

TRENNUNG ABWÄRTS UND AUFWÄRTS LAUFENDER WELLEN DURCH STAPELUNG VON GEOPHON- UND HYDROPHONSPUREN

K. Köhler

Zusammenfassung

In Vertikalen Seismischen Profilen werden sowohl abwärts laufende als auch aufwärts laufende Wellen beobachtet, die sich gegenseitig überlagern. Bei der Datenverarbeitung kann man diese Wellen gewöhnlich aufgrund ihrer entgegengesetzten Scheingeschwindigkeiten trennen. Diese Wellentrennung ist jedoch problematisch, wenn nicht genügend viele Empfängertiefen für die Mehrspurfilterung vorliegen, wenn die Signalformen in benachbarten Tiefen verschieden sind oder wenn die Scheingeschwindigkeiten wegen der Überlagerung der Wellen nur ungenau gemessen werden können.

Bei Verwendung von Bohrlochsonden mit Geschwindigkeitsempfängern (Geophonen) und Druckempfängern (Hydrophonen) besteht eine zweite Möglichkeit zur Wellentrennung, bei der die unterschiedlichen Richtungsempfindlichkeiten der beiden Empfängertypen ausgenutzt werden. Durch Stapelung der Spuren von beiden Empfängertypen kann man je nach Wahl der Amplitudenfaktoren entweder die abwärts laufenden oder die aufwärts laufenden Kompressionswellen isolieren.

Erste praktische Erfahrungen dieses Verfahrens werden vorgestellt.

1 Einleitung (Physikalische Grundlagen)

Bei der Messung Vertikaler Seismischer Profile enthalten die Bohrlochsonden in manchen Fällen sowohl Geschwindigkeitsaufnehmer (im folgenden kurz "Geophone" genannt) als auch Druckaufnehmer (im folgenden kurz "Hydrophone" genannt). Ein Qualitätsvergleich der mit diesen beiden Empfängertypen gemessenen Spuren fällt meist zugunsten der Geophonspuren aus, wie es auch Dürschner und Stein (1985) gezeigt haben. Folglich scheinen Hydrophone in Bohrlochsonden nur von geringem Nutzen zu sein.

Bei genauer Betrachtung ergibt sich jedoch, daß Geophone und Hydrophone verschiedene Eigenschaften der seismischen Wellen messen, nämlich die Partikelgeschwindigkeit im Gestein bzw. die Druckschwankung in der Spülung der Bohrung. Der Einfachheit halber werde jetzt angenommen, daß die Druckschwankungen in der Spülung näherungsweise proportional zu den Druckschwankungen im Gestein seien, so daß wir davon ausgehen können, daß das Hydrophon die Druckschwankungen im Gestein mißt. Die Verhältnisse bei der Messung einer Kompressionswelle sind in Bild 1 skizziert.

Für Kompressionswellen hat Helbig (1983) ausführlich abgeleitet, daß Partikelgeschwindigkeit und Druck einander proportional sind, wobei die seismische Impedanz der Proportionalitätsfaktor ist. Jedoch ist zu beachten, daß die Partikelgeschwindigkeit ein Vektor ist, wohingegen der Druck ein Skalar ist. Der Meßwert des Geophons ist daher zusätzlich vom Cosinus des Winkels α zwischen der Partikelgeschwindigkeit und der Schwingungsrichtung des Geophons abhängig.

Die unterschiedlichen Richtcharakteristiken von Geophon und Hydrophon kann man nutzen, wenn man Wellen mit verschiedenen Ausbreitungsrichtungen voneinander trennen will. So haben Löwenthal und Jakubowicz (1983) vorgeschlagen, durch gleichzeitige Messung mit Geophonen und Hydrophonen auf See das seismische Quellsignal von den Reflexionen an der Meeresoberfläche oberhalb des Streamers zu isolieren.

Bei Vertikalen Seismischen Profilen ist die Nutzung der Richtcharakteristiken besonders naheliegend, weil dabei die Trennung der abwärts und aufwärts laufenden Wellen ein wesentlicher Schritt der Datenverarbeitung ist. Der Kern eines entsprechenden Verfahrens ist die Stapelung der Hydrophonspuren auf die Geophonspuren.

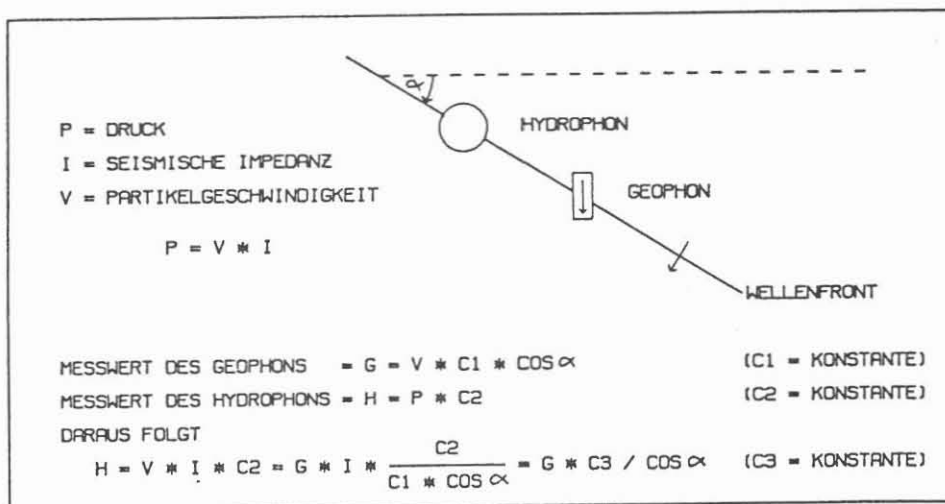


Bild 1: Vergleich der Meßwerte eines Geophons (Geschwindigkeitsempfänger) und eines Hydrophons (Druckempfänger) beim Durchgang einer Kompressionswelle.

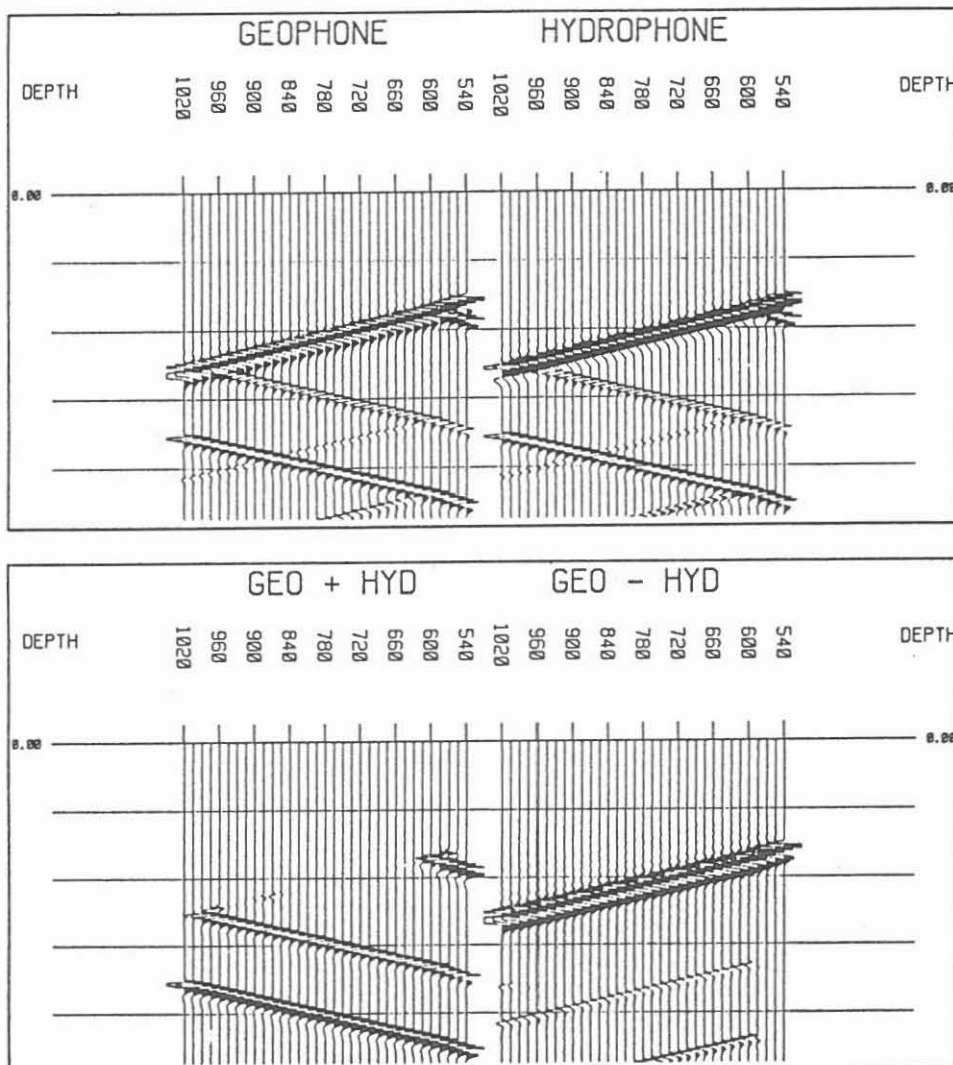


Bild 2: Wellentrennung in einem synthetischen VSP (DEPTH = Empfängertiefe).
 Oben: Meßwerte von Geophon und Hydrophon.
 Unten links: Summe beider Arten von Meßwerten ergibt das aufwärts laufende Wellenfeld.
 Unten rechts: Differenz beider Arten von Meßwerten ergibt das abwärts laufende Wellenfeld.

