Deep seismic imaging in the presence of a heterogeneous overburden:

Numerical modelling and case studies from the Central Andes and Southern Andes

---

Seismische Abbilder heterogener Medien:

Numerische Modellierungen und Fallbeispiele aus den zentralen und südlichen Anden

Mi-Kyung Yoon
Berlin, 2005

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
am Institut für Geologische Wissenschaften
Freie Universität Berlin

Tag der mündlichen Prüfung:	18. Februar 2005
1. Gutachter:	Prof. Dr. S. A. Shapiro
2. Gutachter:	Prof. Dr. R. Kind

Wenn jemand sucht, dann geschieht es leicht,
dass sein Auge nur noch das Ding sieht, das er sucht,
dass er nichts zu finden, nichts in sich einzulassen vermag,
weil er nur immer an das Gesuchte denkt,
weil er ein Ziel hat, weil er vom Ziel besessen ist.
Suchen heisst: ein Ziel haben.

Finden aber heisst: frei sein, offen stehen, kein Ziel haben.

Hermann Hesse

SUMMARY

Heterogeneities of various sizes and different magnitude of velocity fluctuations are distributed within the subsurface. The amplitude and phase fluctuations due to scattering of the wave field severely influence the reflectivity and the coherency of reflections. In this thesis prestack depth migrated images of synthetic and real data sets were analysed to provide an improved understanding of reflection images from complex media. Also, the Reflection Image Spectroscopy method RIS was invented to extract structural details from seismic reflection images of strongly heterogeneous media.

Three numerical experiments were carried out to investigate: the image distortion due to scattering in the heterogeneous layer, the reflection images containing narrow-frequency-bands (RIS method) and the influence of errors in the migration velocity on the reflectors. Three deep reflection data sets from the South American Andes were processed using Kirchhoff prestack depth migration. Furthermore, the ANCORP and the NVR-SPOC data were analysed using the RIS method.

To investigate the influence of scattering in the heterogeneous layer on seismic images synthetic depth sections were calculated using finite difference modelling and Kirchhoff depth migration. Several velocity models consisting of a deep reflector and heterogeneous layer were built. The standard deviation of the velocity fluctuations and the correlation lengths varied.

In the first experiment the influence of scattering on the reflectivity and on the coherency of the reflectors was studied. The results showed that the apparent reflectivity is not only dependent on the magnitude of the velocity fluctuation, but also on the size of the wavelength relative to the correlation length. When the correlation length and the wavelength are of similar size the reflectivity of the heterogeneous layer and of the deep reflector is significantly decreased.

The results indicated that strong scattering in heterogeneous layers might cause the abrupt change in reflectivity of the Nazca reflector in the ANCORP image. Also, the lack of deeper reflections in the eastern part of the profile was related to strong scattering. It was proposed that the QBBS and the Altiplano reflectors represent such heterogeneous layers. The correlation lengths of the heterogeneities in the QBBS are estimated to be few kilometers, and in the Altiplano region a few hundred meters.

The RIS method was applied to the synthetic data in the second experiment. The low-pass and band-pass filtered synthetic seismogram sections were migrated and analysed.

The images showed that the deep reflector appeared incoherent and disrupted in the broadband image. The image fluctuations along the deep reflector continuously decreased with continuous suppression of the high frequency contents. The real reflector shape was recovered in the low-frequency image.

The third experiment studied the influence of migration velocity errors on the shape and the coherency of a reflector below a heterogeneous layer. Mainly the depth of the reflector image was affected. The reflector was shifted linearly to smaller depth when using slower migration velocity and shifted into larger depth when using faster velocity. The shape of the reflector was not distorted by using wrong migration velocities.

The prestack migrated images of the ANCORP and the PRECORP data from the Central Andes and the SPOC-NVR data from the Southern Andes provided a detailed structural image of the subduction zone. In the ANCORP image the Nazca reflector is visible over a distance of about 110 km in E-W direction. The compiled image of the depth section with local earthquake data shows a good spatial correlation between the hypocenters and the upper boundary of the oceanic crust at the beginning of the profile. At greater depths an offset between the hypocenters and the Nazca reflector is visible. A slightly smaller offset is observed in the PRECORP image between the Nazca reflector and the local hypocenters. The ANCORP data were recalculated using two alternative velocity models from tomographic inversion to study whether the observed offset is a result of using wrong migration velocities or whether it is related to the subsurface structure. The comparison of the three depth sections showed that the refraction model provides an accurate image of the reflections from the oceanic crust in the beginning of the profile as well as of the deeper Nazca reflector. The compilation of the depth sections with the hypocenters showed that the apparent offset remains in both recalculated images. It was concluded that the offset is independent from the used migration velocity model, but related to the subsurface structure.

