

Was uns Erdbeben über die Erde erzählen

Heiner Igel

Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität,
Theresienstrasse 41, 80333 München (Heiner.Igel@lmu.de).

Erdbeben und die Struktur des tiefen Erdinnern

Die Frage, wie es im Erdinnern - unter unserem scheinbar festen Boden - aussieht, hat die Fantasien der Völker schon immer beschäftigt. Phänomene wie Vulkanausbrüche und Erdbeben hat man lange als Ausdruck göttlicher Mächte verstanden. Erst die verheerenden Erdbeben in der Neuzeit (Lissabon, 1755 oder Messina, 1783) haben die Wissenschaftler auf den Plan gerufen, diese Phänomene im Zusammenhang mit bekannten physikalischen Gesetzen zu verstehen.

Erdbeben sind Quellen seismischer Energie. Es werden Wellen erzeugt, die sich ab einer bestimmten Stärke (Magnituden größer ca. 5) über den ganzen Planeten ausbreiten und ihn – ähnlich wie eine Glocke – über Tage zum Schwingen anregen können. Das erste Mal, dass solche Schwingungen eines Erdbebens, das in weiter Ferne stattgefunden hat, gemessen wurde, war 1889 in Potsdam. In gewisser Weise war dies die Geburtsstunde der *globalen Seismologie*, deren Ziel es ist, aus den Beobachtungen seismischer Wellen die Struktur des Erdinnern zu erforschen.

Es wurde schnell erkannt, dass zur Bestimmung der Struktur des Erdinnern viele Messstationen (Seismometer) auf dem Globus verteilt werden müssen. Es dauerte bis in die 60er Jahre, dass ein solches standardisiertes globales seismisches Messnetz entwickelt wurde. Kurioserweise kam der Anstoß zu einem solchen Netz nicht nur aus der Wissenschaft, sondern war eine Konsequenz des Kalten Krieges, welcher in den 60er Jahren die Weltpolitik beherrschte. Um die atomare Wettrüstung einzuschränken, wurde 1960 ein Teststoppabkommen unterzeichnet, welches die Sprengung atomarer Ladungen untersagte. Ein solcher Teststopp kann nur mit Hilfe der Seismologie kontrolliert werden!

Die enorme Sprengkraft solcher Tests erzeugt seismische Wellen, die durch und um die ganze Erde laufen. Mit Hilfe eines standardisierten Seismometernetzes konnten die Quellen lokalisiert werden. Aber wie konnte man die Signale von denen natürlicher Erdbeben unterscheiden? Explosionen erzeugen in erste Linie so genannte Kompressionswellen (wie Schallwellen) während Erdbeben verstärkt so genannte Scherwellen

(ähnlich den Schwingungen einer Saite) anregen. Diese Unterschiede sind bis heute die Basis dafür, Erdbeben von Kernwaffentests zu unterscheiden.

In gewisser Weise haben wir also dem Kalten Krieg zu verdanken, was wir heute über das Erdinnere wissen. Denn selbstverständlich wurden die Seismometer in der Regel von den Geophysik Instituten der Welt operiert. Der größte Teil der Beobachtungen waren natürliche Erdbeben und es entstand eine enorm wertvolle Datenbasis, die zur Bestimmung der Struktur des Erdinneren verwendet werden konnte. Die Methodik, mit der man die seismischen Beobachtungen auswertet, um etwas über das Erdinnere zu erfahren, nennt man *seismische Tomographie*.

Bild: erstes Seismogramm

Bild: Globales Seismogramm

Seismische Tomographie

Dieser Begriff erinnert natürlich an die medizinische Tomographie, und in der Tat besteht eine enge formale Verwandtschaft. In der Medizin werden um den zu untersuchenden Körper zahlreiche Quellen und Empfänger placiert. Elektromagnetische Wellen werden durch den Körper auf vielen verschiedenen Wegen geschickt, woraus sich nach einem aufwändigen mathematischen Verfahren (einem Inversionsverfahren) ein dreidimensionales Bild des Innern berechnen lässt.

