen Ergebnisse der Crossline-Migrationen mit dem CMMO- und CMSO-Verfahren im praktischen Einsatz auf reale Daten zu testen und miteinander zu vergleichen. Auf der Grundlage dieses Vergleiches und der bisher durchgeführten synthetischen Versuchsergebnisse werden die Vor- und Nachteile der beiden Verfahren zur Bearbeitung eines realen 3D-Datensatzes weiter untersucht, bestätigt und schließlich zusammengefaßt dargestellt. Dabei wird eine Entscheidung darüber getroffen werden, welches der beiden Verfahren für die Crossline-Migration des 3D-Costa Rica-Datensatzes in Kap. 7 verwendet werden sollte.

Durchführung der Crossline-Migrationen mit dem CMMO- bzw. CMSO-Prozeß:

Der CMSO-Prozeß wurde im folgenden ausschließlich mit dem Sirius-3D-Programmpaket durchgeführt. Der CMMO-Prozeß wurde mit dem eigenen CMMO-Programm gerechnet. Zur Durchführung des CMSO-Prozesses stand ein genaues 3D-RMS-Feld I zur Verfügung (Kap. 7).

Die 3D-Prestack-Daten der ausgewählten Inline 199 (Abb. 6.1 a) wurden auf einer Länge von 15 km mit dem CMMO-Verfahren bzw. CMSO-Verfahren crossline-migriert. Die 3D-Prestack Daten entlang dieser Inline lagen in CMP-Gathern mit einem Inkrement von 25 m vor. Jeder CMP wurde im allgemeinen von 30 Spuren mit einem maximalem Offset von ca. 3000 m überdeckt.

Die Migrationsparameter zur Durchführung des CMSO- bzw. des CMMO-Prozesses wurden für beide Verfahren einheitlich gewählt, damit anschließend ein optimaler Vergleich beider Ergebnisse möglich war:

Die maximale Crossline- Migrationsapertur wurde mit 3200 m gewählt (vgl. Abb. 6.1 a und 6.1 b). Die crossline-migrierten CMP-Gather der Inline 199 besaßen jeweils 30 Spuren mit einem minimalem Offset von 100 m und einem maximalen Offset von 3000 m bei einem konstanten Inkrement des Offsets von $\Delta h = 100$ m. Die Spuren der 3D-Prestack-Inputdaten und der crossline-migrierten 2D-Prestack-Daten lagen entlang seismischer Spuren mit einer maximalen Laufzeit von 8 s und einem Abtastintervall von 4 ms vor. Für die Durchführung der beiden Crossline-Migrationen standen jeweils 3D-Prestack-Daten von insgesamt 33 Inlines zur Verfügung (Abb. 6.1 a). Damit wurde entlang der Crossline-Richtung ein Bereich von 3200 m überdeckt. Der maximal mögliche Migrationswinkel wurde durch den Bereich von 3200 m, in dem der Crossline-

Operator maximal wirken konnte, mit zunehmender Tiefe immer weiter eingeschränkt (Abb. 6.1 b). Dadurch werden räumliche Aliasing-Effekte für größere Tiefen stärker unterdrückt als für kleinere Tiefen (vgl. Kap. 5.1.2).

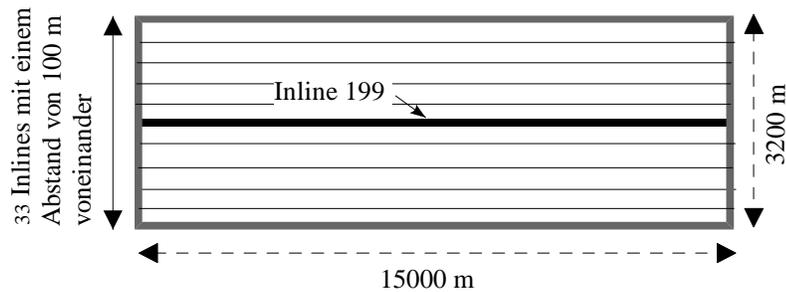


Abb. 6.1 a: Die Inline 199 des realen Costa-Rica-Datensatzes wurde in einem Bereich von 15 km mit dem CMMO- bzw. CMSO-Verfahren crossline-migriert. Die Migrationsapertur betrug dabei 3200 m.

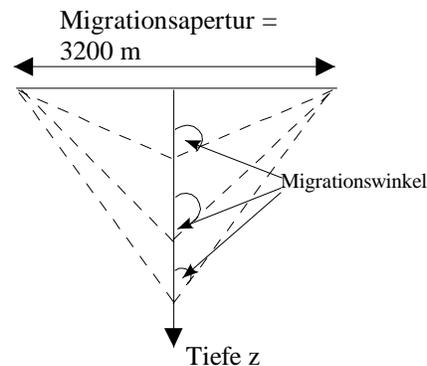


Abb. 6.1 b: Mit zunehmender Tiefe bei konstanter Migrationsapertur werden die Migrationwinkel immer kleiner.

Die Rechenzeiten zur Durchführung des CMSO-Verfahrens mit dem Sirius 3D-Programm lagen bei ca. 12 h (Rechner: Sun sparc ultra 1). Der CMMO-Prozess benötigte dagegen eine sehr viel größere Rechenzeit, die ungefähr um den Faktor 40 größer war (Rechner: Sun sparc ultra 4).

Nach Durchführen der Crossline-Migrationen wurden die Ergebnisse zusätzlich zur besseren Darstellung mit einem zeitabhängigen Bandpaßfilter, einem Amplitudennormierungsprozeß (AGC) und einem FK-Filter (zur Beseitigung der Meeresbodenmultiple) bearbeitet (vgl. Kap. 7). Das Ergebnis von 10 Crossline-migrierten CMSO- bzw. CMMO-Gathern entlang der Inline 199 ist in Abb. 6.2 a und 6.2 b zu sehen. In den CMMO-migrierten Gathern ist deutlich das Abschwächen von Amplituden in kleinen Offsetbereichen zu beobachten. Im Vergleich zum CMSO-Ergebnis sehen die CMMO-prozessierten Daten insbesondere im Bereich kleinerer Laufzeiten deutlich niederfrequenter aus. Die CMMO-Daten zeigen außerdem mehr Noise.

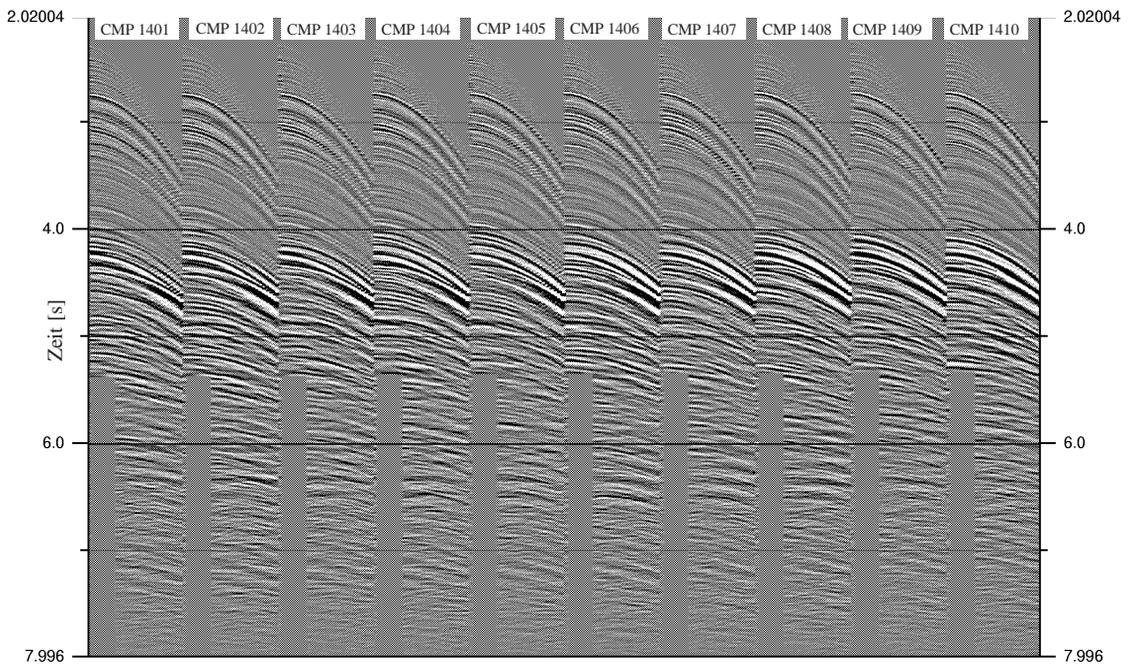


Abb. 6.2 a: Ergebnis der Crossline-Migration (CMSO) auf die Inline 199 des realen Costa Rica-Datensatzes. Dargestellt sind 10 CMP-Gather mit einem maximalen Offset von 3000 m. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Abstand von 100 m.

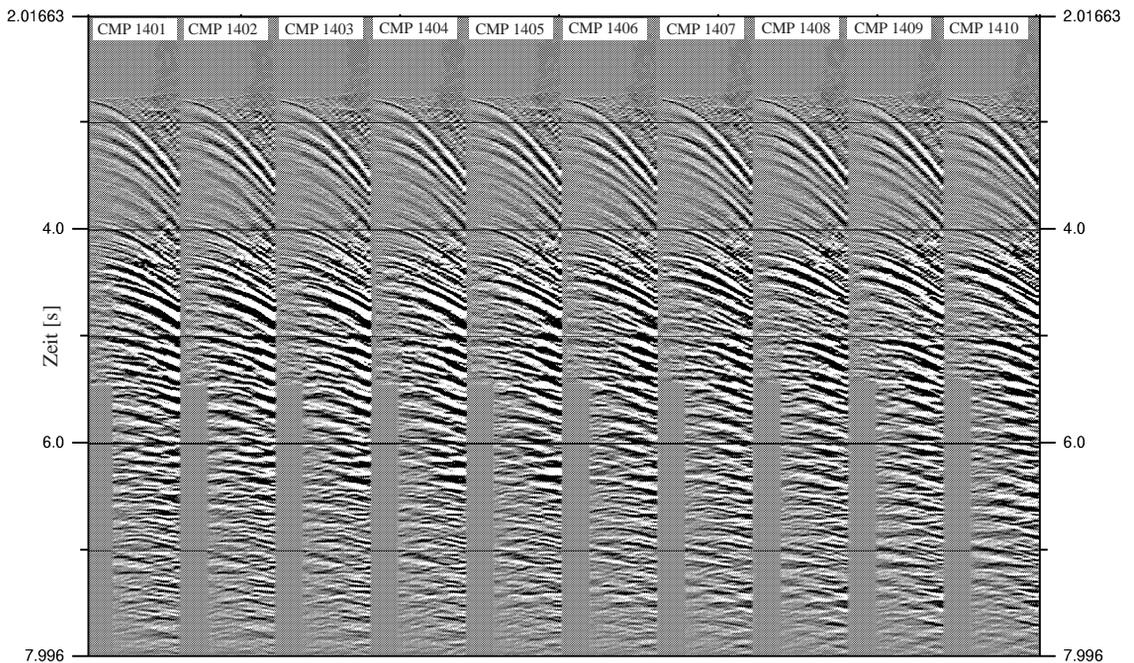


Abb. 6.2 b: Ergebnis der Crossline-Migration (CMMO) auf die Inline 199 des Costa Rica-Datensatzes. Dargestellt sind 10 CMP-Gather mit einem maximalen Offset von 3000 m. Jedes CMP-Gather besteht aus 30 Spuren mit einem Abstand von 100 m.

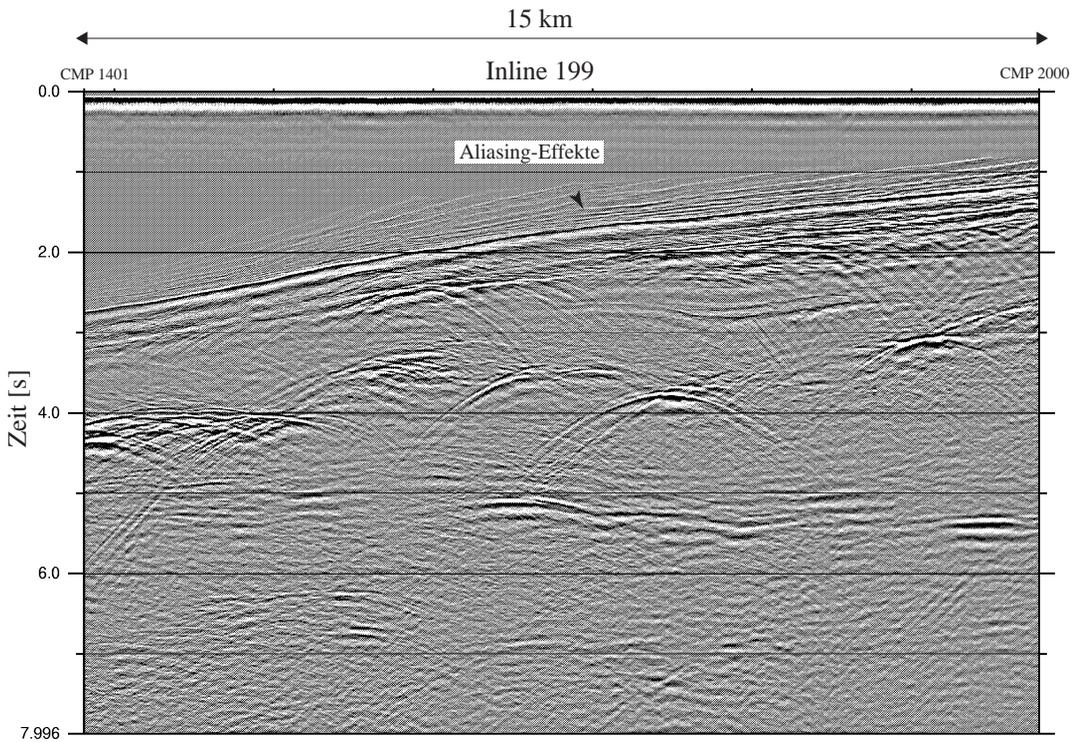


Abb. 6.3 a: Stapelsektion der CMSO-Daten entlang der Inline 199.

