

A MIGRATION-TYPE APPROACH FOR THE FAST LOCATION OF SEISMICITY: THEORY AND APPLICATIONS

vorgelegt von
Dipl.-Geophys. Susanne Rentsch

Berlin, April 12, 2007

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
am Institut für Geologische Wissenschaften,
Fachrichtung Geophysik,
der Freien Universität Berlin



Tag der mündlichen Prüfung:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

29. 06. 2007

Prof. Dr. Serge A. Shapiro

Prof. Dr. Rainer Kind

Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorgelegte Dissertation selbst verfaßt und mich dabei keiner anderen als der von mir ausdrücklich bezeichneten Quellen bedient habe. Weiterhin erkläre ich hiermit, daß ich an keiner anderen Stelle ein Prüfungsverfahren beantragt bzw. die Dissertation in dieser oder anderer Form bereits anderweitig als Prüfungsarbeit verwendet oder einer anderen Fakultät als Dissertation vorgelegt habe.

Zusammenfassung

Das Lokalisieren von Erdbeben ist nicht nur eine wichtige Aufgabe in der globalen Seismologie, sondern spielt auch eine große Rolle bei industriellen Anwendungen wie z.B. dem Überwachen von Reservoiren. Die Entwicklung einer schnellen und robusten Lokalisierungsprozedur in dieser Arbeit wurde hauptsächlich von dem industriellen Interesse an Echtzeit-Lokalisierungsprozeduren inspiriert. Bei der Untersuchung von etablierten und modernen Standardlokalisierungsmethoden stellte sich heraus, dass das genaue Picken von P- und S-Wellenankunftszeiten den zeitaufwendigsten Teil innerhalb dieser Methoden darstellt. Bei der Literaturrecherche wurden ebenfalls Lokalisierungsmethoden gefunden, die keine Ankunftszeiten von P- und S-Wellen benötigen und hauptsächlich auf dem Prinzip der Wellenfeld-Extrapolation rückwärts in der Zeit basieren. Der Hauptnachteil dieser Methoden ist, dass sie ein eher dichtes Stationsnetz benötigen. Außerdem erhält man bei diesen Methoden die Bebenlokation nur, indem man für alle Zeitschritte nach dem besten Fokus in den Migrationsbildern sucht. Dies allein kann eine zeitaufwändige und fehleranfällige Aufgabe sein. Im Gegensatz dazu wurde in dieser Arbeit eine Lokalisierungsmethode entwickelt, die weder von exakten P- und S-Wellenankunftszeiten noch von einem dichten Stationsnetz abhängt und auch keine Suche nach einem Fokus im Migratonsbild für jeden Zeitschritt benötigt.

Bevor diese neue Lokalisierungsmethode entwickelt werden konnte, war es notwendig, ein detailliertes Verständnis über seismische Quellen und die Wellen, die sie abstrahlen, zu erlangen. In dieser Arbeit werden die mathematischen Ausdrücke für seismische Wellenfelder, die von verschiedenen Quelltypen abgestrahlt werden, vorgestellt. Die zugehörigen Gleichungen wurden in ein Modellierungsprogramm implementiert, um synthetische 3-Komponentendaten von verschiedenen Quellen zu erzeugen. Diese synthetischen Daten wurden dann daraufhin untersucht, welche Beobachtungen aus diesen dreikomponentigen Aufzeichnungen dazu benutzt werden können, um das Hypozentrum der seismischen Quelle zu invertieren, ohne dabei die Ankunftszeiten von P- und S-Wellen zu Hilfe zu nehmen. In dieser Arbeit lag das Hauptaugenmerk auf der Polarisationsinformation, welche im Fall von P-Wellen die Information über die Wellen-

