



Doctoral Thesis

2.5D elastic modelling and sensitivity investigations directed towards near-surface seismic waveform analysis

Author(s):

Latzel, Sabine

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006164458> →

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. 18934

**2.5D elastic modelling and sensitivity investigations
directed towards
near-surface seismic waveform analysis**

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH
for the degree of

Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

SABINE LATZEL

Diplom-Physikerin (Dipl. Phys.)
University of Stuttgart (Germany)
born December 19, 1979
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hansruedi Maurer, examiner
Prof. Dr. Alan G. Green, co-examiner
Prof. Dr. Stewart Greenhalgh, co-examiner
Prof. Dr. Christopher Juhlin, co-examiner

2010

Abstract

Analysis of surface-based shallow seismic data can be problematic with traditional methods, such as seismic reflection processing, refraction tomography and surface wave analysis. These methods require identification and isolation of single phases, namely reflected body waves, first break direct/refracted arrivals and dispersed surface wave trains. In shallow seismic data these phases are not well separated, but arrive at the receivers in overlapping time windows. Full waveform inversion methods do not require the individual phases to be separated and are thus expected to be a powerful tool for shallow investigations. Ideally, one would devise a waveform inversion algorithm that considers 3D visco-elastic subsurface models and an arbitrary surface topography. Currently, such a comprehensive approach is computationally too expensive, and the prevalent strategy is to employ a 2D acoustic approximation.

The acoustic approximation is expected to be problematic for shallow seismic data, because such data contain significant portions of surface wave energy that is not considered with this type of numerical modelling. Furthermore, it cannot account for the shear waves and mode conversions, which are prevalent in the seismograms. I quantify the inadequacy of the acoustic approximation with an extensive waveform and waveform sensitivity analysis in both the time domain and the frequency domain, which also highlights the substantial differences between scalar (pressure sources and receivers) and vectorial (directed sources and multi-component receivers) seismic data.

An information content analysis that is based on the eigenvalue spectrum of the approximate Hessian matrix revealed that the combination of vertically oriented sources and horizontally oriented receivers is most favourable. It outperforms the commonly employed combination of vertically directed sources and vertical component receivers. The information content analysis also highlights that there would be little benefit in acquiring full tensorial data, including all possible source/receiver component configurations. If complete seismograms are analysed, there is no difference in information content between time and frequency domain waveform inversions. However, restricting the data space to selected time windows results in a significant loss of information. In contrast, selecting only a few carefully chosen frequencies causes only minor degradations of the information content.

Because of the inadequacy of the acoustic approximation I have implemented a frequency-domain elastic modelling code that is based on the finite element technique. My implementation considers a 2D grid of regular square elements and perfectly matched layer boundary conditions. The resulting matrix equation is evaluated with a state-of-the-art direct matrix solver. Comparisons with analytic 2D solutions indicate that the accuracy depends on the source receiver directivity combination. For example, the accuracy for horizontal and collinear sources and receivers (both at the surface) is about

four times better compared with configurations, where source and receiver directions are perpendicular to each other. Tests with different widths of the perfectly matched boundary layers showed that in most cases a width of 10 grid points is sufficient and that a width of 30 grid points covers all troublesome cases.

A comparison of my frequency-domain finite element modelling results with those from a well established finite difference time domain programme showed a very good match. These comparisons also offered an excellent opportunity to investigate the general efficiency of frequency and time-domain modelling. If the response for several source positions is required, which is a typical scenario during waveform inversions, the frequency-domain approach outperforms the time-domain code approach in terms of computing time. This advantage comes at the expense of a substantially higher memory consumption of the frequency-domain algorithm.

2D waveform modelling does not properly account for the 3D spreading of a point source. This can be partially corrected with 3D to 2D transformation or filtering methods, but these amplitude and phase corrections are not expected to work satisfactorily for shallow seismic data. To strike a balance between the impractical full 3D elastic approach and the problematic 2D approximation, I have implemented a 2.5D modelling algorithm. Here, a Fourier transformation of the 3D differential equations is performed with respect to the coordinate perpendicular to the model plane (y -direction). The resulting 2D differential equations include the resulting wavenumber k_y as a parameter. Choosing an appropriate suite of k_y wavenumbers, with which the inverse transformation to the space domain can be carried out accurately, is a non-trivial problem because the spectra show abrupt disruptions (even pole-like behaviour) at certain critical wavenumbers. For homogeneous and mildly heterogeneous models I propose an uneven sampling strategy based on Gauss-Legendre integration points in which the critical wavenumbers are avoided or skipped. For strongly heterogeneous models this approach is not applicable and an even sampling strategy must be employed because the critical wavenumbers are not known in advance, at least for the surface waves and Stoneley waves. Unfortunately, such an even sampling strategy proved to be numerically unstable, because some k_y wavenumbers may fall on or lie too close to the singularities in the k_y spectrum. The solution to this problem will require more research, perhaps by considering a complex frequency approach or using complex elastic moduli that introduce slight attenuation in the model, thus moving the singularities off the real wavenumber axis along which the inverse transform is applied.