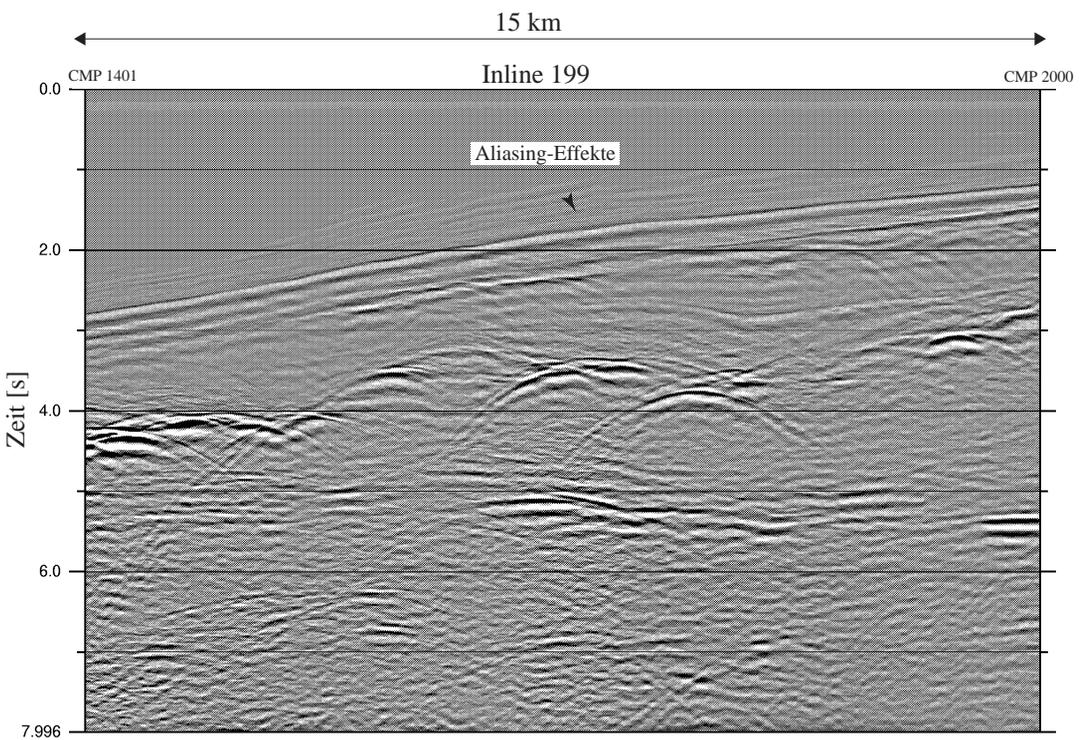


Abb. 6.3 b: Stapelsektion der CMMO-Daten entlang der Inline 199. Die CMMO bearbeiteten Daten sind noch mit einem DMO-Prozeß behaftet.

In den Abb. 6.3 a und 6.3 b ist die Stapelsektion der jeweils crossline-migrierten CMP-Gather entlang der Inline 199 zu sehen. Als Stapelgeschwindigkeiten wurden in beiden Darstellungen die Geschwindigkeiten des 3D-RMS-Modells benutzt, das auch als Eingabe für den CMSO-Prozeß diente. Beide Stapelsektionen zeigen oberhalb des Meeresbodens und in den oberen Sedimentschichten sehr ähnliche Streifenmuster. Diese sind Effekte des räumlichen Aliasings (vgl. Kap. 5.1.2). Auch in diesen Darstellungen sehen die CMMO-bearbeiteten Daten besonders für kleinere Laufzeiten niederfrequenter aus. Insgesamt sind die Stapelergebnisse beider Crossline-Verfahren hinsichtlich evtl. elimierter Seiteneffekte visuell jedoch gut vergleichbar. Beide Verfahren sollten damit gleichermaßen in der Lage sein, 3D-Seiteneffekte von der Inline 199 zu eliminieren. Die CMMO-Daten sind jedoch noch mit einem DMO-Prozeß behaftet (vgl. Abb. 5.14). Um diesen Effekt zu eliminieren, muß zusätzlich ein inverser 2D-DMO-Prozeß auf diese Daten wirken (Kap. 3.2.3). Das Stapelergebnis des inversen 2D-DMO-Prozesses auf die CMMO-Daten der Inline 199 ist in Abb. 6.3 c dargestellt. Wie schon in Kap. 5 gezeigt, produziert der benutzte inverse DMO-Operator zusätzlichen Verfahrennoise. Diese Erscheinung zeigt auch die Abb. 6.3 c. Im Gegensatz zum CMMO-Ergebnis in Abb. 6.3 b ist die Auflösung besonders für kleinere Laufzeitbereiche weiter reduziert worden.

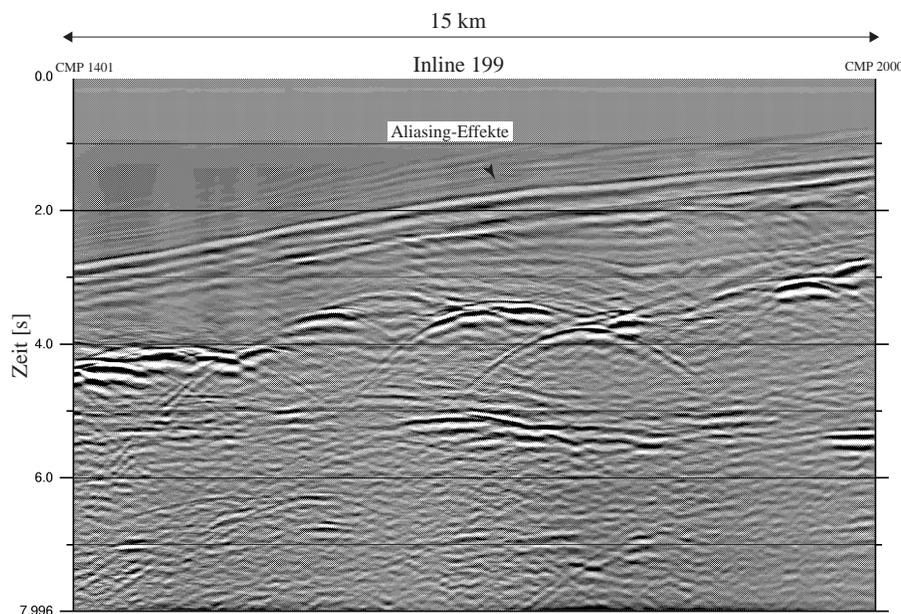


Abb. 6.3 c: Stapelsektion der CMMO-Daten entlang der Inline 199 nach Anwenden des inversen 2D-DMO-Prozesses.

Die bereits in den Kap. 5 und 6 ermittelten Vor- und Nachteile der CMMO- bzw. CMSO-Methode werden im folgenden in Bezug auf die Anwendung auf einen realen Datensatz noch einmal bestätigt und ergänzt:

	CMMO-Verfahren	CMSO-Verfahren
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Benötigt keinerlei Geschwindigkeitsinformationen. ● Kann effizient eingesetzt werden bei großen Variationen in den Schuß-Empfängerabständen und Azimuten (Kap. 5.1.1). ● Verfahren kann auch eingesetzt werden, wenn Geschwindigkeiten mit der Tiefe und / oder lateral in Inline-Richtung variieren (Kap. 5.2.1 und 5.2.2). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Produziert sehr wenig Verfahrensnoise. ● Sehr schnelles Verfahren. ● Verfahren kann auch eingesetzt werden, wenn Geschwindigkeiten mit der Tiefe und / oder lateral in Inline-Richtung variieren (Kap. 5.2.1 und 5.2.2).
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Produziert mehr Verfahrensnoise als CMSO-Prozeß, hauptsächlich bedingt durch DMO-Verfahren (z.B. Kap. 5.1). ● Sehr große Rechenzeiten. ● Sofern 2D-Geschwindigkeitsanalysen (Fokussierungsanalyse) durchgeführt werden sollen, müssen die CMMO-Ergebnisse vom Prinzip her noch mit einem inversen 2D-DMO-Prozeß bearbeitet werden (Abb. 4.2). Dieser produziert zusätzlichen Noise und tiefere Frequenzen. ● Auftreten von räumlichen Aliasing-Effekten z.B. bei einem zu großen Abstand benachbarter Inlines in Crossline-Richtung oder bei zu groß gewähltem Crossline-Migrationsoperator (Kap. 5.1.2). ● Verfahren läßt sich bei starken lateralen Geschwindigkeitsvariationen in Crossline-Richtung nicht mehr korrekt anwenden (Kap. 5.2.3). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Benötigt zur Durchführung ein 3D-RMS-Feld, welches z.B. aus Stapelgeschwindigkeiten abgeleitet werden kann. Sind die Geschwindigkeiten zu gering, so können u.U. 3D-Seiteneffekte nicht mehr eliminiert werden (Kap. 5.1.3). ● Starke Variationen in den Azimuten der 3D-Inputdaten können zur Folge haben, daß in den crossline-migrierten Daten Amplituden von großen Offsetbereichen nicht mehr generiert werden können (Kap. 5.1.1). ● Auftreten von räumlichen Aliasing-Effekten z.B. bei einem zu großen Abstand benachbarter Inlines in Crossline-Richtung oder bei zu groß gewähltem Crossline-Migrationsoperator (Kap. 5.1.2). ● Verfahren läßt sich bei starken lateralen Geschwindigkeitsvariationen in Crossline-Richtung nicht mehr korrekt anwenden (Kap. 5.2.3).

Tab. 6.1: Vor- und Nachteile des CMMO- bzw. CMSO-Prozesses für den praktischen Einsatz im 3D-Fall.

Ausschlaggebend für die endgültige Entscheidung den 3D-Costa Rica-Datensatz mit dem CMSO-Verfahren zu bearbeiten, waren schließlich der deutlich geringere Verfahrensnoise und die Schnelligkeit des CMSO-Prozesses gegenüber dem CMMO-Verfahren. Darüber hinaus stand für die Durchführung des CMSO-Prozesses ein bekanntes zuverlässiges 3D-RMS-Feld I zur Verfügung, das die geforderten Voraussetzungen für eine effiziente Durchführung des CMSO-Prozesses erfüllte (Kap. 7). Auch waren die in Kap. 5.1.1 beschriebenen Probleme, die bei stark variierenden Azimuten beim CMSO-Verfahren auftreten können, in den 3D-Inputdaten nicht gegeben.

Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoll, den Costa Rica-Datensatz vollständig mittels des CMSO-Verfahren zu bearbeiten.

Das bedeutet aber nicht, daß in jedem Fall realer Daten das CMSO-Verfahren angewandt werden sollte. Unter folgenden Voraussetzungen kann der CMMO-Prozeß im Vergleich zur CMSO-Methode eingesetzt werden.

1. Es liegen keine oder nur sehr ungenaue Geschwindigkeitsinformationen vor. Der CMMO-Prozeß benötigt keinerlei Geschwindigkeitsinformationen. Er kann deshalb mit Vorteilen (z.B. kann der CMSO-Prozeß im Fall von zu kleinen Geschwindigkeiten keine 3D-Effekte mehr eliminieren) zur Durchführung einer Crossline-Migration eingesetzt werden.
2. Wenn nur ein oder wenige 2D-Profile crossline-migriert werden sollen. In diesem Fall sind die Rechenzeiten für den CMMO-Prozeß vertretbar.
3. Wenn 2D-DMO-Sektionen gefragt sind. Das trifft z.B. zu, wenn 2D-Poststack-Migrationen durchgeführt werden sollen. In einem solchen Fall werden die Vorteile von DMO-prozessierten Daten beim Stapelprozeß (Kap. 3.1) genutzt und es werden DMO-Daten gestapelt, die frei von 3D-Seiteneffekten sind.
4. Unregelmäßige 3D-Meßkonfigurationen, in denen z.B. Schuß-Empfänger-Azimalwinkel stark variieren oder CMP-Spuren fehlen, sind für den CMSO-Prozeß ungünstig (Kap. 5.1.1). Das CMMO-Verfahren ist in einem solchen Fall dem CMSO-Verfahren überlegen und kann z.B. fehlende CMP-Spuren ersetzen.

7 Anwenden einer 3D-Prestack-Migration (Two Pass) auf einen realen Costa Rica-Datensatz

In diesem letzten Kapitel werden die Ergebnisse einer Two Pass-Migration zur Ableitung eines 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes am Beispiel des realen 3D-Costa Rica-Datensatzes vorgestellt. Zur Durchführung des Two Pass-Verfahrens nach der CMSO-Methode wurde das Sirius-3D-Programmpaket verwendet. Die Durchführung der Two Pass-Migration war Teil eines DFG-Gemeinschaftsprojektes (1999) von GEOMAR, Kiel und BGR, Hannover. Ziel des Projektes war, die vorherrschenden komplizierten geologischen Strukturen innerhalb des 3D-Meßgebietes detailliert und lagerrichtig abzubilden. Dies sollte durch eine 3D-Poststack-Tiefenmigration der gemessenen seismischen 3D-Daten erreicht werden. Das konventionelle 3D-Prozessing bis hin zum 3D-Stack der 3D-Costa Rica-Daten wurde 1993 im Auftrag der BGR von der Firma Geco-Prakla (BGR-Report, 1999) durchgeführt. Mit Hilfe des abgeleiteten 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes, welches im folgenden mit Makrogeschwindigkeitsfeld B bezeichnet wird, war man schließlich in der Lage, eine solche komplette 3D-Tiefenmigration der gestapelten 3D-Costa Rica-Daten durchzuführen. Das Ergebnis dieser 3D-Poststack-Tiefenmigration war schließlich ein genaues Abbild der 3D-Untergrundstrukturen, auf dessen Grundlage eine geologische Interpretation erfolgte. Diese geologische Interpretation wurde von Mitarbeitern der BGR, Hannover durchgeführt.

Die Ergebnisse dieses DFG-Projektes wurden bereits als Abschlußbericht (GEOMAR-Report, 1999; BGR-Report, 1999) der DFG übergeben. Es werden im folgenden nach einer kurzen Beschreibung der seismischen 3D-Daten die wichtigsten Ergebnisse des Two Pass-Prozesses zur Ableitung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B und der anschließenden 3D-Poststack-Tiefenmigration gezeigt.

Als neues Ergebnis einer weiteren Two Pass-Migration wird im Rahmen dieser Arbeit außerdem ein neu generiertes verbessertes Makrogeschwindigkeitsfeld C vorgestellt. Mit diesem Makrogeschwindigkeitsfeld C wurde eine neue 3D-Poststack-Tiefenmigration durchgeführt, die in bestimmten Untergrundbereichen deutliche Verbesserungen gegenüber der vorhergehenden Tiefenmigration mit dem Makrogeschwindigkeitsfeld B (DFG-Projekt, 1999) aufweist. Das Ergebnis dieser neuen 3D-Tiefenmigration wird derzeit von Mitarbeitern der BGR zu weiteren Interpretationszwecken genutzt.

