



Straße bei Alto Hospicio in Chile, nach einem Erdbeben der Stärke 7,6 im April 2014

Blick ins Herz der Finsternis

Erdbeben wie jüngst in Mexiko sind zerstörerisch. Forschern liefern sie Informationen über das Innenleben unseres Planeten **VON URS WILLMANN**

Beim Blick in die Ferne sind wir weit gekommen. Mit dem Welt- raumteleskop Hubble haben sich Menschen im vergangenen Jahr eine Galaxie angeschaut, die 13,4 Milliarden Lichtjahre entfernt ist. Viel weiter geht es nicht. Schwieriger ist das Sehen nach innen, der Blick hinein in unseren Planeten. Die Erdkruste versperrt die Sicht, äußerst effektiv. Nur vage entwickelt sich daher die Vorstellung vom Innenleben des Bodens unter unseren Füßen. Noch nie ist ein direkter optischer Blick dort hingelangt: ins finstere Herz der Erde.

Aber Wissenschaftler wie Andreas Fichtner haben gelernt, mit Hilfsmitteln zu arbeiten. Vergangene Woche nutzte er ein besonderes Ereignis, das Beben der Erde unter Mexiko. Das Hauptaugenmerk der Nachrichtensendungen lag auf den Zerstörungen, die das Geschehen auf der Oberfläche verursacht hat. Rauchwolken, über 300 Tote, Häuser in Trümmern. Der deutsche Geophysiker Fichtner aber, Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich, nutzte die plattentektonische Erschütterung, um hinauszublicken. Denn das Erdbeben von Mexiko schickte Signale: codierte Bilder vom Innern des Planeten.

Jedes Mal nämlich, wenn die Wellen an die Oberfläche kommen, treffen sie auf Sensoren von Erdbebenforschern irgendwo auf der Welt. Aus den Daten lässt sich herauslesen, was die Wellen zuvor auf ihrem Weg durch den Planeten erlebten. Seismologen lernen, solche Signale aus der irdischen Unterwelt immer besser zu analysieren und mehr Informationen daraus zu gewinnen. Wie das funktioniert, kann Fichtner auf einem Stück Pappe erklären. Er greift zum Stapel, der in der Mitte des Wirtshaustisches liegt, und zückt seinen Kugelschreiber. Die Erde ist ein Bierdeckel.

Fichtner markiert nah am Rand der Pappscheibe ein Kreuz: »Das Erdbeben, genauer: sein Hypozentrum.« Von da zieht er eine Zickzacklinie an der Kante des Deckels entlang. »Die Oberflächenwelle«, sagt er. Sie bewegt sich in der Erdkruste fort, von Kontinent zu Kontinent. Dann zeichnet er eine zweite Linie. Sie stellt die sogenannte Raumwelle dar, ausgelöst vom selben Erdbeben. Und diese bewegt sich nicht an der Kante entlang, sondern halbkreisförmig über die Pappscheibe. »Die geht als Kompressionswelle in die Tiefe«, sagt Fichtner. In einem Bogen schwingt sie hinab in den Erdmantel und erreicht an anderer Stelle wieder die Erdkruste – den Rand des Bierdeckels. Dort wird sie reflektiert und aufgeteilt auf zwei neue, kleinere Wellen: eine parallel zum Bierdeckelrand durch die Erdkruste, die zweite als nächste Raumwelle in die Tiefe (siehe Grafik). Diese Bewegung setzt sich schwächer werdend ein ums andere Mal fort.

Die Wellen, die durch den Globus schwingen, verraten Fichtner, wie die irdische Kugel im In-

nersten beschaffen ist. Indem er die Unruhe des Planeten nutzt, erhält der ETH-Forscher neue Einblicke in dessen Aufbau.

Auslöser der Erdstöße vergangener Woche in Mexiko war die Nahtstelle zweier tektonischer Platten. Die Region, Teil des Pazifischen Feuerrings, ist als Unruheherd bekannt. Im Jargon der Geologen handelt es sich um eine Subduktionszone. Ein Stück ozeanische Kruste, die Cocosplatte, schiebt sich dort mit einer Geschwindigkeit von sechs Zentimetern pro Jahr unter die kontinentale Nordamerikanische Platte. Verhaken sich die Krustenteile, bauen sich tektonische Spannungen immer weiter auf – bis sie mit einem Rummus gelöst werden.

Die Folgen waren in Mexiko-Stadt außergewöhnlich stark zu spüren. Das hängt mit der Lage der Metropole zusammen. In Teilen steht sie auf dem Gebiet eines ehemaligen Sees. Die angetrockneten Sedimente aus Ton und Vulkanasche verhalten sich bei einem Beben wie Wackelpudding. Die weiche Masse gerät in Schwingung und verstärkt so die Erschütterungen. Sogar relativ schwache oder weit entfernte Beben können daher verheerende Auswirkungen zeitigen. Wissenschaftler sprechen vom Mexico-City-Effekt.

