

## Seismische Tomographie: Durchleuchtung der Erde gewinnt an Schärfe

Der seismischen Tomographie als bildgebendes Verfahren wird eine zentrale Rolle in der Erforschung der Struktur der Erde und ihrer Dynamik zugeschrieben. Mit den Daten des Seismometer-Netzwerkes USArray sind dreidimensionale Bilder vom Aufbau der Erde in bislang nicht gekannter Detailtreue entstanden. Im Untergrund des Yellowstone kann (ehemals?) aufströmendes Mantelgestein (Mantle Plume) bis in 800 km Tiefe (unterer Mantel) verfolgt werden.

Michael Kotulla

Die USArray-Initiative (MELTZER et al. 1999) ist Teil des US-amerikanischen Programms „EarthScope – Ein Blick in unseren Kontinent“ (KERR 2013b). Das 2004 begonnene Projekt tritt in seine vorerst letzte Phase. Die Tomographie\* des US-Kernlandes ist nahezu abgeschlossen; nunmehr erfolgt die systematische Durchleuchtung Alaskas (2014–2018) und seiner Randgebiete.

Die Datensammlung erfolgt im Wesentlichen durch ein mobiles Seismometer-Netzwerk (Array) mit 400 Seismometerstationen, das seit

2004 von der Pazifikküste schrittweise ostwärts „gewandert“ ist. Die Stationen werden jeweils für eine Dauer von zwei Jahren in einem regelmäßigen Raster von  $\pm 70$  km Maschenweite aufgestellt. Daneben gibt es über 100 permanente Seismometerstationen (Referenz-Netzwerk) und einen Pool portabler Stationen für Spezialuntersuchungen.

Die Seismometer registrieren Erdbebenwellen. Auf ihrem Weg zwischen Quelle und Empfänger nehmen sie Informationen über den

**Abb. 1** Seismische Tomographie. Das aktuelle Bild zeigt einen Querschnitt der Erdkruste (Crust) und des Mantels (Mantle) unterhalb von Nordamerika bis in eine Tiefe (Depth) von 2.800 km. Die unterschiedlichen Laufzeitzeiten seismischer Wellen werden interpretiert und in Wärmeunterschiede umgerechnet. Blaue und grüne Farbtöne bedeuten im Verhältnis kältere Gesteine, rote Farbtöne dagegen wärmere Regionen. Die grüne „Diagonale“ im Mantel und die sich nach links (Westen) anschließenden grünen und blauen Zonen zwischen den Tiefenlinien von 410 km und 660 km (Übergangszone unterer zu oberer Erdmantel) werden als Rest einer alten tektonischen Platte (Subducted Plate), der Farallon-Platte, gedeutet, die – ausgelöst durch eine Plattenkollision – unter der nordamerikanischen Platte subduziert (abgetaucht) bzw. von der nordamerikanischen Platte überfahren wurde. Diese Platte (bzw. Plattenbewegung) wird für die Gebirgsbildung und den Vulkanismus im Westen der USA verantwortlich gemacht. (Bild: Suzan VAN DER LEE & Steve GRAND; freundliche Zurverfügungstellung)

