

Broadband imaging of anisotropy and composition in the Earth's mantle

Doctoral Thesis

Author(s):

Auer, Ludwig

Publication date:

2016

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010715830>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH Nr. 23393

Broadband imaging of anisotropy and composition in the Earth's mantle

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZÜRICH
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by
LUDWIG AUER

MSc. Geophys., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
born on 06.10.1986
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Domenico Giardini	ETH Zürich	Examiner
Prof. Lapo Boschi	UPMC Paris	Co-Examiner
Prof. Tarje Nissen-Meyer	University of Oxford	Co-Examiner
Prof. Philippe Lognonné	IPGP Paris	Co-Examiner

2016

Summary

Seismic tomography is a computational inverse mapping procedure with the goal of translating subtle structural imprints on seismic waveforms into two- or three-dimensional models of the subsurface. State of the art tomography models of the Earth's mantle are today based on diverse combinations data-types measured across the entire observable seismic time and frequency spectrum and defined over the whole extent of the mantle. Despite the exponential growth of global seismological databases in the previous decades, the quality of these models is still limited through issues such as inhomogeneity of global datasets, failure of employed forward and inverse theories, inadequate physical parameterizations, and elusiveness of realistic model uncertainties. This thesis revolves around some of these issues and their remedy through a unique combination of classic ray-theoretical and fully numerical tomographic imaging algorithms as well as joint geodynamic-seismic modelling.

The first part of this thesis is concerned with the problem of global radial shear-wave anisotropy at the extent of the entire mantle, which we image using a new set of ray-theoretical tomography algorithms that allows to jointly invert surface- and body-wave constraints at multiple, adaptive resolution, to account for spatial inhomogeneities of global data coverage. Using this algorithm we present our model *savani*, the third published whole-mantle model of radial shear-velocity anisotropy. Building on our new model we reconcile anisotropic upper mantle structure underneath the oceanics with conceptual half-space cooling predictions and mantle discontinuity depths from receiver functions and *SS* precursors and find that a purely thermal interpretation of the transition between the lithospheric and the asthenospheric mantle is inadequate.

Next, we adapt our tomography toolbox to allow for the joint inversion of *P*- and *S*-wave datasets and employ mineralogical scaling laws about the isotropic $\frac{dv_S}{v_S} / \frac{dv_P}{v_P}$ ratio in the form of additional regularization constraints. As a result we derive our model *SPani* of shear and compressional wave speeds for the entire mantle, and analyse recovered v_P/v_S ratios in the top 300 km of the mantle, to find that back-arc basins in the Western Pacific are characterized by large v_P/v_S ratios and moderately low v_S at ~ 150 km depth, which is consistent with presence of water and might be an indication for the effectiveness of slab-related processes to hydrate the mantle.

Aiming to enhance v_P resolution in the upper mantle, we add 12502 new multi-frequency cross-correlation traveltimes of regional phases, including triplicated P-waves. As these phases cannot be modelled with ray-theory, they require an interpretation with numerical finite-frequency kernels which we compute from full synthetic wavefields obtained through the code *AxiSEM*, an efficient visco-elastic spectral element solver for axisymmetric background models. We define Europe and its surroundings as the first target region to apply our updated tomography toolbox. Our strategy is to keep semi-approximate (ray) theory where appropriate (global long-wavelength structure, surface wave dispersion), but to resort to a full-waveform interpretation where necessary (regional scale, non-geometrical wave phenomena). We present a preliminary version of the new waveform tomography *SPani+* for Europe, embedded in a global model, and observe promising resolution gains related to imaging remnants of subducted slabs in the upper mantle.

