Abb. 1: Darstellung des dreidimensionalen Wellenfeldes (grün und magenta) in einem unserer geodynamischen Modelle zu vier verschiedenen Zeitpunkten. Für diese Simulation eines Erdbebens in der Region der Fidschi-Inseln wurde das sog. Spektrale Elemente-Verfahren verwendet und die Wellenausbreitung auf 486 Prozessoren des Höchstleistungsrechners HLRB II am Leibniz-Rechenzentrum berechnet. Blaue und braunrote Regionen zeigen die schnellen bzw. langsamen Bereiche der aus dem geodynamischen Modell vorhergesagten Scherwellengeschwindigkeiten. Die Topographie ist zur geografischen Orientierung ebenfalls farblich gekennzeichnet.

ABB.: SCHUBERTH ET AL., GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL, 2012

Geophysik

Erdbeben, die Dynamik des Erdinneren und Supercomputer

Fortschritte im Verständnis der internen Dynamik unseres Planeten und der Physik von Erdbeben sind heute vor allem durch aufwändige Rechnungen möglich, die auf parallelen Supercomputern, etwa am Leibniz-Rechenzentrum, durchgeführt werden.

Von Bernhard Schuberth, Stefan Wenk, Heiner Igel und Hans-Peter Bunge

Die Dynamik des Erdinneren

Geowissenschaftler rätseln bis heute, wie sich das tiefe Erdinnere bewegt und was die so genannten seismischen Heterogenitäten (Änderungen der Geschwindigkeiten seismischer Wellen im Erdinneren) verursacht. Eine genaue Kenntnis des dynamischen Verhaltens des Mantels ist wichtig, da die Strömungen in der Tiefe die Plattentektonik antreiben und steuern, auf welche Art und Weise die Erde abkühlt. Dies sind entscheidende Faktoren bei Modellierungen tektonischer Prozesse oder in Simulationen des Geodynamos und des damit verbundenen Erdmagnetfelds sowie für die thermische Entwicklung der Erde. Ein besseres Verständnis dieser Aspekte ist von großer gesellschaftlicher Bedeutung. So führt z. B. die kontinuierliche Drift der tektonischen Platten relativ zueinander zu einem Aufbau von Spannungen an den Plattengrenzen, die regelmäßig durch Bruch des Krustengesteins abgebaut wird: Es kommt zu – oft katastrophalen – Erdbeben.

Der Großteil unserer Kenntnisse über die Struktur und das dynamische Verhalten des tiefen Erdinneren stammt aus der Analyse der Aufzeichnungen von seismischen Wellen, die bei mittelstarken und starken Beben durch den gesamten Erdkörper laufen. Ähnlich wie bei der medizinischen Tomographie erlaubt uns die seismische Tomographie, ein dreidimensionales Bild des jetzigen Zustands (geologisch gesehen) der elastischen Struktur des Erdmantels zu „sehen". In den letzten zwei Jahrzehnten wurde eine Vielzahl solcher 3-D-Modelle erzeugt. Allerdings liefert die seismische Tomographie nur eine begrenzte Auflösung, das heißt, man erhält nur ein unscharfes und verzerrtes Bild der Erdstruktur. Dies ist unter anderem eine Folge der von der Natur vorgegebenen ungleichmäßigen Verteilung von Erdbeben sowie seismischen Empfängern, die überwiegend auf Kontinentregionen beschränkt sind.

Trotz erheblicher Verbesserungen in den seismologischen Methoden und eines dramatischen Anstiegs in der Menge und Qualität der verfügbaren Daten werden Interpretationen von tomographischen Bildern dadurch erschwert, dass die sichtbaren Strukturen sowohl durch thermische wie auch durch chemische Effekte verursacht werden können. Dies erklärt, warum die Verteilung chemischer Heterogenitäten und deren Rolle für die Dynamik des Mantels bisher kaum verstanden sind (Abb. 1).