2 Anwendung des Verfahrens auf ein synthetisches Beispiel

Bild 2 enthält im oberen Teil die Geophonspuren und Hydrophonspuren eines VSP, das mit einem Programm von Müller und Temme (1982) berechnet worden ist. Die Laufzeiten in beiden Sektionen sind gleich, aber die Amplituden der abwärts laufenden Wellen sind entgegengesetzt gepolt. Die Stapelung der beiden Sektionen führt zu der Sektion links unten, in der die abwärts laufenden Wellen gelöscht sind. Werden vor der Stapelung die Amplituden in den Hydrophonspuren umgepolt, so entsteht die rechts unten gezeigte Sektion, in der die aufwärts laufenden Wellen gelöscht sind.

An diesem synthetischen Beispiel wurde das Grundprinzip des Verfahrens gezeigt. Wie sich das Verfahren in der Praxis bewährt und welche Komplikationen dort auftreten, wird in den folgenden Beispielen gezeigt werden.

3 Anwendung des Verfahrens auf das Beispiel A

In den Bildern 3 und 4 sind die Geophonspuren bzw. Hydrophonspuren des Beispiels A dargestellt. Die Energiequelle war ein Luftpulserarray mit 3 Luftpulsern von zusammen 1,53 l Inhalt (1 x 0,33 l + 2 x 0,6 l, 150 bar), das je Empfängertiefe viermal ausgelöst wurde. Die Spuren mit gleichen Empfängertiefen sind in den gezeigten Sektionen schon gestapelt. In beiden Sektionen kann man deutlich die abwärts laufende Welle erkennen, wohingegen die reflektierten Wellen nicht sichtbar sind.

Die Stapelung der Hydrophonspuren auf die Geophonspuren führt zu den Sektionen in den Bildern 5 und 6. In Bild 5 sind die abwärts laufenden Wellen geschwächt und einige reflektierte Signale kommen zum Vorschein, insbesondere die von dem Reflektor bei etwa 1900 m Tiefe. Bei dem Stapelergebnis in Bild 6 dagegen, das mit umgekehrter Polung der Hydrophonspuren berechnet wurde, sind die abwärts laufenden Wellen erhalten.

Das mäßige Signal/Rauschen-Verhältnis in Bild 5 weist darauf hin, daß im Widerspruch zur anfangs gemachten Näherungsannahme die Signalformen auf den Hydrophonspuren von den Signalformen auf den Geophonspuren abweichen. Zur Verbesserung der Stapelergebnisse ist also eine Signalanpassung naheliegend.

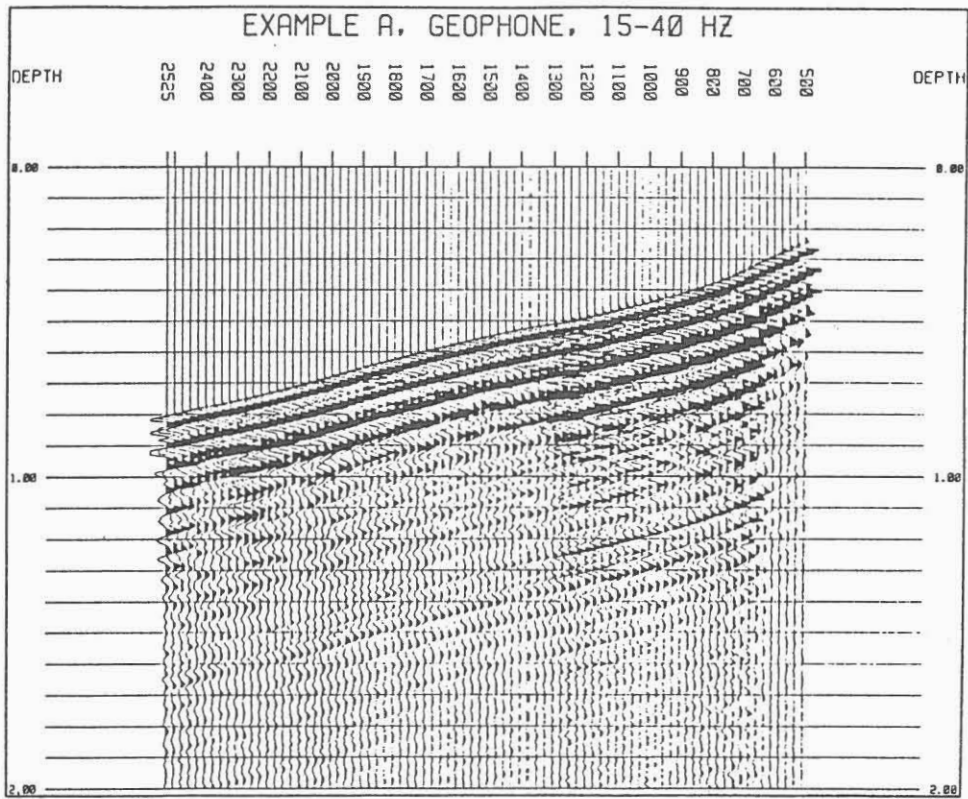


Bild 3: Geophonspuren des Beispiels A. Energiequelle = Luftpulserarray 4fach gestapelt.

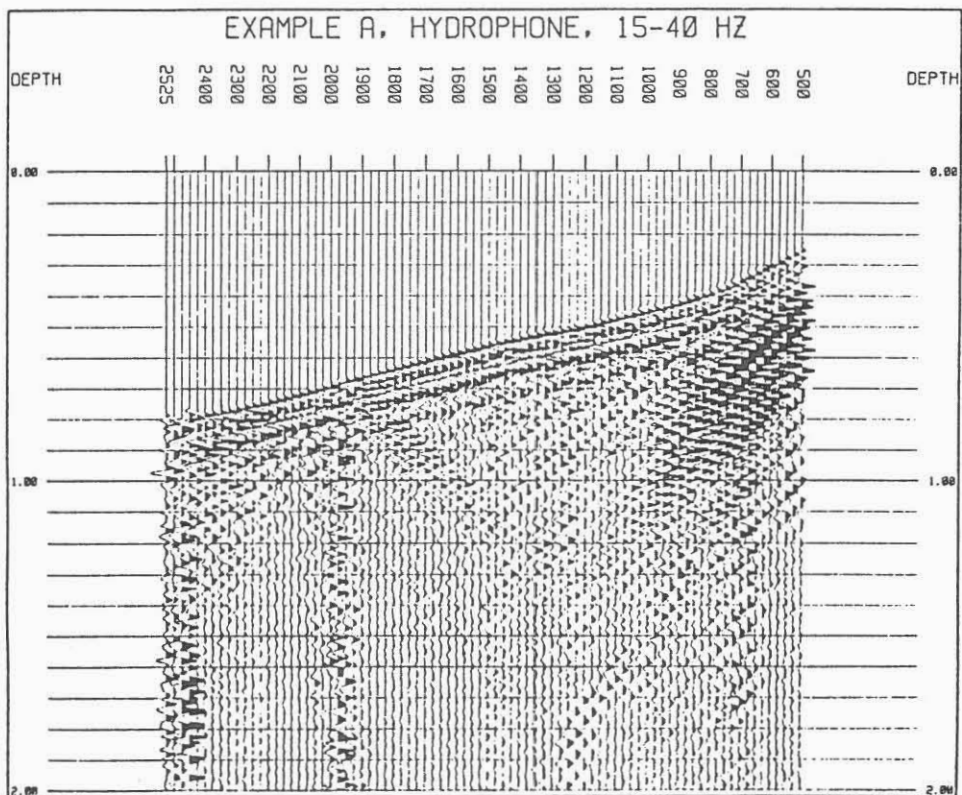


Bild 4: Hydrophonspuren des Beispiels A, Energiequelle = Luftpulserarray 4fach gestapelt.