Den Auswirkungen der lokalen Geografie gilt Fichtners Aufmerksamkeit jedoch nur am Rand. Ihn interessiert das Verhalten der Wellen im globalen Maßstab. Erschüttert ein Beben die Erdkruste, kann es sein, dass die Ausläufer der Wellen noch 24 Stunden später messbar sind: Immer wieder prallen sie am äußeren festen Rand der Erde oder an ihrem Kern ab, wabern erneut durch den Mantel und sammeln dabei quasi Informationen. Denn jedes Mal, wenn sich den Wellen eine geologische Unregelmäßigkeit in den Weg stellt, hinterlässt dies Spuren, die von Sensoren wahrgenommen und von Computern analysiert werden können.

Mit Seismologenteams auf der ganzen Welt haben die ETH-Forscher um Fichtner mehrere Jahre an einem gemeinschaftlichen Modell der Erde gebaut. Kürzlich stellten sie »Generation 1« ihres Collaborative Seismic Earth Model (CSEM) fertig. Nie zuvor ließen sich der Aufbau der Erde und die Dynamik in ihrem Innern so exakt beobachten.

Eine seiner jüngsten Entdeckungen hat der 38-jährige Fichtner unter der Insel Ulleung im Japanischen Meer gemacht. Die Region ist für Geologen seit Langem ein Hotspot der Forschung, weil auch dort tektonische Platten aneinandergereiht und heftige Erdstöße auslösen. Fichtners Forschergruppe hat die Daten von 58 Erdbeben analysiert und festgestellt, dass sich die seismischen Wellen unter Ulleung beträchtlich langsamer bewegen als im übrigen Untergrund.

Geophysiker wissen, dass diese Erschütterungen sich in weicherem Gestein mit geringerem

Tempo ausbreiten. Was die Bremswirkung verursacht, errechneten Fichtner und sein Team mithilfe aufwendiger Simulationen. Am Ende tauchte auf ihren Bildschirmen das Abbild einer gewaltigen 300 Kilometer langen, 100 Kilometer tiefen Anomalie auf: teilweise geschmolzenes Gestein.

Solche und viele andere »Heterogenitäten« identifiziert Fichtner aus Wellendaten, die Seismografen irgendwo auf der Welt auffangen. Damit aus den gigantischen Zahlenmengen in überschaubaren Zeiträumen Erkenntnisse werden, hilft den Erdwissenschaftlern das Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) in Lugano. Es besitzt den derzeit

seismologen sind verlässlichere Warnungen vor tödlicher Unruhe im Erdinneren und vor Tsunamis. Auf diesem Feld arbeitet die ETH Zürich mit australischen Forschern zusammen.

Derzeit tüfteln sie an Möglichkeiten, Störungen im Untergrund per Glasfaserkabel früh zu erkennen. Das Prinzip: Man schicke einen Laserimpuls durch das Kabel und registriere seine Beschaffenheit nach seiner Rückkehr. Bewegt sich irgendwo die Umgebung, in der das Kabel liegt, so verschiebt sich auch die Position winziger Fehlerstellen in der Glasfaser – und der Laserimpuls hat sich bei seiner Rückkehr verändert. Auf diese Weise ließe sich der Untergrund in

Mexiko-Stadt 15 Sekunden Zeit, um einen sicheren Ort aufzusuchen. Immerhin.

Ließen sich mit einem dichten Netz von Glasfaserkabeln Erschütterungen noch früher erkennen, dann bliebe mehr Zeit, sich zu retten. »Die Technik existiert«, sagt Fichtner. Bereits heute wird die Temperatur in Bohrlochern mit Glasfaser und Laser gemessen. Einen ganzen Ozeanboden kann man damit aber noch nicht beobachten, weil die Lasersignale nach 50 Kilometern zu schwach werden. Sie müssten verstärkt werden.

Ein anderer Forschertraum sind Warnsysteme, die eine weitere Informationsquelle aus dem Untergrund nutzen: das seismische Rauschen. Früher fühlten sich die Seismologen davon gestört. Denn das globale Rauschen übertönt nach einer gewissen Zeit die sich abschwächenden Signale eines Erdbebeneignisses. Mittlerweile aber lässt sich das Rauschen nutzen. Erzeugt wird es hauptsächlich durch riesige Ozeanwellen und Turbulenzen in der Atmosphäre. Sie bringen den Ozeanboden zum Schwingen.