Zusammenfassung

Seismische Tomographie ist eine rechnergestützte Inversionsmethode, die dazu dient die von strukturellen Heterogenitäten verursachten Phasen- und Amplitudenvariationen in seismischen Wellenformen in zwei- oder dreidimensionale Untergrundmodelle zu übersetzen. Tomographische Erdmantelmodelle basieren in der Regel auf Kombinationen verschiedener sekundärer Observablen die entlang des gesamten Zeit- und Frequenzspektrums aufgezeichneter Rohseismogramme gemessen werden, und sind über die gesamte Tiefenerstreckung der Erde definiert. Trotz des exponentiellen Wachstums seismologischer Datenbanken ist der Nutzwert tomographischer Modelle aufgrund von Inhomogenitäten in globalen Datensätzen, unzulänglicher theoretischer und numerischer Approximationen, äquivoken physikalischen Parameterisierungen und Defiziten bei der Quantifizierung realistischer Modellfehler limitiert. In dieser Doktorarbeit sollen einige der obengenannten Probleme mithilfe neuartiger Tomographieansätze, sowie kombinierter geodynamisch-seismischer Modellierung in Angriff genommen werden.

Der erste Teil der vorliegenden Dissertation beschäftigt sich mit radialer Scherwellenanisotropie auf globaler Skala im gesamten Erdmantel. Mithilfe einer neuen strahlentheoretischen Inversionsmethode, die uns erlaubt seismische Oberflächenwellen gemeinsam mit Raumwellen auf einem multipel aufgelösten, adaptiven Diskretisierungsgitter zu invertieren, entwickeln wir unser neues Modell *savani*. Auf der Basis von *savani* vergleichen wir anisotrope Strukturen im oberen Erdmantel mit geodynamischen Vorhersagen eines konzeptuellen abkühlenden Halbraummodells, sowie Diskontinuitätstiefen, abgeleitet aus *SS* Vorläuferphasen und Stationsantwortfunktionen, und schlussfolgern, dass eine rein thermische Interpretation seismischer Beobachtungen innerhalb des lithosphärischen und asthenosphärischen Erdmantels unwahrscheinlich ist.

Im nächsten Schritt erweitern wir unsere Tomographie-Toolbox um ein Modul zur gemeinsamen Inversion von P und S Laufzeiten. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Anwendung mineralogischer Skalierungsbedingungen im Bezug auf das Verhältnis zwischen $\frac{dv_S}{v_S}$ und $\frac{dv_P}{v_P}$, sowie deren Implementierung in der Form von zusätzlichen Regularisierungsthermen. Im Ergebnis entwickeln wir unser Modell *SPani*, das Variationen in v_P und v_S im kompletten Erdmantel abbildet, und

Rückschlüsse auf Wassergehalt und mögliche Zusammenhänge mit der Subduktion ozeanischer Lithosphäre zulässt.

Um den Einschränkungen bei der Auflösung von v_P im oberen Mantel entgegenzuwirken, fügen wir 12502 Multi-Frequenz Kreuzkorrelationslaufzeiten regionaler seismischer Phasen wie triplizierten P -Wellen zu unserer Inversion hinzu. Da diese Phasen nicht mit einem strahlentheoretischen Formalismus modelliert werden können, berechnen wir für die Interpretation dieses neuen Datensatzes numerische Finite-Frequency Sensitivitäten auf Basis globaler synthetischer Wellenfelder, erzeugt mit einem effizienten visco-elastischen Spektrale-Elemente Löser für axialsymmetrische Hintergrundmodelle (*AxiSEM*). Wir wählen Europa als erste Zielregion um unsere erweiterte Tomographie-Toolbox zu testen. Unsere Inversionsstrategie basiert auf der Idee semi-approximative Methoden auf diejenigen Datentypen anzuwenden, die sich mit optischer Strahlentheorie ausreichend genau modellieren lassen, jedoch eine wellenformbasierte Interpretation für die Phasen heranzuziehen, die sich mit ungenaueren Vorwärtsmodellen nicht behandeln lassen. Wir präsentieren eine vorläufige Version unseres Modells *SPani+* für Europa, eingebettet in ein globales Modell, und weisen auf vielversprechende Auflösungsverbesserungen im oberen Erdmantel hin.