



Doctoral Thesis

Time reverse modeling of low-frequency tremor signals

Author(s):

Steiner, Brian

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005842672> →

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](#).

**TIME REVERSE MODELING OF
LOW-FREQUENCY TREMOR SIGNALS**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

BRIAN STEINER
Dipl. Natw. ETH Zurich

born 20th October 1977

citizen of
Morschach (SZ)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg	ETH Zurich	examiner
PD Dr. Stefan M. Schmalholz	ETH Zurich	co-examiner
Prof. Dr. Dirk Gajewski	University of Hamburg	co-examiner
PD Dr. Erik H. Saenger	ETH Zurich / FU Berlin	co-examiner

Abstract

This thesis investigates time reverse modeling as a numerical technique for detecting and locating sources of low-frequency (< 10 Hz) tremor signals in a complex subsurface. The idea of locating the spatial origin of signals with time reverse modeling has been adapted from existing studies by other authors in physics, medicine and seismology. This thesis develops time reverse modeling further as an application to sources of continuous tremor signals for which no identification of first arrival time or single event is possible.

The software used for numerical modeling was developed during this thesis. A computer code of full elastic wave propagation in 1D, 2D and 3D based on an explicit finite-difference algorithm has been programmed. This code has been constructed for application on a normal PC (personal computer). It is able to calculate forward and reverse modeling. Reverse modeling can be performed with synthetic signals from forward simulations as well as with field signals acquired by seismometers during field measurements. Prerequisites for the field signals used for reverse modeling are that they are complete in time, synchronous for multiple seismometers and measured with three-component seismometers. An external code for preparation of field data as input signals for numerical reverse modeling is added to the wave propagation code. The wave propagation code is further linked to a parallel code by Erik H. Saenger which allows the performance of highly resolved 2D or demanding 3D simulations distributed on multiple processors. A major topic of time reverse modeling research is the imaging condition as a tool to analyze and present the results. Analyzing individual time steps during reverse modeling is neither convenient nor representative for continuous tremor signals. The imaging condition has rather to cope with the time axis as an additional parameter together with space. An approach is to collapse the time axis in imaging the maximum absolute particle velocity per grid point throughout the entire time of reverse modeling. The highest values of this imaging condition correspond either to a high amplitude of one wave front or to the positive interference of signals reversely emitted by multiple seismometers. The latter is a possible indication of a seismic source as might be created by the simultaneous return of signals at their common source location. This imaging condition comprises both body waves (P-waves and S-waves) into one image. The independent behavior of the P-waves and the S-waves is imaged with their individual maximum energy densities as additional imaging conditions. Advantages and drawbacks of the individual imaging conditions are specifically addressed and discussed.

The time reverse modeling algorithm is applied to synthetic and field data for 2D and 3D geometry. Knowledge and experience gained from 2D applications are advanced and described in this thesis. Results from preliminary studies on 3D applications are summarized in the Appendix.

Synthetic studies with single or multiple sources in the subsurface are carried out to learn about the general focusing behavior of reversely propagated signals and the spatial detectability of seismic sources. In these studies, specific questions are addressed, for example, to signals from different types of sources, to different S/N-ratios (signal to noise ratios) and to a varying Poisson's ratio for the individual P-wave and S-wave velocity models. The synthetic studies reveal the general applicability of time reverse modeling for detecting and locating sources of continuous low-frequency seismic signals. Furthermore, they deliver essential information how to deal with time reverse modeling and how to interpret results, as they point out the limitations and some artifacts of this technique.

Field signals were acquired by measurements distributed over different surveys above two well known hydrocarbon reservoirs in Voitsdorf, Austria. A hypothesis states that hydrocarbon reservoirs may be locations of seismic sources which emit low-frequency tremor-like signals. This hypothesis is surveyed by reverse modeling of recorded low-frequency signals without specifically questioning the mechanical background of possible signal emission. The studies indicate, for the specific area in Voitsdorf, possible presence of sources of low-frequency tremor signals in the vicinity of the hydrocarbon reservoirs. However, some open questions require further investigation before a conclusive evaluation of the hypothesis can be made.

Integral aspects of the application of time reverse modeling on field data are, in addition to modeling, pre-processing of the input signals and post-processing of the output image. Pre-processing consists of collecting synchronous seismograms, band-pass filtering of the data for the low-frequency range and resampling of the time axis to the time sample required for numerical modeling. The input signals, furthermore, have to be revised for possible external disturbances or internal distortion by the seismometers themselves. For example, a short-time strong amplitude which is very much likely not related to a source in the subsurface has to be removed from the seismogram as it may remarkably lower the quality of the result produced by reverse modeling. Post-processing mainly covers adjustment of the color scale of the image to visualize possible source locations. Post-processing also aims to improve multiple results for the same area in statistically balancing randomly distributed side effects, e.g. by stacking of the images.