Zusammenfassung

Die Auswertung an der Oberfläche aufgezeichneter flachseismischer Daten mittels herkömmlicher seismischer Methoden wie Reflektionsseismik, Refraktionstomographie und Verfahren zur Oberflächenwellenanalyse ist mit Problemen behaftet. Diese Methoden setzen die Identifizierung bestimmter Anteile des Wellenfeldes voraus, nämlich der Einsätze der reflektierten Raumwellen, der Einsätze der direkten und refraktierten Raumwellen beziehungsweise der Wellenzüge der dispergierten Oberflächenwellen. In flachseismischen Datensätzen treten diese Wellenfeldanteile nicht getrennt auf, sondern werden in sich überlappenden Zeitfenstern aufgezeichnet. Die Methode der Inversion vollständiger Wellenfelder kommt ohne die Identifizierung der einzelnen Anteile des Wellenfeldes aus und ist daher voraussichtlich optimal zur Analyse flachseismischer Daten. Der Idealfall wäre eine Wellenfeldinversion unter Annahme viskoelastischer seismischer Parameter dreidimensionaler heterogener Erdmodelle mit beliebiger Topographie. Ein solcher Ansatz ist gegenwärtig mit zu hohem numerischen Aufwand verbunden. Am weitesten verbreitet sind daher zur Zeit Ansätze, die auf einer akustischen Näherung und zweidimensionalen Modellen basieren.

Es ist abzusehen, daß die akustische Näherung im Fall flachseismischer Datensätze problematisch ist, da diese wesentliche Anteile von Oberflächenwellenenergie enthalten, welche mit einem akustischen Ansatz nicht modelliert werden können. Außerdem läßt die akustische Näherung die Scherwellenanteile und Modenkonzersionen außer acht, die häufig in den Seismogrammen zu beobachten sind. Ich quantifiziere das Ausmaß der Unzulänglichkeit der akustischen Näherung mit Hilfe einer umfangreichen Analyse von Wellenfeldern und Wellenfeldsensitivitäten, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich, die auch die grundlegenden Unterschiede zwischen skalaren (Beschränkung auf Druckwellen) und vektoriellen (Einsatz gerichteter Quellen und Aufzeichnung sämtlicher Wellenfeldkomponenten) seismischen Daten vor Augen führt.

Die Untersuchung des Informationsgehalts flachseismischer Datensätze mittels der Eigenwertspektren der Hesseschen Matrizen offenbart, daß die Kombination vertikal gerichteter Einzelkraftquellen mit der Aufzeichnung der Horizontalkomponente des Wellenfeldes den größten Vorteil bietet. Diese Wahl übertrifft die herkömmlich eingesetzte Kombination vertikaler Einzelkraftquellen mit der Aufzeichnung der Vertikalkomponente des Wellenfeldes in Bezug auf den Informationsgehalt. Die Studie des Informationsgehaltes zeigt auch, daß die Aufzeichnung des gesamten tensoriellen Wellenfeldes für sämtliche Kombinationen von Quell- und Empfängerrichtung wenig weiteren Informationsgewinn bringen würde. Für die Analyse vollständiger Seismogramme besteht kein Unterschied im Informationsgehalt von Wellenforminversionen im Zeit- oder Frequenzbereich. Soll der Datenraum der Inversion jedoch auf einzelne Zeitfenster beschränkt werden führt dies zu einem beträchtlichen Informationsverlust. Demgegenüber ist die Auswahl einiger

mit Bedacht ausgesuchter Frequenzen mit einem relativ geringen Verlust an Information verbunden.

