

Labor-Reise in das Innere der Erde

Der Geologe Hauke Marquardt gewinnt experimentell Erkenntnisse über Vorgänge im unteren Erdmantel, die helfen können, Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit von Erdbebenwellen besser vorherzusagen

Beim schweren Erdbeben in Haiti im Januar 2010 starben je nach Schätzung bis zu 300.000 Menschen. Niemand hatte die Erschütterung kommen sehen, denn die heute verfügbaren Werkzeuge der Geowissenschaftler reichen kaum für eine exakte Vorhersage aus. Umso wichtiger ist es, die Vorgänge in der Welt unter unseren Füßen genauer zu verstehen. Einen wichtigen Beitrag dazu leistete der Geologe Hauke Marquardt, der in seiner an der Freien Universität Berlin vorgelegten Doktorarbeit die elastischen Eigenschaften von Materie im unteren Erdmantel untersucht hat.

Die »geologische Unterwelt« unseres Planeten ist noch weitgehend unerkundet. 1989 bohrten Geologen auf der russischen Halbinsel Kola das bislang tiefste Loch. Sie kamen 12 Kilometer tief – ein winziger Bruchteil der insgesamt rund 6370 Kilometer bis zur Erdmitte. Grund: Bereits in 12 Kilometer Tiefe herrschen Temperaturen von 180 Grad, die ein tieferes Vordringen technisch unmöglich machten.

Erkenntnisse über den inneren Aufbau der Erde können Geologen bisher nur indirekt erlangen – durch Messungen von Erdbebenwellen. Diese werden an Schichtübergängen im Erdinnern reflektiert, gebeugt oder absorbiert. Computer können aus den Daten eine Art Tomografie-Bild der Erde zusammensetzen. Das Ergebnis: Die Erdkruste, auf der wir stehen, ist eine nur relativ dünne Schicht von 50 Kilometer Dicke. Sie grenzt an den zähflüssigen Erdmantel, der bis in eine Tiefe von 2900 Kilometer reicht. Darunter befindet sich der weitgehend flüssige Erdkern, der überwiegend aus Eisen besteht und im Zentrum bis zu 5000 Grad heiß ist.

Studienpreis-Juror Christian Schwägerl:

»Das Thema erscheint auf den ersten Blick weit weg von uns: Es geht um Prozesse tief im Inneren der Erde. Doch Hauke Marquardt begründet spannend und nachvollziehbar, wie wichtig seine Arbeit für das Verständnis und die Vorhersage insbesondere von Erdbeben ist. Ein wirklich »tiefer« Beitrag, der durch außerordentliche wissenschaftliche Qualität, seine Bedeutung für erdbebengefährdete Länder weltweit und eine überzeugende Darstellung besticht.«

Die Erdkruste ist jedoch nicht gänzlich starr. Sie besteht aus sogenannten tektonischen Platten, die auf dem halbflüssigen Material des Erdmantels schwimmen wie Eisschollen auf dem Meer. Wenn diese Platten miteinander kollidieren oder sich untereinanderschieben (wie an vielen Ozeanrändern), entstehen Erdbeben und Vulkane; riesige Gebirge türmen sich auf. Ein Großteil der seismischen und vulkanischen Aktivität an der Erdoberfläche geht auf diese Plattenbewegungen zurück. Sie ist auch die treibende Kraft hinter der Anfang des 20. Jahrhunderts vom deutschen Geologen Alfred Wegener entdeckten Kontinental-Verschiebung: Alle sieben heutigen Kontinente entstanden, als vor rund 150 Millionen Jahren ein einziger Urkontinent namens Pangaea zerbrach.

Wie kann man Eigenschaften des unteren Erdmantels untersuchen, wenn diese Tiefen für Menschen – wohl für alle Ewigkeit – unzugänglich sind? Hauke Marquardt bediente sich in seiner Dissertation eines Tricks, der es ermöglicht, das Material gleichsam aus dem unteren Erdmantel ins Labor hochzuholen. Dafür ließ er zunächst das zweithäufigste Material des Erdmantels – eine aus Eisen, Magnesium und Sauerstoff bestehende kristalline Verbindung namens Ferroperiklas – im Bayrischen Geoinstitut synthetisieren. Ferroperiklas ist in der Erdkruste nicht vorhanden und kann nur künstlich erzeugt werden. Dieses Mineral macht zusammen mit dem silikalthaltigen Perowskit den größten Teil des Erdmantels aus. Doch der »Stoff« allein reicht für die Studien nicht aus, weil im unteren Erdmantel ein gigantisch hoher Druck herrscht. »Er ist in 1900 Kilometer Tiefe in etwa so groß, als würde man den Eiffelturm auf einer Fingerspitze balancieren«, erläutert Marquardt.