The application of the RIS method to the ANCORP data revealed additional structural details of the Nazca reflector. The data were band-pass filtered in three frequency ranges and migrated. In all of the narrow-band-frequency images distinct reflections from the top and bottom of the oceanic crust were observed along the first 110 km. In the middle of the profile the high-frequency image revealed thin east dipping reflections that were not visible in the broadband depth image. These reflections were located near the lower boundary of the Nazca reflector and were interpreted as the top of the oceanic crust. The high-frequency image also showed thin horizontal reflections at a depth of 80 km interpreted as the top of the reflective continental mantle wedge. The PRECORP section was reinterpreted. The horizontal reflections visible at a depth of 80 km were interpreted as the highly reflective continental mantle wedge. The thin east dipping reflectors at depths larger than 80 km were interpreted as the oceanic crust. The continuation of the top of the oceanic crust indicated that the local seismicity is limited to the oceanic crust and to the upper mantle. The RIS method provided a well resolved image of the internal structure of the Nazca reflector and provided new insights improving the knowledge and the understanding of the deeper subduction zone and the processed therein.

In the SPOC-NVR section reflections from the permotriassic accretionary wedge were revealed. Mainly east dipping reflections were observed. A band of horizontal reflections at a depth around 23 km showed good correlation with a wide-angle reflector from the continental crust. By enhanced amplitude stacking and trace normalisation reflections from the top and the bottom of the oceanic crust were revealed. Furthermore, the RIS method revealed a strong reflection from the oceanic Moho at depths between 35 - 40 km. Additional details of the structures within the continental crust were not obtained.

The RIS method application provided first meaningful results. The focus of the application was mainly set on the analysis of the reflector image and the uncovering of reflectors masked in the broadband images. The relation between the spatial parameters of the heterogeneities and the apparent reflectivity in different frequency bands was not sufficiently investigated. Further numerical modelling studies are still necessary for an improved understanding of the RIS method and its benefits.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Untergrund sind Heterogenitäten unterschiedlicher Grösse und mit unterschiedlicher Stärke der Geschwindigkeitsfluktuationen verteilt. Die durch Streuung des Wellenfeldes verursachten Amplituden- und Phasenfluktuationen beeinflussen dabei die Stärke und die Kohärenz seismischer Reflexionen. In dieser Arbeit wurden synthetische und reale Datensätze Prestack-Tiefen migriert und analysiert, um zu einem besseren Verständnis von seismischen Abbildern komplexer Medien beizutragen. Ausserdem wurde die Reflection-Image-Spectroscopy Methode (RIS) eingeführt, welche strukturelle Details aus seismischen Abbilder heterogener Medien extrahiert.

Es wurden drei numerische Experimente durchgeführt. Dabei wurde die Zerstörung des seismischen Abbildes durch eine heterogene Schicht untersucht. Seismische Sektionen, die nur ein schmales Frequenzband der Daten abbilden, wurden miteinander verglichen und ausgewertet (RIS Methode). Ferner wurde der Einfluss von Fehlern in der Migrationsgeschwindigkeit auf das seismische Abbild der Reflektoren analysiert. Mittels der Kirchhoff Migration wurden drei reflexionsseimische Datensätze aus den südamerikanischen Anden bearbeitet. Zwei dieser Datensätze wurden mit der RIS Methode bearbeitet und interpretiert.

Die synthetischen Tiefensektionen wurden mittels Finite-Differenzen Modellierung und Kirchhoff Prestack-Tiefen Migration für unterschiedliche Geschwindigkeitsmodelle erzeugt. Die Modelle bestanden aus einem ebenen Reflektor unterhalb einer heterogenen Schicht mit variierenden Geschwindigkeitsfluktuationen und Korrelationslängen der Heterogenitäten.

Die Ergebnisse der numerischen Modellierungen zeigten, dass die Reflektivität einer heterogenen Schicht nicht nur von der Stärke der Geschwindigkeitsfluktuationen, sondern auch von dem Verhältnis der Wellenlänge zur horizontalen Korrelationslänge der Heterogenitäten beeinflusst wird. Die Reflektivität nimmt dabei deutlich ab, wenn die Wellenlänge und die Korrelationslänge in einer Grössenordnung liegen. Die Anwendung der RIS Methode zeigte, dass die Fluktuationen des seismischen Abbildes in unterschiedlichen Frequenzbereichen unterschiedlich stark zu beobachten sind. Bildete man ein schmales Frequenzband ab, in dem die Fluktuationen geringer waren als in anderen einem Frequenzband, so konnte z.B. das von Fluktuationen unbeeinflusste wahre Reflektorabbild gewonnen werden. Bei der Migration von reflexionsseismischen Daten in heterogenen Medien mit falschen Geschwindigkeiten wurde hauptsächlich die Tiefe des abgebildeten Reflektors beeinflusst. Die Reflektivität und die Kohärenz des Reflektors wurden nicht verändert.