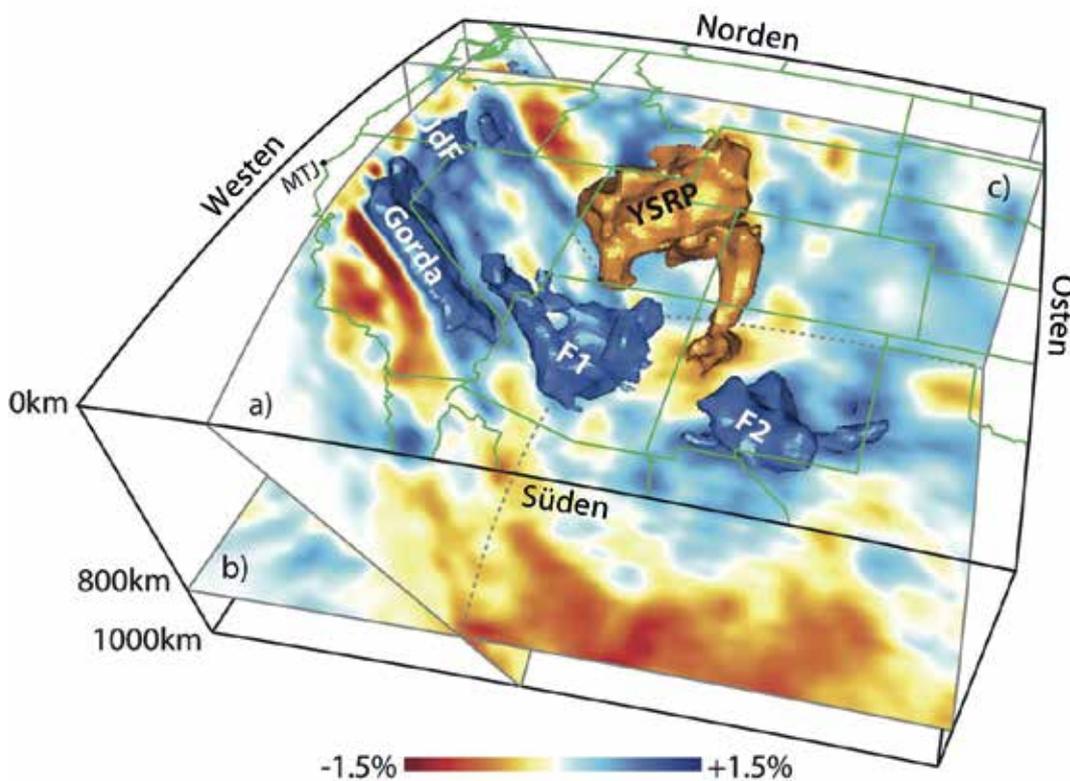
Untergrund (Geschwindigkeitsanomalien der Wellenausbreitung) auf, die durch die seismische Tomographie entziffert werden. Auf diese Weise wird der gesamte Aufbau der Erde interpretiert und abgebildet<sup>1</sup>.

Auf der großen Skala macht die Tomographie abtauchende (Lithosphären-) Platten, große Scherzonen (z. B. San Andreas-Verwerfung) oder aufströmendes Mantelgestein (Plumes, Manteldiapire) sichtbar. Die Textabbildungen der ausgewählten Beispiele, die hier erläutert werden, zeigen den Untergrund des nordamerikanischen Kontinents (Abb. 1, Earthscope 2008, vgl. VAN DER LEE et al. 2008) sowie des pazifischen Nordwestens (Abb. 2, OBRYSKI et al. 2010). Während Abb. 1 auf seismischen Daten vor der USArray-Initiative basiert, sind für Abb. 2 USArray-Daten verarbeitet worden.

## Glossar

**Seismische Tomographie:** Die Durchleuchtung und Sichtbarmachung von Strukturelementen des Erdinneren, ähnlich dem Prinzip einer Röntgen-Computertomographie. Dabei werden Geschwindigkeitsanomalien der seismischen Wellenausbreitung in Temperaturunterschiede umgewandelt.

Solche dreidimensionalen und hochauflösenden Bilder (im Dekakilometer-Bereich) tragen maßgeblich zum weiteren Verstehen der Struktur der Erde und ihrer Dynamik bei. Allerdings wird zunächst (nur) ein Einblick in den Ist-Zustand (Struktur) gewährt, die Dynamik, der geodynamische Prozess, die strukturelle Veränderung mit der Zeit, muss rekonstruiert werden.



