



Doctoral Thesis

## Wavefield decomposition and imaging of multicomponent seabed seismic data

**Author(s):**

Muijs, Remco

**Publication Date:**

2005

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005026405> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 15986

**WAVEFIELD DECOMPOSITION AND IMAGING  
OF MULTICOMPONENT SEABED SEISMIC DATA**

A dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**

for the degree of  
**Doctor of Natural Sciences**

presented by  
**Remco Muijs**

Drs. Geophysics (M.Sc.)  
Utrecht University, The Netherlands  
born August 7, 1976  
citizen of The Netherlands

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. K. Holliger, examiner  
Prof. Dr. A. G. Green, co-examiner  
Dr. J. O. A. Robertsson, co-examiner  
Dr. ir. D. J. Verschuur, co-examiner

2005

# Zusammenfassung

---

Die Akquisition von Seismikdaten mittels Multikomponenten Sensoren ( $P, v_x, v_y, v_z$ ) auf dem Meeresboden erlaubt die Aufnahme der P- und S-Wellenantwort der Erde und ermöglicht einen vektororientierten Ansatz hinsichtlich der seismischen Datenbearbeitung und Interpretation. Zur optimalen Ausnutzung der vektoriellen Eigenschaften des aufgezeichneten Wellenfeldes sollten die Daten in die auf- und abtauchende P- und S-Wellenkomponenten direkt unterhalb des Meeresbodens zerlegt werden. Die meisten wellengleichungsbasierten Zerlegungsmethoden benötigen präzise Informationen über die elastischen Eigenschaften des Meeresbodens in der unmittelbaren Umgebung der Geophone und gut kalibrierte Sensoren, die eine akkurate vektorielle Beschreibung der wahren Bodenbewegung ermöglichen. In der Praxis sind diese Bedingungen häufig ungenügend erfüllt, so dass elastische Wellenfeldzerlegungsverfahren bis heute nicht standardmässig in der seismischen Datenverarbeitung eingesetzt werden.

Zur Überwindung der praktischen Schwierigkeiten bei der elastischen Wellenfeldzerlegung, habe ich robuste, datenbasierte Methoden entwickelt, die es erlauben, effizient die benötigte a priori Information aus den Daten zu berechnen. Um die elastischen Eigenschaften des Meeresbodens abzuschätzen, habe ich einen neuen Inversionsansatz basierend auf einer Multikomponenten-AVO-Analyse des Reflektionskoeffizienten des Meeresbodens formuliert. Die Anwendung auf synthetische und beobachtete Daten zeigt, dass die Robustheit und Genauigkeit, mit der die Meeresbodeneigenschaften bestimmt werden können, signifikant verbessert werden, wenn die Amplitudeninformation aller vier aufgezeichneten Datenkomponenten miteinbezogen werden. Für den speziellen Fall von Multikomponentendaten, die auf Land aufgenommen wurden, können die oberflächenna-

hen Eigenschaften des Untergrundes mit einem ähnlichen Ansatz bestimmt werden. Dieser Ansatz setzt eine dichte Geophonauslage mit Multikomponentensensoren, von denen mindestens einer in einer geringen Tiefe vergraben ist, voraus.

Zur Berücksichtigung der potentiell inadäquaten Geophonkopplung am Meeresboden und der Variationen in der Instrumentenantwort, ist das ursprüngliche Konzept in ein mehrschrittiges angepasstes Zerlegungsschema erweitert worden, mit dem frequenzabhängige Kalibrationsfilter für die Sensoren und die elastischen Eigenschaften des Meeresbodens abgeschätzt werden können. Dieses Schema basiert auf adäquaten Voraussetzungen auf die Zwischenergebnisse der Wellenfeldzerlegung. Ein grosser Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass es keine a priori Informationen und minimale Eingriffe des Benutzers benötigt, so dass das Wellenfeld effizient und automatisch zerlegt werden kann. Die Robustheit und Genauigkeit dieses Ansatzes werden anhand zweier Datenbeispiele aus der Nordsee gezeigt. Einer dieser Datensätze wurde in geringer Wassertiefe ( $\pm 150$  m) aufgezeichnet und repräsentiert aufgrund starke Interferenz der primären Reflektionen mit den Oberflächenmultiplen eine grosse Herausforderung für die Wellenfeldzerlegung. In beiden Beispielen, führt die adaptive Zerlegung zu befriedigenden Resultaten für die ab- und auftauchenden P-Wellenpotentiale unmittelbar unterhalb des Meeresbodens. Primäre Reflektionen konzentrieren sich wie erwartet in dem auftauchenden P-Wellenpotential und abtauchende Wellen, sowie z.B. „Receiver-Side“-Multiplen werden unterdrückt. Andererseits zeigen die zerlegten S-Wellensektionen nur eine geringe Verbesserung gegenüber den entsprechenden Rohdaten. Dies deutet auf mögliche Fehler in der Kalibrierung der horizontalen Geophone oder auf Mängel im Meeresbodenmodell, für welches die Zerlegungsoperatoren abgeleitet wurden, hin.