ausbreitungsrichtung enthält. Mit Informationen über die Ausbreitungsrichtung lässt sich das Hypozentrum der seismischen Quelle invertieren. Die synthetischen Daten wurden auch dazu benutzt, die Zuverlässigkeit und Grenzen von Polarisationsanalysen zu untersuchen. Basierend auf der Abschätzbarkeit von Polarisationsinformationen wurde dann ein Lokalisierungsalgorithmus entwickelt, welcher zusätzlich auch Ereignisdetektierung, Phasenidentifikation unter Zuhilfenahme von arrayspezifischen Beobachtungen als auch Abschätzungen zur Lokalisierungsungenauigkeit und Tests zur Empfängerzuverlässigkeit (welche unabdingbar für die Polarisationsanalyse ist) beinhaltet. Der Kern der Lokalisierungsmethode ist an die sogenannte *Gaussian-Beam-Migration* angelehnt und benötigt zur Lokalisierung lediglich ein Zeitintervall, das die P-Welle eines detektierten Ereignisses enthält. Die Polarisationsinformation in diesem Zeitintervall wird abgeschätzt und als Startrichtung für das *Raytracing* benutzt. Die Energie des Signals wird daraufhin um den Strahl zurück propagiert, wobei die sogenannten *Gaussian Beams* die Energie wichten und damit die Rückpropagation auf den physikalisch relevanten Teil entlang des Stahls begrenzen. Eine Summation der *Gaussian Beams* über alle Empfänger erzeugt eine ausgeprägte Energieverteilung, deren Maximum als Hypozentrum interpretiert wird. Die Funktionsweise der Algorithmen, die in dieser Arbeit entwickelt wurden (Ereignisdetektierung, Phasenidentifikation und Lokalisierung), werden erläutert und an verschiedenen synthetischen Daten getestet (die allesamt mit Rauschen kontaminiert waren). Außerdem ist in dieser Arbeit eine kritische Evaluierung der Signal-Rausch-Verhältnisse dargestellt, unter denen die Methode noch funktioniert und ab wann diese versagt. Bei dieser Evaluation stellte sich heraus, dass die Grenzwerte für das Signal-Rausch-Verhältnis von der Apertur abhängig sind.

Die in dieser Arbeit entwickelte Lokalisierungsmethode wurde an zwei verschiedenen realen Datensätzen getestet. Der erste Datensatz gehört zu einem *Hydraulic Fracture* Experiment, welches im Carthage Cotton Valley Gas Feld (Ost-Texas, USA) durchgeführt wurde. Die Empfängerzuverlässigkeit wurde mit der eigens dafür entwickelten Methode getestet, welche unzuverlässige Empfänger von zuverlässigen Empfängern automatisch unterscheiden konnte. Letztere wurden daraufhin zum Lokalisieren benutzt. Die lokalisierten Hypozentren zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Hypozentren, die durch Standardlokalisierungsmethoden mit Ankunftszeiten von P- und S-Wellen berechnet wurden. Dieser Datensatz wurde außerdem dazu benutzt, die Robustheit der entwickelten Lokalisierungsmethode zu testen. Hierfür wurden verschiedene Zeitintervalle zur Lokalisierung benutzt, die keine direkte P-Welle (dafür aber Rauschen oder ein anderes kohärentes Signal) enthielten und damit gegen die Hauptbedingung dieses Lokalisierungsalgorithmuses verstießen. Die Ergebnisse verhielten sich sehr robust und zeigten für die Intervalle, die keine direkte P-Welle enthielten, kein Energiemaximum, welches als Hypozentrum interpretiert werden könnte.

