

Muench, Thomas Willi ¹; Koch, Manfred ¹; Schlittenhardt, Jörg ²
¹ Uni Kassel; ² BGR Hannover

Simultane Inversion für die dreidimensionale Struktur von Lithospäre und Kruste und regionalen Hypozentren in und um Deutschland unter Berücksichtigung eines anisotropen oberen Mantels

Beginnend mit den grundlegenden refraktionsseismischen Studien von Bamford (1973) und Fuchs (1977) über das anisotrope Verhalten der Pn-Geschwindigkeiten. unterhalb Deutschlands wurden seither viele seismische Untersuchungen durchgeführt, die weitere Anzeichen dafür liefern, dass weite Teile des oberen Mantels unterhalb von Europa und Deutschland anisotrop sind.

Tatsächlich zeigte Schlittenhardt (1999) zum ersten Mal das die entsprechenden Pn-Residuen eine azimuthale Anhängigkeit zeigen, die mit der bisher vermuteten Anisotropie übereinstimmt.

Dieses Phänomen wurde durch eine 1D Time-Term Analyse (Song et al., 2001) und eine komplette 2D anisotrope Pn Inversion.(Song et al., 2001) von 2000 regionalen Pn-Laufzeitresiduen von ungefähr 220 in einem Datenkatalog von Henger und Leydecker enthaltenen Beben weiter untersucht.

In der ersten der beiden Studien zeigten die Autoren, dass eine Anisotropie-Ellipse mit der schnellen Achse in Richtung $\sim N25^{\circ}E$ und einem Anisotropielevel von $\sim 3.5\%$ die Datenvarianz erkennbar reduziert. Die zweite der Studien zeigt, dass geologisch aussagekräftige Pn-Geschwindigkeitsänderungen des oberen Mantels nur unter Berücksichtigung der Pn-Anisotropie im Inversionsprozess gewonnen werden können.

Weitere Details über die 3D-Struktur unter Berücksichtigung der Anisotropie im oberen Mantel kann jedoch nur eine komplette 3D-SSH-Inversion liefern. Dazu wird eine erweiterte Version der Methode der simultanen Inversion für Struktur und Hypozentren (SSH) von Koch (1993) verwendet, um die Analyse von Song et al. (2001, 2004) zu einer vollständigen simultanen Inversion für die dreidimensionale Struktur der Kruste und des oberen Mantels und regionaler Hypozentren unterhalb Deutschlands zu ergänzen. Programmtechnisch wird dies bezweckt, in dem in dem originalen SSH-Code von Koch (1993) die Anisotropie für Pn-Laufzeitresiduen in der oben genannten Form einer elliptischen Korrektur berücksichtigt wird.

Ausserdem konnte für die neu durchgeführte Inversion die Datenbasis wesentlich verbessert werden indem die Aufzeichnungen von Beben zwischen 2000 bis 2003 hinzugenommen wurden. Die Aufzeichnungen dieser drei zusätzlichen Jahre führen zu einer Verdoppelung der verwertbaren Anzahl an Beben auf ca 650 mit einer Gesamtzahl von 12600 Phasen bei einer maximal erlaubten azimuthalen Lücke (gap) von 120 Grad. bzw. zu 1235 Beben mit 22899 Phasen bei einer Lücke von 180 Grad. Auch die Durchstrahlung des Untersuchungsgebietes wird etwas verbessert da einige Stationen in den Randzonen hinzugekommen sind.

Trotz der verbesserten Datenlage, der grössere Anzahl von aufgezeichneten Phasen und der restriktiveren Selektion der Aufzeichnungen leiden doch viele der Ereignisse unter relativ schwacher Tiefenauflösung, was die komplette SSH-Analyse zu einem aufwändigen und schwierigen Unterfangen macht. Um dieses Problem zu ansatzweise zu bewältigen wird die SSH-

Inversion in mehreren, aufeinander aufbauenden Stufen mit zunehmender Komplexität durchgeführt.

Zunächst werden in einem ersten Schritt verbesserte vertikal inhomogene Modelle (1D-Modelle mit i.a. vier Schichten) sowohl für fixierte (d.h. mit den ursprünglich ermittelten, was einer reinen Strukturbestimmung gleich kommt) als auch für simultan neu invertierte Hypozentren (eigentliche SSH) unter Berücksichtigung sowohl eines isotropen als auch eines anisotropen oberen Mantels erstellt. Dabei zeigt sich, dass sich für die anisotrope Inversion, zusätzlich zu einer etwas besseren Anpassung des RMS-Wertes, auch ein seismologisch sinnvollerer Wert von $\sim 8,0\text{km/s}$ für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pn-Welle im oberen Mantel ergibt, statt $\sim 7,90\text{km/s}$ bei der isotropen Inversion. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der refraktionsseismischen Auswertungen von Enderle et al. (1997) und ist ein eindeutiges Anzeichen dafür, dass es notwendig ist die Anisotropie im oberen Mantel bei Inversion mit zu berücksichtigen, um vernünftige Pn-Geschwindigkeiten zu bekommen.

Leider zeigt sich die aufgrund der Verteilung der Hypozentren und der starken Abnahme der Anzahl der Beben im Tiefenbereich zwischen 20 und 30 km auch die zu erwartende schlechtere Auflösung der Struktur in dieser (dritten) Schicht (20-30km). Im Gegensatz dazu ist die vierte Pn-Schicht wiederum gut aufgelöst, da hier die Pn-Laufzeiten aller Beben diese Struktur relative gleichmässig durchleuchten. Erstaunlicherweise zeigt sich jedoch als Resultat der doch im Ganzen guten Durchleuchtung des Untersuchungsgebietes, dass sich die Instabilität im wesentlichen auf die genannte dritte Schicht beschränkt, mit kleineren Störungen in der zweiten Schicht (10-20km), wohingegen die erste (0-10km) und die vierte Schicht (>30km) im wesentlichen als stabil aufgelöst angesehen werden können.