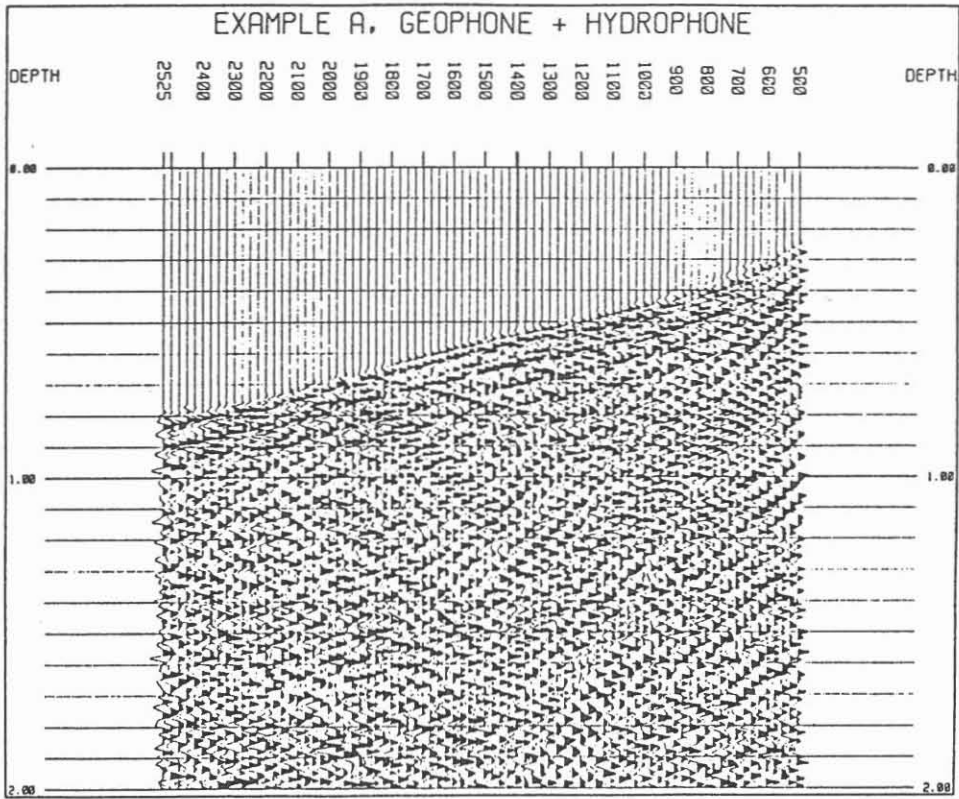


Bild 5: Summe von Geophon- und Hydrophonspuren (300 ms Regelfensterlänge). In etwa 1900 m Tiefe löst sich eine reflektierte Welle ab.

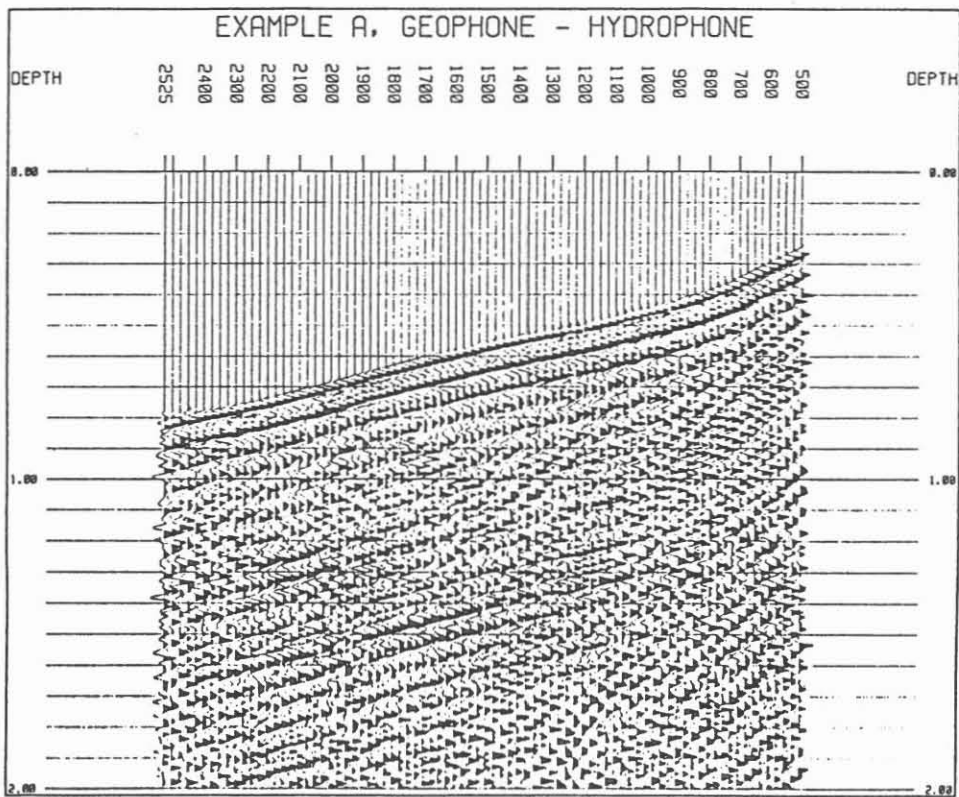


Bild 6: Differenz von Geophon- und Hydrophonspuren (300 ms Regelfensterlänge). Das abwärts laufende Wellenfeld ist sehr deutlich dargestellt.

Die Signalanpassung wurde im vorliegenden Beispiel mit einer Dekonvolution versucht, die wegen der starken Reverberationen ohnehin notwendig ist. Das gewählte Verfahren ist eine Spike-Dekonvolution mit 200 ms Operatorlänge. Für die Bestimmung der Dekonvolutionsoperatoren für die Geophonspuren einerseits und die Hydrophonspuren andererseits wurden die Autokorrelationsfunktionen über jeweils 11 Empfängertiefen gemittelt. Die Ergebnisse der Dekonvolution sind in den Bildern 7 und 8 dargestellt.

In den Ergebnissen der Dekonvolution sind reflektierte Wellen schon schwach sichtbar. Außerdem sollten jetzt die Signalformen auf den Hydrophonspuren ähnlich den Signalformen auf den Geophonspuren sein, so daß die Wellentrennung durch Stapelung bessere Erfolgsaussichten als vor der Dekonvolution hat. In den Ergebnissen der Stapelungen in den Bildern 9 und 10 kann man deutlich die aufwärts laufenden bzw. abwärts laufenden Wellen erkennen. Leider sind die Ergebnisse nicht völlig zufriedenstellend, weil die aufwärts laufenden Wellen in Bild 9 durch langsame Wellen überlagert werden, die wahrscheinlich in der Spülung der Bohrung geführt werden.

Zum Vergleich mit dem Ergebnis in Bild 9 wurde auch eine Mehrspurfilterung auf die dekonvolutionierten Geophonspuren in Bild 7 angewendet. Für diese Mehrspurfilterung wird die Laufzeitkurve der direkten Wellen benötigt. Bild 11 enthält die in den Geophonspuren (Bild 7), den Hydrophonspuren (Bild 8) und den isolierten abwärts laufenden Wellen (Bild 10) gemessenen Laufzeitkurven.

Da die in den Geophonspuren gemessene Laufzeitkurve einen relativ glatten Verlauf hat, wurde sie für die Mehrspurfilterung der Geophonspuren genutzt. Das Ergebnis in Bild 12 entspricht dem üblichen Ergebnis einer Wellentrennung und hat ein besseres Signal/Rauschen-Verhältnis als die Sektion in Bild 9, jedoch bestätigt es die in Bild 9 sichtbaren Reflexionssignale.

4 Anwendung des Verfahrens auf das Beispiel B

Die Geophon- bzw. Hydrophonspuren des Beispiels B sind in den Bildern 13 und 14 dargestellt. Die Energiequellen waren jeweils 0,5 bis 1 kg Sprengstoff 26 m unterhalb der Erdoberfläche. Beide Sektionen wurden bereits mit einer Spike-Dekonvolution behandelt, deren Operatoren aus den Abzeitspuren bestimmt wurden. Sowohl abwärts laufende Wellen als auch aufwärts laufende Wellen sind zu erkennen.