Um das Material unter den in dieser Tiefe real herrschenden Bedingungen zu untersuchen, musste Marquardt daher seine Laborprobe unter ähnlich hohen Druck setzen. Dabei machte er sich zunutze, dass Druck physikalisch als »Kraft pro Flächeneinheit« definiert ist. Um einen hohen Druck zu erzeugen, muss man entweder die Kraft stark erhöhen – oder wahlweise die Fläche, auf die eine vorgegebene Kraft wirkt, stark verkleinern. Marquardt nutzte die zweite Variante – ein von »Hochdruckmineralogen« verwendetes Standardverfahren: Dazu spannte er eine Ferroperiklas-Probe zwischen zwei winzigen Diamantspitzen ein, die im Innern einer handtellergroßen Hochdruckpresse aufeinanderdrücken. Außen an diesem





Metallwürfel befinden sich Stellschrauben. Je kräftiger sie angezogen werden, desto höher wird der Druck auf die Probe. Die Winzigkeit der Diamantspitzen (im Fachjargon: Stempel­flächen) sorgt dafür, dass die relativ geringe Spannkraft der Schrauben den gewünschten »Giga-Druck« (80 Giga-Pascal oder 800.000 bar) erzeugt – entsprechend dem in knapp 2000 Kilometer Erdtiefe. Das war bei der Art von Experimenten, wie Marquardt sie durchführt, ein neuer Weltrekord.

Um die eingespannte Probe genau untersuchen zu können, ist die Druckpresse auf beiden Seiten mit »Diamantfenstern« versehen, die den Blick auf die Diamantspitzen aus jeweils unterschiedlichen Richtungen erlauben. Durch diese Fenster sandte Marquardt bei seinen Experimenten Laser- oder Röntgenlicht.

Für seine Studien ist Marquardt mit der Druckzelle im Handgepäck um die halbe Welt gereist. Denn er benötigte eine extrem starke Röntgenstrahlung. Die Strahlen werden beim

Durchlaufen des Kristalls gestreut und erzeugen auf einem gegenüberliegenden Schirm ein Bild, das Rückschlüsse auf die innere Struktur des Kristalls erlaubt: Der hohe Druck, so ein erster Befund, staucht den Ferroperiklas-Kristall deutlich zusammen; seine Eisen-, Magnesium- und Sauerstoffatome sowie deren Elektronen rückten enger aneinander. Die Reisen führten Marquardt bis zu Synchrotrons in England und USA, deren äußerst energiereiche Röntgenstrahlung das Bild relativ schnell, innerhalb von Minuten, lieferte. Bei der schwächeren Strahlung konventioneller Quellen droht das Bild im Hintergrundrauschen unterzugehen, und es würde bestenfalls erst nach Tagen sichtbar – eine Folge der Winzigkeit der Probe.

Dieses Zusammenstauchen wirkte sich, wie Marquardt weiterhin herausfand, deutlich auf die Materialeigenschaften des Ferroperiklas-Kristalls aus. Er interessierte sich insbesondere für die Ausbreitung von Schallwellen im Innern des Kristalls, weil Schallwellen sich ähnlich verhalten wie Erdbebenwellen.

Bei Erdbeben entstehen zwei Arten von Wellen: »Longitudinal-Wellen«, die als Druckwellen in Richtung ihrer Ausbreitung schwingen und den Boden dabei periodisch stauchen und strecken; und »Transversal-Wellen«, die den Boden wie Wasserwellen auf- und abschwngen lassen und damit quer zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingen.

Man kann eine Longitudinal- oder Druckwelle auch im Garten erzeugen, indem man an einem stramm in die Länge gezogenen Wasserschlauch plötzlich noch stärker in Längsrichtung zerrt. Die zusätzliche Deformation wirkt zunächst nur auf das Ende, das man in der Hand hält, pflanzt sich dann aber als Druckwelle über den Schlauch fort, bis sich der zusätzliche Druck gleichmäßig über die gesamte Länge verteilt hat. Eine solche Druckwelle wirkt nur in Längsrichtung des Schlauchs. Dieser schwingt dabei weder nach oben noch nach unten.

Eine Transversalwelle (auch Scherwelle genannt) hingegen entsteht, wenn man einen schlaff auf dem Boden liegenden Gartenschlauch plötzlich an einem Ende hochreißt. Diese nun seitlich wirkende Auslenkung breitet sich ähnlich wie eine Wasserwelle aus. Der Schlauch schlägt dabei quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle aus.

Bei einem Erdbeben kommen zuerst die Druckwellen an. Sie werden, da sie schneller sind, auch Primär-Wellen oder kurz »p-Wellen« genannt. P-Wellen machen sich dadurch bemerkbar, dass der Untergrund kräftig horizontal hin und her schwankt, was z. B. Schränke und Stehlampen umkippen lässt. Einige Sekunden oder Minuten später treffen die langsameren Transversalwellen (auch als Sekundär-Wellen oder »s-Wellen« bezeichnet) ein. S-Wellen heben und senken den Boden, ihre Auslenkung ist also vertikal. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der p- und s-Wellen können Geowissenschaftler errechnen, wie weit jeweils das Epizentrum entfernt ist. Je kürzer der Abstand, desto näher ist man am Bebenherd.