Although the development and the application of time reverse modeling have been performed and presented in a general way, the examples and the findings are transferable to closely related situations in Earth sciences, engineering or other scientific fields dealing with signal recording and processing. Examples of possible continuative applications

might be the localization of volcanic tremors or the tracking of acoustic emissions caused by strain energy release in construction.

Zusammenfassung

Diese Doktorarbeit untersucht die Rückwärtsmodellierung (engl. time reverse modeling) als numerische Technik, um Quellen von tieffrequenten Erschütterungen (< 10 Hz) (engl. low-frequency tremors) in einem komplexen Untergrund zu entdecken und zu lokalisieren. Die Idee, die Signalquelle mit Hilfe von Rückwärtsmodellierung zu lokalisieren, stammt aus bestehenden Forschungsarbeiten anderer Autoren aus den Bereichen Physik, Medizin und Seismologie. Diese Doktorarbeit entwickelt die Rückwärtsmodellierung weiter, so dass sie auch bei Quellen mit langanhaltenden Erschütterungssignalen angewendet werden kann, bei welchen weder Ersteinsätze noch Einzelereignisse ersichtlich sind.

Die Software für die in der Arbeit verwendete numerische Modellierung wurde während der Doktorarbeit entwickelt. Es wurde ein Computercode für die vollelastische Wellenausbreitung in 1D, 2D und 3D programmiert, welcher auf einem Expliziten Finite Differenzen-Algorithmus basiert. Dieser Code ist für die Anwendung auf einem normalen PC (Personalcomputer) konstruiert. Er eignet sich, um sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsmodellierungen zu berechnen. Die Rückwärtsmodellierung kann einerseits mit synthetischen Signalen aus Vorwärtssimulationen, andererseits auch mit realen Seismometer-Signalen aus Feldmessungen ausgeführt werden. Die Voraussetzungen für die Verwendung realer Daten sind dabei, dass die Daten zeitlich vollständig sind, dass sie zeitgleich von verschiedenen Seismometern stammen und dass sie mit 3-Komponenten-Seismometern gemessen wurden. Damit diese Realdaten als Eingabesignale in der Rückwärtsmodellierung verwendet werden können, müssen sie mit einem weiteren Computerprogramm aufbereitet werden. Dieses ist dem Computerprogramm für Wellenausbreitung angegliedert. Dieses Programm für Wellenausbreitung ist zudem mit einem parallelisierenden Programm von Erik H. Saenger verknüpft, welches die Berechnung hochauflöster 2D- oder anspruchsvoller 3D-Simulationen mit Hilfe mehrerer Prozessoren erlaubt.

In der Erforschung der Rückwärtsmodellierung ist die grafische Darstellung von Resultaten (engl. imaging condition) ein bedeutendes Thema. Die erzeugten Abbildungen werden für die Analyse gebraucht und veranschaulichen die Resultate. Bei der Rückwärtsmodellierung von kontinuierlichen Erschütterungssignalen ist es weder zweckmässig noch repräsentativ, einzelne Zeitschritte zu analysieren. Hingegen ist es wichtig, dass die Zeitachse berücksichtigt wird - die Zeit als ein zusätzlicher Parameter zum Raum. Eine Möglichkeit ist, dass die maximale absolute Partikelgeschwindigkeit während der gesamten Dauer der Rückwärtsmodellierung für jeden Gitterpunkt einzeln dargestellt wird. Dies

entspricht praktisch einer Reduktion der gesamten Zeitachse auf einen einzigen Zeitpunkt. Die höchsten Werte einer solchen Abbildung entsprechen entweder einer hohen Amplitude einer Wellenfront oder einer positiven Interferenz zwischen Signalen, die von verschiedenen Seismometern rückwärts ausgesendet wurden. Letzteres ist ein möglicher Hinweis auf eine seismische Quelle, da dieser Maximalwert durch die gleichzeitige Rückkehr von Signalen an ihrem gemeinsamen Quellort verursacht worden sein könnte. Diese Abbildung fasst beide Körperwellen (P-Wellen und S-Wellen) in einem Bild zusammen. Das eigenständige Verhalten der P-Wellen und der S-Wellen wird durch die Darstellung ihrer individuellen maximalen Energiedichten gezeigt. Die Energiedichten stellen somit eine zusätzliche Abbildungsmöglichkeit dar. Vorteile und Nachteile dieser individuellen Abbildungen werden speziell angesprochen und diskutiert.