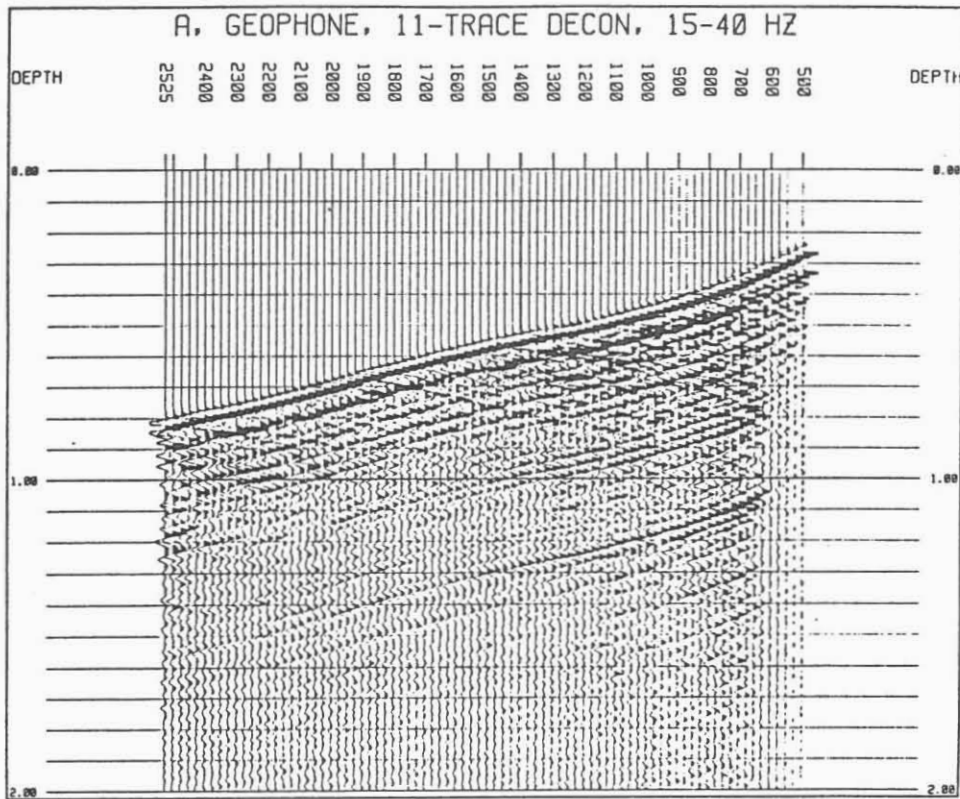


Bild 7: Geophonspuren nach Spikedekonvolution mit 200 ms Operatorlänge. Die Operatorberechnung erfolgte aus jeweils 11 Nachbarspuren.

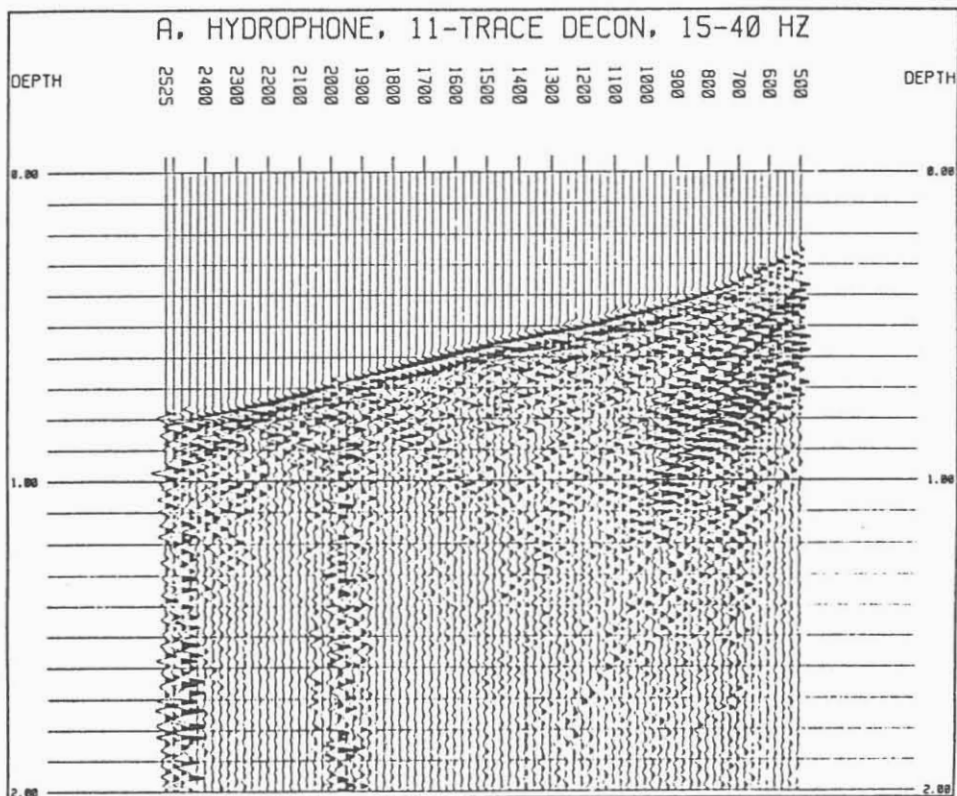


Bild 8: Hydrophonspuren nach Spikedekonvolution mit 200 ms Operatorlänge. Die Operatorberechnung erfolgte aus jeweils 11 Nachbarspuren.

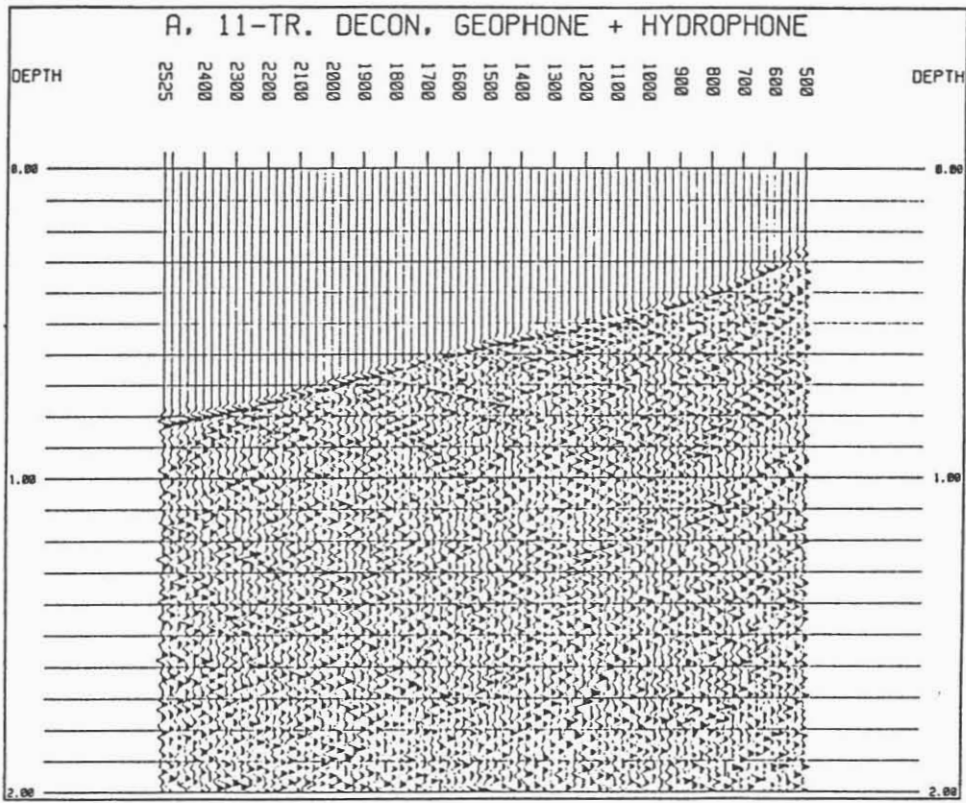


Bild 9: Summe von Geophon- und Hydrophonspuren nach Spikedekonvolution (300 ms Regelfensterlänge). Das Signal/Rauschen-Verhältnis ist gegenüber Bild 5 verbessert.

