

Adaptively anisotropic tomography of the European upper mantle

Doctoral Thesis

Author(s):

Schäfer, Julia Felicitas

Publication date:

2011

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006717119>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 19909

Adaptively Anisotropic Tomography of the European Upper Mantle

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
JULIA FELICITAS SCHÄFER
Dipl.-Geophys., Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

1. Oktober 1982
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Eduard Kissling	ETH Zürich	examiner
Dr. Lapo Boschi	ETH Zürich	co-examiner
Prof. Dr. Domenico Giardini	ETH Zürich	co-examiner
Prof. Dr. Jean-Paul Montagner	IPG Paris	co-examiner

Abstract

The purpose of this thesis is to improve our understanding of the dynamics of the upper mantle, and in particular of the European/Mediterranean upper mantle, through the analysis of seismic surface-wave data. Love and Rayleigh waves are the portion of teleseismic seismograms most sensitive to relatively shallow Earth structure, and provide a resolution of the lithosphere and uppermost upper mantle that cannot be achieved by any other seismic data set. The combination of high-quality measurements of both Love and Rayleigh waves assembled in previous studies allows us to constrain not only the isotropic, but also the radially anisotropic pattern of shear-wave velocity heterogeneity in the region of interest. Compared to earlier work, and taking advantage of a constantly growing data coverage, this study focuses on developing and applying a tomographic parameterization strategy that accounts for the known, severe inhomogeneity in the geographic distribution of data (i.e. sources and stations).

On a global scale most of the models today are still parameterized uniformly. No adequate consideration is given to the inhomogeneity of data coverage, which results in a severe nonuniqueness of the tomographic inverse problem, and subsequent loss of model quality due to under- and/or overparameterization in certain regions. If model resolution capability is not taken into account when parameterizing the model, features might be incorrectly imaged (smearing and related issues) in the final model, which, as seismic models are used as constraints to geodynamics, leads to misinterpretation. In order to obtain laterally equally resolved (in the sense of having fewer model parameters in areas where resolution is lower) and thus trustable models which provide as much information as possible on a global scale, a parameterization grid has to adapt to the local model resolution capability. A number of studies have been carried out in this context, mostly involving adaptive voronoi or tetrahedral cells. We have devised a new algorithm for upper-mantle surface-wave tomography based on adaptive voxel parameterization. High image resolution is achieved in regions with dense data coverage while a lower image resolution is kept in regions where the data coverage is low. This way, parameterization is everywhere optimal, both in terms of its computational cost, and of approximately uniform model resolution.

We describe in detail our implementation of this adaptive grid as well as the definition and computation of an appropriate roughness damping operator. Application of our method to two independent, previously published surface-wave data sets leads to two new models of the Earth's upper mantle: one focused on European lithosphere and

uppermost upper mantle, the other, which is so far only very preliminary, global and resolved down to the transition zone thanks to the addition of surface-wave overtone data.

Our models are in agreement with large-scale features which have already been observed in earlier studies, both at the global and regional scale. Interestingly, for what concerns our isotropic tomography models, we believe e.g. to have improved overall seismic resolution of the very deep cratonic root that underlies southern Finland. Another possibly important achievement of this study is the identification of a seemingly robust map of radial anisotropy throughout Europe and the Mediterranean Basin that shows a suggestive agreement with anisotropic features predicted by flow modeling and assumptions on the orientation of olivine crystals. Our preliminary attempt to use overtone measurements suggests a possible improvement in depth resolution in the depth range of the mantle transition zone: features that can be addressed with these data include e.g. slab interaction with the 660 km discontinuity, and transition-zone anisotropy (hence flow and/or composition).