Der zweite Satz realer Daten stammt vom *San Andreas Fault Observatory at*

Depth (SAFOD). Das SAFOD-Gelände befindet sich in der Nähe von Parkfield in Kalifornien, ungefähr 1.8 km südwestlich der an der Erdoberfläche beobachtbaren San Andreas Verwerfung. SAFOD besteht aus zwei Bohrlöchern, dem *Pilot Hole*, welches ein 2.2 km tiefes vertikales Bohrloch ist, und dem *Main Hole*, welches nach 1.6 km zur Verwerfungszone hin mit einem Winkel von 50-60° zur Vertikalen abgelenkt ist. Der abgelenkte Teil des Bohrloches zeigt hierbei auf eine Region, in der sich ständig wiederholende Erdbeben (sogenannte Targetbeben) beobachtet werden können. Die Lokalisierung dieser Targetbeben stellt eine Schwierigkeit für den entwickelten Lokalisierungsalgorithmus dar, da hierfür die Registrierungsgeometrie unvorteilhaft war. Um Targetbeben dennoch lokalisieren zu können, wurde daraufhin (SAFOD-spezifisch) die Zuhilfenahme von Laufzeitunterschieden in den Algorithmus implementiert. Außerdem konnte die Registrierungsgeometrie dazu benutzt werden, Targetbeben zu identifizieren. Wie bereits oben erwähnt, wurde auf diese Weise ein Targetbeben in dem gesamten Datensatz identifiziert und dann auch mit der SAFOD-spezifischen Implementierung von Laufzeitunterschieden erfolgreich lokalisiert. Die Lokalisierungsungenauigkeit für das Targetbeben, welches innerhalb dieses Projektes besondere Aufmerksamkeit erhielt, wurde detailliert in 3D abgeschätzt, wobei mögliche Ungenauigkeiten in den gepickten Laufzeitunterschieden als auch mögliche Ungenauigkeiten in der Empfängerorientierung berücksichtigt wurden. Die Robustheit der Targetbebenlokalisierung wurde weiterhin unter Verwendung von sechs verschiedenen 3D-Geschwindigkeitsmodellen der SAFOD-Region getestet. Die hierbei berechneten Hypozentren stimmten alle innerhalb ihrer dreidimensionalen Fehlerintervalle überein. Die detektierten Beben, die nicht aus der Targetbebenregion stammten, wurden ebenfalls lokalisiert. Die horizontale Projektion dieser Hypozentren zeigte deutlich, dass die Epizentren entlang der an der Erdoberfläche beobachteten San Andreas Verwerfung verteilt sind.

Die erfolgreiche Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Lokalisierungsmethode auf synthetische Daten und auch auf reale Daten mit ganz verschiedenen Charakteristiken zeigt das große Potential der Methode. Darüber hinaus zeichnet sich die Lokalisierungsmethode durch ihren hohen Automatisierungsgrad aus, da sie nicht von exakt gepickten Ankunftszeiten von P- und S-Wellen abhängt. Dieser hohe Automatisierungsgrad ist dafür verantwortlich, dass Lokalisierungen viel schneller als mit Standardlokalisierungsmethoden berechnet werden können.

Summary

Locating earthquakes is an important task not only in global seismology but also for industrial applications like the monitoring of a reservoir. The industrial interest in location procedures that provide real-time hypocenter estimates mainly inspired the development of a fast and robust location procedure in this thesis. The investigation of state of the art technologies showed that the requirement of accurate P- and S-wave arrival picking is the most time-consuming part of standard location procedures. Furthermore it was found that other modern approaches that do not use arrival times of P- and S-waves are mainly based on the principles of reverse-time wavefield extrapolation. It was found that the main disadvantage of these methods is that they require a rather dense recording network. In order to obtain the event location with a reverse-time migration based method it is necessary to check the obtained images for the 'best-focused' source image at every time step. This check can be time-consuming as well as error-prone by itself. In this thesis a location procedure was developed that does not depend on accurate arrival time picks and which also does not require dense recording networks or a focusing-selection in time as modern reverse time wavefield extrapolation do.

Before designing such a new location procedure a detailed understanding of seismic sources as well as of the waves they radiate must be developed. The mathematical expressions of wavefields radiated from different seismic sources are introduced and the equations were implemented in a modeling program to generate synthetic multi-component data for different source types. The synthetic data were used to analyze how three component seismic recordings can be interpreted in terms of hypocenter inversion without using arrival-time information. In this thesis the main focus was on polarization information which contains in the case of a P-wave the information about the propagation direction of the wave and hence provides the opportunity for hypocenter inversion. The synthetic data were also used to investigate the reliability and limits of polarization estimates. Based on the possibility to estimate polarization information a location procedure was designed which also includes event detection, array-based phase identification as well as estimates of location uncertainties and of receiver fidelity (which is mandatory for polarization analysis). The kernel of the location procedure is in-

spired by Gaussian-beam migration and requires only a selection of time intervals around the P-wave of a detected event. The polarization information of the three-component data in the selected time interval around the P-wave is estimated and used to perform initial-value ray tracing. By weighting the energy of the signal using Gaussian beams around these rays the energy back-propagation is restricted to physically relevant regions only. A summation of the Gaussian beams over all receivers yields regions of distinct energy and the event location corresponds to the region of maximum energy in the resulting image. The principles of the algorithms developed in this thesis (event detection, phase identification and location) are explained and tested on several different synthetic data (which were also noise contaminated). Furthermore, a critical evaluation of the signal-to-noise limits for the designed location method is given and it was found that the signal-to-noise limit depends on the aperture of the recording network.

