

DISS. ETH NO. 15074

**SEISMIC-VELOCITY DISCONTINUITIES IN THE  
CRUST AND MANTLE OF THE EURASIA-AFRICA  
PLATE BOUNDARY REGION**

A dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**

for the degree of  
**Doctor of Natural Sciences**

presented by  
**Mark van der Meijde**

Drs. University of Utrecht (The Netherlands)  
born July 10, 1973  
citizen of The Netherlands

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner  
Dr. Suzan van der Lee, co-examiner  
Dr. George Helffrich, co-examiner

2003

# Abstract

---

The Mediterranean region is characterised by the plate boundary between Eurasia and Africa, extending from the Azores triple junction with the North American plate to the easternmost Mediterranean Sea. Plate motion in the region is dominated by slow convergence between the two plates, alternated with relatively rapid extension in subdomains within the region. Uncommonly, the plate boundary does not manifest itself as a relatively focused zone of seismicity and surface deformation. Due to the irregular shape of the continents, the presence of micro continents between the Eurasian and African plates and the different convergent patterns the tectonics is highly complicated. This tectonic complexity of the Mediterranean region is reflected in strong lateral variations in crustal and upper mantle structure.

To investigate the Mediterranean region's crust and upper mantle discontinuous structure we carried out a multi-institutional project (MIDSEA) complementing and extending the existing data coverage by installing 25 broad band seismic stations. The receiver function technique is applied to the new data recorded by the MIDSEA seismic stations to study in detail the crust and upper mantle structure of the region. Using recordings of earthquakes that occurred at large epicentral distances (between  $30^\circ$  and  $95^\circ$ ) we search for phases that are converted from *P*-to-*S* at discontinuous structure in the Mediterranean crust and mantle.

To determine an accurate Moho depth we have reduced the trade-off between crustal velocities and discontinuity depth using a new grid search method, which is an extension of recently published methods to determine crustal thickness. The values we found for Moho depth in the Mediterranean region range from around 20 km for intra-oceanic islands and extended continental margins to near 45 km in regions where the Eurasian and

African continents have collided. More detailed waveform modelling shows that all receiver functions can be well fitted using a 2- or 3-layer model containing a sedimentary layer and/or a mid-crustal discontinuity. A comparison of our results with Moho maps inferred from interpolated reflection and refraction data, shows that for some regions the agreement between our receiver function analysis and existing Moho maps is very good, while for other regions our observations deviate from the interpolated map values or extend beyond the geographic bounds of these maps.

A study on the discontinuous structure of the upper and lower mantle has revealed conversions in the mantle transition zone around 410 km, 520 km and 660 km depth. Additional mantle discontinuities are found near 320 km, 850 km and 1325 km depth. Indications of possible discontinuous structure at 940 km, 1030 and 1475 km depth are also present. Conversion to depth of the receiver functions is based on a specific 1D *S*-velocity model for each station. Models are extracted from a three-dimensional *S*-velocity model for the Mediterranean region (EAV03) and modified to include the best fitting crustal structure beneath the stations.

Conversions from the 410 km and 660 km discontinuities are clearly observable for most stations. On average, we observe a significantly thickened mantle transition zone of  $261 \pm 10$  km under the Mediterranean region which agrees with high velocities observed in tomographic models at these depths. In regions with ongoing or past subduction (eastern Spain, southern Italy, southern Greece and the north-western African coast) thickening of the mantle transition zone with more than 20 km is observed. Of particular interest is the anomalous structure found under eastern Spain around 300 km to 550 km depth. Several independent sets of data indicate that the discontinuous structure under eastern Spain seems to be much stronger pronounced in  $V_s$  than in  $V_p$ . A thin mantle transition zone is found beneath Lanzarote, an intra-oceanic island where active volcanism takes place nowadays. There the transition zone thickness is 219 km, 31 km thinner than for an undisturbed upper mantle.

Increased water content in the deep upper mantle can influence the properties of discontinuities in the mantle transition zone. For 9 broadband seismic stations we observe a strong frequency dependence of the *P*-to-*S* conversion at the 410 km discontinuity, indicating that the phase transition occurs over depth intervals of up to 30 km. Such thickening yields the discontinuity's ability to convert seismic *P*-waves to *S*-waves to depend on wave frequency. We interpret the thick transition of olivine to wadsleyite as being due to at least 500 to 700 ppm water, present in olivine, at depths near 400 km.

The 520 km discontinuity is normally relatively wide, and therefore not observed in receiver function studies. For the Mediterranean region we suggest that the transition interval is narrow and occurs within 10-15 km, possibly due to increased water content in

the mantle transition zone. The absolute depth of the 520 km discontinuity is variable: converted phases are observed over a depth interval of over 50 km.

# Zusammenfassung

---

Das Mittelmeergebiet ist charakterisiert durch die Plattengrenze zwischen Eurasien und Afrika, welche sich von der Tripel Punkt mit der nordamerikanischen Platte bei den Azoren bis zum östlichen Rand des Mittelmeers erstreckt. Die Plattenbewegung in dieser Region ist hauptsächlich geprägt von einer langsamen Konvergenz zwischen den beiden Platten, wobei jedoch in Subregionen zeitweise auch relativ rasche Extensionsbewegungen aufgetreten sind. Ungewöhnlich ist, dass sich die Plattengrenze hier nicht in einer relativ schmalen Zone der Seismizität und Oberflächendeformation offenbart. Aufgrund der unregelmässigen Form der eurasischen und afrikanischen Kontinente, den dazwischen eingeklemmten Mikrokontinenten und wegen der unterschiedlichen Konvergenzmuster ist die Tektonik sehr komplex. Diese tektonische Komplexität des Mittelmeerraums widerspiegelt sich insbesondere in den starken lateralen Schankungen der Struktur von Kruste und Erdmantel.