Die bisher durchgeführten Crossline-Migrationen des 3D-Costa Rica-Datensatzes wurden mit einem 3D-RMS-Feld I durchgeführt, welches aus einer Stapelgeschwindigkeitsanalyse der Costa Rica Daten abgeleitet worden ist. Die Analysenpunkte zur Erzeugung des 3D-RMS-Feldes I lagen jedoch in Inline-Richtung und Crossline-Richtung 500 m auseinander. Außerdem existierten pro analysierter Spur jeweils nur 12 Geschwindigkeitswerte bei einer Spurlänge von 13 s vor. Eine Interpolation dieser Werte ergab dann das für die Crossline-Migration verwendete 3D-RMS-Feld I. Es läßt sich vermuten, daß aufgrund der weit auseinander liegenden Analysenpunkte die Erzeugung des 3D-RMS-Feldes I mit Ungenauigkeiten behaftet war. Deshalb sollte im Rahmen dieser Arbeit geklärt werden, ob mit einem genaueren 3D-RMS-Feld II die Datenqualität und die Ergebnisse der crossline-migrierten Daten weiter verbessert werden können (vgl. Abb. 2.3). Ein solches detaillierteres 3D-RMS-Feld II ist

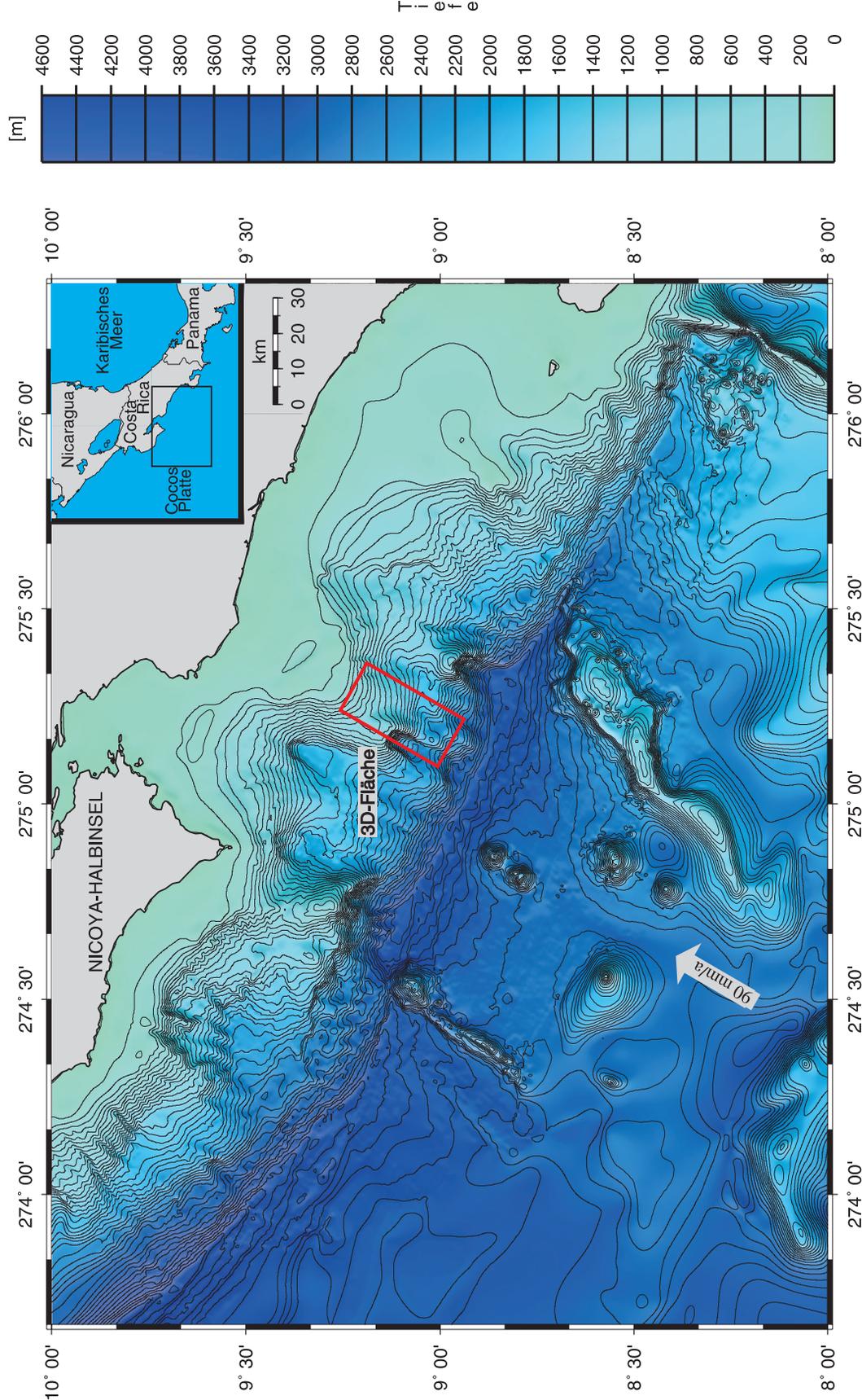
im Rahmen dieser Arbeit aus dem 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld C erzeugt worden. In Kap. 7.3 wird für eine ausgewählte Inline das Ergebnis einer Crossline-Migration gezeigt, die mit diesem neuen detaillierteren 3D-RMS-Feld II durchgeführt wurde.

7.1 Herleitung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C

Im Jahre 1992 wurde von der BGR am aktiven ostpazifischen Kontinentalrand vor Costa Rica eine 3D-reflexionsseismische Untersuchung durchgeführt, die eine Fläche von etwa 15 km (Crossline-Richtung) x 30 km (Inline-Richtung) überdeckt (Abb. 7.1). Hier wird entlang des Middle America Trench (MAT) die ozeanische Cocos-Platte unter die Karibische Platte subduziert. Diese Konvergenzzone wird dabei u.a. von einer keilförmigen prominenten Struktur dominiert, die der eigentlichen Subduktionszone zwischen oberer und unterfahrender Platte aufsitzt und durch hohe seismische Geschwindigkeiten (Ye et al., 1995) ausgezeichnet ist. Diese Keilstruktur zeigt einen kräftigen Reflektor an seiner Oberkante, der in dieser Arbeit mit „rough surface“ bezeichnet wird.

Eine zunächst durchgeführte 3D-Poststack-Zeitmigration (vgl. Kap. 2.1) der gemessenen 3D-Daten ergab nur eine schlechte Auflösung der Untergrundstrukturen und zeigte, daß die mögliche maximale Auflösung einer Zeitmigration aufgrund der Kompliziertheit der geologischen Untergrundstrukturen an ihre Grenzen stieß. Durch Anwenden einer 3D-Poststack-Tiefenmigration versprach man sich jedoch eine wesentlich verbesserte Auflösung, die dann für eine anschließende detaillierte Interpretation der Untergrundstrukturen dienen sollte. Entscheidendes Kriterium für den Erfolg einer solchen 3D-Poststack-Tiefenmigration ist die Qualität des dabei benutzten Makrogeschwindigkeitsfeldes (vgl. Kap. 2.1). Eine erste 3D-Poststack-Tiefenmigration mit dem vorläufigen und sehr ungenauen Makrogeschwindigkeitsfeld A, welches aus Intervallgeschwindigkeiten bestand, die aus Stapelgeschwindigkeiten abgeleitet wurden, zeigte viele Unvollkommenheiten und konnte die geforderte Zielsetzung nicht erfüllen. Deshalb wurde mit Hilfe eines 3D-Prestack-Migrationsverfahrens (Two Pass) das detaillierte 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B und später auch C abgeleitet. Dabei wurden die ungestapelten 3D-seismischen Daten einiger ausgewählter Inlines im First Pass mittels des CMSO-Prozesses zu ungestapelten 2D-Daten crossline-migriert. Im anschließenden Second Pass lieferte anschließend eine 2D-Tiefenmigrationsanalyse inklusive einer Fokussierungsanalyse 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder von den ausgewählten Inlines. Diese stellen einen vertikalen Schnitt durch das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld dar. Eine flächenhafte Interpolation der fehlenden 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder und Glättung ergab schließlich das 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld B bzw. C. Die Interpolation der 2D-Geschwindigkeitsfelder zum 3D-Makrofeld B wurde ebenfalls mit der Sirius 3D-Software durchgeführt. Als Rechner stand eine Sun sparc ultra 1 mit 1 GB Hauptspeicher und einem 170 Mhz Prozessor zur Verfügung.

Abb. 7.1: Bathymetrische Übersichtskarte des ostpazifischen Kontinentalrandes vor Costa Rica.



Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Ergebnisse zur Herleitung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C:

a) Die Crossline-Migration (First Pass):

Der Eingangsdatensatz für die Crossline-Migration umfaßte 3D-Prestack Daten entlang von 154 Inlines (Abb. 7.2) mit einem Abstand von 100 m zueinander. Die Abtastrate der 3D-Daten betrug 4 ms bei einer Spurlänge von 8 s. Der Gesamtumfang des 3D-Datensatzes verteilte sich auf Exabyte-Bänder mit einer Gesamtgröße von über 52 Gigabyte. Bevor die Crossline-Migration auf mehrere Inlines angewendet werden konnte, wurden verschiedene Testversuche mit einzelnen Inlines durchgeführt. Dabei wurde u.a. untersucht, ob mit dem zur Verfügung stehenden 3D-RMS-Modell I ein zufriedenstellendes Ergebnis nach der Crossline-Migration zu erreichen war. Das Resultat der ersten Crossline-Migrationsversuche waren Stapelsektionen von crossline-migrierten Inlines. Diese zeigten, daß der CMSO-Prozeß mit dem verwendeten 3D-RMS-Feld I in der Lage war, die crossline-migrierten Daten mit einer hohen Auflösung und wenig Verfahrensnoise darzustellen. Es war jedoch auch festzustellen, daß die crossline-migrierten Stapelsektionen Streifenmuster zeigten, die hauptsächlich im Bereich des Meeresbodens und der Sedimenteinheiten auftraten. Diese Streifenmuster waren Effekte des räumlichen Aliasing (vgl. Kap. 5.1.2 und Kap. 6). Aufgrund der Erkenntnisse, die in Kap. 5.1.2 beschrieben wurden, wurde deutlich, daß diese Effekte u.a. bei großem Inlineabstand, großem Migrationswinkel und großer Crossline-Migrationsapertur verstärkt auftreten. Weitere Testversuche mit den realen 3D-Daten bestätigten diese Aussagen. Um die Aliasing-Effekte einzudämmen, wurde schließlich ein maximaler Migrationswinkel von 30° und eine maximale Migrationsapertur von 6400 m festgelegt (vgl. Abb. 5.20 d). Mit diesen Einstellungen war es möglich, die räumlich bedingten Aliasingeffekte besonders für mittlere und größere Tiefen gering zu halten. Die Schwierigkeiten hinsichtlich der räumlichen Aliasingeffekte bei der Crossline-Migration beruhten vor allen Dingen auf den großen Inline-Abstand von 100 m zwischen den benachbarten Inlines im ungestapelten 3D-Inputdatensatz. Eine weitere theoretische Möglichkeit zur Reduzierung von Aliasingeffekten hätte unter gewissen Voraussetzungen in einer Interpolation von 3D-Prestack-Daten zwischen den einzelnen benachbarten Inlines z.B. auf 50 m oder 25 m bestanden. Da sich dadurch das Datenvolumen des 3D-Prestack-Datensatzes verdoppelt oder sogar vervierfacht hätte, wäre die Rechenzeit für die Crossline-Migration ungefähr im gleichen Umfang angestiegen. Aus diesem Grunde wurde diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt.

Die anfänglichen Testversuche auf die gemessenen Daten mit der Crossline-Migration zeigten auch, daß das Samplingintervall in den seismischen Inputdaten von 4 ms auf 8 ms angehoben werden konnte, ohne daß wichtige Informationsverluste für die Ableitung der 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder im Second Pass auftraten (Geomar Report, 1999). Dadurch verringerte sich das Gesamtvolumen des Inputdatensatzes von 52 GB auf 26 GB und auch die benötigte Rechenzeit zur Durchführung der Crossline-Migration.

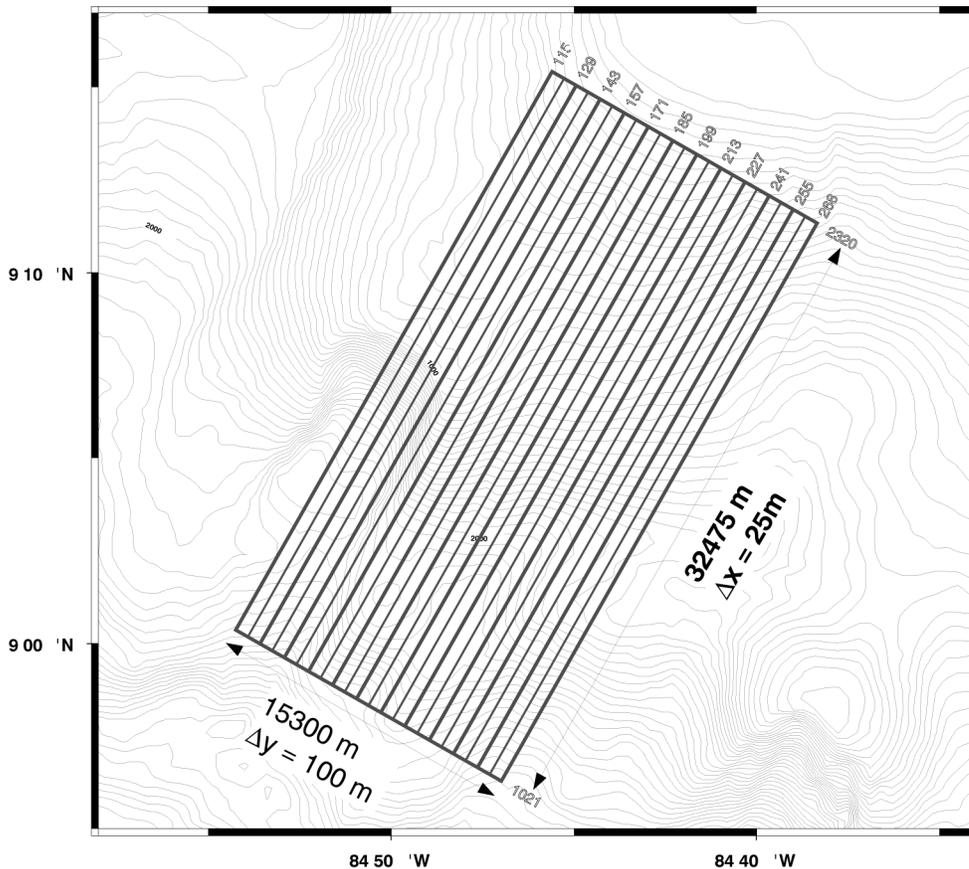


Abb. 7.2: Darstellung des 3D-Meßgebietes und der 12 (Δ Inline = 1400 m) bzw. 23 (Δ Inline = 700 m) crossline-migrierten Inlines zur Erzeugung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C.

In der folgenden Tab. 7.1 werden die endgültig bestimmten Parameter zur Durchführung von zwei Crossline-Migrationen, die zur Ableitung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C benutzt wurden, dargestellt:

Samplingintervall der Inputdaten	4 ms
Samplingintervall der Outputdaten	8 ms
Bandpaßfilter für die Inputdaten vor der Crossline-Migration	3 / 5 Hz - 40 / 60 Hz
Migrationsapertur	6400 m
max. Migrationswinkel	30 Grad
Spuren in crossline-migrierten CMP-Gathern	minimaler Offset: 200 m maximaler Offset: 3200 m Inkrement des Offset: 150 m Abstand der Gather entlang der jeweiligen Inline: 25 m

Tab. 7.1: Parameter der durchgeführten Crossline-Migration zur Herleitung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C.

