

Seismic anisotropy in peridotites from the Western Gneiss Region (Norway)

laboratory measurements at high PT conditions and
fabric based model predictions

Doctoral Thesis

Author(s):

Prelicz, Ruth Miriam

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005115293>

Rights / license:

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

DISS. ETH Nr. 16176

Seismic anisotropy in peridotites from the Western Gneiss Region (Norway)

laboratory measurements at high PT conditions and fabric based model predictions

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOKTOR OF NATURAL SCIENCES

Presented by

Ruth Miriam Prelicz
Diplomgeologin, Technische Universität München

Born March 18, 1975

Citizen of Germany

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg	ETH Zürich	examiner
PD. Dr. Luigi Burlini	ETH Zürich	co-examiner
Dr. Karsten Kunze	ETH Zürich	co-examiner
Prof. Dr. Hartmut Kern	University of Kiel	co-examiner

2005

Abstract

The study of seismic properties of mantle rocks under high-pressure, high-temperature conditions is essential for the comprehension of upper mantle dynamics. Seismic anisotropy in particular contains much information on the structure of the Earth's mantle, but for its interpretation, the relationship between seismic anisotropy and rock fabric needs to be understood. The anisotropy in upper mantle rocks results primarily from the crystal preferred orientation (CPO) of the constituent minerals.

This thesis intends to extend and improve the database on seismic properties available on mantle rocks. Further, the relevance of different olivine CPO types is discussed and the influence of hydrous phases on the seismic properties is investigated.

Ten samples of fresh, unaltered peridotites and pyroxenites from a suite of 49 samples from the Western Gneiss Region in Norway and from the Bragança massif in Portugal were selected for investigation. The samples were carefully described in terms of density, modal and chemical composition and microstructural and textural characteristics.

Two different approaches were used to determine the anisotropy:

(1) Ultrasound velocities of p- and s- waves were measured on cores drilled in three directions perpendicular to each other for each sample. Measurements were carried out in a Paterson Rig, a gas medium apparatus using argon gas as a confining medium to reach a pressure up to 500 MPa. Selected cores were measured from room temperature up to 700°C to investigate the temperature dependence of p-wave velocities.

(2) The complete 3D seismic properties were calculated. The results from the laboratory were compared with calculations carried out on the basis of the modal composition, combined with the CPO and the elastic constants of the individual mineral phases. The CPO and the modal composition were determined by electron backscatter diffraction (EBSD) on a scanning electron microscope. The single crystal elastic constants and their dependencies on pressure and temperature are known from the literature.

In the peridotites from Almklovdalen and Leffdal three different olivine CPOs could be distinguished: The typical mantle fabric, the axial [010] pattern and a CPO with the [100]-axes normal to the foliation plane. This third CPO type is supposed to be related to the presence of a free fluid phase during deformation. So far, this CPO type was only found in metaperidotites in the Alps. In this thesis it is interpreted as related to water-rich "retrograde" conditions.

Thus the 3D velocity calculations, using the CPO of olivine, revealed also three different types of p-wave velocity patterns: One with an orthorhombic symmetry, one with oblate transversally symmetry and one with a prolate transversally v_p distribution. Further it could be demonstrated, that the anisotropy of a peridotite for the third CPO type is unusually low, despite of a considerable texture strength. This is due to a destructive interference of the fast and the slow v_p axes of the olivine crystals in such a CPO. For the third CPO type also the orientation of polarization plane of the fast shear wave v_{s1} is not parallel to the lineation, but perpendicular to it. The common assumption, that the flow direction in the upper mantle can be inferred from the seismic anisotropy might therefore not always be valid in a water-rich environment like a subduction zone.

The chlorite, which also formed under retrograde water rich conditions in the original garnet peridotites has also a strong influence on the seismic properties of a peridotite. It could be shown that even a few percent of chlorite aligned in the foliation plane can change the velocity distribution pattern completely, depending on the olivine CPO of the rock.

The measured seismic properties are in a good agreement with the calculations. Mean p-wave velocities range from 7.8 to 8.2 km/s for the chlorite bearing dunites and harzburgites and from 7.6 to 7.9 km/s for the pyroxenites. The anisotropy for the pyroxenites is low, between 1.5 and 2.5%. For the peridotites the anisotropy ranges from 1.9 to 7.3%.

The measurements at elevated pressure and temperature revealed two temperature regimes with a different seismic behaviour. Above approximately 700 K, p-wave velocities are decreasing with

increasing temperature much faster than theoretically predicted and also faster than at lower temperature. This change occurs suddenly and the process is reversible. The most likely explanation for this kink in the temperature derivative are thermal induced stresses which might loosen certain grain boundaries and modify substantially the local compressibility of some grains.

Zusammenfassung

Die Untersuchung der seismischen Eigenschaften von Mantelgesteinen unter hohen Druck- und Temperatur-Bedingungen ist wesentlich für das Verständnis der Dynamik des oberen Erdmantels. Speziell die seismische Anisotropie enthält viele Informationen über die Struktur des Erdmantels. Für die Interpretation ist es jedoch wichtig, den Zusammenhang zwischen der seismischen Anisotropie und dem Gesteinsgefüge zu verstehen. Die Anisotropie im oberen Erdmantel wird im Wesentlichen durch eine bevorzugte Orientierung der Kristallgitter, der dort auftretenden Minerale, verursacht.

Mit dieser Studie wird soll die bestehende Datenbasis über die seismischen Eigenschaften von Mantelgesteinen erweitert und verbessert werden. Weiter wird die Relevanz von verschiedenen kristallographisch bevorzugten Orientierungen (CPO) diskutiert. Darüber hinaus wird der Einfluss von wasserhaltigen Mineralphasen auf die seismischen Eigenschaften untersucht.