**Abb. 2** 3D-Bild des Untergrundes des Pazifischen Nordwestens. Die aktuelle Tomographie wird interpretiert als eine Interaktion der abtauchenden Juan-de-Fuca-Platte (JdF) bzw. der ehemals größeren Farallon-Platte (F1 und F2 als Fragmente) mit dem Manteldiapir (aufströmendes Mantelgestein), der sich unterhalb der Yellowstone-Snake-River-Ebene (YSRP, P = plain) befindet. Die Gorda-Platte, ehemals Teil der größeren Farallon-Platte, reicht etwa 600 km in die Tiefe. Die Farbskala weist die jeweilige Abweichung der P-Wellen-Geschwindigkeit vom Referenzmodell aus (blau = „kalt“, rot = „warm“). Weitere Erklärungen siehe Textteil. a) Schrägschnitt entlang des Einfallwinkels der Gorda-Platte, b) Horizontalschnitt in 800 km Tiefe, c) Querschnitt etwa entlang des 45. Breitengrades; Oberfläche Abgrenzungen der US-Bundesstaaten. (Grafik aus OBRYSKI et al. 2010; freundliche Zurverfügungstellung durch den Co-Autor Richard A. ALLEN)

## Tomographie und Plattentektonik

Das erste Beispiel wird konventionell mit dem Konzept der Plattentektonik erklärt, wonach die Lithosphäre (Erdkruste und oberster Mantel) in wenige große und einige kleinere bewegliche Einzelteile (tektonische Platten) unterteilt (fragmentiert) ist. In Abb. 1 werden die grüne „Diagonale“ im Mantel und die sich nach links (Westen) anschließenden grünen und blauen Zonen zwischen den Tiefenlinien von etwa 410 und 660 km als Rest einer alten tektonischen Platte (subduzierte Platte) gedeutet, die – ausgelöst durch eine Plattenkollision – unter der nordamerikanischen Platte subduziert (abgetaucht) ist bzw. von der nordamerikanischen Platte überfahren wurde. „Gegenwärtig“ liegt der nordamerikanische Osten über dem Eintauch-Bereich der Platte in den unteren Mantel (unterhalb 660 km). Der tiefste Teil der subduzierten Platte liegt bereits unter dem Atlantischen Ozean. Diese (alte) Platte soll die ehemalige Farallon-Platte (siehe auch PAVLIS et al. 2012, SIEGLOCH & MIHALYNUK 2013) repräsentieren, eine ehemals große ozeanische Platte westlich Amerika (nordamerikanische und südamerikanische Platte), deren westlichster noch vorhandener Rest durch Bruchzonen in die Juan-de-Fuca-, die Explorer- und die Gorda-Platte (Nordamerika), die Cocos-Platte (Mittelamerika) und die Nazca-Platte (Südamerika) zerlegt ist.

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, wieso die ehemalige Farallon-Platte über mehrere Tausend Kilometer bis an die Basis des unteren Mantels überhaupt sichtbar ist. So schreiben beispielsweise SCHMID et al. (2002, 17), dass erwartet werden könnte [aufgrund der langen Zeitskala], dass sich die [„kältere“] subduzierte Farallon-Platte thermisch weitestgehend an das umgebende [„wärmere“] Mantelmaterial unterhalb Nordamerikas angeglichen hat. Stattdessen zeige die Tomographie, so die Autoren weiter, positive seismische Geschwindigkeitsanomalien, die einer Wärmeanomalie von 200-400°C entspreche. In der Tat ist diese Feststellung ein wichtiges Indiz für eine ehemals extrem hohe Platten- bzw. Subduktionsgeschwindigkeit und eine kurze Zeitskala. Anstatt aber ergebnisoffen die Geodynamik und die Zeitfrage zu ergründen, entwickeln sie ein thermisches Modell, welches auf eine Subduktionszeit von 60 Millionen Jahren (verstanden als Real-Jahre) auf Basis radiometrischer Altersdaten gründet.

## Yellowstone-Hotspot

Im zweiten, komplexeren Beispiel wird zusätzlich das Manteldiapir-Konzept angewendet. Die we-

sentlichen Strukturelemente des 3D-Bildes (Abb. 2) bestehen aus markierten blauen („kälteren“) Körpern, gedeutet als herabsinkende Lithosphärenplatten (Gorda; Juan de Fuca, JdF) und Lithosphärenfragmenten (F1, F2), sowie einem gelb-roten („wärmeren“) Körper, gedeutet als Manteldiapir unterhalb der Yellowstone-Snake-River-Ebene (YSRP). Bezogen auf eine zu erwartende mehrere Tausend Kilometer lange, absinkende Farallon-JdF- bzw. Farallon-Platte (s.o.) sind Ausdehnung und Eintauchtiefe (Juan-de-Fuca- (300 km) und Gorda-Platte (600 km)) überraschend gering. Die mit F1 und F2 markierten Körper östlich der abtauchenden Gorda-JdF-Lithosphäre werden als mögliche Fragmente der Farallon-JdF-Lithosphäre interpretiert.