Die Wellenfeldzerlegung separiert Oberflächenmultiplen von primären Reflektionen, ermöglicht es jedoch auch, Multiple als sekundäre Quellen an zu sehen, die im Untergrund Reflektionen auslösen. Diese sekundären Reflektionen können konstruktiv im Abbildungsverfahren verwendet werden. Um die in den Multiplen enthaltene Information hervorzuheben, habe ich ein neues „Prestack“-Abbildungskonzept entwickelt, welches die komplette von der Wellenfeldzerlegung zur Verfügung gestellte Information ausnutzt. Der Abbildungsalgorithmus basiert auf einer abwärts gerichteten Fortsetzung des totalen auf- und abtauchenden Wellenfeldes am Meeresboden. Durch die Interferenz von auf- und abtauchende Wellen, die nicht zum selben Reflektionspunkt im Untergrund gehören, hervorgerufene Artefakte, werden mittels einer neuen 2-D Dekonvolutions-„Imaging Condition“ gedämpft. In Gegensatz zur Unterdrückung von Multiplen, erlaubt die Bearbeitung von

multiplen Reflektionen, die Abbildung des Untergrundes über einen signifikant grösseren Raumbereich und die Verwendung eines stärkeren Quellsignals. Weiterhin benötigt diese Methode keine a priori Informationen über die Charakteristiken der Quelle, da das effektive Quellwellenfeld direkt von den aufgezeichneten Daten berechnet wird. Tests mit synthetischen Daten zeigen, dass diese Migrationstechnik genaue Abbilder des Untergrundes für Modelle mit einer moderaten geologischen Komplexität liefert. Bei starker lateraler Heterogenität ist jedoch die Unterdrückung von Interferenzen unzureichend, weil der Effekt komplexer Deckschichten nicht mittels einer einfachen Dekonvolution des abtauchenden Wellenfeldes entfernt werden kann. In diesem Fall, kann die Qualität der migrierten Sektion weiter verbessert werden, indem man eine Strategie wählt, die explizit die Reflektionen von Deckschichten von den Daten subtrahiert. Diese Prozedur kann als ein sekundärer Migrationsschritt angesehen werden, der die interferenzbedingten Artefakte in der ersten Migration vorhersagt. Eine zufriedenstellende Abbildung des Untergrundes kann dann mittels einer adaptiven Subtraktion der beiden migrierten Sektionen erhalten werden.



# Abstract

---

Acquisition of multicomponent seismic data on the seafloor allows both the compressional and shear wave responses of the Earth to be recorded, thus enabling a vector-oriented approach towards seismic data processing and interpretation. To make optimal use of the vectorial nature of the recorded wavefield, the data should be decomposed into the up- and downgoing P- and S-wave components just below the seabed. Most wave-equation-based decomposition techniques require precise information about the elastic properties of the seafloor in the immediate vicinity of the geophones and well-calibrated sensors that provide an accurate vector representation of the true ground motion. In practice, these conditions are usually insufficiently fulfilled, such that wavefield decomposition has yet to be widely employed in seismic data processing.

To overcome the barriers that prevent the routine decomposition of field data, I have developed efficient robust methods for extracting the required a priori information from the data themselves. To estimate the elastic properties of the seafloor, I have formulated a new inversion approach based on multicomponent AVO-analysis of the seafloor reflection coefficients. Application of this approach to synthetic and field data demonstrated that the robustness and accuracy with which the seafloor properties were determined was significantly enhanced by including the amplitude information contained in all four recorded data components. For the special case of land multicomponent data, the near-surface properties can be estimated in a similar fashion, provided that data are acquired using spatially dense patterns of multicomponent geophones, at least one of which should be buried at a shallow depth.

To account for the detrimental effects of imperfect sensor coupling to the seafloor and

variations in instrument response, the initial procedure was extended into a multistep adaptive decomposition scheme with which frequency-dependent sensor calibration filters and elastic seafloor properties were estimated by imposing constraints on intermediate decomposition results. A major advantage of this processing scheme was that it required no a priori information and only a minimal amount of user-defined input, thus allowing the wavefield to be decomposed in an efficient and automated fashion. The robustness and accuracy of this multistep processing scheme were demonstrated on a receiver gather of multicomponent seabed data as well as a full 2D profile of 4C data acquired in the North Sea. The latter data set was recorded in shallower water than the first and thus represented a greater challenge for adaptive decomposition due to increased interference of primary reflections and surface-related multiples. In both cases, adaptive decomposition yielded satisfactory results for the up- and downgoing P-wave potentials just below the seafloor. Primary reflections were successfully concentrated in the upgoing P-wave potential and downgoing events (e.g., receiver-side multiples) were suppressed. The decomposed S-wave sections, on the other hand, provided little improvement over the recorded horizontal inline component of particle velocity. This may be a result of residual errors in the calibration of the horizontal geophones or shortcomings of the simple seafloor model for which the decomposition operators were derived.

Wavefield decomposition not only separates surface-related multiples from primary reflections, but it also allows multiples to be identified as secondary sources that generate subsurface reflections. These multiple generated reflections, in turn, may be used constructively for imaging purposes. To capitalize on the information carried by these reflections, I developed a novel pre-stack imaging concept that takes advantage of the information provided by wavefield decomposition. The imaging algorithm is based on a downward continuation of the total up- and downgoing wavefields at the seabed. Artifacts generated by cross-talk of up- and downgoing events not associated with common subsurface reflections are attenuated by using a new 2-D deconvolution imaging condition. Compared to multiple elimination, processing multiple reflections allows the subsurface to be imaged over a substantially wider spatial extent using an effectively stronger source wavefield. Moreover, this technique does not require any a priori information about the source signature or directivity, because the effective source wavefield is computed directly from the recordings. Tests on synthetic data demonstrate that this migration technique provides accurate subsurface images for models of moderate geological complexity. In the presence of strong lateral heterogeneity, however, the suppression of cross-talk is imperfect,



because the effect of complex overburden cannot be removed by a simple deconvolution of the downgoing wavefield. In such cases, the quality of the migrated sections can be further improved using an image enhancement strategy aimed at subtracting previously imaged multiple-generated reflections from the data during migration. This procedure can be accomplished by a second migration step that effectively predicts the cross-talk-related artifacts in the initial image. A satisfactory subsurface image can then be obtained by means of an adaptive subtraction of the two intermediate migrated sections.