Um die diskontinuierliche Struktur der Kruste und des oberen Erdmantels im Mittelmeergebiet abzubilden, führten wir ein multi-institutionelles Projekt durch (MIDSEA). Im Rahmen dieses Projekts wurden 25 Breitbandseismometer installiert, wodurch die Abdeckung der Region durch seismische Daten ergänzt und erweitert wird. Um die neu aufgezeichneten Daten der MIDSEA Stationen auszuwerten, wird die receiver function Methode angewandt. Dabei werden in Seismogrammen teleseismischer Erdbeben (mit Epizentraldistanzen zwischen  $30^\circ$  and  $95^\circ$ ) Phasen gesucht, die durch eine *P*-zu-*S* Konversion an Diskontinuitäten im Untergrund entstanden sind.

Zur exakten Bestimmung der Moho-Tiefe verwenden wir eine neue grid-Suche Methode, welche die Abhängigkeit zwischen den seismischen Geschwindigkeiten der Kruste und der Tiefe der Diskontinuität verringert. Diese Methode stellt eine Erweiterung von

kürzlich publizierten Methoden zur Bestimmung der Krustenmächtigkeit dar. Die erhaltenen Werte der Moho-Tiefe im Mittelmeerraum bewegen sich zwischen 20 km unter intra-ozeanischen Inseln und ausgedehnten Kontinentalplatten und 45 km in der Kollisionzone der eurasischen und afrikanischen Kontinente. Eine eingehende Modellierung der Wellenformen hat gezeigt, dass ein 2- oder 3-Schichten-Modell mit einer Sedimentschicht und/oder einer intrakrustalen Diskontinuität ausreicht, um alle receiver functions gut anzupassen. Vergleicht man unsere Resultate mit kartierten, auf interpolierten Reflektions- und Refraktionsdaten basierenden, Moho-Tiefen, so zeigt sich in bestimmten Gebieten eine sehr gute Übereinstimmung, während unsere Beobachtungen in anderen Regionen von den interpolierten Werten abweichen oder jenseits der geographischen Grenzen dieser Karten liegen.

Eine Studie der diskontinuierlichen Struktur des oberen und unteren Erdmantels zeigte, dass in der Übergangzone des Mantels Konversionen in Tiefen um 410 km, 520 km und 660 km auftreten. Zusätzliche Diskontinuitäten wurden nahe bei 320 km, 850 km und 1325 km gefunden, wobei es ebenfalls Anzeichen gibt für die Existenz von Impedanzkontrasten in 940 km, 1030 km und 1475 km Tiefe. Die Transformation der receiver functions in den Tiefenbereich basiert auf einem spezifischen *S*-Geschwindigkeitsmodell für jede Station. Diese Geschwindigkeitsmodelle stammen von einem dreidimensionalen *S*-Geschwindigkeitsmodell des Mittelmeerraums (EAV03) und wurden modifiziert, sodass deren Geschwindigkeitswerte im Bereich der Kruste den am besten passenden Strukturen unterhalb jeder Station entsprechen.

Konversionen an den 410 km und 660 km Diskontinuitäten sind für die meisten Stationen deutlich erkennbar. Die Übergangzone des Erdmantels ist unter dem Mittelmeergebiet mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von  $261 \pm 10$  km signifikant verdickt, was im Einklang steht mit tomographischen Modellen, die in diesen Tiefen hohe Geschwindigkeiten zeigen. In Regionen, wo eine Subduktion stattfindet oder stattfand (Ost-Spanien, Süd-Italien, im Süden von Griechenland und an der Nordwestküste von Afrika) wird eine Verdickung der Übergangzone um mehr als 20 km beobachtet. Von besonderem Interesse ist dabei die anormale Struktur, welche wir unter Ost-Spanien beobachten konnten rund 300 km bis 550 km Tiefe. Mehrere unabhängige Datensätze deuten darauf hin, dass die diskontinuierliche Struktur unter Ost-Spanien in *V<sub>s</sub>* stärker ausgeprägt ist als in *V<sub>p</sub>*. Unterhalb von Lanzarote, einer intra-ozeanischen Insel mit aktivem Vulkanismus, ist die Übergangzone mit 219 km hingegen relativ dünn - 31 km dünner als dies bei einem ungestörten Erdmantel der Fall wäre.

Ein erhöhter Wasseranteil im tieferen oberen Mantel kann die Eigenschaften von Diskontinuitäten der Mantel-Übergangzone beeinflussen. Bei 9 Breitbandstationen beobachten wir eine starke Frequenzabhängigkeit der *P*-zu-*S* Konversion an der 410 km Diskonti-

nuität, was darauf hindeutet, dass der Phasenübergang über einen Tiefenbereich von bis zu 30 km stattfindet.

Bei solch breiten Transitionszonen werden die *P*-Wellen an der Diskontinuität verschieden stark zu *S*-Wellen konvertiert, abhängig von der Wellenfrequenz. Wir interpretieren derart dicke Übergangsbereiche von Olivin zu Wadsleyit als Folge eines Wassergehalts von 500 bis 700 ppm im Olivin, in Tiefen um 400 km.

Die 520 km Diskontinuität ist normalerweise relativ breit und wird deshalb in receiver function Untersuchungen nicht erfasst. Unsere Studie im Mittelmeergebiet deutet hingegen auf ein Transitionsintervall mit einer geringen Mächtigkeit von 10-15 km hin, was womöglich auf einen erhöhten Wassergehalt in der Mantel-Übergangszone zurückzuführen ist. Die absolute Tiefe der 520 km Diskontinuität variiert: konvertierte Phasen werden über einen Tiefenbereich von über 50 km beobachtet.