Nach der Crossline-Migrationen wurden die 2D-Prestack-Daten zusätzlich mit einem

Bandpaßfilter, einer Amplitudennormierung und einem FK-Filter bearbeitet. Durch Anwenden des FK-Filters konnte die Meeresbodenmultiple, die sowohl in den gemessenen als auch crossline-migrierten Daten vorhanden war, eliminiert werden (vgl. Geomar-Report, 1999). Diese Multiplen hätten sich im Second Pass bei der Ableitung der 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder als äußerst störend ausgewirkt.

Die beiden durchgeführten Crossline-Migrationen zur Herleitung der Makrogeschwindigkeitsfelder B und C unterschieden sich lediglich in der Anzahl an crossline-migrierten Inlines (Abb. 7.2). Für die erste Crossline-Migration zur Herleitung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B wurden 12 Inlines crossline-migriert. Diese hatten einen gleichmäßigen Abstand von ca. 1400 m zueinander. Die Rechenzeitdauer für die gesamte Migration aller 12 Inlines lag bei ca. 180 Stunden. Für die zweite Crossline-Migration zur Herleitung des Makrogeschwindigkeitsfeldes C wurden 23 Inlines mit einem Inkrement von ca. 700 m crossline-migriert (Abb. 7.2).

Abb. 7.3 a zeigt die Stapelsektion der nicht-crossline-migrierten Inline 255. In Abb. 7.3 b ist die entsprechende Stapelsektion der crossline-migrierten Inline 255 dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede zu erkennen: z.B. entlang des „rough surface“ oder im Bereich der abtauchenden Platte. Diese Unterschiede sind auf die Eliminierung von 3D-Seiteneffekten nach der Crossline-Migration zurückzuführen. Die Stapelsektion nach Abb. 7.3 b läßt sich als wirkliche 2D-Stapelsektion ohne 3D-Seiteneffekte interpretieren.

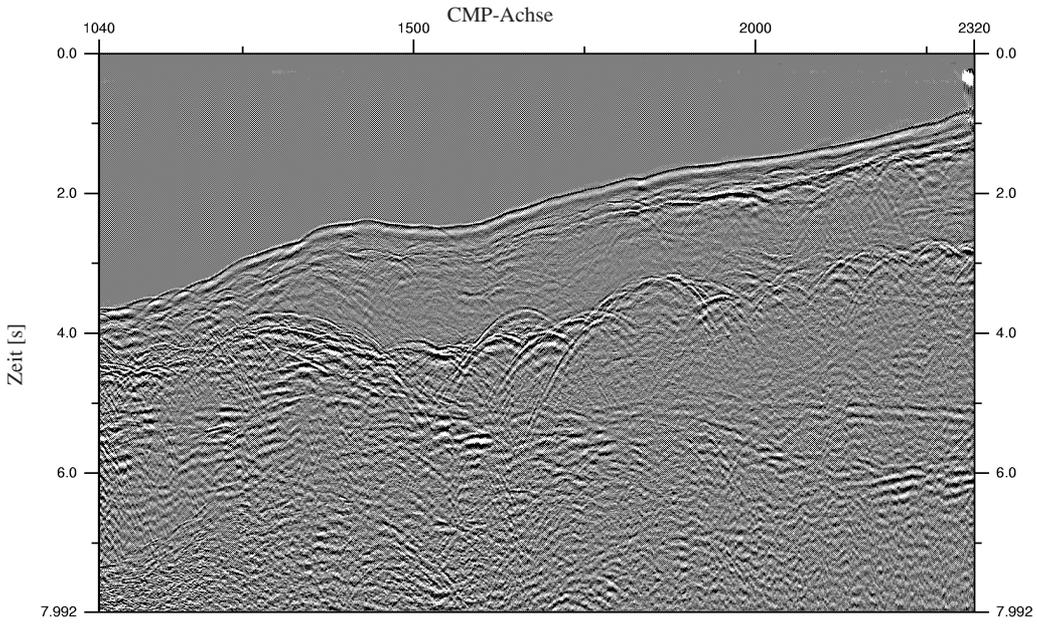


Abb. 7.3 a: Stapelsektion der **nicht** crossline-migrierten Inline 255.

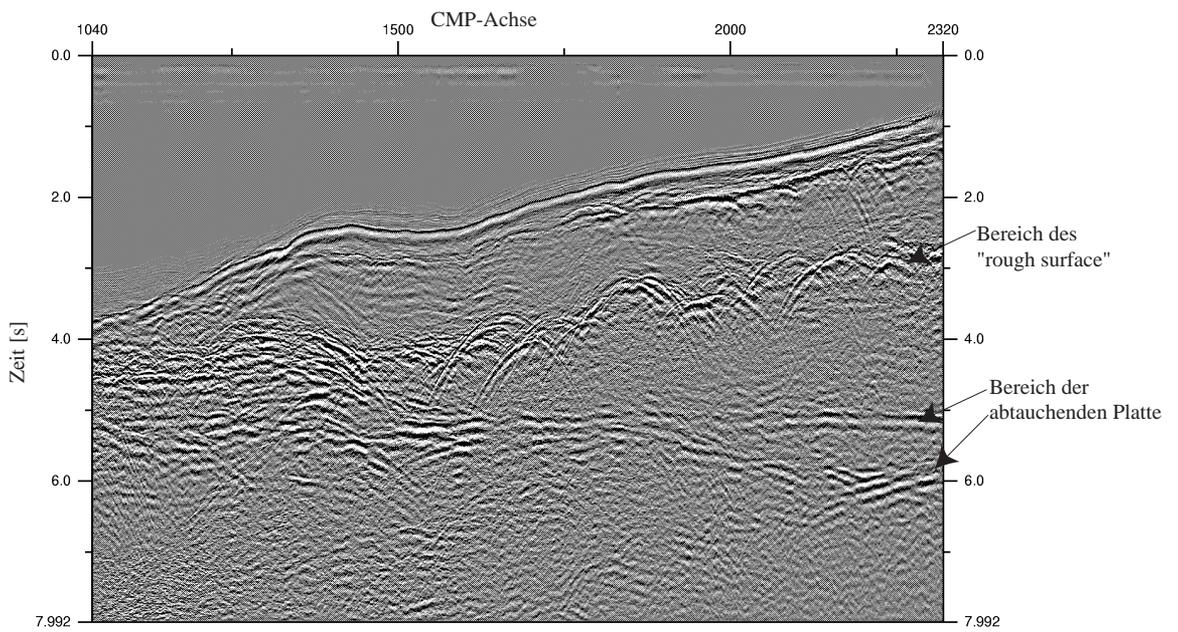


Abb. 7.3 b: Stapelsektion der crossline-migrierten Inline 255.

b) Die 2D-Kirchhoff-Prestack-Tiefenmigration inkl. Fokussierungsanalyse (Second Pass):

Im Second Pass wurden aus den 2D-Prestack-Daten der crossline-migrierten Inlines 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder abgeleitet. Zur Herleitung eines solchen 2D-Makrogeschwindigkeitsfeldes aus 2D-Prestack-Daten werden in der Praxis verschiedene MVA-(Migration Velocity Analysis)-Methoden benutzt. Die MVA-Methoden werden in 2 Hauptgruppen eingeteilt (Wang et. al., 1995):

1. Depth Focusing Analysis (DFA) (Yilmaz und Chambers, 1984, Faye und Jeannot, 1986, McKay und Abma, 1992).
2. Residual Curvature Analysis (RCA) (Al-Yahya, 1989, Deregowski, 1990, Lafond und Levander, 1993).

Prestack-Tiefenmigrationsverfahren sind sehr empfindlich hinsichtlich der Genauigkeit des verwendeten Makrogeschwindigkeitsfeldes. MVA-Methoden nutzen den Vorteil der Empfindlichkeit von Prestack-Tiefenmigrationen gegenüber dem verwendeten Geschwindigkeitsmodell aus und benutzen einen „Migrationsfehler“, um das Geschwindigkeitsfeld iterativ mit zunehmender Tiefe abzuleiten. DFA und RCA sind lokale, eindimensionale Methoden. Es wird immer nur ein einziges CIP- (Common Image Point-) Gather (RCA-Methode) oder ein einziges „depth focusing panel“ (DFA-Methode) benutzt, um die lokalen Geschwindigkeiten abzuleiten. Beide MVA-Methoden haben ihre gute Anwendbarkeit in vielen praktischen Situationen bewiesen, aber es zeigten sich auch Einschränkungen im Falle von sehr komplexen Untergrundstrukturen (Lafond und Levander, 1993). Ein Vergleich dieser beiden Methoden wird bei Hildebrand und MacKay (1992) gegeben.

Die RCA-Methode basiert auf dem Prinzip, daß nach einer Prestack-Migration mit der korrekten Geschwindigkeit ein Reflexionsereignis in einem CIP-Gather entlang einer horizontalen Linie ausgerichtet sein muß. Das Abweichen eines solchen Ereignisses von der horizontalen Linie (nach oben oder unten gekrümmte Kurve) ist ein Indikator für den Fehler im Geschwindigkeitsmodell, auf dem das Imaging beruht.

Die DFA-Methode basiert auf dem Prinzip, daß nach der Prestack-Migration bei richtig gewählten Geschwindigkeiten die Reflexionsenergie in Multi-Offset Gathern in der richtigen Migrationstiefe am besten fokussiert wird. Wenn eine falsche Geschwindigkeit für die Migration benutzt wurde, dann wird die Reflexionsenergie in einer Tiefe fokussiert, die von der Migrationstiefe abweicht. Der Migrationsfehler (Unterschied zwischen Fokussierungstiefe und Migrationstiefe) wird gemessen, indem die Lokation des Fokussierungspunktes in einem sog. „depth focussing panel“ gepickt wird.

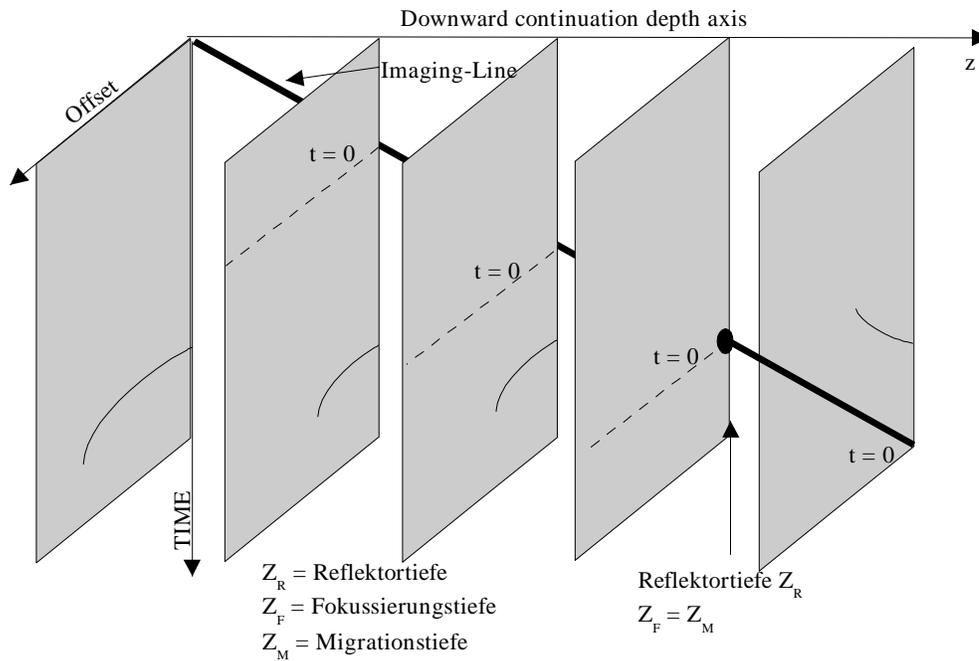


Abb. 7.4 a: Prinzip der Fokussierungsanalyse nach Jeannot et al. (1986) bei korrekt gewählter Migrationsgeschwindigkeit $v = v_M$.

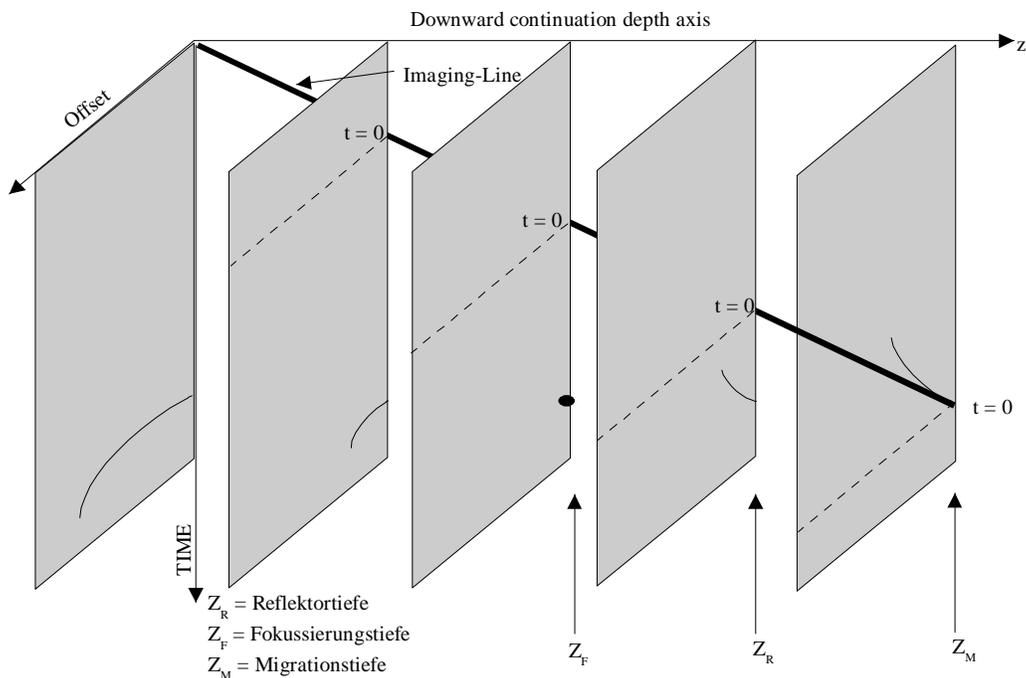


Abb. 7.4 b: Prinzip der Fokussierungsanalyse nach Jeannot et al., 1986 bei zu groß gewählter Migrationsgeschwindigkeit $v < v_M$.