Eine synthetische Erde

Moderne Methoden für die Berechnung seismischer Wellenausbreitung erlauben es uns heutzutage, eine Vielzahl von physikalischen Phänomenen zu simulieren und synthetische Datensätze mit einer Komplexität zu produzieren, die der realer Beobachtungen vergleichbar ist. Die routinemäßige Berechnung synthetischer Seismogramme mit realistischem Frequenzgehalt ist in den letzten Jahren dank der rasant wachsenden Rechenleistung möglich geworden. Bisher war aber unklar, wie geodynamische Überlegungen in seismologischen Simulationen in effizienter und konsistenter Art und Weise eingebaut werden können und wie man von den rechentechnisch höchst anspruchsvollen Simulationen bestmöglich für unser Verständnis der Struktur und Dynamik der tiefen Erde profitiert. Dies war die Motivation, ein neues Verfahren zu entwickeln, um synthetische dreidimensionale seismische Strukturen zu generieren, also basierend auf theoretischen Überlegungen der Strömungsmechanik des Mantels, die in Simulationen der globalen Wellenausbreitung verwendet werden können.

Hier präsentieren wir die Ergebnisse unseres neuen multidisziplinären Ansatzes, der Simulationen aus den Bereichen Geodynamik, Mineralphysik und Seismologie kombiniert. Die Temperaturverteilung im Erdmantel wird durch hochauflösende dreidimensionale Mantelzirkulationsmodelle mit einer Finite-Elemente-Methode vorhergesagt (s. z. B. Bunge 2002 im Literaturverzeichnis auf S. 73). Anschließend werden den Temperaturen entsprechende seismische Geschwindigkeiten zugeordnet. Dies wird durch die jüngsten Fortschritte in der Mineralphysik und Petrologie ermöglicht, wo man nun in der Lage ist, thermodynamisch selbst-konsistente Modelle der Mantelmineralogie für die Umrechnung des dynamisch-thermischen Zustandes der Erde in elastische Parameter zur Verfügung zu stellen. Die so vorhergesagten Modelle seismischer Heterogenitäten wurden dann in einen Spektrale Elemente-Algorithmus für die Simulation der 3-D-globalen Wellenausbreitung eingebaut (Abb. 1).

Beide Simulationstypen, die geodynamische wie auch die seismische, benötigen sehr große Rechenressourcen und parallele Computerarchitekturen. Die Bereitstellung der Supercomputing-Plattform HLRB II am Leibniz-Rechenzentrum war ein entscheidender Faktor für unsere Forschung, und wir können nun zum weltweit ersten Mal Ergebnisse der Simulation 3-D-seismischer Wellenausbreitung durch synthetische geodynamische Erdmodelle präsentieren. Das heißt, wir sind jetzt in der Lage, synthetische Seismogramme völlig unabhängig von seismischen Beobachtungen vorherzusagen. Dies ist der Schlüssel, um geodynamische Hypothesen direkt gegen seismische