Aufgrund der Unzulänglichkeit der akustischen Näherung habe ich ein Programm zur Modellierung elastischer Wellenausbreitung geschrieben, welches auf der Methode der finiten Elemente beruht. Das Programm basiert auf einem regulären Gitter rechteckiger Elemente und der Anwendung der Methode der „Perfectly Matched Layers“ (PMLs). Das sich aus diesem Ansatz ergebende Gleichungssystem wird unter Verwendung einer dem neuesten Stand der Technik entsprechenden Programmbibliothek gelöst. Vergleiche mit analytischen Lösungen in 2D weisen darauf hin, daß die Genauigkeit der Simulation von der Wahl der Kombination von Quell- und Empfängerrichtung abhängt. So ist beispielsweise die Berechnung der Horizontalkomponente in Quellrichtung für horizontal gerichtete Quellen (Quell- und Empfängerposition an der Oberfläche) etwa viermal genauer als die für Konfigurationen, bei denen Quelle und Empfänger senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Versuche mit unterschiedlicher Breite der PMLs ergaben, daß in den meisten Fällen eine Breite von 10 Elementen ausreicht und eine Breite von 30 Elementen auch problematischere Fälle abdeckt.

Ein Vergleich meiner 2D Modellierungsergebnisse im Zeitbereich mit denen eines gängigen Finite-Differenzen Programms demonstrierte eine sehr gute Übereinstimmung. Diese Vergleichsrechnungen boten außerdem eine hervorragende Gelegenheit, die Effizienz von Modellierungen im Frequenz- und Zeitbereich zu ermitteln. Wenn Daten für mehrere Quellpositionen berechnet werden sollen, was im Zuge einer Wellenfeldinversion der Normalfall ist, ist die benötigte Rechenzeit für die Modellierung im Frequenzbereich geringer. Dieser Vorteil wird durch einen wesentlich größeren Speicherplatzbedarf des Frequenzbereichsalgorithmus erkauft.

Die Modellierung von Wellenfeldern in 2D trägt der dreidimensionalen (3D) Wellenausbreitung, ausgehend von einer Punktquelle, nicht ausreichend Rechnung. Mit Hilfe von Filtermethoden zur Transformation eines 2D in ein 3D Wellenfeld kann dies Näherungsweise korrigiert werden, im Fall von flachseismischen Datensätzen ist jedoch ein befriedigendes Ergebnis dieser Amplituden- und Phasenkorrekturen nicht zu erwarten. Als Mittelweg zwischen einer bisher nicht realisierbaren dreidimensionalen elastische Modellierung und dem problematischen zweidimensionalen Ansatz habe ich mich für einen Algorithmus in 2.5D entschieden. Dabei werden die elastischen Bewegungsgleichungen in 3D nach der Raumkoordinate senkrecht zur Modellierungsebene Fouriertransformiert, also in y -Richtung. Die sich ergebenden 2D Gleichungen enthalten die zugehörige Wellenzahl k_y als Parameter. Die geeignete Wahl einer Reihe von Werten für die Wellenzahl k_y , die eine fehlerfreie Rücktransformation in den Ortsbereich ermöglicht, ist keine einfache Aufgabe, da die Wellenzahlspektren für bestimmte kritische Wellenzahlen Unstetigkeitsstellen oder sogar Pole aufweisen. Für homogene oder nur leicht heterogene Erdmodelle schlage ich eine nicht gleichmäßige Auswahl von Wellenzahlen unter Auslassung der kritischen Wellenzahlen vor, die auf den Stützstellen der Gauß-Legendre-Quadratur beruht. Bei stark heterogenen Erdmodellen kann diese Auswahlmethode nicht angewandt werden, da die Lage der kritischen Wellenzahlen, zumindest für die Oberflächenwellen und Stoneleywellen, in diesem Fall nicht bekannt ist. Stattdessen muß auf eine äquidistante Wahl der Wellenzahlen zurückgegriffen werden. Unglücklicherweise ist der Algorithmus für äquidistante Stützstellen numerisch nicht mehr stabil, da einige Wellenzahlen auf oder zu nahe bei den Singularitäten des Wellenzahlspektrums zu liegen kommen können.

Die Lösung dieses Problems ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen. Denkbar wären die Anwendung der Methode der komplexen Frequenzen oder die Einführung komplexer elastischer Parameter die zu einer leichten Dämpfung der Wellen führen würde, damit die Singularitäten der Wellenfeldspektren nicht mehr auf der Achse der reellen Wellenzahlen zu liegen kommen, entlang derer die Rücktransformation in den Ortsbereich ausgeführt wird.