Unser Patient Erde lässt sich leider nicht in einen Tomographen pressen! Für die Seismologen sind die Quellen die Erdbeben und die Empfänger die Seismographen. Hier ergeben sich sofort – im Vergleich zur Medizin – einige Schwierigkeiten: Erdbeben finden zum einen nicht regelmäßig statt und zum anderen nur in sehr begrenzten Regionen der Erde (nämlich vor allem an den Rändern der Kontinentalplatten). Darüber hinaus sind mehr als 70% der Erdoberfläche vom Meer bedeckt. Dies bedeutet, dass die Überdeckung der Erdoberfläche mit Seismometern stark durch die Verteilung der Kontinente bestimmt wird. Regionen wie der Pazifik sind hier unterversorgt. Es gibt internationale Projekte, die darauf hinwirken, (sehr teure) geophysikalische Observatorien auf dem Meeresboden einzurichten, um dieses Defizit zu beheben.

Die seismische Tomographie erlaubt nun, durch Auswertung der Seismogramme, die weltweit nach jedem größeren Erdbeben aufgezeichnet werden, die 3D Struktur des tiefen Erdinneren zu bestimmen. Wir bestimmen dabei für die einzelnen Regionen des Erdinneren die Geschwindigkeiten, mit denen sich die seismischen Wellen

ausbreiten (zwischen 3km/s und 14km/s). Seit der 60er Jahre wissen wir, dass großräumige Bewegungen im Erdmantel (Konvektion) für die Bewegung der Kontinentalplatten (Plattentektonik) verantwortlich sind. Ähnlich der Konvektion, die wir vom Kochtopf kennen, gibt es heiße (seismisch langsame) Regionen, die aufsteigen, und kalte (seismisch schnelle) Regionen, die absinken. Die seismische Tomographie hat seit Mitte der 80er Jahre mit immer größerer Genauigkeit solche aufsteigenden und absteigenden Regionen im Erdinnern ermitteln können. Hier ist zu bemerken, dass diese Bewegungen so langsam sind (bis ca. 15cm pro Jahr), dass wir eigentlich nur eine Momentaufnahme dieser Konvektion sehen können. Allerdings haben diese Tomogramme des Erdinnern gezeigt, dass die ozeanische Kruste, welche in so genannten Subduktionszonen im Erdinnern verschwindet, bis hinunter an die Grenze zwischen Erdmantel und Erdkern (in ca. 3000km Tiefe) versinken kann. Die Tomogramme haben auch gezeigt, dass unter den zahlreichen *hot spots* der Erde (z.B. Hawaii, Galapagos Inseln) sich tiefe Wurzeln mit erniedrigten seismischen Geschwindigkeiten (also mit erhöhter Temperatur) befinden. Diese erhöhte Temperatur führt zu teilweisem Aufschmelzen des Gesteins, was sich durch Vulkanismus an der Oberfläche bemerkbar macht.

Allerdings gibt es in diesem Bereich der Geowissenschaften – der Geodynamik – noch zahlreiche offene Fragen, die für das Verständnis der Entwicklung unseres Planeten – auch im Zusammenhang mit der Klimageschichte – von zentraler Bedeutung sind: Welches sind die kontrollierenden Faktoren für die Bewegungen im Innern der Erde? Wie tief reichen die Wurzeln der *hot spots*? Warum sinken an einigen Stellen der Erde die Ozeanplatten bis in große Tiefen, an anderen nicht?

Um diese und andere Fragen beantworten zu können, reichen die Verfahren der heutigen Tomographie, die zum Teil auf starken Vereinfachungen beruhen, nicht aus. Antworten auf diese Fragen stecken in den enormen seismischen Datenbanken, die digitale Aufzeichnungen der Erdbeben enthalten. Um Details dieser Seismogramme zu verstehen und unser Bild des Erdinnern zu verbessern, müssen wir allerdings Methoden entwickeln, die es uns erlauben, seismische Wellenausbreitung in einer 3D Erde zu simulieren. Dazu sind die größten Supercomputer, wie dem Bundeshöchstleistungsrechner am Leibniz Rechenzentrum in München gerade recht.

Erdbeben auf Supercomputern

Um unser Ziel – die Berechnung der Wellenausbreitung in einer 3D Erde – erreichen zu können, müssen wir die entsprechenden physikalischen

Gleichungen (hier die Wellengleichung) lösen. Dazu verwenden wir so genannte numerische Verfahren (zum Beispiel finite Differenzen, finite Volumen), die darauf basieren, dass man das zu untersuchende Gebiet in (bis zu 10^9) kleine Volumen zerlegt. Zur Berechnung der Wellenausbreitung nach einem Erdbeben kommt uns hier eine Entwicklung der Rechentechnik entgegen, die seit Ende der 80er Jahre die Leistungsfähigkeit der Computer revolutioniert hat: die parallele Rechnerarchitektur.