Prinzip der Fokussierungsanalyse nach Jeannot et al., 1986:
 Die Fokussierungsanalyse beruht auf der Imaging-Bedingung, daß ein in die Tiefe

gerechnetes Wellenfeld zur Zeit $t = 0$ beim Offset $h = 0$ fokussiert, wenn die Geschwindigkeit v richtig gewählt wurde. In Abb. 7.4 a ist der Fall dargestellt, bei dem mit der exakten Geschwindigkeit gerechnet wurde. Die Migrationstiefe Z_M ist gleich der Fokussierungstiefe Z_F . In Abb. 7.4 b ist der Fall dargestellt, daß die Migrationsgeschwindigkeit v_M größer als die wahre Migrationsgeschwindigkeit v gewählt wurde. Die Folge ist, daß die Hyperbel für ein kleineres $Z < Z_R$ fokussiert, allerdings für $t \neq 0$. In der Migrationstiefe Z_M wird für $t = 0$ entsprechend der Imaging-Bedingung nur eine Teilfokussierung beobachtet. Aus den Daten lassen sich Z_F (Fokussierungstiefe) und Z_M ablesen. Für kleine Geschwindigkeitsfehler läßt sich mit diesen Informationen die wirkliche Reflektortiefe Z_R berechnen (Jeannot et al., 1986):

$$Z_R = \frac{Z_M + Z_F}{2} . \quad (7.1)$$

Die Aufdatierung der Geschwindigkeit erfolgt dann nach folgender Formel:

$$v^2 = \frac{Z_F}{Z_M} \cdot v_M^2 . \quad (7.2)$$

Die im Sirius 3D-Programm implementierte MVA-Methode basiert auf der DFA-Methode von Jeannot et al. (1986 und 1994). Das Programm bietet deshalb neben einer 2D-Kirchhoff Prestack-Tiefenmigration die Möglichkeit, Migrations-Fokussierungsanalysen durchzuführen und mit einem Picking-Modul iterativ 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder abzuleiten.

Ausgehend vom Meeresboden wurden zur Herleitung des richtigen 2D-Makrogeschwindigkeitsfeldes für jede crossline-migrierte Inline verschiedene Horizonte in zunehmender Tiefenlage gepickt. Im allgemeinen wurde ein Iterationsschritt für jeden Horizont durchgeführt. Auf diese Weise wurde für jede Inline ein 2D-Makrogeschwindigkeitsfeld schichtweise von oben nach unten iterativ aufgebaut (vgl. Geomar-Report, 1999). Bei dieser gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer benachbarter Inlines zeigte sich folgender Vorteil: Im Gegensatz zur Bearbeitung einer einzelnen oder sehr weit auseinander liegenden 2D-Linien, liegt bei der Fokussierungsanalyse und der Tiefenmigration vieler engabständiger, paralleler 2D-Linien ein großer Vorteil darin, daß bei Unsicherheit des Horizontverlaufs die benachbarten Parallellinien mit berücksichtigt werden können. So entsteht beim Picken und Entwickeln der 2D-Linien eine enge Verzahnung der benachbarten Linien zueinander. In vielen Fällen besteht somit die Möglichkeit, das Geschwindigkeitsmodell besser an die geologischen Gegebenheiten anzupassen.

Auf diese Weise wurden unabhängig voneinander zur Herleitung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes B 12 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder bzw. zur Herleitung des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes C 23 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder erzeugt. Aus diesen 2D-Geschwindigkeitsmodellen wurden dann die beiden 3D-Makrogeschwindigkeitsfelder B und C berechnet. Hierzu wurde ebenfalls ein Programmpaket der Sirius 3D-Software benutzt, mit dessen Hilfe fehlende Geschwindigkeitsfelder beliebig eng abständig in Crossline-Richtung interpoliert werden können. In den Abb. 7.5 a und Abb. 7.5 b sind die Makrogeschwindigkeitsfelder B und

C in 3D-Darstellung wiedergegeben. Das Makrofeld B wurde insgesamt bis in eine Tiefe von 8010 m erzeugt. Im Gegensatz dazu wurde das Makrofeld C bis 12000 m Tiefe generiert, um später bei der 3D-Poststack-Tiefenmigration in einen größeren Tiefenbereich migrieren zu können. Oberhalb des „rough surface“ sind die beiden Makrogeschwindigkeitsfelder B und C weitgehend identisch. Innerhalb der Keilstruktur zeigt das Makrogeschwindigkeitsfeld B eine sehr homogene Geschwindigkeitsverteilung auf. Im Gegensatz dazu nimmt innerhalb der Keilstruktur beim Makrogeschwindigkeitsfeld C die Geschwindigkeit mit zunehmender Tiefe zu. Unterhalb der Keilstruktur sind die Geschwindigkeit des Makrogeschwindigkeitsfeldes C z.T. deutlich geringer als beim Makrogeschwindigkeitsfeld B. Sowohl das Makrogeschwindigkeitsfeld B als auch C zeigen in Crossline-Richtung nur „geringe“ laterale Geschwindigkeitsänderungen.

Als Hauptursache für die Verbesserung des Makrogeschwindigkeitsfeldes C gegenüber dem Makrogeschwindigkeitsfeld B ist die Verdichtung der 2D-Linien zu nennen. Als Folge der Verdichtung der 2D-Linien beim Two Pass-Verfahren ergeben sich:

- Verbesserte MVA-Fokussierungsanalyse durch zuverlässigere Interpretation von benachbarten 2D-Linien.
- Genauere Interpolation des 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes C.

Als Folge der verbesserten MVA-Fokussierungsanalyse sind die abgeleiteten 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder genauer und erlauben eine Fokussierungsanalyse auch für größere Tiefen, da sich im allgemeinen nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Ungenauigkeiten der Geschwindigkeiten für kleinere Tiefen ungünstig auf die Bestimmung der Geschwindigkeiten für größere Tiefen auswirken. Aus diesen Gründen läßt sich das Makrogeschwindigkeitsfeld C auch für größere Tiefen wegen der erhöhten Genauigkeit in den oberen Schichten für die 3D-Tiefenmigration bestimmen.

Zum Abschluß des Kap. 7.1 wird zusammenfassend dargestellt, warum die Crossline-Migration hinsichtlich der variablen Geschwindigkeitsverteilung $v = v(x, y, z)$, die im 3D-Untergrund besteht, auf den Costa Rica Datensatz effektiv angewendet werden konnte (vgl. Kap. 5.2):

1. Die 3D-Daten wurden so aufgenommen, daß die Streichrichtung geologischer Ereignisse möglichst in Crossline-Richtung lag. Deshalb sind die lateralen Geschwindigkeitsvariationen in Crossline-Richtung deutlich geringer als in Inline-Richtung.
2. Die ersten Testversuche von Crossline-Migrationen auf einzelne Inlines zeigten als Ergebnis, daß sich die Datenqualität der crossline-migrierten Daten gegenüber den nicht crossline-migrierten Daten visuell nicht verschlechtert hat. Wäre eine zu starke laterale Geschwindigkeitsvariation in Crossline-Richtung vorhanden gewesen, so hätten die crossline-migrierten Daten starken Processingnoise gezeigt (vgl. Kap. 5.2).
3. Die Makrogeschwindigkeitsfelder B und C zeigen entlang von 2D-Tiefenschnitten in Crossline-Richtung nur „geringe“ laterale Geschwindigkeitsvariationen (vgl. Tab. 5.9 in Kap. 5.2).

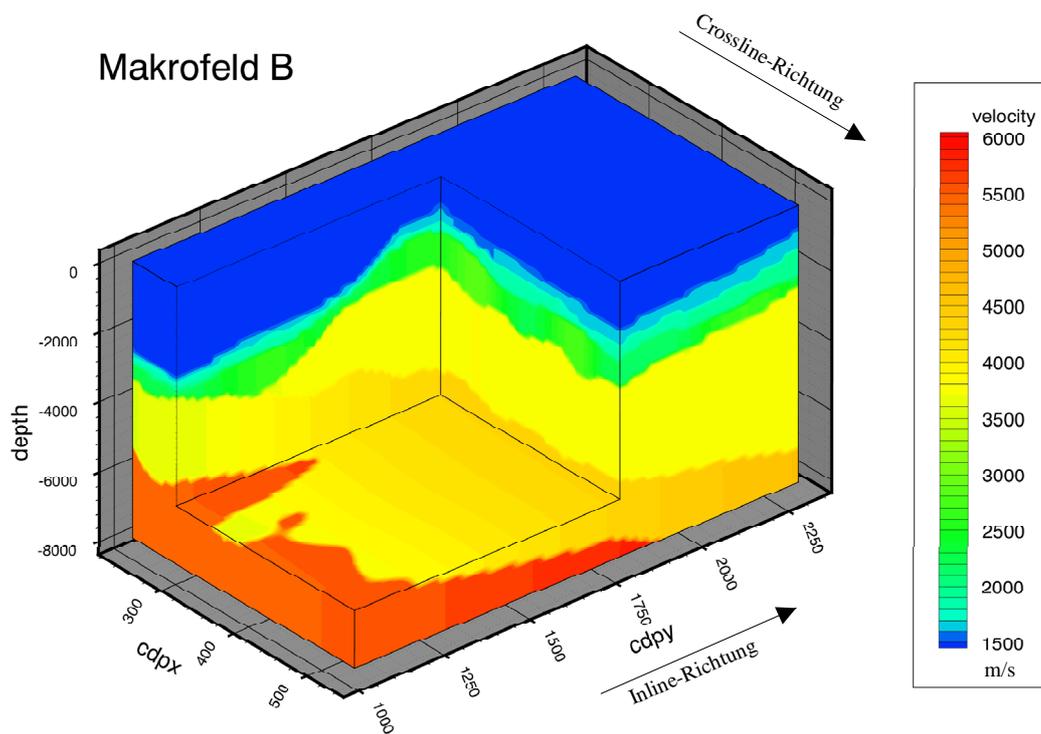


Abb. 7.5 a: 3D-Darstellung des Makrogeschwindigkeitsfeldes B.

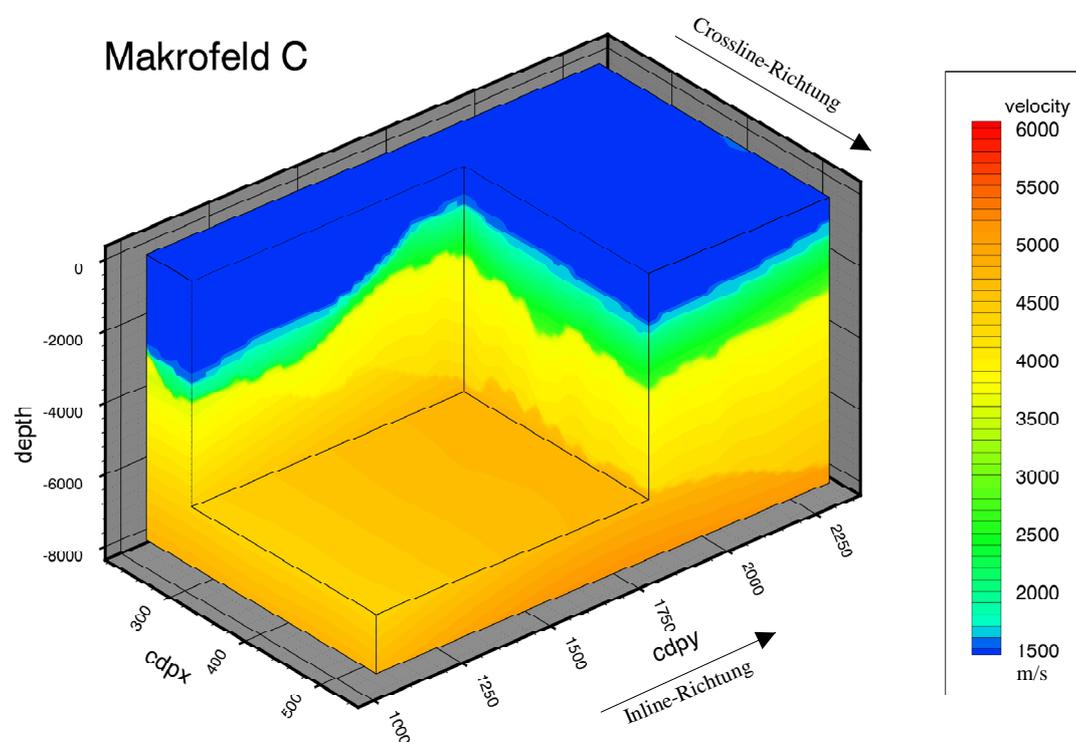


Abb. 7.5 b: 3D-Darstellung des Makrogeschwindigkeitsfeldes C. Das Makrofeld C wurde bis in eine Tiefe von 12000 m erzeugt. Aus Vergleichsgründen mit Makro B ist jedoch nur der Tiefenbereich bis 8000 m dargestellt.

7.2 Ergebnisse der 3D-Poststack-Tiefenmigrationen mit den Makrogeschwindigkeitsfeldern B und C

Beide 3D-Makrogeschwindigkeitsfelder B und C dienen als Eingabe zur Durchführung von zwei 3D-Poststack-Migrationen, mit der die gestapelten 3D-Costa Rica-Daten tiefenmigriert wurden. Für die existierenden verschiedenen Migrationsmethoden wird im Zero-Offset-Fall das „Exploding-Reflector-Modell“ (Sherwood-Loewenthal-Modell) angenommen (vgl. Kap. 2.2.1). Der Vorteil dieses Modells liegt darin, daß zur Realisierung der unterschiedlichen Migrationsverfahren nur die relativ einfache Einwegwellengleichung benutzt wird, die die Ausbreitung von akustischen Wellen von den Quellen aus großer Tiefe zur Oberfläche beschreibt. Diese lautet bei Vorgabe von beliebigen Geschwindigkeitsfeldern $v(x, y, z)$ für in negative z -Richtung laufende Wellen (Claerbout, 1984):

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = j \cdot \sqrt{\frac{\omega^2}{v(x, y, z)^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}} \cdot \bar{p}(x, y, z, \omega) \quad , \quad (7.3)$$

mit $\bar{p}(x, y, z, \omega)$ = Wellenfeld nach der eindimensionalen Fouriertransformation bzgl. der Zeit,
 $v(x, y, z)$ = 3D-Makrogeschwindigkeitsfeld.

Die Zero-Offset-Sektion an der Oberfläche mit der Tiefe $z = 0$ wird dann mit Hilfe der Einwegwellengleichung entgegen der Ausbreitungsrichtung zeitlich zurückgerechnet (Downward Continuation) und das Wellenfeld zur Zeit $t = 0$ (Imaging-Prinzip) für jede Tiefe z bestimmt.

Für die Wellenfortsetzung gibt es verschiedene Migrationsverfahren. Diese lassen sich nach der Methodik in drei Gruppen einteilen:

- a) Fourier-Verfahren,
- b) Finite-Differenzen- (FD-) Verfahren,
- c) Kirchhoff-Verfahren.

In Tabelle 7.2 (Ristow, 1997) werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der Verfahren genannt.