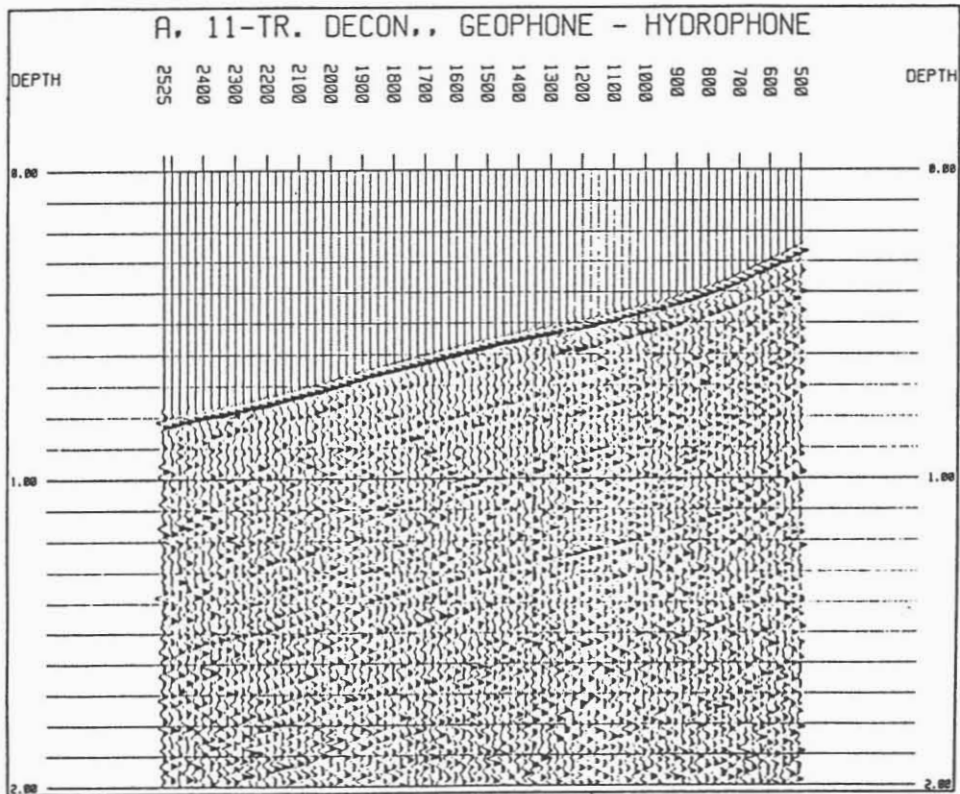


Bild 10: Differenz von Geophon- und Hydrophonspuren nach Spikedekonvolution (300 ms Regelfensterlänge). Die Signalform der abwärts laufenden Wellen ist sehr kurz.

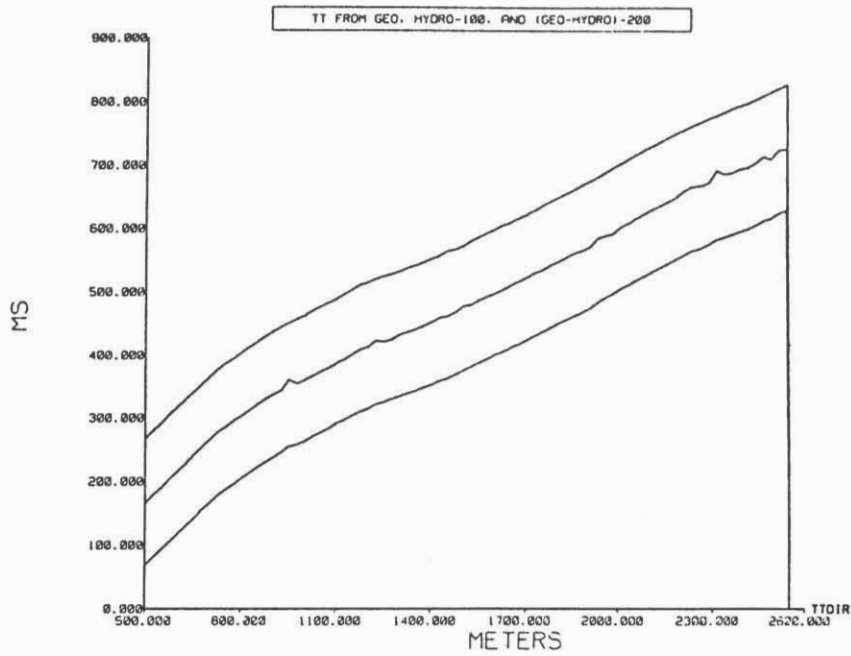


Bild 11: Laufzeitkurven der direkten Welle in Beispiel A, jeweils um 100 ms versetzt dargestellt.

Oben: Analyse der Geophonspuren (siehe Bild 7)

Mitte: Analyse der dekonvolvierten Hydrophonspuren (siehe Bild 8)

Unten: Analyse der Differenz von Geophon- und Hydrophonspuren (siehe Bild 10).

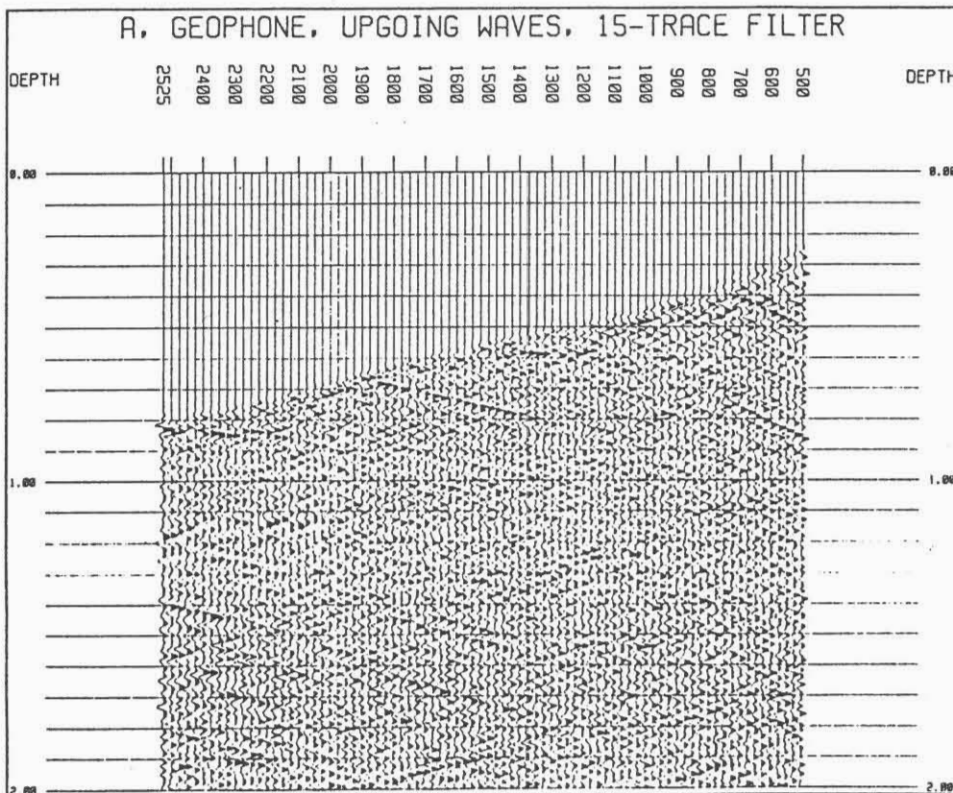


Bild 12: Aufwärtslaufendes Wellenfeld, berechnet mit einem Mehrspurfilter aus den Geophonspuren (siehe Bild 7). Die Reflexionssignale in Bild 9 werden bestätigt.