The developed location procedure is also applied to two case studies. The first data set was from a hydraulic fracture experiment performed in the Carthage Cotton Valley gas field (East Texas, USA). The application of the receiver fidelity test distinguished unreliable receivers from reliable receivers. The latter were used for the event detection and location. The hypocenters obtained with the migration-based procedure developed in this thesis was in a very good agreement with the hypocenters obtained with arrival-time-based standard location procedures. The data set was also used to perform robustness tests for the developed algorithm by using time intervals that did not contain a direct P-wave arrival (only noise or other coherent arrivals) for the event location. The test showed very robust results and no hypocenters were obtained from the time intervals that contradicted the location requirement of containing a direct P-wave.

Furthermore, the location method was applied to data from the San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD). SAFOD site is located near Parkfield, California, about 1.8 km southwest of the San Andreas Fault surface trace. It consists of two boreholes, the Pilot Hole which is a 2.2 km deep vertical borehole and the Main Hole which deviates in about 1.6 km depth towards the fault zone at approximately 50 to 60 degree inclination from the vertical. The deviating part of the Main Hole points towards a hypocentral region of repeating events (target events). The data analyzed in this thesis were recorded with a receiver array from Paulson Geophysical Services Inc. deployed in the deviating part of the Main Hole. The data set contained several events including one target event. It was found that the acquisition geometry was unfavorable to locate a target event and a SAFOD specific implementation of the use of arrival time differences was implemented in the location procedure in order to locate target events. However, the acquisition geometry also provided the opportunity to identify target events. One target event was identified in the data set and located with the additional use of arrival time differences. The uncertainties for the target event location (which were of special interest in the frame of this project) are estimated in 3D by taking into account possible picking errors as well as errors in the receiver orientation. Furthermore,

the robustness of the target event location was tested using six different 3D velocity models which were available for the SAFOD site. All obtained hypocenters of the target events matched within the estimated 3D uncertainty. Other events that did not occur in the hypocentral region of the target events were also located. The horizontal projection of the obtained hypocenters clearly shows that the epicenters are distributed along the San-Andreas Fault surface trace.

The successful application to synthetic data as well as to real data obtained in two different environments shows the high potential of the developed location procedure. Moreover, without the dependence on accurately picked arrival times of P- and S-Waves the presented method is characterized by a high degree of automation which allows for much faster location than standard location procedures.

Contents

1	Motivation and introduction	1
2	Background	7
2.1	Earthquakes	7
2.2	Seismic sources	11
2.3	Multi-component seismology	16
2.4	Ray Theory	25
3	Location procedure	31
3.1	Event detection	31
3.2	Location Method	33
3.3	Application to synthetic data	39
3.3.1	Explosion source	39
3.3.2	Double couple source	43
3.4	Location uncertainty and signal-to-noise limits	47
3.5	Receiver Fidelity	49
3.6	Receiver fidelity tests on synthetic data	53
4	Application to Hydraulic Fracturing Data	57
4.1	Geological settings	59
4.2	The monitoring wells and its instrumentation	61
4.3	Data analysis and receiver fidelity tests	63

Contents

4.4	Event location	67
4.5	Robustness tests	72
4.6	Discussion	72
5	Application to data from the San Andreas Fault Observatory at Depth	75
5.1	The San Andreas Fault Observatory at Depth	75
5.2	Geological settings at the SAFOD site	78
5.3	SAFOD specific implementation of the location procedure	80
5.4	Data set	82
5.5	Processing and Results	83
5.5.1	Event detection and polarization analysis	83
5.5.2	Vp-Vs ratio analysis	89
5.5.3	Target event location and uncertainty estimates	91
5.5.4	Target event location with different velocity models	94
5.5.5	Correlation with Main Hole logging data	96
5.5.6	Complex waveforms	96
5.5.7	Location of detected events	98
5.5.8	Waveform correlation	99
5.6	Discussion	101
6	Conclusions	103
A	MatLab scripts for the polarization analysis	121
B	Cotton Valley supplements	125
B.1	Receiver orientation	125
C	SAFOD supplements	129
C.1	Reading the raw data	129
C.2	Electronic noise	130
C.3	Receiver orientation of the P/GSI array	132
C.4	Velocity models	136

Acknowledgments - Danksagungen	139
List of Publications	141