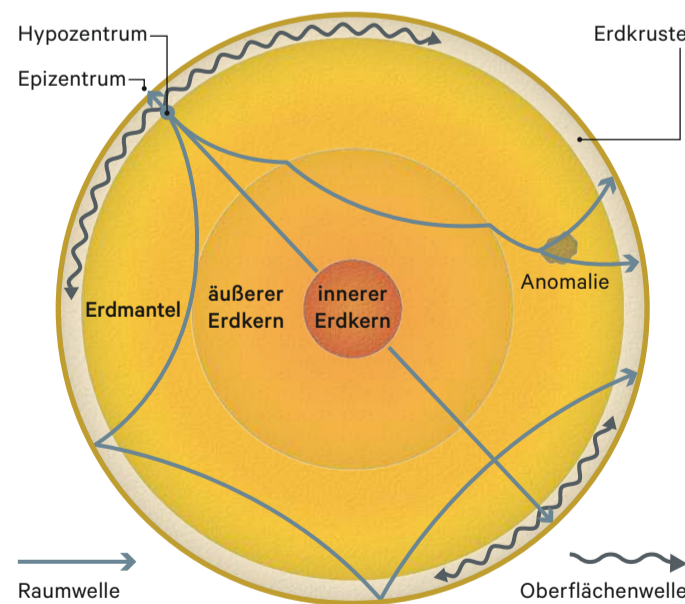
Hören können wir das irdische Grummeln nicht – es ist für unsere Ohren zu tief. Aber nach einer Pilotstudie konnten die ETH-Forscher darin erstmals ein globales Muster erkennen: In unserem Winter gibt es in der nördlichen Hemisphäre starke Stürme und somit starke Quellen, die das Rauschen quasi »füttern«. Gleichzeitig ist auf der südlichen Hemisphäre Sommer. Dort herrscht Ruhe. Im südlichen Winter ist es umgekehrt. So können die Seismologen heute aus der permanenten Unruhe im Erdinneren heraushören, in welchem Monat wir uns gerade befinden. Die Idee dahinter: Je besser man das Rauschen kennt, desto leichter lässt es sich nutzen, um das Erdinnere zu erkunden.

Vor Jahresfrist gelang es japanischen Forschern gar, einen einzelnen Sturm im Nachhinein nachzuweisen. Sie hatten im Dezember 2014 ein rätselhaftes Zittern im irdischen Sound wahrgenommen und dessen Urheber dingfest gemacht: einen Sturm namens Alexandra. Auch US-Forscher erkannten im seismischen Rauschen Unruhe-Spuren aus dem San-Andreas-Graben.

Noch sind die Bilder aus der Unterwelt lückenhaft und unscharf. Andreas Fichtner ist aber optimistisch, die Observierung des Planeten Schritt für Schritt zu verbessern. Das Land, in dem er arbeitet, überwacht er bereits heute rund um die Uhr. Immer kurz nach Mitternacht, um 0,05 Uhr, erhält er ein »Tagesmodell des seismischen Rauschens« im helvetischen Souterrain. Ein Zwölftausendstel der Erdoberfläche hat er damit permanent im Blick. »Präseismische Veränderungen« kann er dabei noch nicht erkennen. Aber wenn man nur lange genug hinschaut, macht sich die Zukunft bestimmt irgendwann bemerkbar.

Wellen im Untergrund

Wenn irgendwo die Erde bebt, gerät der ganze Planet in Schwingung



Der Herd des Bebens ist das Hypozentrum, senkrecht darüber liegt das Epizentrum. Raumwellen breiten sich in die Tiefe aus. Sie werden von Hindernissen (Erdkern, Anomalien) abgelenkt und von der Erdkruste zurückgeworfen. Bis zu 24 Stunden lang können Forscher sie messen – und daran erkennen, wie das Innere der Erde beschaffen ist

leistungs- fähigsten Rechner Europas. Wofür Fichtners Laptop 900 Jahre bräuchte, das erledigt das Tessiner Superhirn mit Zehntausenden Prozessoren in einem Tag. »Das große Türkei- beben von 1999 rechnen wir in Lugano in einer Sekunde durch«, sagt Fichtner.

Wer Erdbeben versteht, kann Siedlungen sicherer bauen. Geothermieunternehmen nutzen die Fortschritte auf ihrer Suche nach alternativen Energieformen. Mineralölfirmen kontrollieren mit dem Wissen die Stabilität ausgebeuteter Lagerstätten und fahnden nach neuen Vorräten. Einer der wichtigsten Erträge der Arbeit von Computer-

Echtzeit überwachen, Warnungen könnten schneller erfolgen.

Bislang funktionieren die meisten Warnsysteme so wie jene in Mexiko. Sie registrieren die sogenannten Primär- oder P-Wellen im Boden, die mit einer Geschwindigkeit von fünf bis sieben Kilometern pro Sekunde herankommen. Diese sind weniger gefährlich. Aber sie können davor warnen, dass die halb so schnellen Sekundär- oder S-Wellen folgen und schließlich die zerstörerischen Oberflächenwellen mit den großen Amplituden. Aufgrund des zeitlichen Unterschieds zwischen den Ankunftszeiten der verschiedenen Wellenarten, blieben den gewarnten Menschen in