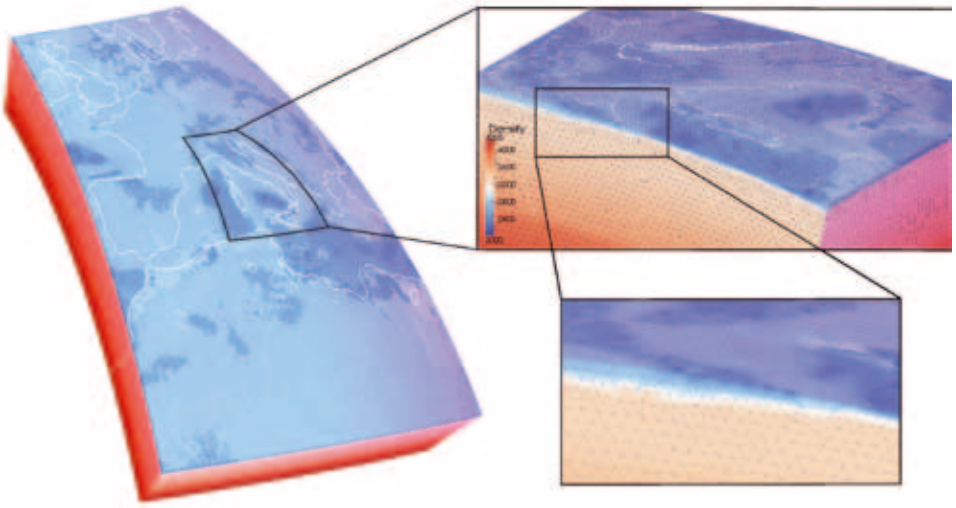

Abb. 2: Tetraedergitter für ein europäisches Erdmodell, mit dem das L'Aquila-Erdbeben von 2009 simuliert wurde. Das dreidimensionale Modell folgt mit dem Gitter der komplizierten Geometrie des Übergangs zwischen Erdkruste und Erdmantel in ca. 30 bis 50 km Tiefe (s. Detailausschnitt rechts unten).

Beobachtungen zu testen, was in Zukunft als ergänzendes Analyseinstrument zu tomographischen Inversionen benutzt werden kann.

Wellenausbreitung in komplexen Erdmodellen

Für die Simulationen durch die oben beschriebenen geodynamischen Modelle wurde das so genannte Spektrale Elemente (SE)-Verfahren verwendet. Am Lehrstuhl für Geophysik der LMU München wurde in den letzten Jahren ein alternatives Verfahren zur Wellen- und Bruchsimulation entwickelt, welches für bestimmte Modellklassen Vorteile hat (z. B. Modelle mit stark variierenden seismischen Geschwindigkeiten oder starker Topographie, wie etwa bei Vulkanen). Während SE die Wellengleichungen auf deformierten Hexaedergittern berechnet, wird bei dem Diskontinuierlichen Galerkin (DG)-Verfahren das Erdmodell mittels Tetraeder diskretisiert (Abb. 2). Dies ist bei der Rechengittererstellung vorteilhaft, wenn das Gitter zum Beispiel komplizierten Flächen folgen muss.

Die Wahl des numerischen Verfahrens zur Lösung der physikalischen Gleichungen spielt für die Implementierung auf parallelen Supercomputern – wie SuperMUC – eine große Rolle. Die Vorteile des DG-Verfahrens bei der Gittererzeugung werden relativiert durch die erhöhte Komplexität des Algorithmus und die größere Schwierigkeit, eine entsprechende Lastbalancierung für eine große Zahl von Prozessoren zu erreichen. Dies ist vor allem im Zeitalter der Multicore-Architekturen eine große Herausforderung.

Vergleich mit Beobachtungen

Das DG-Verfahren wurde im Rahmen eines KONWIHR-Projekts auf regionale Erdmodelle erweitert und getestet. Dies schließt den Vergleich mit bekannten Rechenverfahren (z. B. SE) und den Vergleich mit Beobachtungen ein. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse einer Simulation, die für das verheerende L'Aquila-Erdbeben im April 2009 in Italien berechnet wurden. Die auf dem Supercomputer des LRZ berechneten Ergebnisse werden direkt mit den Beobachtungen verglichen. Man erkennt, dass zumindest die Wellenformen am Anfang der seismischen Spuren sehr gut übereinstimmen. Dies ist ein Maß für die derzeitige Genauigkeit des tomographischen Erdmodells unter Europa. Die Diskrepanz der Seismogramme ist allerdings auch ein Indiz dafür, dass das Erdmodell noch recht weit von einem Modell entfernt ist, welches die Daten perfekt erklärt. Nur die kontinuierliche Verbesserung der Erdmodelle mittels Inversion der gesamten Wellenfelder wird in den nächsten Jahren zu wesentlich besseren Ergebnissen führen. Dazu sind enorm große Rechenkapazitäten erforderlich.

Hat der untere Erdmantel eine einheitliche chemische Zusammensetzung?