## Die in allen Facetten heute zu beobachtenden Geoprozesse sind verglichen mit der Vorzeit extrem niedrig-dynamisch und lokal begrenzt.

Mit Unterstützung geologischer Befunde an der Erdoberfläche rekonstruieren OBREBSKI et al. aus diesem komplexen Untergrundbild einen wahrscheinlichen Verlauf der Ereignisse: Die abtauchende Lithosphärenplatte wird von aufströmendem Mantelgestein (pilzartige Struktur) „durchschweißt“, fragmentiert und teilweise durch den Plume-Kopf assimiliert. Das weiter aufsteigende Magma erreicht die Oberfläche; in kurzer Zeit werden – einem Aderlass gleich – gewaltige Lavamengen an Spaltensystemen ausgestoßen. Es entstehen die Flutbasalte des Columbia River im Osten Oregons. Eine Verlagerung der Aktivität in den südlichen Bereich des Plume-Kopfes und eine fortschreitende Subduktion bzw. Überführung in nordöstlicher Richtung relativ zur nordamerikanischen Platte (ca. 600 km) führt zum (abklingenden?) Vulkanismus der Yellowstone-Snake-River-Ebene und final zum heutigen Hotspot (Wärmeanomalie) des Yellowstone.

Die mögliche Existenz von Manteldiapiren und ihre Wirkungsweise wird seit über 40 Jahren diskutiert (vgl. KERR 2013a). Sofern die aufwändige seismische Interpretation korrekt ist, haben OBREBSKI et al. (2010) den Yellowstone-Plume nunmehr hochauflösend bis in den oberen Teil des unteren Mantels (800 km Tiefe) abbilden (und verfolgen) können; SMITH et al. (2009) gelang dies aufgrund eines gröbermaschigen Apparatur-Netzes (nur) bis in 660 km Tiefe (Grenze unterer zu oberer Mantel). Der tomographische Einzel-Befund in Verbindung mit weiteren geodynamischen, geochemischen und geologischen Überlegungen spricht für eine tiefgründige Entstehung des Mantelstroms an der Basis des unteren Mantels (2.700 – 2.900

km Tiefe). Das vermuten auch SCHMANDT et al. (2012), die ebenfalls auf Basis von USArray-Daten einen „heißen Mantel“ unterhalb Yellowstone bis zu einer Tiefe von etwa 900 km zeigen können. Dennoch äußern sie nüchtern: „Die Herkunftstiefe des Plume innerhalb des unteren Mantels bleibt ungewiss“ (S. 224, in Übersetzung).

## Fazit

Die großskalige Durchleuchtung der Erde hat an Schärfe und Vertrauenswürdigkeit gewonnen. Dennoch kann das interpretierte Bild des Untergrundes nicht direkt überprüft werden; Tiefbohrungen dieses Ausmaßes sind nicht möglich.

Die fahrradartigen Verbindungen zwischen der Oberfläche und den Tiefen des Erdmantels (Plattentektonik, Manteldiapire) scheinen allerdings weitestgehend „eingefroren“ oder „festgefahren“. So wirken nicht nur die bestandsaufnehmenden tomographischen Bilder. Die in allen Facetten heute zu beobachtenden Geoprozesse (System Erde) sind verglichen mit der Vorzeit extrem niedrig-dynamisch und lokal begrenzt. Für die Plattentektonik beschreibt es FRANKE so (2000, 30): „Die einzelnen Platten, aus denen sich die Kontinente zusammensetzen, sind größtenteils zur Ruhe gekommen, so dass die Plattenbewegungen innerhalb der heutigen Kontinente meist vollständig erloschen sind.“