<i>Verfahren</i>	<i>Vorteil</i>	<i>Nachteil</i>
Fourier-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • großer maximaler Migrationswinkel 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwierigkeiten bei der Berücksichtigung von lateralen Änderungen der Geschwindigkeit
Finite-Differenzen-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung von Geschwindigkeitsvariationen • optimale laterale Auflösung 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitierung des maximalen Migrationswinkels

<i>Verfahren</i>	<i>Vorteil</i>	<i>Nachteil</i>
Kirchhoff-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • flexibles Verfahren • Berücksichtigung von Geschwindigkeitsvariationen • großer maximaler Migrationswinkel 	<ul style="list-style-type: none"> • reduzierte Auflösung der migrierten Daten gegenüber FD-migrierten Daten

Tab. 7.2: Vor- und Nachteile der 3 wichtigsten Migrationsmethoden

Die Hauptanforderung an die existierenden 3D-Poststack-Migrationsverfahren bezieht sich vor allen Dingen auf eine gute Anwendbarkeit hinsichtlich einer komplizierten Geschwindigkeitsverteilung im 3D-Untergrund. Die Fourierverfahren schieden aufgrund der großen Nachteile bei lateral variablen Geschwindigkeiten von vornherein aus. Die FD-Verfahren zeigen im Vergleich zur Kirchhoff-Migration im Fall komplizierter Geschwindigkeitsfelder die bessere Auflösung (Geoltrain, Brac, 1991). Deshalb wurden die 3D-Postsack-Migrationen mit dem FD-Verfahren realisiert. Hinzu kam noch, daß uns ein Programm mit einer sehr effektiven Methode zur Durchführung der 3D-FD-Migration zur Verfügung stand. Diese 3D-FD-Methode benutzt ein Multi-Way-Splitting-Verfahren (Ristow, Rühl, 1995; Ristow, Rühl, 1997). Diese Migrationsanwendung beruht auf der Trennung (Splitting) des 3D-Downward-Continuation-Operators in einfache 2D-FD-Operatoren in jedem Tiefenschritt in zwei oder mehr Richtungen. Die besonderen Vorteile dieses Verfahrens z.B. gegenüber anderen FD-Methoden sind, daß es unbedingt stabil ist, es lassen sich bestimmte vorgegebene maximale Migrationswinkel erreichen und es ein relativ schnelles Verfahren für die Tiefenmigration (Ristow, 1997) ist.

Für die 3D-FD-Poststack-Tiefenmigration wurde der Inline-Abstand der gestapelten 3D-Daten zuvor mittels Interpolation von 100 m auf 50 m verkleinert. Aus diesem Grund besteht der gestapelte 3D-Costa Rica-Datensatz aus 309 Inlines im Gegensatz zu 154 Inlines beim gemessenen 3D-Prestack-Datensatz. Die 3D-Tiefenmigration mit dem Makrogeschwindigkeitsfeld B wurde bis in eine Tiefe von 8010 m und die Tiefenmigration mit Makrogeschwindigkeitsfeld C bis in eine Tiefe von 12000 m durchgeführt. Die Rechenzeiten für die beiden Migrationen lagen bei ca. 190 Stunden für die Tiefe von 8010 m bzw. 340 Stunden für die Tiefe von 12000 m. Gerechnet wurde auch hier jeweils auf einer Sun sparc ultra 1 mit 170 Mhz Prozessor und 1 GB Arbeitsspeicher. Die Abb. 7.6 a und 7.6 b zeigen ein Teilergebnis der beiden 3D-Poststack-Tiefenmigrationen entlang der Inline 200. Beide Abb. sind im gleichen Maßstab dargestellt. Das Migrationsergebnis mit Makrogeschwindigkeitsfeld C zeigt besonders im Bereich größerer und noch vergleichbarer Tiefen einige Verbesserungen gegenüber dem entsprechenden Migrationsergebnis mit Makrofeld B. Z.B. innerhalb des CMP-Bereiches von 1040 - 1540 bei einer Tiefe zwischen 6000 m - 7500 m ist ein Reflektor deutlicher fokussiert worden, als bei der Tiefenmigration mit Makrogeschwindigkeitsfeld B. Im Bereich des „rough surface“ und darüber lassen sich keine sichtbaren Verbesserungen feststellen. Ähnliche Ergebnisse zeigen auch andere Inline-Vergleiche von beiden Migrationsergebnissen.

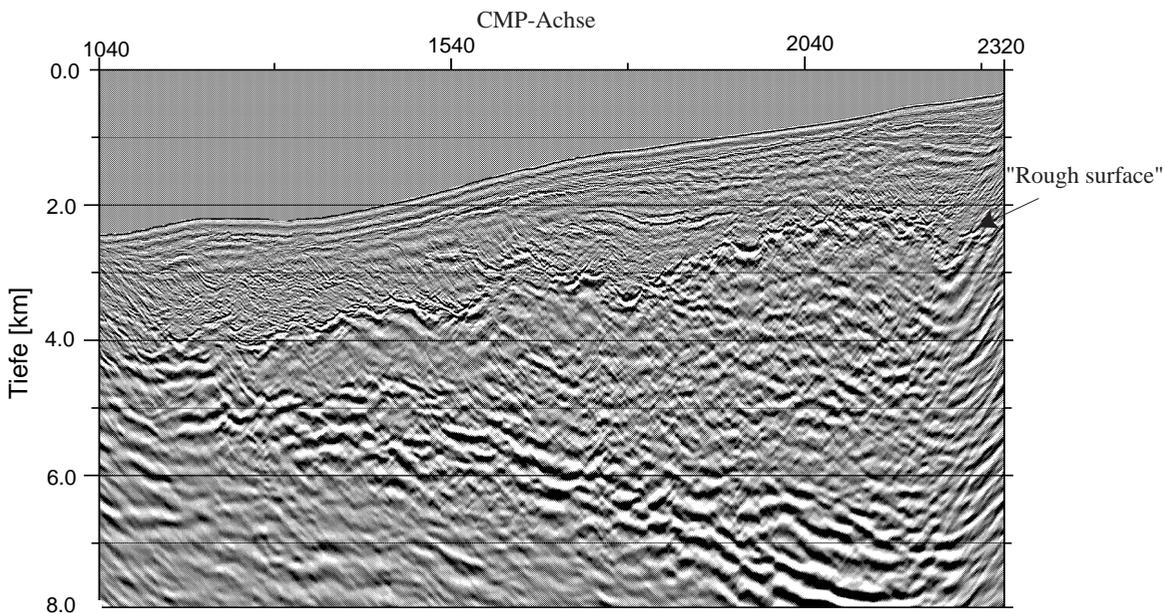


Abb. 7.6 a: Ergebnis der 3D-Poststack-Tiefenmigration der Inline 200 mit Makrogeschwindigkeitsfeld B.

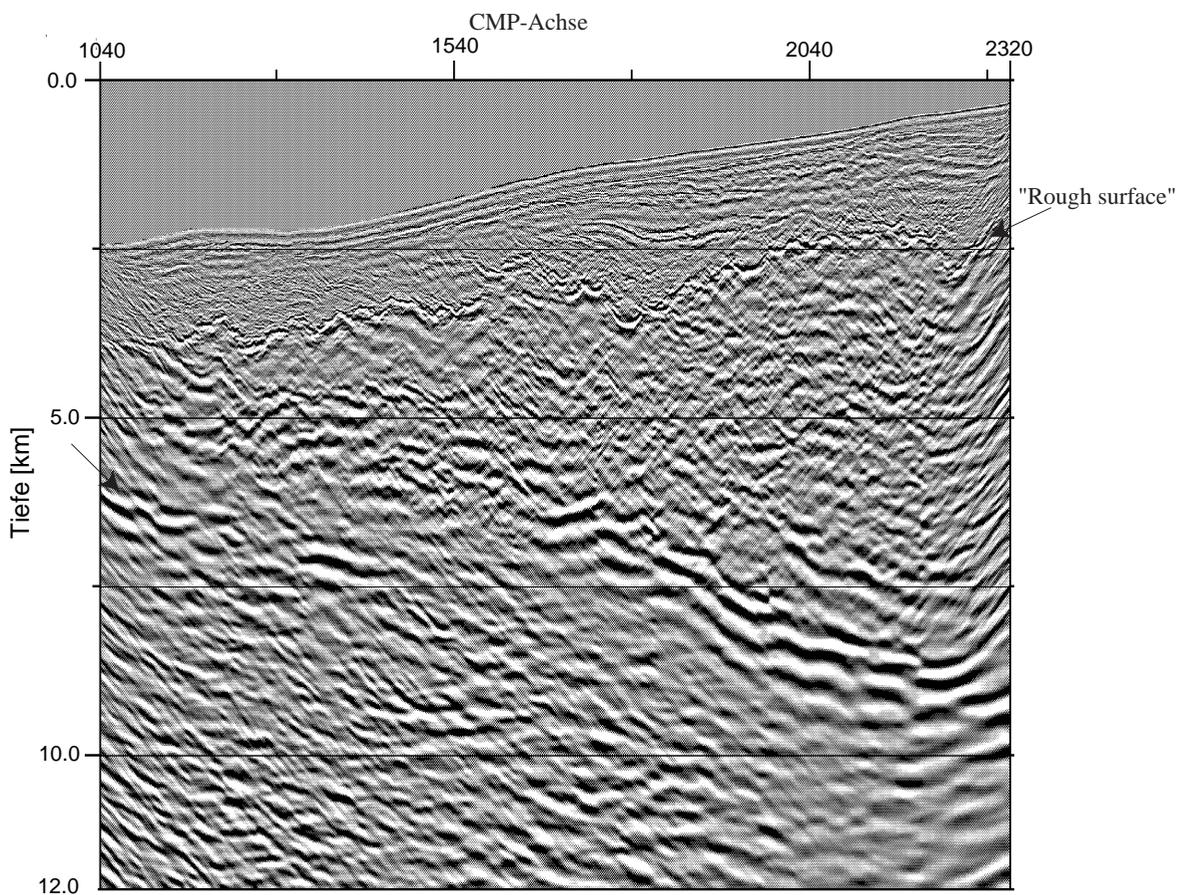


Abb. 7.6 b: Ergebnis der 3D-Poststack-Tiefenmigration der Inline 200 mit Makrogeschwindigkeitsfeld C.

7.3 Ergebnisse der Crossline-Migration mit einem verbesserten 3D-RMS-Feld

Aus dem Makrogeschwindigkeitsfeld C konnte mit Hilfe des Sirius 3D-Programmpaketes ein 3D-RMS-Feld II erzeugt werden. Das auf diese Weise neu erzeugte 3D-RMS-Feld II ist zuverlässiger als das bisher benutzte 3D-RMS-Feld I. Vergleiche zwischen den RMS-Geschwindigkeiten dieser beiden 3D-RMS-Felder zeigten, daß die Geschwindigkeiten des RMS-Feldes I oberhalb des „rough surface“ gut mit denen des RMS-Feldes II übereinstimmen. Im allgemeinen variieren die RMS-Geschwindigkeiten zwischen den beiden Geschwindigkeitsfeldern in diesem Bereich um ± 5 %. Unterhalb des „rough surface“ bzw. für größere Tiefen sind die RMS-Geschwindigkeiten vom RMS-Feld I um 10% und mehr höher als die von RMS-Feld II. Aufgrund der Ergebnisse des Kap. 5.1.3 läßt sich deshalb folgendes vermuten: Bei zu groß gewählten RMS-Geschwindigkeiten können beim CMSO-Verfahren 3D-Seiteneffekte weiterhin relativ gut eliminiert werden. Zwar können dadurch räumliche Aliasingeffekte verstärkt werden, aber diese nehmen im allgemeinen mit zunehmender Zeit, steigender Geschwindigkeit und abnehmender Frequenz mit der Tiefe ab (vgl. Kap. 5.1.2) und sollten deshalb nur für kleinere Tiefenbereiche ein größeres Problem darstellen.

Das 3D-RMS-Feld II diene als Eingabe für eine weitere Crossline-Migration, die aus Testgründen nur auf die Inline 199 des 3D-Prestack-Datensatzes angewandt wurde. Die ungestapelten crossline-migrierten Daten dieser Inline wurden anschließend mit einem 2D-Makrogeschwindigkeitsfeld tiefenmigriert. Ein solches 2D-Geschwindigkeitsfeld stand noch aus der 2D-Geschwindigkeitsanalyse im Second Pass zur Herleitung des Makrogeschwindigkeitsfeldes C zur Verfügung. Das Endergebnis dieser 3D-Prestack-Migration (Two Pass) ist in Abb. 7.7 b wiedergegeben. Zum Vergleich ist das entsprechende Ergebnis der Two Pass-Migration dargestellt, die im First Pass mit dem ungenaueren 3D-RMS-Feld I durchgeführt wurde (Abb. 7.7 a). Die Crossline-Migrationen im First Pass wurden für beide Beispiele mit denselben Parametern durchgeführt. Der Vergleich beider Ergebnisse zeigt, daß unterhalb des „rough surface“ für größere Tiefen keine sichtbaren Unterschiede auftreten. Am „rough surface“ und teilweise in den darüber liegenden Einheiten sind jedoch Unterschiede erkennbar. Im Fall des verwendeten RMS-Feldes II zeigt vor allen Dingen der „rough surface“ insgesamt eine Verbesserung. Sein Verlauf konnte z.T. schärfer fokussiert werden (z.B. CMP-Bereich: 1750 - 2320). Die hier gefundenen Resultate lassen deshalb den Schluß zu, daß eine Crossline-Migration mit einem detaillierteren und genaueren 3D-RMS-Feld vor allen Dingen in kleineren Tiefen Abbildungsverbesserungen für komplizierte geologische Strukturen liefern kann, wohingegen sich für größere Tiefenbereiche kaum Verbesserungen ergeben.

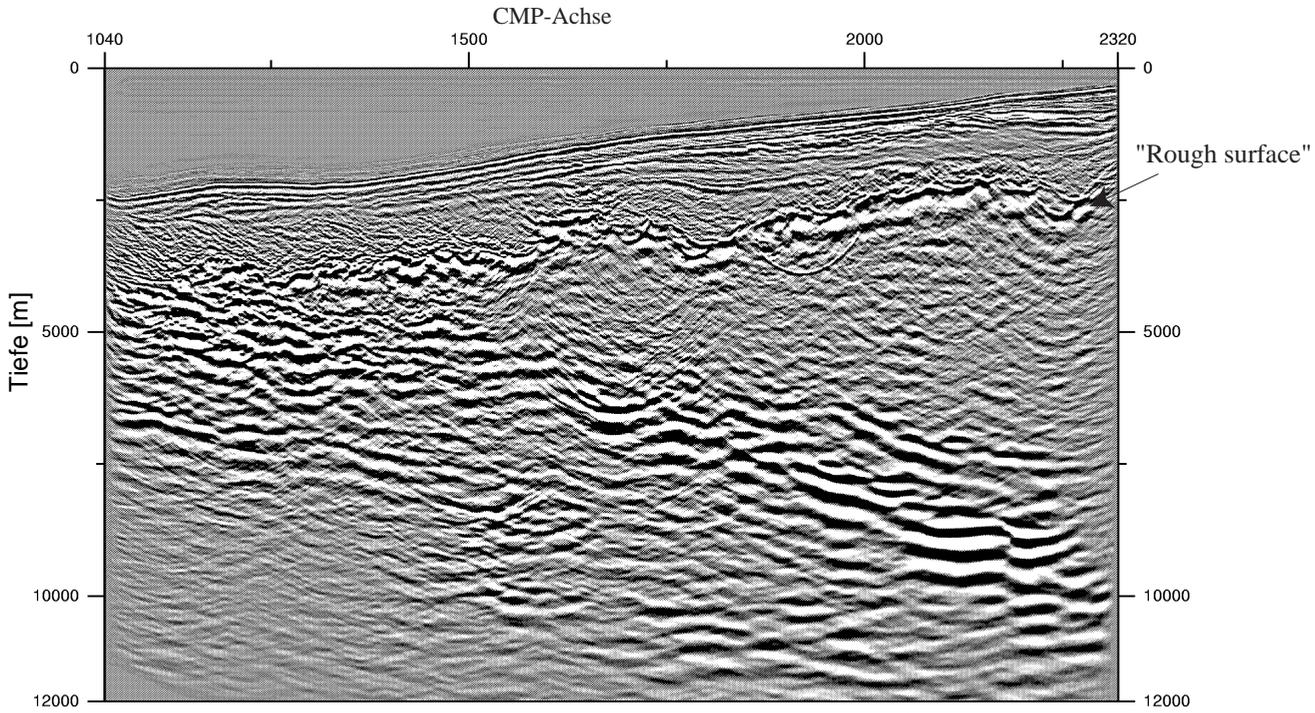


Abb. 7.7 a: Two-Pass-Migration der Inline 199. Im First Pass (Crossline-Migration) wurde das RMS-Feld I benutzt.

