



Doctoral Thesis

## **A parametrized three-dimensional alpine crustal model and its application to teleseismic wavefront scattering**

**Author(s):**

Waldhauser, Felix

**Publication Date:**

1996

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001735289> →

**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](#).

DISS. ETH No. 11940

**A PARAMETRIZED THREE-DIMENSIONAL ALPINE CRUSTAL  
MODEL AND ITS APPLICATION TO TELESEISMIC  
WAVEFRONT SCATTERING**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

FELIX WALDHAUSER

Dipl. Natw. ETH

born August 31, 1966

in Basel-Stadt

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. St. Mueller, examiner  
Prof. Dr. E. Kissling, co-examiner  
Prof. Dr. J. Ansorge, co-examiner  
Dr. W. L. Ellsworth, co-examiner

1996

## ABSTRACT

Different seismic methods do not necessarily show the same characteristics in the data they produce, nor do they necessarily image the same structure at the same location with the same resolution. The comparative use of seismic data and information derived by different seismic methods to construct quantitative 3D seismic models is, however, of great significance. Such models, by depicting the lateral continuity of differently imaged structures, are needed to cross-check results from different seismic investigations and to use them as 'a priori' information in inversion methods.

The aim of this thesis was to develop a method for construction of 3D seismic models using data and information from different seismic methods and to apply and test the method on dominant structural features in the Alpine region. A concept for a 3D seismic lithospheric model construction is established, that incorporates the strength of controlled-source seismic and earthquake tomographic methods. It entails a 3D parametrization scheme that accounts for seismic structures to which all methods are most sensitive. The parametrization scheme is flexibly designed in order to allow revising and updating model parameters, and refining established models by including new structural elements. The model consists of discretely distributed model parameters on an even 3D grid. Model parameters on grid nodes are P-velocities, location of refractors and reflectors, confidence values and resolution information. The concept uses controlled-source seismic information to derive 3D crustal structures in such a way that teleseismic wavefront scattering can be studied. It can also be used for integration of local earthquake tomographic results.

A procedure is developed to model seismic information in three dimensions obtained from two-dimensional (2D) controlled-source seismic (CSS) investigations. The procedure involves relocation of 2D derived structural elements in 3D space (3D migration) and interpolation processes to obtain continuity of model parameters. Quantification of data uncertainties allows calculation of the simplest models satisfying the data. The procedure is applied to the crust-mantle boundary in the Alpine region using the seismic information from a dense network of CSS-profiles. A laterally continuous crust-mantle interface showing least surface roughness and highest continuity is modeled, featuring interface offsets where required (principle of simplicity). P-velocities associated with the crust-mantle boundary such as lower-crustal, uppermost-mantle and average crustal velocities are volumetrically represented within their volume of influence.

This well established structural and velocity information, near-surface structures such as low-velocity sedimentary basins, as well as reference velocities for information gaps are parametrized and a 3D seismic model of the central and western Alps and

northern Apennines is derived. The 3D crustal model depicts three crustal blocks, separated from the upper mantle by a European, Adriatic and Ligurian Moho.

The established 3D Alpine velocity model is subsequently used to calculate teleseismic first arrival travel times, using an existing finite-difference approach to the 3D eikonal equation accounting for strong velocity heterogeneities. Absolute and relative teleseismic travel times have been calculated through the 3D model accounting for spherical travel time fields of incoming wavefronts at the base of the 3D model at a depth of 70 km. Azimuthal dependence of teleseismic travel time delays due to wavefront scattering at the dominant Alpine crustal structures is investigated and residuals between -0.6 s and +1.8 s with respect to a 1D reference model down to a depth of 70 km are obtained. Migration of travel time anomalies at the surface due to deep Alpine crustal structures depend on the azimuth of the incoming teleseismic waves. Teleseismic travel time residuals along 2D profiles have been calculated and compared with earlier studies. Compared with these studies, the method followed in this present work has some significant advantages. It uses a quantified velocity model, consistently parametrized and with a reliability estimation for the model parameters. This allows to determine the confidence of the calculated teleseismic travel times, and to improve the velocity model according to new findings. Furthermore, an accurate calculation of teleseismic travel times through strong heterogeneous 3D velocity structures is possible, considering spherical time fields of incoming wavefronts from any azimuth at the base of the model. 2D teleseismic data modeling can account for effects from strong heterogeneous structures outside the profile only approximately by projecting these structures onto the profile. Heterogeneous velocity structures in 3D models influence seismic waves at the proper location in space.

# ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Abbildungsmechanismen produzieren verschiedene seismische Methoden in den seltensten Fällen äquivalente Daten mit gleichen Eigenschaften, auch bilden sie gleiche seismische Strukturen nicht in gleicher räumlicher Lage mit der gleichen Auflösung ab. Trotzdem ist eine kombinierte Verwendung von Daten aus verschiedenen seismischen Methoden zur Erstellung von drei-dimensionalen (3D) Modellen von grosser Bedeutung. Solche Modelle sind, da sie die wahrscheinliche räumliche Dimension von verschiedenartig abgebildeten Strukturen aufzeigen, eine wertvolle Hilfe zur Verifikation von seismischen Interpretationen und eignen sich deshalb besonders zur Verwendung als 'a priori' Information bei der Verwendung tomographischer Methoden.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die Methodik zur Erstellung von seismischen 3D Modellen unter Verwendung von unterschiedlichen seismischen Daten zu entwickeln und auf die wichtigsten Strukturen im Alpenraum anzuwenden und dadurch zu testen. Ein Konzept zur Konstruktion von 3D Lithosphären-Modellen wurde ausgearbeitet, das die sich ergänzenden Stärken von aktiven und passiven seismischen Methoden in Bezug auf ihre Auflösung seismischer Strukturen betont. Eine 3D Modell-Parametrisierung wurde definiert, welche die wichtigsten strukturellen Elemente erfasst und das Überprüfen von bestehenden und das Einfügen von neuen strukturellen Elementen ermöglicht. Das Geschwindigkeitsmodell besteht aus einem gleichmässigen 3D-Gitter mit Modellparametern wie P-Wellen-Geschwindigkeiten, räumliche Lage von Reflektoren und Refraktoren, Gewichtungen und Informationen über das Auflösungsvermögen. Das Konzept benutzt Modellinformationen von aktiven seismischen Untersuchungen (Refraktions- und Reflexionsseismik) zur Erstellung eines 3D Geschwindigkeitmodells, das es erlaubt Streueffekte von teleseismischen Wellenfronten an den parametrisierten Strukturen zu quantifizieren.

Zwei-dimensional (2D) erfasste strukturelle Informationen von aktiven seismischen Untersuchungen wurden - unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten und Fresnel-Volumen - drei-dimensional modelliert. Die dazu entworfene Prozedur beinhaltet eine Relokalisierung der 2D-Strukturen im Raum (3D-Migration) und einen Interpolationsprozess mit dem Ziel, eine räumliche Kontinuität der Modellparameter anzustreben. Die Quantifizierung der Datenungenauigkeit erlaubt die Berechnung von einfachsten 3D Modellen, welche alle Daten befriedigen.

Die Prozedur wurde auf die alpine Krusten-Mantel-Grenze (Moho) angewendet, unter Verwendung publizierter Interpretationen aus dem dichten aber unregelmässigen Netzwerk von aktiv-seismischen Profilen. Eine lateral möglichst kontinuierliche Moho-

Grenzfläche wurde modelliert, welche die geringste Topographie in ihrer Oberfläche aufweist und mit minimaler lateraler Ausdehnung von vertikalen Versätzen auskommt. Mit der Krusten-Mantel-Grenze assoziierte Geschwindigkeiten, wie diejenigen aus der Unterkruste, dem obersten Mantel und Durchschnittsgeschwindigkeiten für die Kruste wurden im Volumen ihres Einflussbereichs dargestellt.

Diese gut dokumentierten Struktur- und Geschwindigkeits-Informationen zusammen mit oberflächennahen Strukturen wie Sedimentbecken sowie Referenz-Werten für Informationslücken ergaben ein 3D P-Wellen Geschwindigkeitsmodell der Zentral- und West-Alpen und des nördlichen Apennins bis zu einer Tiefe von 70 km. Das 3D Modell bildet drei Krustenblöcke ab, welche durch die Europäische, die Adriatische und die Ligurische Moho vom oberen Mantel darunter abgesetzt sind.

In einem nächsten Schritt wurde das 3D Geschwindigkeitsmodell für die Berechnung teleseismischer Laufzeiten verwendet. Dafür wurde ein existierender Algorithmus verwendet, der die 3D Eikonal-Gleichung für lateral stark variierende Geschwindigkeitsfelder mit der Methode der finiten Differenzen löst. Algorithmus und Modell-Parametrisierung wurden für das teleseismische Vorwärtsproblem getestet. Unter Berücksichtigung von sphärischen teleseismischen Wellenfronten an der Basis des 3D Modells in 70 km Tiefe, berechnet mit dem Standard-Erdmodell IASP91, wurden absolute und relative Laufzeiten für verschiedene Einfallrichtungen und Epizentraldistanzen an der Oberfläche des 3D Modells berechnet. Laufzeitresiduen in der Grösse von -0.6 s bis +1.8 s, verglichen mit einem 1D Referenz-Modell bis in 70 km Tiefe, wurden dabei festgestellt. Die Lage der Laufzeit-Anomalien an der Oberfläche verschiebt sich für tiefliegende Krustenstrukturen in Abhängigkeit vom Azimuth der einfallenden teleseismischen Wellenfronten. Laufzeitresiduen entlang Profil-Linien wurden berechnet und im Vergleich zu Resultaten früherer Untersuchungen diskutiert. Aus der in dieser Arbeit entwickelten Methode und deren Anwendung auf den Alpenraum ergaben sich folgende Vorteile. Für Laufzeitberechnungen steht ein konsistent parametrisiertes und quantifiziertes 3D Geschwindigkeitsmodell zur Verfügung, das es erlaubt, die Zuverlässigkeit der berechneten teleseismischen Laufzeiten an der Oberfläche abzuschätzen. Das 3D Modell kann überprüft, verbessert und verfeinert werden. Im weiteren ist das Vorwärtsrechnen von teleseismischen Laufzeiten auch in stark variierenden Geschwindigkeitsstrukturen, wie in derjenigen des 3D Alpen-Modells, möglich. Azimuth- und epizentraldistanzabhängige, gekrümmte Wellenfelder an der Basis des Modells werden berücksichtigt. Während bei 2D Untersuchungen prägnante, ausserhalb des Profils liegende Inhomogenitäten auf das Profil projiziert werden müssen, beeinflussen Inhomogenitäten im 3D Modell die teleseismische Wellenfront an der richtigen Stelle im Raum.