## Anmerkung

<sup>1</sup> Der Kurzbeitrag beschränkt sich auf das bildgebende Verfahren der seismischen Tomographie. Er behandelt nicht die unterschiedlichen Modelle und Sichtweisen zum Aufbau der Erde. Die primär seismologische Definition der Regionen – Kruste, unterer und oberer Mantel, äußerer und innerer Kern – beruht im Wesentlichen auf Unterschieden in der Dichte und der chemischen Zusammensetzung. Beispielsweise definiert die Mohorovičić-Diskontinuität die Grenzfläche Kruste/oberer Mantel mit einer (sprunghaften) Zunahme der seismischen P-Wellengeschwindigkeit auf > 7,6 km/s (ozeanische Kruste), > 7,8 km/s (kontinentale Kruste) oder, im Falle der isländischen Kruste, auf > 7,5 km/s

(BJARNASON 2008). Die Gliederung in eine feste äußere Gesteinshülle, der Lithosphäre (griech. *lithos* = Stein), und einer darunter befindlichen, plastischen Asthenosphäre (griech. *asthenos* = weich) basiert auf Unterschieden im Festigkeits- bzw. Fließverhalten (Rheologie). Zur Lithosphäre gehört neben der Kruste der obere Teil des Mantels, der sog. lithosphärische Mantel. Die Lithosphärenplatten werden als starre Körper betrachtet, die auf der teilweise aufgeschmolzenen, plastischen Asthenosphäre driften bzw. driften können.

## Literatur

- BJARNASON IT (2008) An Iceland hotspot saga. *Jökull* 58, 3-16.
- Earthscope (2008) Seismic Tomography. [<http://www.usarray.org/researchers/pubs>]
- FRANKE W (2002) Die vereinigten Platten von Europa. In: WEFER G (Ed.) Expedition Erde, 30-34, Berlin.
- KERR RA (2013a) The Deep Earth Machine Is Coming Together. *Science* 340, 22-24.
- KERR RA (2013b) Geophysical Exploration Linking Deep Earth and Backyard Geology. *Science* 340, 1283-85.
- MELTZER A, RUDNICK R, ZEITLER P, LEVANDER A, HUMPHREYS G, KARLSTROM K, EKSTRÖM G, CARLSON R, DIXON T, GURNIS M, SHEARER P & VAN DER HILST R (1999) USArray Initiative. *GSA Today*, November, 8-10.
- OBREBSKI M, ALLEN RM, XUE M & HUNG S-H (2010) Slab-plume interaction beneath the Pacific West. *Geophysical Research Letters* 37, L14305, doi:10.1029/2010GL043489.
- SMITH RB, JORDAN M, STEINBERGER B, PUSKAS CM, FARRELL J, WAITE GP, HUSEN S, CHANG W-L & O'CONNELL R (2009) Geodynamics of the Yellowstone hotspot and mantle plume: Seismic and GPS imaging, kinematics, and mantle flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 188, 26-56.
- SCHMANDT B, DUEKER K, HUMPHREYS E & HANSEN S (2012) Hot mantle upwelling across the 660 beneath Yellowstone. *Earth and Planetary Science Letters* 331-332, 224-236.
- SCHMID C, GOES S, VAN DER LEE S & GIARDINI D (2002) Fate of the Cenozoic Farallon slab from a comparison of kinematic thermal modeling with tomographic images. *Earth and Planetary Science Letters* 204, 17-32.
- SIEGLOCH K & MIHALYNUK MG (2013) Intra-oceanic subduction shaped the assembly of Cordilleran North America. *Nature* 496, 50-56.
- VAN DER LEE S, REGENAUER-LIEB K & YUEN DA (2008) The role of water in connecting past and future episodes of subduction. *Earth and Planetary Science Letters* 273, 15-27.

## Webseite

[www.earthscope.org](http://www.earthscope.org); [www.iris.edu/hq/](http://www.iris.edu/hq/); [www.usarray.org](http://www.usarray.org).