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Doktorarbeit analysieren wir seismische Oberflächenwellen mit dem Ziel zum Verständnis der Dynamik des oberen Mantels, insbesondere im Bereich Europas und des Mittelmeerraums, beizutragen. In teleseismischen Messungen stellen Love und Rayleigh Wellen den Teil da, der die grösste Sensitivität zu relativ oberflächennahen Strukturen aufweist und erlauben daher die Lithosphäre und den obersten Teil des oberen Mantels genauer aufzulösen, als es mit anderen seismischen Datensätzen möglich wäre. Ein in vorangegangenen Studien gemessener, qualitativ hochwertiger, Datensatz bestehend aus einer Kombination aus Love und Rayleigh Wellen, erlaubt uns neben der isotropen auch die radial anisotrope Struktur von Heterogenitäten der Scherwellengeschwindigkeit aufzulösen. Im Vergleich zu früheren Studien profitieren wir von einer sich konstant verbessernden Datenabdeckung und richten den Fokus dieser Arbeit auf die Entwicklung und Anwendung einer Parameterisierung des tomografischen Inversionsproblems, welche den Effekt inhomogener geografischer Datenabdeckung (insbesondere bedingt durch die inhomogene Verteilung von Stationen und seismischen Quellen) berücksichtigt.

Globale Modelle sind bis heute vorwiegend gleichförmig parameterisiert. Eine inhomogene Datenabdeckung wird nicht angemessen berücksichtigt, was in einigen Gebieten durch Über- und/oder Unterparameterisierung zu einem nicht eindeutigen Resultat des tomografischen Inversionsproblems und damit verbundenem Verlust an Modellqualität führt. Das Vernachlässigen des tatsächlichen Auflösungs potentials bei der Parameterisierung des Modells kann zu inkorrekt dargestellt von Strukturen im resultierenden Modell führen (Verschmieren und ähnliche Effekte). Da seismische Modelle in Zusammenhang mit geodynamischen Prozessen interpretiert werden, kann dies zu Fehlinterpretationen führen. Um glaubwürdigere Modelle mit lateral gleichförmiger Auflösung (im Sinne von gröberer Parameterisierung in Regionen mit geringerer Auflösungsfähigkeit) zu erhalten, die den grösstmöglichen Informationsgehalt aufweisen, ist eine Parameterisierung notwendig, die sich lokal an die Auflösungsfähigkeit anpasst. In diesem Sinne wurden bereits eine Reihe von Studien durchgeführt, die in den meisten Fällen Voronoi oder tetraedrische Zellen verwenden. Wir haben einen neuen Algorithmus zur Oberflächenwellen-Tomografie des oberen Mantels entwickelt der auf sich in der Grösse anpassungsfähigen Voxeln basiert. In Regionen mit dichter Datenabdeckung kann eine feine Parameterisierung des resultierenden Modells erzielt werden, während eine gröbere Auflösung in Regionen mit geringerer Datenabdeckung erhalten bleibt. Auf diese Weise wird in jedem Punkt eine

Parameterisierung erreicht die optimal, im Sinne von Rechenzeit als auch im Sinne von Modellauflösung, ist.

Es wird die Implementierung des adaptiven Grids, wie auch die Definition und Berechnung eines angemessenen Dämpfungsparameters für die Modellrauhigkeit detailliert beschrieben. Wir wenden unsere Methode auf zwei bereits publizierte Datensätze, basierend auf Oberflächenwellen, an und erhalten als Resultat zwei neue Modelle des oberen Mantels: Ein Modell mit dem Schwerpunkt auf der europäischen Lithosphäre und dem oberen Mantel und ein bislang noch vorläufiges, globales Modell, das dank der zusätzlichen Verwendung von Obertonmessungen eine Auflösung bis zur Tiefe der Mantelübergangszone aufweist.

Unsere Modelle sind auf globaler und regionaler Skala im Einklang mit in vorangegangenen Studien beobachteten grossräumigen Heterogenitäten. Interessanterweise glauben wir im Hinblick auf isotrope Strukturen die Auflösung z.B. der tiefen kratonischen Wurzel unter Finnland zu erhöhen. Eine weitere, möglicherweise wichtige Errungenschaft dieser Arbeit ist die Bestimmung eines anscheinend robusten Modells radialer Anisotropie Europas und des Mittelmeerraums. Dieses Modell scheint mit den Voraussagen geodynamischer Modelle und der damit verbundenen Ausrichtung der Olivinkristalle im Einklang zu stehen. Unser vorläufiger Versuch zur Verwendung von Obertondaten suggeriert eine mögliche Verbesserung der Auflösung im Bereich der Mantelübergangszone: Heterogenitäten, die mit diesen Daten aufgelöst werden könnten sind z.B. Slabs, die mit der 660 km Diskontinuität interagieren und Anisotropie der Mantelübergangszone und daher Manteldynamik und/oder -zusammensetzung.