Der Algorithmus der Rückwärtsmodellierung wird auf synthetische und reale Daten mit 2D- und 3D-Geometrie angewendet. Das Wissen und die Erfahrung, die durch 2D-Anwendungen gewonnen wurden, sind weit fortgeschritten und in dieser Arbeit beschrieben. Resultate von Vorstudien in 3D-Anwendungen sind im Anhang zusammengefasst.

Synthetische Studien mit einzelnen oder mehreren Quellen im Untergrund dienen dem Erlernen einerseits der generellen Fokussierungsverhalten von rückwärts propagierenden Signalen und andererseits der räumlichen Auffindbarkeit von seismischen Quellen. In diesen Studien werden spezifische Fragen beispielsweise zu Signalen von verschiedenen Quelltypen behandelt, aber auch Fragen zu Signalen mit verschiedenen S/N-Verhältnissen (Signal-zu-Rauschen-Verhältnis) oder einer variablen Querdehnungszahl (engl. Poisson's ratio) für die individuellen P-Wellen- und S-Wellen-Geschwindigkeitsmodelle. Die synthetischen Studien zeigen die generelle Anwendbarkeit der Rückwärtsmodellierung für die Entdeckung und Lokalisierung von Quellen kontinuierlicher tieffrequenter Signale. Die synthetischen Beispiele liefern zudem grundlegende Informationen zum Umgang mit der Rückwärtsmodellierung und der Interpretation der Resultate, da sie auch die Grenzen und Nebeneffekte dieser Technik aufzeigen.

Reale Signale wurden während mehreren Feldmessungen über zwei gut bekannte Reservoirs von Erdöl und Erdgas in Voitsdorf (Österreich) gewonnen. Es gibt die Hypothese, dass Erdöl- und Erdgasreservoirs Orte seismischer Quellen sind, die tieffrequente Signale - ähnlich wie Erschütterungen - aussenden. Diese Hypothese wird in der vorliegenden Arbeit mit Rückwärtsmodellierung untersucht, ohne dass die mechanischen Ursachen dieser vermuteten seismischen Signale hinterfragt werden. Spezifisch für die Region Voitsdorf deuten die Studien eine mögliche Existenz von Quellen tieffrequenter Signale in der Umgebung der Reservoirs an. Dabei bleiben aber mehrere Fragen offen. Diese benötigen noch weitere Untersuchungen, bevor eine schlüssige Beurteilung der Hypothese vollzogen werden kann.

Integrale Bestandteile bei der Anwendung der Rückwärtsmodellierung auf reale Daten sind, zusätzlich zur Modellierung selbst, die Vorbereitung der Eingabesignale und die Nachbearbeitung der ausgegebenen Abbildungen. Die Vorbereitung besteht aus dem Sammeln zeitgleicher Seismogramme, dem Filtern der Signale mit Hilfe von Bandpass-Filtern für den tieffrequenten Bereich und der Verfeinerung der Zeitauflösung, die für die numerische Modellierung benötigt wird. Die Eingabesignale müssen zudem überprüft werden, ob externe Störungen oder interne Verzerrungen durch die Seismometer selbst vorhanden sind. So muss beispielsweise eine kurzzeitige starke Amplitude, die sehr wahrscheinlich nicht mit einer Quelle im Untergrund zusammenhängt, vom Seismogramm entfernt werden. Denn sie könnte die Qualität des Resultats der Rückwärtsmodellierung wesentlich beeinträchtigen. Nachbearbeitung besteht vor allem aus der Anpassung der Farbskala einer Abbildung, um mögliche Quellorte sichtbar zu machen. Die Nachbearbeitung hat auch zum Ziel, den Einfluss zufälliger Nebeneffekte durch statistischen Ausgleich zu verringern, zum Beispiel durch Aufaddieren der Abbildungen von mehreren Rückwärtsmodellierungen im gleichen Gebiet.

Obwohl die Entwicklung und die Anwendung der Rückwärtsmodellierung in allgemeiner Weise ausgeführt und präsentiert werden, sind die Beispiele und die Erkenntnisse auf verwandte Probleme in Erdwissenschaften, Ingenieurwesen oder anderen Wissenschaftsgebieten mit Signalmessung und -prozessierung übertragbar. Beispiele weiterführender Anwendungen könnten die Lokalisierung von vulkanischen Erschütterungen oder die Verfolgung akustischer Emissionen in Baukonstruktionen sein.