Marquardt hat bei seinen Untersuchungen nun überraschend festgestellt, dass sich auch s-Wellen unterschiedlich schnell durch unter hohem Druck stehende Ferropentaklas-Kristalle bewegen können: Der hohe Druck im unteren Erdmantel bewirkt, dass sich die Kristalle in bestimmter Weise ausrichten. Diese Kristallorientierung wiederum führt dazu, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der s-Wellen von ihrer jeweiligen Schwingungsrichtung (Polarisation) abhängt.

Zum experimentellen Nachweis beschloss Marquardt einen einzelnen eingespannten Ferropentaklas-Kristall – er ist mit 0,05 Millimeter Länge an der längsten Kante so klein, dass er nur unter dem Mikroskop sichtbar ist – mit Laserlicht. Die thermischen Eigenschwingungen der Atome im Kristall wechselwirken mit dem Laserlicht. Aus dieser Wechselwirkung lässt sich die Schallgeschwindigkeit im Kristall berechnen. Diese Schallwellen haben zwar nur eine Wellenlänge von wenigen Nanometern, sind aber dennoch mit den oft kilometerlangen Erdbebenwellen vergleichbar.

Bei seinen Laser-Experimenten drehte Marquardt die Druckzelle nach und nach – und damit auch den eingespannten Ferropentaklas-Kristall. Ergebnis: Besonders langsam wurden die Schallwellen, wenn sie diagonal über eine der sechs Würfel­flächen des Kristalls liefen. Ursache ist das jeweils im Zentrum der Flächen positionierte Eisenatom, dessen Elektronen unter hohem Druck enger an den Atomkern heranrücken – was den

Schall in dieser Richtung bremst. Entlang der Würfelkanten hingegen breitete sich der Schall erheblich schneller aus.

Im unteren Erdmantel herrschen enorme Drücke und Temperaturen. »Dadurch werden Gleitsysteme aktiviert, in denen sich die Atome gegeneinander verschieben können«, sagt Marquardt. »Dies führt zu einer Rotation der Kristalle. Sie reagieren auf den Druck, indem sie sich entlang einer bevorzugten Achse ausrichten.« In der Summe könnte dies zur Folge haben, dass sich die gesamte Schicht ähnlich wie ein riesiger Kristall verhält, der s-Wellen je nach deren Schwingungsrichtung unterschiedlich schnell weiterleitet. Ein Vergleich der gemessenen Geschwindigkeitsunterschiede mit Labordaten dürfte künftig helfen, die Massebewegungen im unteren Erdmantel besser zu verstehen.

Mit Hilfe seiner Befunde konnte Marquardt, der seit 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen GeoForschungs-Zentrum Potsdam tätig ist, auch ein neuartiges Thermometer zur Messung von Temperaturen in unterschiedlichen Erdtiefen konzipieren. Die experimentell ermittelte Absenkung der Schallgeschwindigkeit, die durch das Eisen im Ferropentaklas entsteht, führt höchstwahrscheinlich auch im tieferen Erdmantel (1300 bis 1800 Kilometer) zu einer deutlichen Abbremsung von Erdbebenwellen. »Die genaue Erdtiefe, in der diese Abbremsung stattfindet, ist abhängig von der vorherrschenden Temperatur. Daher ist es im Prinzip möglich, die Geschwindigkeiten von Erdbebenwellen als Thermometer zu verwenden«, erklärt Marquardt. Dazu bedürfte es allerdings noch umfangreicherer Labordaten und verbesserter Erdbebenaufzeichnungen.

Bisherige Schätzungen der Temperatur des unteren Erdmantels sind vage und reichen von 2500 und 4000 Grad. Eine genauere Kenntnis wäre laut Marquardt hilfreich, »weil die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Materialeigenschaften und auf viele Prozesse im Erdmantel hat. Sie bestimmt beispielsweise, ob Materialien in der tiefen Erde flüssig oder fest sind – und damit auch, ob sich an die Oberfläche aufsteigendes Magma bilden kann.«

Hauke Marquardt (30) hat an der Freien Universität Berlin und der Eberhard-Karls-Universität Tübingen Geologie studiert. Seine Promotion realisierte er an der Freien Universität Berlin und dem Deutschen GeoForschungs-Zentrum (GFZ) Potsdam. Nach einem Forschungsaufenthalt an der University of California in Berkeley (USA) ist er seit 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen GeoForschungs-Zentrum Potsdam.

Beitragstitel **Die tiefe Erde im Labor**

Hauke Marquardt

Promotion an der Freien Universität Berlin

Deutsches GeoForschungs-Zentrum Potsdam

Telefon dienstlich +49-331-288-1894

Mobil +49-157-71980145

E-Mail hama@gfz-potsdam.de