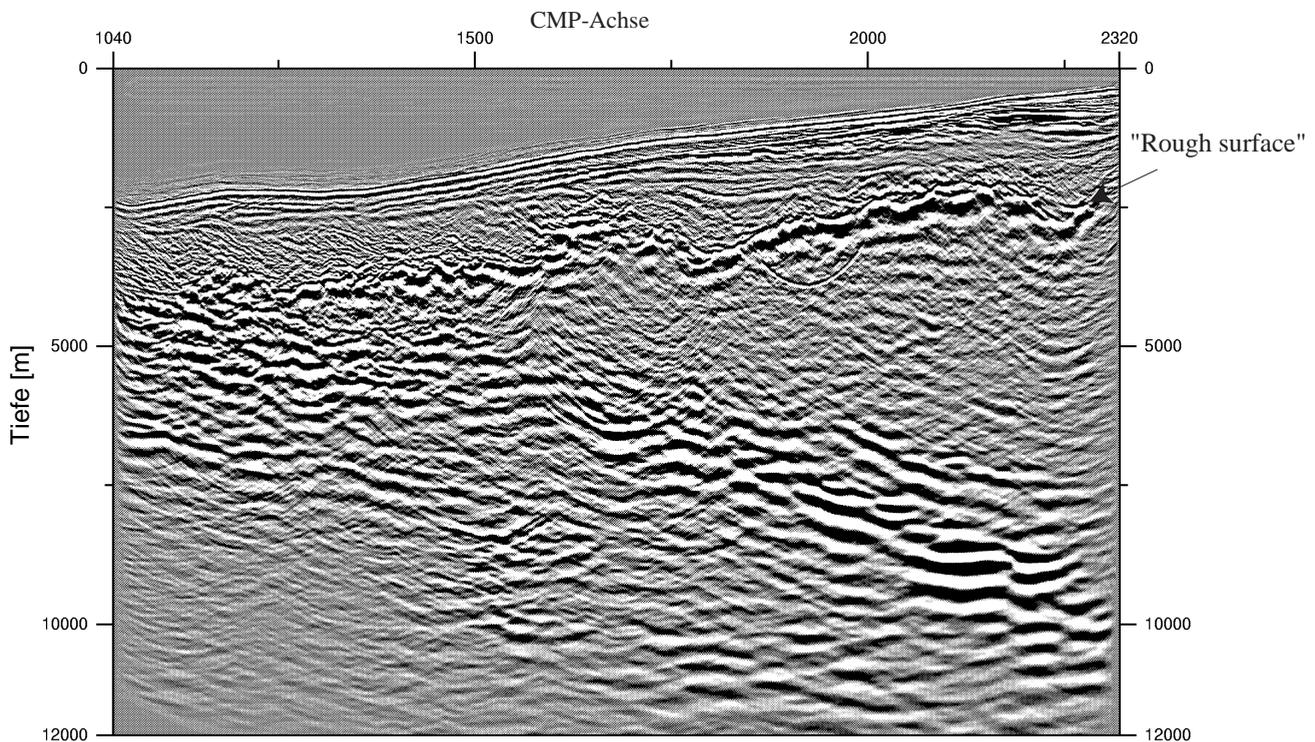


Abb. 7.7 b: Two-Pass-Migration der Inline 199. Im First Pass (Crossline-Migration) wurde das RMS-Feld II benutzt, welches aus dem Makrogeschwindigkeitsfeld C abgeleitet worden ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Crossline-Migrationsmethoden hinsichtlich der Anwendbarkeit innerhalb eines Two Pass-Prozesses zur Ableitung von 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldern untersucht und miteinander verglichen. Bei beiden Verfahren handelt es sich um Zeitmigrationsprozesse, die von ihrer Herleitung aus nur für den konstanten Geschwindigkeitsfall korrekt arbeiten. Das erste vorgestellte Verfahren beruht auf einer Methode von Devaux et al. (1996) und wurde in dieser Arbeit mit CMSO bezeichnet. Es handelt sich hierbei im wesentlichen um einen „Single-Offset-Prozeß“, bei dem aus einer gegebenen Inputspur nur eine Outputspur erzeugt wird. Dieser Prozeß benötigt ein 3D-RMS-Geschwindigkeitsfeld. Die zweite Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und wird mit CMMO bezeichnet. Es handelt sich hierbei im Gegensatz zum CMSO-Verfahren um einen „Multi-Offset-Prozeß“, bei dem eine gegebene Inputspur mehrere Outputspuren erzeugt. Das Verfahren arbeitet mit einem DMO-Prozeß und benötigt keine Geschwindigkeitsinformationen.

Beide Verfahren zeigten in den Untersuchungen ein räumliches Aliasing-Problem, das z.B. dann auftreten kann, wenn die gemessenen 3D-Prestack-Daten benachbarter Inlines in der Crossline-Richtung einen zu großen Abstand voneinander haben. Aliasingeffekte treten in den crossline-migrierten Daten vor allem bei kleineren Laufzeiten, geringen Geschwindigkeiten und hohen Frequenzen verstärkt auf. Bei der Bearbeitung von synthetischen und realen 3D-Daten zeigte sich, daß die Aliasingeffekte z.B. durch Beschränkung des maximal möglichen Migrationswinkels zu einem großen Teil unterdrückt werden können. Eine Reduzierung der maximalen Frequenzen könnte ebenfalls die Aliasingeffekte mindern, jedoch würde eine solche Maßnahme auch die Auflösungsqualität verschlechtern.

Hinsichtlich der Einsatzfähigkeit in 3D-Untersuchungsgebieten mit einer nicht konstanten Geschwindigkeitsverteilung zeigten CMMO- und CMSO-Verfahren gleiche Ergebnisse. Treten vertikale und laterale Geschwindigkeitsvariationen lediglich entlang der Inline-Richtung auf, so können beide Verfahren effizient zur Beseitigung von 3D-Effekten eingesetzt werden. Bei Geschwindigkeitsvariationen entlang der Crossline-Richtung, also der eigentlichen Wirkungsrichtung der Crossline-Migration, können beide Methoden nur im Fall von moderaten Geschwindigkeitsänderungen richtige Ergebnisse liefern. Anzeichen für eine mangelnde Einsatzfähigkeit der Verfahren ist z.B. eine starke Zunahme von Verfahrennoise in den crossline-migrierten Daten.

Treten in der 3D-Meßkonfiguration der 3D-Inputdaten Schuß-Empfängeraufstellungen mit großen Azimutalwinkeln gegenüber der Inline-Richtung auf, so ist der CMSO-Prozeß nicht mehr in der Lage, Amplituden für größere Offsetbereiche, die in den Inputdaten noch vorhanden sein können, entlang der Inline-Richtung zu generieren. Der CMMO-Prozeß ist davon nicht betroffen. Er ist dem CMSO-Prozeß bei komplizierter 3D-Aufnahmegeometrie überlegen.

Bei den Untersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit des benötigten 3D-RMS-Geschwindigkeitsmodells zur Durchführung der CMSO-Methode stellte sich heraus, daß bei zu kleinen RMS-Geschwindigkeiten 3D-Seiteneffekte nur noch unzureichend eliminiert werden können. Werden zu große RMS-Geschwindigkeiten benutzt, ist dieser

Effekt wesentlich schwächer zu beobachten. Deshalb sollten bei Unsicherheit über die richtigen RMS-Geschwindigkeiten die benutzten Geschwindigkeiten etwas zu groß gewählt werden. Insgesamt ist der CMSO-Prozeß jedoch relativ unempfindlich gegenüber den verwendeten Geschwindigkeiten und kann auch bei leichten Ungenauigkeiten des 3D-RMS-Feldes noch gute Ergebnisse liefern.

Die Nachteile des CMMO-Verfahrens gegenüber dem CMSO-Verfahren liegen hauptsächlich in einer deutlich höheren Rechenzeit und in der Zunahme von Verfahrensnoise. Aufgrund der hohen Rechenzeiten sollte bei einer Crossline-Migration von mehreren Inlines die CMSO-Methode bevorzugt werden. Vorteile hat der CMMO-Prozeß dann, wenn keine Geschwindigkeitsinformationen vorliegen, der gemessene 3D-Datensatz eine unregelmäßige 3D-Meßkonfiguration aufweist und wenn 2D-DMO-Sektionen für eine direkte Weiterbearbeitung (2D-Poststack-Migration) gefragt sind.

Unter Anwendung des CMSO-Prozesses wurden zwei verschiedene 3D-Prestack-Migrationsverfahren (Two Pass) praktisch auf einen realen 3D-Datensatz (Costa Rica-Datensatz) durchgeführt. Ergebnis waren die zwei unterschiedlich genauen 3D-Makrogeschwindigkeitsfelder B und C. Das Makrofeld C wurde aus doppelt so vielen 2D-Linien erzeugt wie das Makrofeld B. Es zeigte sich, daß die Anzahl der prozessierten 2D-Linien entscheidend für die Genauigkeit des erzeugten 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes beim Two Pass-Verfahren ist. In bestimmten Bereichen zeigt das Makrofeld C deutliche Verbesserungen gegenüber dem Makrofeld B. Allerdings steigen bei einer Verdichtung der 2D-Linien auch die benötigte Rechenzeit und der Arbeitsaufwand beim Two Pass-Verfahren an. Dieser ist im Second Pass, während der iterativen Ableitung der 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder, besonders groß.

In einem von dem Two Pass-Verfahren unabhängigen 3D-Migrationsprozeß wurden anschließend die beiden 3D-Makrogeschwindigkeitsfelder B und C zur 3D-Tiefenmigration der gestapelten realen 3D-Daten (3D-Poststack-Migration) benutzt. Die beiden Migrationsergebnisse zeigen im Vergleich, daß die Tiefenmigration mit dem genaueren Makrofeld C Verbesserungen in größeren Tiefenbereichen ergeben hat.

Das Two Pass-Verfahren diente in dieser Arbeit ausschließlich zur Ableitung von 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldern. Dabei wurde nur ein Teil der 3D-Prestack-Daten entlang ausgewählter 2D-Linien bearbeitet. Erste praktische Ansätze haben für zukünftige Arbeiten gezeigt, daß der gesamte 3D-Prestack-Datensatz mittels des 3D-Prestack-Migrationsverfahrens (Two Pass) migriert werden kann. Das Ergebnis wären 2D-tiefenmigrierte Inlines ohne 3D-Effekte. Dazu müßten im First Pass sämtliche Inlines des 3D-Prestack-Datensatzes crossline-migriert werden, um die 3D-Seiteneffekte zu eliminieren. Im Second Pass können die crossline-migrierten Daten dann 2D-tiefenmigriert werden. Die dafür benötigten 2D-Makrogeschwindigkeitsfelder können z.B. von 2D-Tiefenschnitten entlang eines 3D-Makrogeschwindigkeitsfeldes stammen, welches zuvor mittels des Two Pass-Verfahrens abgeleitet wurde. Das Migrationsergebnis dieser Two Pass-Migration kann anschließend für das gesamte 3D-Volumen interpretiert werden. Auf diese Weise werden die Nachteile einer 3D-Poststack-Migration, die durch den Stapelprozeß entstanden sind, umgangen. Allerdings ist der Rechenzeitaufwand für das Gesamtvolumen sehr hoch. Im Vergleich zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten 3D-Poststack-Tiefenmigrationen würde eine solche Anwendung des Two Pass-Verfahrens auf den kompletten Costa Rica-Datensatz,

bei gegebenem Makrogeschwindigkeitsfeld, ungefähr den 8-fachen Rechenzeitaufwand benötigen.

9 Literaturverzeichnis

Abma, R., Sun, J., Bernitsas, N., 1999: Antialiasing methods in Kirchhoff migration, *Geophysics*, 64, 1783-1792.

Al-Yahya, K., 1989: Velocity analysis by iterative profile migration, *Geophysics*, 54, 718-729.

Berkhout, A.J., 1984: *Seismic migration, Teil B, Practical aspects*, Elsevier.

Berkhout, A.J., 1985: *3-D Seismic processing with an eye to the future: World Oil*.

Berkhout, A.J., 1987: *Applied seismic wave theory*, Elsevier.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1999: Three-dimensional detailed imaging of prominent structures in reflection seismics at the active continental margin off Costa Rica, BGR-Report: 0119373.

Biondi, B., Ronen, S., 1987: Dip-moveout in shot profiles, *Geophysics*, 52, 1473-1482.

Bolondi, G., Loinger, E., Rocca, F., 1982: Offset continuation in theory and practice, *Geophysical Prospecting*, 30, 813-828.

Bolondi, G., Loinger, E., Rocca, F., 1984: Offset continuation in theory and practice, *Geophysical Prospecting*, 32, 1045-1073.

Cabrera, J., Perkins, W., Hagen, T., Ratcliff, D.W., Lynn, W., 1992: 3D-prestack depth migration: implementation and case history, 62nd Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 948-951.

Canning, A., 1993: *Organisation and imaging of three-dimensional seismic reflection data before stack*, Ph.D. dissertation, Rice University.

Canning, A., Gardner, G.H.F., 1996: A two-pass approximation to 3-D prestack migration, *Geophysics*, 61, 409-421.

Claerbout, J.F., 1984: *Imaging the earth's interior*, Blackwell Scientific Publication, Palo Alto, CA (USA).

Deregowski, S.M., 1986: What is DMO?, *First Break*, v. 4, no. 7, 7-24.

Deregowski, S.M., 1990: Common-offset migration and velocity analysis, *First Break*, v. 8, no. 6, 225-234.

Devaux, V., Gardner, G.H.F., Rampersad, T., 1996: 3-D prestack depth migration by Kirchhoff Operator Splitting, 66th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 455-458.

DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft, 1999: DFG-Forschungsvorhaben Hi 179/26-1 und 2, Ri 688/4-1 und 2, Abschlußbericht.

Etgen, J.T., 1994: Stability of explicit depth extrapolation through laterally-varying media, 64th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1266-1269.

Ferber, R.G., 1994: Migration to multiple offset and velocity analysis, Geophysical Prospecting, 42, 99-112.

Ferber, R.G., Sanders, B., Yilmaz, O., 1996: Quick-look 3-D prestack time migration, 66th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 451-454.