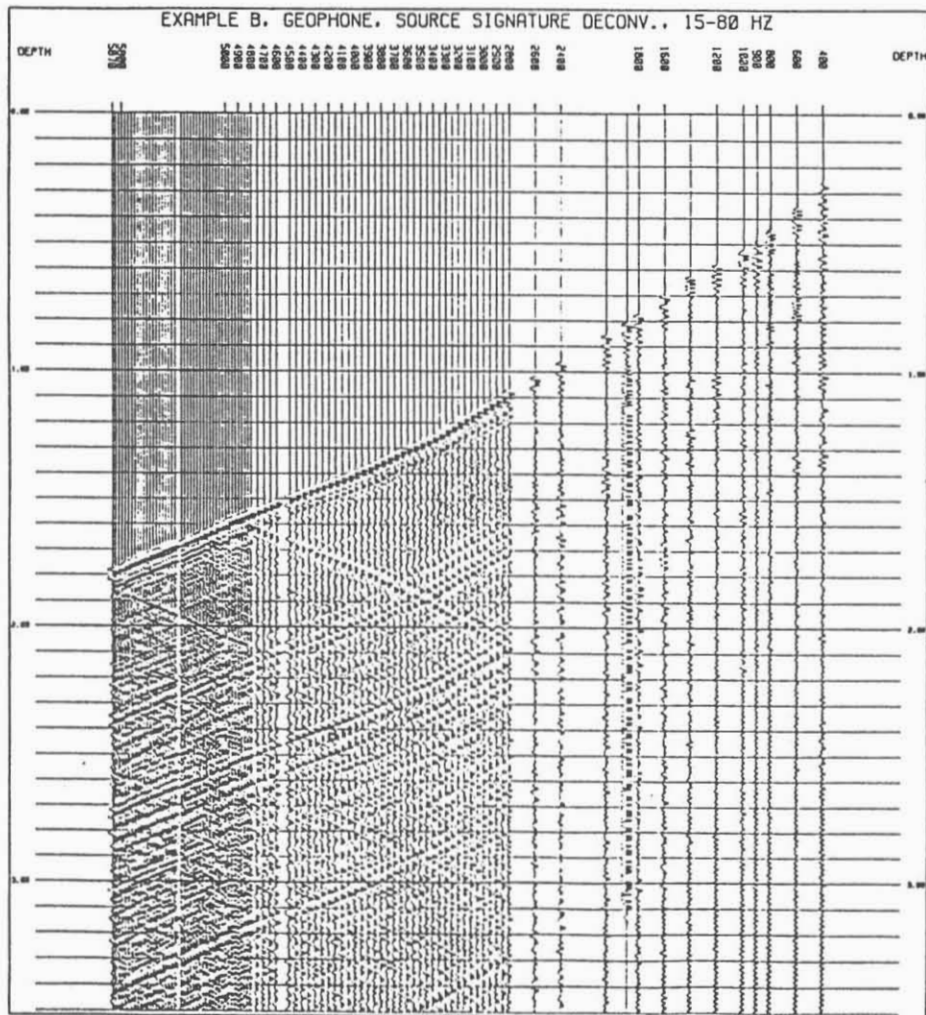


Bild 13: Geophonspuren des Beispiels B, Energiequelle = Sprengstoff.

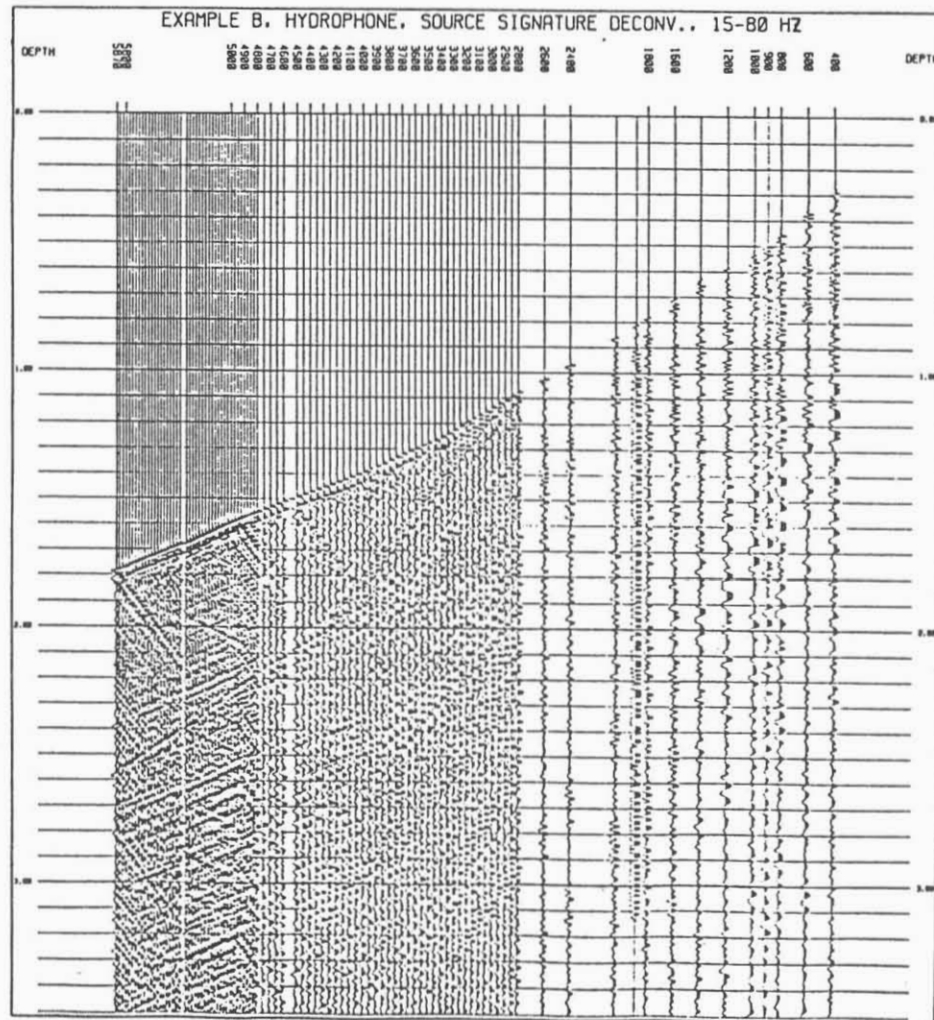


Bild 14: Hydrophonspuren des Beispiels B, Energiequelle = Sprengstoff.

Durch Kreuzkorrelation über ein Fenster um die Ersteinsätze auf den Spuren aus jeweils gleicher Empfängertiefe wurde geprüft, ob die Signalformen in beiden Sektionen übereinstimmen. Die gemittelte Kreuzkorrelationsfunktion wird in Bild 15 links gezeigt. Im Vergleich zu den rechts daneben abgebildeten gemittelten Autokorrelationsfunktionen der Hydrophonspuren und der Geophonspuren liegt die erwartete Vorzeichenumkehr vor. Die Asymmetrie der Kreuzkorrelationsfunktion weist auf zusätzliche kleine Phasenverschiebungen zwischen Geophon- und Hydrophonspuren hin.

Aus den Korrelationsfunktionen kann man einen Anpassungsoperator berechnen, der die Signalformen auf den Hydrophonspuren an die Signalformen auf den Geophonspuren anpaßt. Nach Anwendung dieses Operators ergab sich die rechts dargestellte gemittelte Kreuzkorrelationsfunktion, die bis auf das Vorzeichen mit der gemittelten Autokorrelationsfunktion der Geophonspuren übereinstimmt. Die angepaßten Hydrophonspuren sind in Bild 16 dargestellt. Der Unterschied gegenüber der unbehandelten Sektion in Bild 14 ist kaum sichtbar.

Die angepaßten Hydrophonspuren wurden mit zwei verschiedenen Polungen auf die Geophonspuren gestapelt, so daß die Sektionen in den Bildern 17 und 18 entstanden. Die aufwärts laufenden Kompressionswellen sind nur noch in Bild 17 zu finden, wohingegen die abwärts laufenden Kompressionswellen nur noch in Bild 18 zu finden sind.

In beiden Stapelergebnissen stören langsame Wellen, die die Kompressionswellen überlagern. Da diese Störsignale vorzugsweise von den Hydrophonspuren stammen, wurde ein Versuch unternommen, sie durch automatische zeitabhängige Gewichtung bei der Stapelung zu unterdrücken. Das Ergebnis der gewichteten Stapelung ist die Sektion mit den aufwärts laufenden Wellen in Bild 19. Im Vergleich zu Bild 17 sind dort die Störwellen zum größten Teil unterdrückt, ohne daß die Signale der aufwärts laufenden Kompressionswellen merklichen Schaden genommen haben.