Eine spezifische Frage, die wir mit unserem zu Beginn erwähnten Joint-Forward-Modeling-Ansatz beantworten wollten, ist der Ursprung zweier großer Regionen stark reduzierter seismischer Geschwindigkeiten im untersten Erdmantel (die sog. afrikanischen und pazifischen Anomalien, auch „superplumes" genannt). Einige seismologische Beobachtungen werden als Indiz dafür gewertet,

BEIDE ABB.: LMU

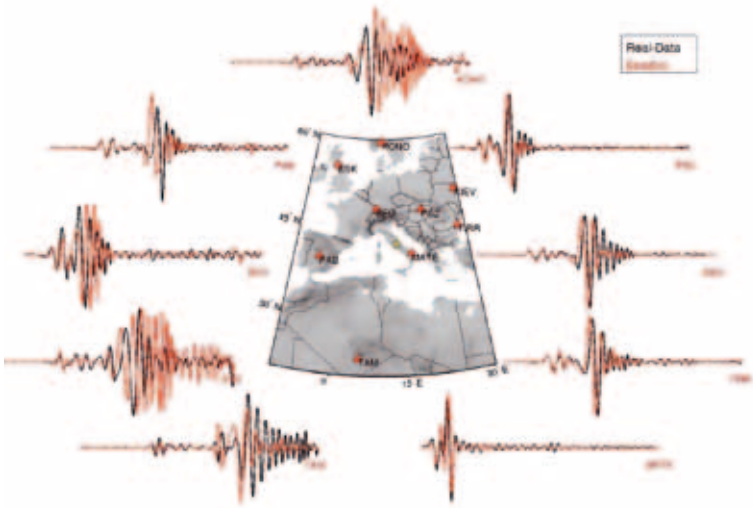

Abb. 3: Vergleich beobachteter Bodenbewegungen (schwarze Seismogramme) nach dem Erdbeben von L'Aquila in Italien (Epizentrum mit gelbem Stern markiert) mit synthetischen Seismogrammen (rote Seismogramme), die auf dem Supercomputer des LRZ berechnet wurden. Die Übereinstimmung (und Differenzen) sind ein Maß dafür, wie gut die Struktur unter dem europäischen Kontinent bekannt ist. Ziel ist es, die Diskrepanz zu minimieren, indem man das Erdmodell verbessert.

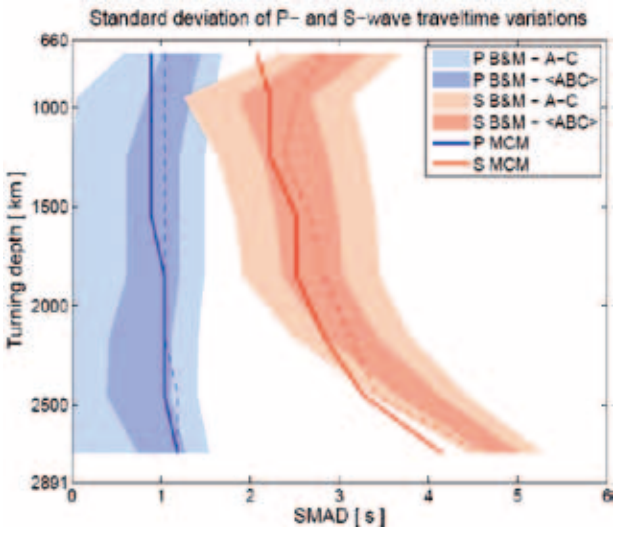

Abb. 4: Vergleich der Standardabweichung (SMAD = skalierte mittlere durchschnittliche Abweichung) von Laufzeit-Variationen in unserem geodynamischen Modell mit Beobachtungen. Unterlegte Flächen zeigen den Bereich der aus Beobachtungen abgeleiteten Werte. Blaue Linien stehen für die Laufzeit-Variationen simulierter P-Wellen, rote Linien für die Laufzeit-Variationen von S-Wellen. Durchgezogene und gestrichelte Linien zeigen SMAD-Kurven für zwei verschiedene Messtechniken.

dass die superplumes durch unterschiedliche chemische Zusammensetzung hervorgerufen werden, und dass sie Ansammlungen von Material mit gegenüber normalem Mantelgestein erhöhter Dichte darstellen. Neuere geodynamische, mineralogische und auch seismologische Studien verweisen aber auf einen starken thermischen Gradienten zwischen dem Erdkern und dem Mantel, der eine alternative Erklärung durch die daraus resultierenden großen lateralen Temperaturschwankungen liefern könnte. In der vorliegende Studie testeten wir die Hypothese, ob die Existenz eines solchen starken thermischen Gradienten über die Kern-Mantel-Grenze hinweg in iso-chemischen Mantelzirkulationsmodellen (also ohne chemische Variationen) mit geophysikalischen Beobachtungen in Einklang gebracht werden kann.