Um das Problem der Tiefenauflösung besser in den Griff zu bekommen, werden zur Zeit Wadati-Diagramme erstellt und ausgewertet um die Herdzeit der einzelnen Ereignisse besser bestimmen zu können. Diese noch in der Entwicklung befindliche Methode dient also als eine weitere Quelle an *a priori* Informationen, die den „trade-off“ zwischen Herdzeit und Tiefenlage reduzieren sollen.

Für die Erstellung von vollen 3D Modellen für Struktur und Hypozentren, wurden dann die neu ermittelten 1D-Anfangsmodelle ausgewertet und ein für die 3D-Inversion optimales neues vertikal inhomogenes Startmodell durch Vergleich der einzelnen Modelle auf Plausibilität und Reduktion des RMS ausgewählt. Mit diesem optimierten Startmodell werden nun Rechnungen mit verschieden starker Blockaufteilung, beginnend bei 9×9 über 15×15 bis 21×21 Blöcken pro Schicht gerechnet. Dies entspricht einer Kantenlänge pro Block von 72km bei 9×9 , 43km bei 15×15 und 31km bei 21×21 bei einer lateralen Ausdehnung von 650km x 650km.

Dass diese relativ hohen Auflösungen noch sinnvoll sind, kann anhand der parallel für die jeweilige Blockunterteilung durchgeführten „Checkerboard“-Tests gezeigt werden. Diese zeigen ein relativ gutes Auflösungsvermögen, selbst für verrauschte Daten, im Kernbereich des Untersuchungsgebietes. Diese nimmt natürlicherweise aufgrund der verwendeten SSH-Methode mit lokalen Beben zum Rand hin ab, da dort keine wesentliche Durchstrahlung mehr vorhanden ist.

Als Ergebnis der 3D-Rechnungen zeigt sich, obwohl die anisotropen Rechnungen im Vergleich zu den isotropen keine wesentliche Verbesserung des RMS zeigen, dass die ersteren für den

oberen Mantel vernünftiger, weniger extreme und stabilere Geschwindigkeiten liefern als letzere.

Im letzten Schritt werden noch zusätzlich zu den P-Phasen die S-Phasen für die SSH-Inversion herangezogen. Das V_p/V_s -Verhältnis wird dabei vorgegeben und dazu einerseits aus dem Vergleich des RMS als Ergebnis verschiedener 1D-Inversionen und andererseits aus den oben beschriebenen Wadati-Diagrammen ermittelt. Trotzdem ist die Verwendung von S-Phasen in dem Inversionsprozess als kritisch anzusehen, da die zugehörigen Laufzeiten im allgemeinen schlechter bestimmt sind und andererseits nicht wirklich neue Informationen über die Struktur enthalten da die Strahlwege vornehmlich denen der P-Phasen entsprechen.

Im Hinblick auf die geologische und tektonische Interpretation der tomographisch ermittelten Strukturen kann gezeigt werden dass, unabhängig von der Unterteilung des Untersuchungsgebietes, gewisse Tendenzen in der Struktur der Kruste als auch des oberen Mantels sichtbar werden. Diese bleiben zudem meistens erhalten bei einer feineren Unterteilung in z.B. 21x21 oder 25x25 Blöcke pro Schicht, was eine gewisse statistische Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse bedingt. Einige der erhaltenen strukturell-tomographischen Details speziell in der oberen Kruste lassen sich mehr oder weniger anhand der tektonischen Übersichtskarte (Burollet, Pia, Franke u. Trümpy, 1992) erklären .

Referenzen:

Bamford, D., Refraction data in western Germany- A time term interpretation, *Z. Geophys*, 39, 907-927, 1973.

Fuchs, K, Seismic anisotropy of the subcrustal lithosphere as evidence for dynamical processes in the upper mantle, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 49, 167-179, 1977.

Koch, M., Simultaneous inversion for three-dimensional crustal structure and hypocenters including direct, refracted and reflected phases. I. Development, validation and optimal regularization of the method, *Geophys. J. Int.*, 112, 385-412, 1993

Schlittenhardt, J., Regional velocity models for Germany: a contribution to the systematic travel-time calibration of the International Monitoring System, in *Proceedings of the 21st DoD/DOE Seismic Research Symposium: Technologies for Monitoring The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*, Las Vegas, Nevada, Vol. I, 263-273, 1999.

Song L.-P., M. Koch, K. Koch, and J. Schlittenhardt, Isotropic and anisotropic P_n velocity inversion of regional earthquake traveltimes underneath Germany, *Geophys. J. Int.*, 146 (3), 795-800, 2001.

Song, L.-P., Koch, M., Koch, K., Schlittenhardt, J. 2004. 2-D anisotropic P_n -velocity tomography underneath Germany using regional traveltimes, *Geophys. J. Int.*, **157**, 645- 663

Tektonische Übersichtskarte von Deutschland

P. Burolet, G.V. Dal Piaz, W. Franke und R. Trümpy, 1992, A Continent Revealed, The European Geotraverse, Atlas Map 1, Tectonics, South Sheet, The European Science Foundation