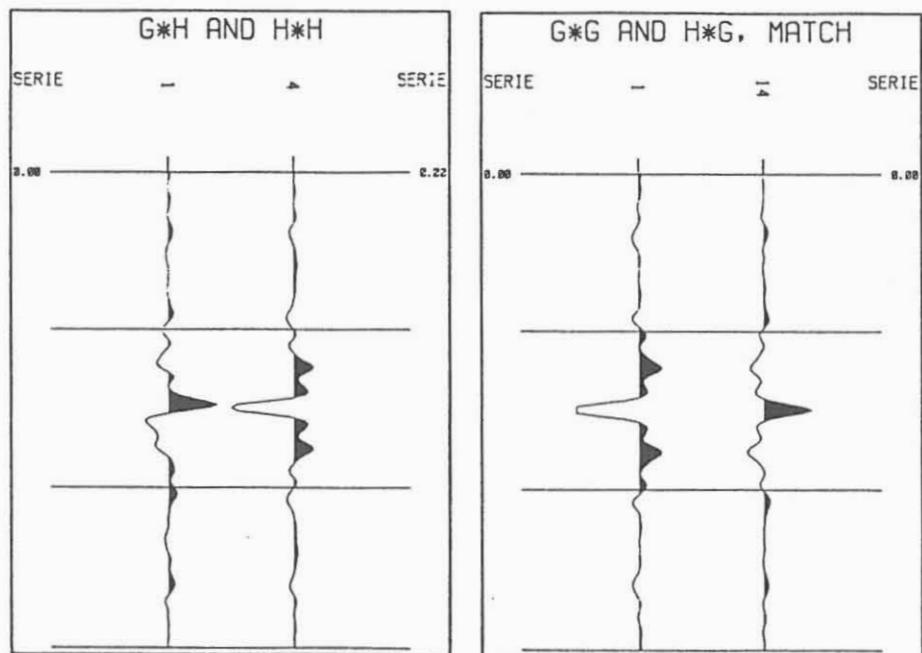


Bild 15: Gemittelte Korrelationsfunktionen (negative Zahlen schwarz).
 Links: Geophonspuren korreliert mit Hydrophonspuren
 2. von links: Autokorrelation der Hydrophonspuren
 2. von rechts: Autokorrelation der Geophonspuren
 rechts: Geophonspuren korreliert mit Hydrophonspuren nach Signalanpassung

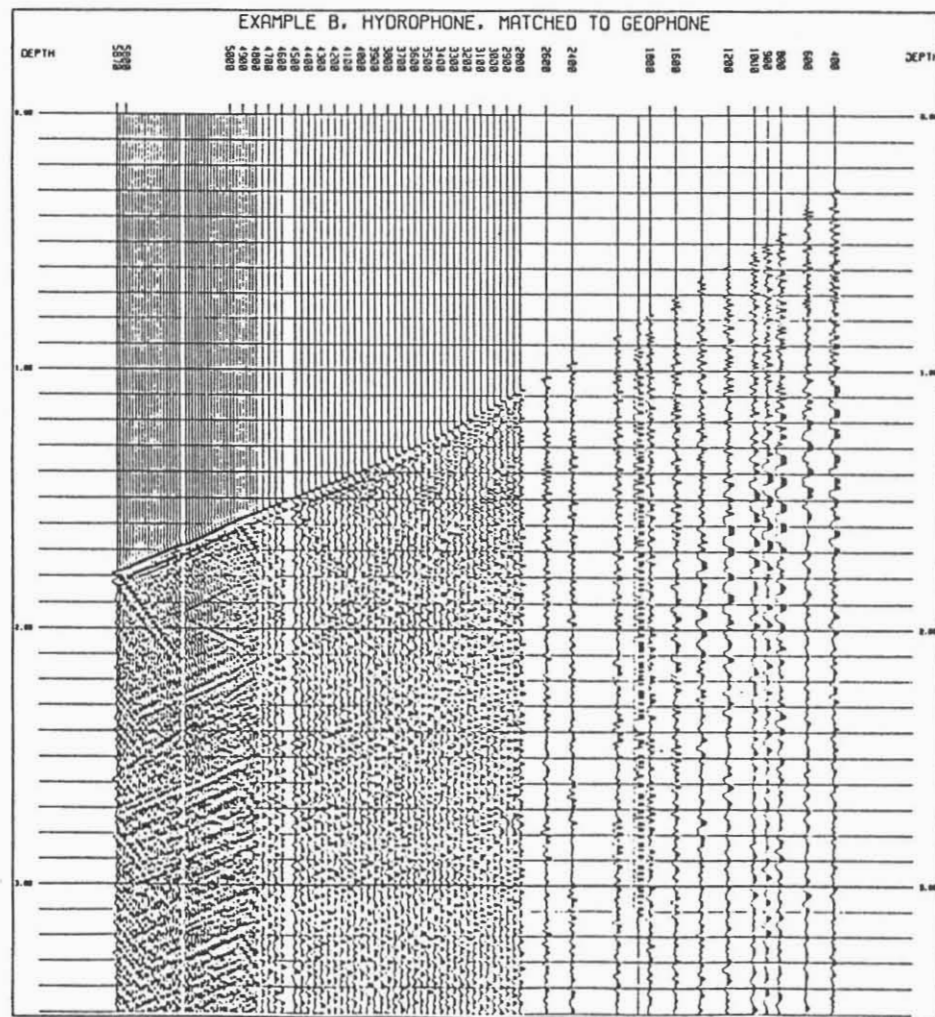


Bild 16: Hydrophonspuren nach Signalanpassung an die Geophonspuren

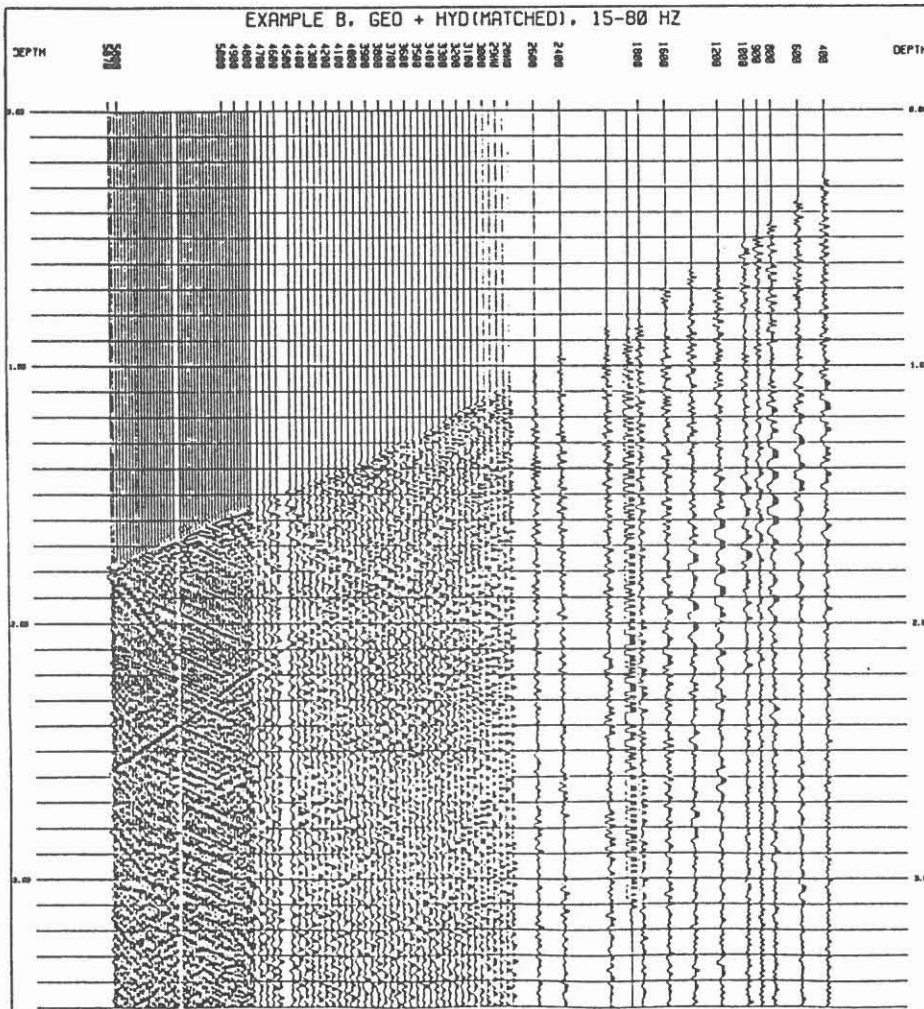


Bild 17: Summe von Geophon- und Hydrophonspuren nach Signalanpassung. Die abwärts laufenden Kompressionswellen sind unterdrückt, aber die reflektierten Wellen werden von langsamen Störwellen überlagert.