Die Laufzeiten der beobachteten seismischen Wellen, mit denen wir unseren synthetischen Datensatz verglichen haben, zeigen ein eigenartiges Verhalten in ihren Statistiken in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe der Wellen im unteren Erdmantel [Bolton & Masters 2001]: Die Standardabweichung der Laufzeitvariationen der P-Wellen bleibt nahezu konstant mit der Tiefe, während die der S-Wellenlaufzeiten stark in Richtung der Kern-Mantel-Grenze zunimmt. Dieser Anstieg im Falle von S-Wellen ist besonders unterhalb einer Tiefe von rund 2.000 km ausgeprägt (Abb. 4). Ein solcher Unterschied in der Statistik zwischen P- und S-Wellen ist in einem iso-chemischen Mantel im Rahmen der Strahlentheorie, die das Rückgrat der Seismologie bildet, nicht zu erklären.

Berücksichtigt man aber, wie in unserem Fall, das volle Wellenfeld, so findet man, dass die Standardabweichungen der Laufzeitvariationen von P- und S-Wellen in unserem geodynamischen Modell das gleiche unterschiedliche Verhalten wie die Beobachtungen zeigen. Dies ist ein bemerkenswertes Ergebnis angesichts der iso-chemischen Natur unseres Mantelzirkulationsmodells und unterstreicht die Wichtigkeit, die korrekte Physik der Wellenausbreitung bei der Interpretation langperiodischer seismischer Daten zu berücksichtigen. Besonders hervorzuheben ist auch, dass unser Vergleich synthetischer Daten mit Beobachtungen zeigt, dass ein einfaches iso-chemisches Modell der Mantelströmung, mit der Annahme eines hohen Wärmeflusses aus dem Kern, die Statistik der seismischen Beobachtungen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ erklären kann. Während dieser Befund nicht zwangsläufig bedeutet, dass es keine chemischen Heterogenitäten im unteren Mantel gibt, so zeigt unsere Studie doch, dass komplexe großräumige Variationen in der chemischen Zusammensetzung nicht erforderlich sind, um den hier untersuchten beobachteten seismischen Datensatz zu erklären.

Geowissenschaften und Supercomputing

Geophysikalische Datenmengen wachsen rasant. In der vorgestellten Studie haben wir uns auf ein einziges Frequenzband konzentriert. In Zukunft wird es aber wichtig werden, die neuen Multi-Frequenz-Datensätze aus der Perspektive der Vorwärtssimulationen ergänzend zu tomographischen Studien zu verstehen. Eine technische Hürde ist hierbei, dass der Speicherbedarf sehr groß ist, um die seismische Wellenausbreitung bis zu den höchsten, tele-seismisch beobachteten Frequenzen zu simulieren (ca. 1 Hz). SuperMUC, der Nachfolger des HLRB II, wird sicher dazu beitragen, uns dem Ziel näher zu bringen, das gesamte, für Studien über die tiefe Erde relevante Frequenzspektrum abzudecken.

DIE AUTOREN

Dr. Bernhard Schuberth ist als Geophysiker im Bereich Geodynamik der LMU München tätig, Stefan Wenk ist Doktorand im Bereich Seismologie der LMU München, den Prof. Dr. Heiner Igel leitet. Prof. Dr. Hans-Peter Bunge hat den Lehrstuhl für Geophysik, Schwerpunkt Geodynamik, an der LMU inne.

Literatur

H. Bolton, G. Masters, Journal of Geophysical Research 106 (B7) (2001), 13,527–13,540

H.-P. Bunge, M. Richards und J. Baumgardner, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 360 (2002), 2545–2567

M. Käser, C. Pelties, E. C. Castro, H. Djikpesse und M. Prange, The Leading Edge 29 (2010), 76–85

B. S. A. Schuberth, C. Zaroli und G. Nolet, Geophysical Journal International 188 (3) (2012), 1393–1412

ABB.: SCHUBERTH ET AL., GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL, 2012