Forel, D., Gardner, G.H.F., 1988: A three-dimensional perspective on two-dimensional dip moveout, Geophysics, 53, 604-610.

Geoltrain, S., Brac, J., 1991: Can we image complex structures with finite-difference traveltimes?, 61th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1110-1113.

GEOMAR - Forschungszentrum für marine Geowissenschaften, Kiel, 1999: 3D-Makro-Geschwindigkeitsbestimmungen und 3D-Tiefenmigration des seismischen 3D-Costa-Rica Datensatzes, Geomar Report Nr. 91.

Hale, D., 1983: Dip-Move-Out by Fourier transform, Ph.D. dissertation, Stanford University, also published as Stanford Exploration Project Report No. 36.

Hale, D., 1991a: Stable explicit depth extrapolation of seismic wavefields, Geophysics, 56, 1770-1777.

Hale, D., 1991b: 3D depth migration via McClellan transforms, Geophysics, 56, 1778-1785.

Hale, D., 1992: Dip Moveout Processing, Colorado School of Mines.

Hildebrand, S., MacKay, S., 1992: Depth migration velocity analysis: A comparison of two approaches, 54th Mtg. and Tech. Exhibit. Europ. Assn. Expl. Geophys., Expanded Abstract, 266-267.

Holberg, O., 1988: Towards optimum one-way wave propagation, Geophysical Prospecting, 36, 99-114.

Hubral, P., 1977: Time-migration - some ray theoretical aspects, Geophysical Prospecting, 25, 728-745.

Jacobowicz, H., Levin, S., 1983: A simple exact method of 3D-migration, Geophysical Prospecting, 31, 34-56.

Jeannot, J.P., Faye, J.P., Denelle, E., 1986: Prestack migration velocities from depth focusing analysis, 56th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 438-440.

- Jeannot, J.P., Berranger, I., 1994: Ray-mapped focusing: A migration velocity analysis for Kirchhoff prestack depth imaging, 64th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1326-1329.
- Judson, D.R., Schultz, P.S., Sherwood, J.W.C., 1978: Equalizing the stacking velocities of dipping events via DEVILISH, 48th Ann. Intern. Mtg. SEG, San Francisco.
- Lafond, C.F., Levander, A.R., 1993: Migration moveout analysis and depth focusing, *Geophysics*, 58, 91-100.
- Levin, F.K., 1971: Apparent velocity from dipping interface reflections, *Geophysics*, 36, 510-516.
- Liner, C.L., Cohen, J.K., 1988: An amplitude preserving inverse of Hale's DMO, 58th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1117-1120.
- Lumley, D., Claerbout, J., Bevc, D., 1994: Anti-aliased Kirchhoff 3-D migration, 64th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1282-1285.
- MacKay, S., Abma, R., 1992: Imaging and velocity estimation with depth-focusing analysis, *Geophysics*, 57, 1608-1622.
- Ratcliff, D.W., Gray, S.H., Whitmore, Jr., N.D., 1992: Seismic imaging of salt structures in the Gulf of Mexico, *The Leading Edge*, 11.
- Ristow, D., 1980: 3D-downward extrapolation of seismic data in particular by finite difference method, Ph.D. dissertation, University of Utrecht, The Netherlands.
- Ristow, D., Rühl, T., 1994: Fourier Finite-Difference Migration, *Geophysics*, 59, 1882-1893.
- Ristow, 1995: 2D- und 3D-Imaging-Verfahren, 15. Mintrop-Seminar, Tagungsband.
- Ristow, D., Rühl, T., 1996: Reducing anisotropy and frequency dispersion by 3-D Fourier finite-difference migration, 66th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 471-474.
- Ristow, 1997a: Vorlesung - 3D-Migration, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, WS 1997/98.
- Ristow, 1997b: Prestack-Poststack-Migration: Vorteile und Nachteile, 17. Mintrop-Seminar, Tagungsband.
- Ristow, D., Rühl, T., 1997a: 3-D implicit finite-difference migration, *Geophysics*, 62, 554-567.
- Ristow, D., Rühl, T., 1997b: Optimized operators for 3D-Fourier finite-difference migration, *Journal of Seismic Exploration*, 6, 367-383.

- Ronen, J., 1987: Wave-equation trace interpolation, *Geophysics*, 52, 973-984.
- Schneider, W.A., 1978: Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*, 43, 49-76.
- Stoffa, P.L., Fokkema, J.T., de Luna Freire, R.M., Kessinger, W.P., 1990: Split-step fourier migration, *Geophysics*, 56, 410-421.
- Stork, C., 1994: Demonstration of MVA tomography with controls and constraints for determining an accurate velocity model for prestack depth migration, 64th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1338-1341.
- Wang, B., Pann, K. Meek, R.A., 1995: Macro velocity model estimation through model-based globally-optimized residual-curvature analysis, 65th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1084-1087.
- Ye, S., Bialas, J., Flüh, E., Stavenhagen, A., v. Huene, R. 1996: Crustal structure of the Middle American Trench off Costa Rica from wide-angle seismic data, *Tectonics*, 15, 1006-1021.
- Yilmaz, O., 1979: Prestack partial migration, Ph.D. dissertation, Stanford University, also published as Stanford Exploration Project Report No. 18.
- Yilmaz, O., Claerbout, J.F., 1980: Prestack partial migration, *Geophysics*, 45, 1753-1779.
- Yilmaz, O, Chambers, R., 1984: Migration velocity analysis by wavefield extrapolation, *Geophysics*, 49, 1664-1674.
- Yilmaz, O., 1994: *Seismic data processing*, Soc. of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK (USA).
- Zhu, J., Lines, L., Gray, S., 1998: Smiles and frowns and their applications in migration velocity analysis, 68th Ann. Intern. Mtg. SEG, Expanded Abstract, 1612-1615.

Anhang A: Realisierung des CMSO-Verfahrens

Im folgenden wird die Herleitung des in dieser Arbeit benutzten eigenen Algorithmus zur Realisierung des CMSO-Verfahrens nach Devaux et al. (1996) beschrieben:

In Abbildung 4.1 stellt die x' -Achse die gewünschte 2D-Linie (Inline) dar, auf die eine gegebene 3D-Zeitreihe zu einer 2D-Zeitreihe transformiert werden soll.

Ein seismischer Impuls, der zur Zeit t registriert wurde, kann von irgendeinem Punkt des Ellipsoides (Abb. 4.1) stammen. Für dieses Ellipsoid im ungedrehten x -, y - System gilt folgende Gleichung:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad , \quad (\text{A.1})$$

mit $b = (a^2 - h^2)^{1/2}$; kleine Halbachse,
 h = halber Abstand Schuß-Empfänger,
 $a = v \cdot t/2$; große Halbachse,
 v = konstante Geschwindigkeit,
 t = Gesamtlaufzeit Schuß-Empfänger,
 $M = M(x_0, y_0)$; CMP-Punkt.

Für die Drehung des Koordinatensystem um den Winkel φ gilt mit bekannten Transformations-Formeln:

$$x = x' \cdot \cos \varphi - y' \cdot \sin \varphi \quad \text{und} \quad y = x' \cdot \sin \varphi + y' \cdot \cos \varphi \quad . \quad (\text{A.2})$$

$$x_0 = x_0' \cdot \cos \varphi - y_0' \cdot \sin \varphi \quad \text{und} \quad y_0 = x_0' \cdot \sin \varphi + y_0' \cdot \cos \varphi \quad . \quad (\text{A.3})$$

Folgende Abkürzungen werden nun eingeführt:

$$A^2 = \frac{1}{a^2} \quad \text{und} \quad (\text{A.4})$$

$$B^2 = \frac{1}{b^2} \quad . \quad (\text{A.5})$$

Aus den Gleichungen A.1 bis A.5 folgt dann:

$$A^2 \cdot [\cos \varphi (x' - x_0') - \sin \varphi (y' - y_0')]^2 + B^2 \cdot [\sin \varphi (x' - x_0') + \cos \varphi (y' - y_0')]^2 = 1 - B^2 \cdot z^2 \quad . \quad (\text{A.6})$$

Die 2D-Schnittfläche (Ellipse) des Ellipsoides mit der Inline-Linie (x' -Achse) ergibt sich aus Gleichung (A.6) für $y'=0$:

$$A^2 \cdot [x' \cdot \cos \varphi - x_0' \cdot \cos \varphi + y_0' \cdot \sin \varphi]^2 + B^2 \cdot [x' \cdot \sin \varphi - x_0' \cdot \sin \varphi - y_0' \cdot \cos \varphi]^2 = 1 - B^2 \cdot z^2 \quad . \quad (\text{A.7})$$

Mit den Gleichungen (A.3) vereinfacht sich Gleichung (A.7) zu:

$$A^2 \cdot [x' \cdot \cos \varphi - x_0]^2 + B^2 [x' \cdot \sin \varphi - y_0]^2 = 1 - B^2 \cdot z^2 \quad . \quad (\text{A.8})$$

Ausquadrieren von Gleichung (A.8) liefert dann:

$$A^2 \cdot x'^2 \cdot \cos^2 \varphi - 2 \cdot A^2 \cdot x_0 \cdot x' \cdot \cos \varphi + A^2 \cdot x_0^2 + B^2 \cdot x'^2 \cdot \sin^2 \varphi - 2 \cdot B^2 \cdot x' \cdot y_0 \cdot \sin \varphi + B^2 \cdot y_0^2 = 1 - B^2 \cdot z^2 \quad . \quad (\text{A.9})$$

Durch Umstellen der Gleichung (A.9) folgt schließlich:

$$x'^2 \cdot (A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi) - 2 \cdot x' \cdot (A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi) + B^2 \cdot z^2 = 1 - A^2 \cdot x_0^2 - B^2 \cdot y_0^2 \quad . \quad (\text{A.10})$$

In Gleichung (A.10) wird jetzt eine quadratische Ergänzung eingefügt:

$$\begin{aligned} & (A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi) \cdot \left[x'^2 - \frac{A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot 2 \cdot x' + \left(\frac{A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right)^2 \right] \\ & - \frac{(A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi)^2}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} + B^2 \cdot z^2 = 1 - A^2 \cdot x_0^2 - B^2 \cdot y_0^2 \quad . \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Das „Einführen des Quadrates“ liefert dann:

$$\begin{aligned} & (A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi) \cdot \left[x' - \frac{A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right]^2 \\ & + B^2 \cdot z^2 = 1 - A^2 \cdot x_0^2 - B^2 \cdot y_0^2 + \frac{(A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi)^2}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} = r \quad . \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Für den rechten Teil der Gleichung (A.12) wurde die Abkürzung r eingeführt.

In Hauptachsendarstellung sieht dann die Gleichung (A.12) nach der Einführung von r folgendermaßen aus:

$$\frac{\left[x' - \frac{A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right]^2}{\frac{r}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi}} + \frac{z^2}{\frac{r}{B^2}} = 1 \quad . \quad (\text{A.13})$$

Es werden schließlich folgende Abkürzungen für die gesuchten 2D-Parameter der 2D-Ellipse eingeführt:

$$x'_M = \frac{A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad , \quad (\text{A.14})$$

$$a'^2 = \frac{r}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad , \quad (\text{A.15})$$

$$b'^2 = \frac{r}{B^2} \quad . \quad (\text{A.16})$$

Damit läßt sich Gleichung (A.13) in verkürzter Form schreiben:

$$\frac{(x' - x'_M)^2}{a'^2} + \frac{z^2}{b'^2} = 1 \quad (\text{2D-Ellipse}). \quad (\text{A.17})$$

Aus x'_M , a' und b' lassen sich alle notwendigen Größen für die gesuchten Parameter der 2D-Zeitreihe bestimmen.

- Für die Halbachse a' gilt:

$$a' = \frac{v \cdot t'}{2} \quad \implies \quad t' = \frac{2 \cdot a'}{v} \quad , \quad (\text{A.18})$$

mit $t' = 2\text{D-Laufzeit}$ und
 $v = \text{konstante Geschwindigkeit}$.

- Für den halben Offset h' entlang der x' -Achse:

$$2 \cdot h' = 2 \cdot \sqrt{a'^2 - b'^2} \quad . \quad (\text{A.19})$$

- Für den neuen 2D-CMP-Punkt auf der x' -Achse gilt:

$$x'_M = \frac{A^2 \cdot x_0 \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot y_0 \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad . \quad (\text{A.14})$$

Die Formeln (A.14, A.15 und A.16) gelten allerdings nur für den Sonderfall, daß der 2D-Tiefenschnitt durch das Ellipsoid entlang der 2D-Achse (Inline) bei $y' = 0$ liegt (vgl. Abb. 4.1). Ist $y' \neq 0$, so ergeben sich für x'_M , a' und b' letztendlich folgende Formeln:

$$x'_M = \frac{A^2 \cdot (x_0 + y' \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot (y_0 - y' \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad , \quad (\text{A.20})$$

$$a'^2 = \frac{1 - A^2 \cdot (x_0 + y' \cdot \sin \varphi)^2 - B^2 \cdot (y_0 - y' \cdot \cos \varphi)^2 + q}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad , \quad (\text{A.21})$$

$$\text{mit } q = \frac{[A^2 \cdot (x_0 + y' \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \varphi + B^2 \cdot (y_0 - y' \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi]^2}{A^2 \cdot \cos^2 \varphi + B^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad . \quad (\text{A.22})$$

$$b^2 = \frac{1 - A^2 \cdot (x_0 + y' \cdot \sin \varphi)^2 - B^2 \cdot (y_0 - y' \cdot \cos \varphi)^2 + q}{B^2} . \quad (\text{A.23})$$

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes Ri 688/5-1 MIGMAK am GEOMAR Forschungszentrum für marine Geowissenschaften der Universität Kiel. Für die Unterstützung danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Für die hervorragende Betreuung der Arbeit, die ständige Diskussionsbereitschaft und das entgegengebrachte Vertrauen danke ich ganz besonders Herrn Prof. Dr. Dietrich Ristow.

Mein Dank gilt auch allen anderen ehemaligen Mitarbeitern unseres Arbeitsteams für die fachliche und menschliche Beratung. Besonderer Dank gilt hier Herrn Dr. Thomas Rühl, der mich in den Anfängen meiner Arbeit am GEOMAR unterstützt hat und Herrn Dr. Jan Hauschild, der mir mit freundschaftlicher Beratung stets eine sehr große Hilfe war.

Bei Herrn Dr. Dirk Kläschen möchte ich mich für seine stetige Verfügbarkeit als wertvoller Diskussionspartner und die fachkundige Bewältigung diverser Hard- und Softwareprobleme bedanken.

Herrn Prof. Dr. Bernd Milkereit danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Den genannten und allen übrigen Mitarbeitern meiner Abteilung danke ich für die angenehme und kameradschaftliche Atmosphäre, in der fruchtbares Arbeiten erst möglich wird.

Für die Geduld und die uneingeschränkte liebevolle Unterstützung, die während der Anfertigung dieser Arbeit erforderlich war, möchte ich mich ganz herzlich bei meiner kleinen Giannina bedanken.