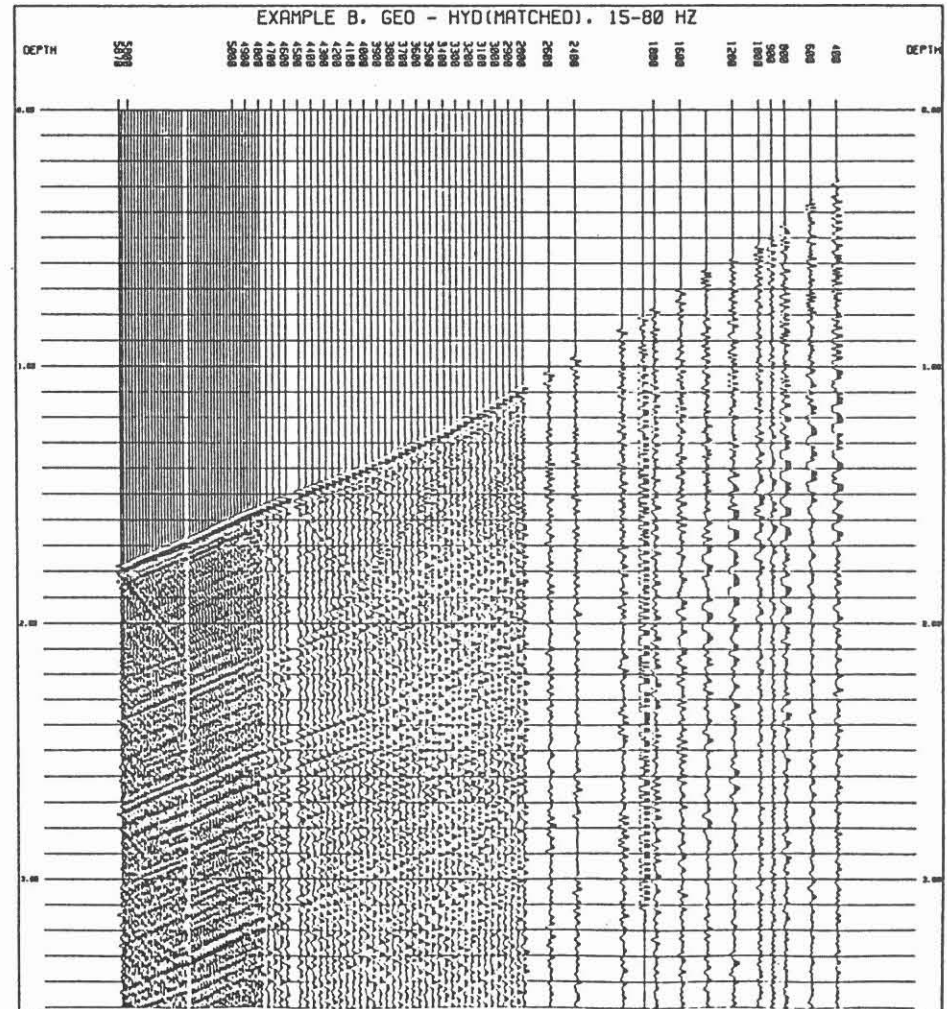


Bild 18: Differenz von Geophon- und Hydrophonspuren nach Signalanpassung. Die aufwärts laufenden Kompressionswellen sind unterdrückt.

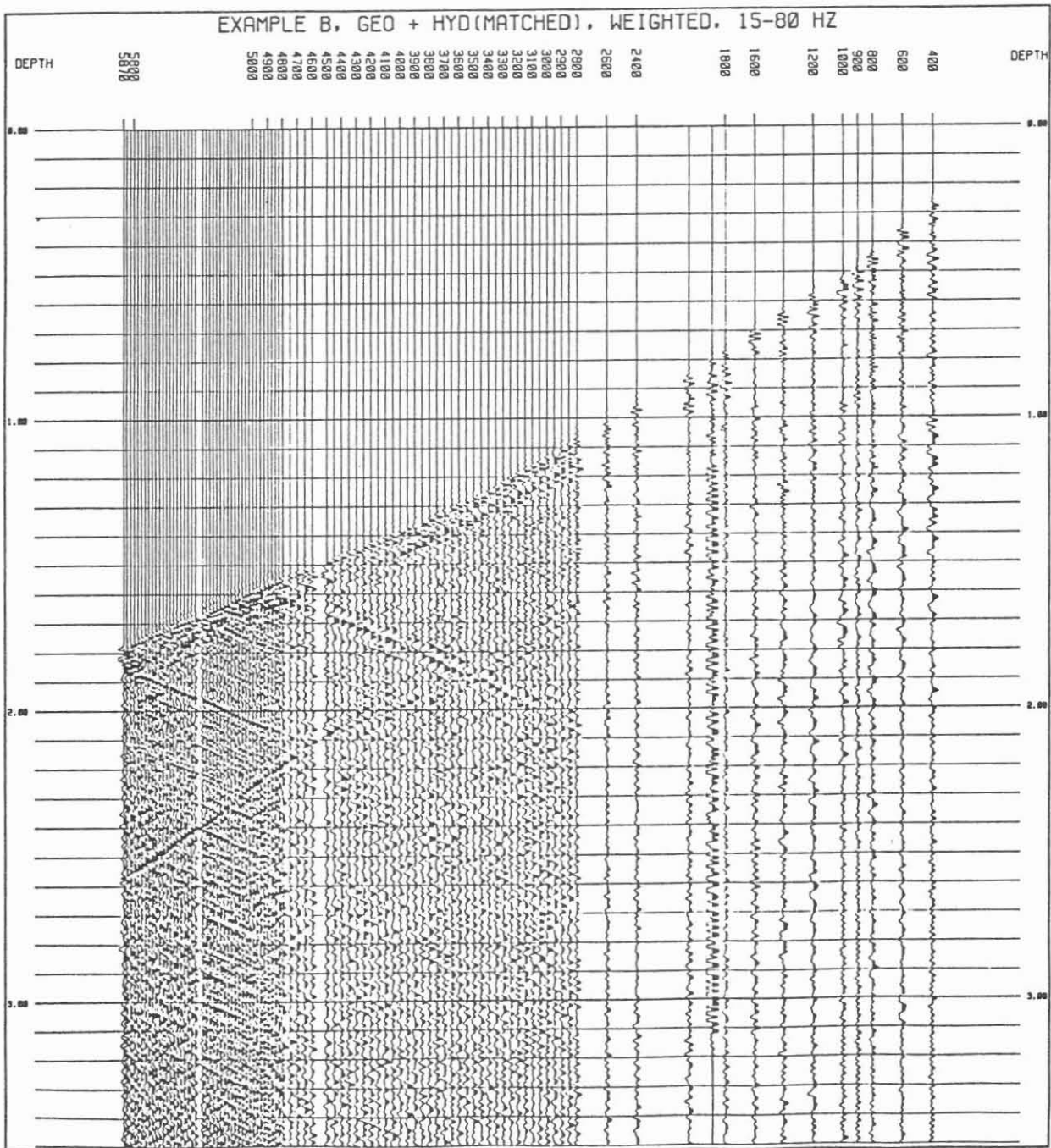


Bild 19: Gewichtete Summe von Geophon- und Hydrophonspuren nach Signalanpassung. Die reflektierten Kompressionswellen sind auswertbar.

5 Schlußfolgerungen

Die gezeigten Beispiele belegen, daß die Stapelung von Hydrophonspuren auf Geophonspuren ein wirksames Verfahren zur Trennung aufwärts und abwärts laufender Kompressionswellen ist. Ein schwerwiegender Nachteil gegenüber Geschwindigkeitsfilterungen mit Spuren aus mehreren Empfängertiefen ist jedoch die Empfindlichkeit der Hydrophonspuren gegen Störwellen. Das führt gewöhnlich zu einer Beeinträchtigung des Signal/Rauschen-Verhältnisses im Stapelerggebnis. Das beschriebene Verfahren ist daher vorzugsweise in solchen Fällen in Erwägung zu ziehen, in denen eine Mehrspurfilterung aus irgendwelchen Gründen nicht oder nicht erfolgreich durchführbar ist.

6 Danksagungen

Den Gesellschaften Amoco Inc., BEB Erdgas und Erdöl GmbH und Mobil Oil AG danke ich für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der gezeigten VSP-Beispiele. Der PRAKLA-SEISMOS AG danke ich für die Erlaubnis zur Vorbereitung und Präsentation dieses Vortrages.

Literaturhinweise

Dürschner, H. und Stein, B. [1985]

Beobachtung von unterschiedlichen seismischen Wellenfeldern und ihre Interpretation am Beispiel eines vertikalen seismischen Profils,
Vortrag auf der 45. Jahrestagung der DGG in München

Helbig, K. [1985]

Seismic impedance,
First Break, März 1983, S. 25 - 32

Loewenthal, D. und Jakubowicz, H. [1983]

Wave equation-based source signature deconvolution,
Vortrag auf der 53. Jahrestagung der SEG in Las Vegas

Müller, G. und Temme, P. [1982]

Numerical simulation of vertical seismic profiling