Es wurden zehn Proben frischer, nicht alterierter Peridotite und Pyroxenite aus einer Sammlung von insgesamt 47 Gesteinsproben aus der Westlichen Gneis Region in Norwegen und dem Bragança Massiv in Portugal ausgewählt. Die Gesteinsproben wurden sorgfältig im Hinblick auf ihre Dichte, den Modalbestand, die chemische Zusammensetzung, Mikrogefüge und Textur beschrieben.

Zwei verschiedene Ansätze wurden verwendet, um die Anisotropie zu bestimmen:

(1) Die Geschwindigkeiten von Ultraschallwellen wurden in drei, jeweils zueinander senkrecht stehenden Bohrkernen gemessen. Die Messungen wurden in einem so genannten Paterson Rig, einem Gas-Medium-Apparat durchgeführt. Beim Paterson Rig wird Argongas als Druckübertragungsmedium verwendet, um einen Umschließungsdruck von bis zu 500 MPa zu erreichen. Ausgewählte Kerne wurden außer bei Raumtemperatur noch zusätzlich bei erhöhten Temperaturen bis zu 700°C gemessen, um die Temperaturabhängigkeit der P-Wellen zu untersuchen.

(2) Außerdem wurden die kompletten 3-dimensionalen seismischen Eigenschaften der Proben berechnet. Die Laborergebnisse wurden mit den Ergebnissen aus den Modellrechnungen verglichen, welche auf der Basis des Modalbestandes, der CPO und den elastischen Konstanten der einzelnen Mineralphasen gemacht wurden. Die CPO und der Modalbestand wurden mit Hilfe von Elektronen-Rückstreu-Diffraktometrie (EBSD) im Rasterelektronenmikroskop bestimmt. Die elastischen Konstanten für den Einkristall und ihre Druck- und Temperaturabhängigkeit sind aus der Literatur bekannt.

In den Peridotiten von Almklovdaalen konnten drei verschiedene Arten von Olivin CPO unterschieden werden. Neben dem typischen Mantel Gefüge existieren dort noch das sog. axiale [010] Verteilungsmuster und eine dritte CPO, bei welcher die [100]-Achsen senkrecht zur Foliationsebene stehen. Es wird vermutet, dass dieser dritte CPO Typ mit dem Vorkommen einer freien fluiden Phase im Zusammenhang steht. Bisher ist dieser CPO Typ nur aus Metaperidotiten in den Alpen bekannt. In der vorliegenden Arbeit wird er als Ergebnis von wasserreichen, retrograden Bedingungen interpretiert. Entsprechend ergaben die Berechnungen drei verschiedene Geschwindigkeitsverteilungen für P-Wellen. Eine Geschwindigkeitsverteilung zeigt eine orthorhombische Symmetrie, die nächste eine oblat transversale und die dritte ein prolate transversale Symmetrie. Es konnte gezeigt werden, dass die Anisotropie für Peridotite mit einer CPO des dritten Typs, ungeachtet einer gewissen Texturierung, ungewöhnlich niedrig ist. Die Ursache dafür ist eine destruktive Interferenz der für P-Wellen schnellen und langsamen Achsen der Olivinkristalle in Gesteinsproben mit einer solchen CPO. Auch die Orientierung der Polarisationssebene der schnellen Scherwellen ist nicht lineationsparallel ausgerichtet. Die übliche Annahme, dass man die Fließrichtung im oberen Mantel aus der seismischen Anisotropie ableiten kann gilt deshalb nicht unbedingt in einer wasserreichen Umgebung, wie beispielsweise in einer Subduktionszone.

Der Chlorit, welcher sich ebenfalls unter wasserreichen, retrograden Bedingungen in den ehemaligen Granatperidotiten gebildet hat, hat ebenfalls einen starken Einfluss auf die seismischen Eigenschaften des Gesteins. Weiter konnte gezeigt werden, dass sogar wenige Prozent Chlorit, welche parallel zu Foliation ausgerichtet sind, das Muster der P-Wellengeschwindigkeitsverteilung komplett verändern

können. Wie diese Veränderung aussieht, hängt wiederum auch von der Olivin CPO des Gesteins ab.

Die gemessenen seismischen Eigenschaften stimmen gut mit den Berechnungen überein. Durchschnittliche P-Wellengeschwindigkeiten variieren zwischen 7,8 und 8,2 km/s für die chlorithaltigen Dunite und Harzburgite und zwischen 7,6 und 7,9 km/s für die Pyroxenite. Die Anisotropie der Pyroxenite ist mit Werten zwischen 1,5 und 2,5% niedrig. Dagegen reichen die Anisotropiewerte der Peridotite von 1,9 bis 7,3%.

Die Messungen bei hohem Druck und hoher Temperatur haben gezeigt, dass zwei Temperaturregime mit unterschiedlichen seismischen Eigenschaften existieren. Oberhalb von 700 K nimmt die P-Wellengeschwindigkeit plötzlich viel stärker ab, als theoretisch vorhergesagt und auch viel stärker als zuvor in niedrigeren Temperaturbereichen. Dieser Wechsel von einem Regime ins andere erfolgt plötzlich. Außerdem soll betont werden, dass diese Änderung reversibel ist. Am wahrscheinlichsten für diesen „Knick“ im Temperaturverhalten der P-Wellengeschwindigkeiten ist der Aufbau von thermisch induzierten Spannungen. Diese Spannungen lockern vermutlich nicht nur Korngrenzen, sondern beeinflussen auch die lokale Kompressibilität der Körner.