Die Kirchhoff Prestack-Tiefen Migration der reflexionsseismischen Datensätze ANCORP

und PRECORP aus den zentralen Anden und das SPOC-NVR Profil aus den südlichen Anden erbrachte ein detailliertes strukturelles Abbild der Subduktionszone. So wurde im ANCORP Profil der Nazca Reflektor über eine Länge von 110 km in ost-westlicher Richtung abgebildet. Dieser markiert die subduzierende ozeanische Kruste. Am Anfang des Profils konnte eine gute Übereinstimmung des Reflektors und der Bebenlokationen beobachtet werden. Dahingegen wurde zur Mitte des Profils hin ein Versatz in der Tiefe zwischen dem Reflektor und den Bebenlokationen festgestellt. Ein ähnlicher Offset wurde auch in dem PRECORP Profil beobachtet. Der ANCORP Datensatz wurde mit zwei Geschwindigkeitsmodellen aus der Tomographie neumigriert, um zu klären, ob der beobachtete Offset durch falsche Migrationsgeschwindigkeiten verursacht wurde, oder ob der Offset im Zusammenhang mit den Untergrundstrukturen zu sehen ist. Der Vergleich der alten und der neugewonnenen Sektionen zeigte, dass das Weitwinkel-Geschwindigkeitsmodel ein optimales Abbild der ozeanischen Kruste und des Nazca Reflektors erbrachte. Der beobachtete Offset zwischen dem Nazca Reflektor und den Bebenlokationen war auch in den neuberechneten Sektionen zu beobachten. Daraus wurde geschlussfolgert, dass der Offset struktureller Natur ist.

Durch die Anwendung der RIS Methode auf die ANCORP Daten konnten weitere strukturelle Details des Nazca Reflektors gewonnen werden. Die Daten wurden dabei in drei verschiedenen Frequenzbereichen Bandpass gefiltert und migriert. Die Hochfrequenzsektion zeigte schmale nach Osten einfallenden Reflexionen, die in der Breitbandfrequenzsektion nicht zu erkennen waren. Die Reflexionen im unteren Bereich des Nazca Reflektors wurden als Oberkante der ozeanischen Kruste interpretiert. Desweiteren waren in der Hochfrequenzsektion horizontale Reflektoren in einer Tiefe von 80 km sichtbar, die als die Oberkante des hydratisierten Mantelkeils in der kontinentalen Platte interpretiert wurden. Die in der PRECORP Sektion beobachteten nach Osten einfallenden Reflexionen in einer Tiefe von über 80 km wurden ebenfalls als ozeanische Kruste, die darüber abgebildeten horizontalen Reflektoren als hydratisierter kontinentaler Mantelkeil interpretiert.

In der SPOC-NVR Sektion wurden die hauptsächlich nach Osten einfallenden Reflektoren des permotriassischen Akkretionskeils abgebildet. Ein Band horizontaler Reflexionen in einer Tiefe von 23 km zeigte zudem gute Übereinstimmung mit der Tiefenlage eines in den Weitwinkeldaten beobachteten Reflektors zwischen der oberen und unteren kontinentalen Kruste. Durch eine erweiterte Stapelung und Normierung der Tiefenspuren der migrierten Sektion wurden Reflexionen der ozeanischen Kruste sichtbar. Die Ergebnisse der RIS Methode zeigten dabei einen starken Reflektor der ozeanischen Moho in Tiefen zwischen 35 - 40 km.

Die Anwendung der RIS Methode auf synthetische und reale Daten zeigte erste gute Ergebnisse. Dabei wurden hauptsächlich die Fluktuationen des seismischen Abbildes analysiert. Das Verhältnis zwischen den räumlichen Parametern der Heterogenitäten und der scheinbaren Reflektivität in unterschiedlichen Frequenzbereichen wurde nicht ausreichend untersucht. Daher sind weitere numerische Modellierungen notwendig, um die RIS Methode und ihre Anwendbarkeit besser zu verstehen.

Contents

List of Figures