Das Prinzip ist recht einfach und ich möchte es an einem Beispiel erläutern: Angenommen Sie haben 1000 Rechenaufgaben zu lösen und Sie verteilen sie auf eine Klasse mit 20 Schülern (Prozessoren). Wenn alle gleich schnell rechnen, sollte das Problem in 20-facher Geschwindigkeit zu lösen sein. Schwierig wird es nur dann, wenn zur weiteren Berechnung Information von anderen Schülern (z.B. wer hat die größte Zahl?) benötigt wird. Dann müssen alle miteinander kommunizieren. Häufig braucht man zu einer Berechnung Information eines ganz bestimmten Schülers (Prozessors). Plötzlich spielt die Sitzordnung eine Rolle! Nun kann man im Voraus die Schüler so anordnen, dass nur der Nachbar gefragt werden muss (*nearest-neighbor-communication*). Viele der in der Physik verwendeten partiellen Differentialgleichungen lassen sich auf analoge Weise effizient *parallelisieren*. Damit wurde die Berechnung realistischer 3D Systeme auf Supercomputern möglich.

In der Abbildung ist eine Momentaufnahme des auf einem Supercomputer simulierten seismischen Wellenfeldes ca. 5 Minuten nach einem Erdbeben in einer Tiefe von 600km im Raum Indonesien dargestellt. Die von der Herdregion abgestrahlten seismischen Wellen laufen durch die Erde und an deren Oberfläche entlang. Im Innern werden sie von den Regionen zurückgestreut, an denen sich die Materialeigenschaften stark ändern. Dies ist zum Beispiel an der unteren Grenze des Erdmantels der Fall. Dort findet eine dramatische Änderung der physikalischen Eigenschaften beim Übergang zu dem darunter liegenden flüssigen äußeren Kern statt. Dieser Übergang (fest - flüssig) kann im Ausmaß mit dem an der Erdoberfläche (fest - gasförmig) verglichen werden. Von dieser Region (Kern-Mantel-Grenze) werden starke Reflektionen zurückgestreut, die man in der Abbildung der Computersimulation sehen kann. All diese zurückgestreuten Signale enthalten Information über die physikalischen Eigenschaften des Erdinnern. Sie zu entziffern und die für die Geodynamik und erdgeschichtliche Entwicklung relevanten Schlüsse zu ziehen ist Hauptaufgabe der globalen Seismologie.

Bild: Supercomputer

Bild: Snapshot Wellenausbreitung und Gitter

Nicht nur die globale Seismologie profitiert von den Möglichkeiten, die moderne Supercomputer bieten. Die realistische Simulation von Erdbebenzenarien entwickelt sich zur Zeit zu einem wichtigen Bestandteil der Abschätzung seismischer Gefährdung.

Ist Erdbebenvorhersage möglich?

Jein! Diese Frage wird von der Öffentlichkeit meist nur im Sinne einer kurzfristigen (Stunden bis Tage) Vorhersage verstanden. Die Geowissenschaftler vereinen unter dem Begriff Erdbebenvorhersage Zeitskalen von Stunden bis zu mehreren Jahrzehnten, weshalb es im Dialog mit den Medien oft zu Missverständnissen kommt. Dazu ein Beispiel: Am 17. August 1999 fand in der Türkei ein verheerendes Erdbeben mit Epizentrum nahe der Stadt Izmit mit einer Magnitude von 7.4 statt, welches nahezu 20000 Menschen das Leben kostete. Aus geowissenschaftlicher Sicht war dieses Erdbeben langfristig vorherzusehen: In den ca. 100 Jahren vor diesem Erdbeben gab es im Schnitt alle 20 Jahre ähnlich starke Erdbeben, deren Epizentren sich konsistent in westlicher Richtung bewegten. Diese Beobachtung wurde im Vorfeld des Izmit Bebens in mehreren Veröffentlichungen herangezogen, um auf die Gefahr großer Beben in der Westtürkei hinzuweisen. Das Beben 1999 lässt sich als ein weiteres Beispiel dieser Westmigration der Epizentren verstehen. Eine ähnliche Migration von Epizentren wurde auch an anderen großen Störungen wie der San-Andreas Verwerfung beobachtet. Während für einige seismisch aktive Regionen der Welt solche langfristigen Prognosen existieren, stellt sich die Frage, wie vor allem Personenschäden bei großen Beben vermindert werden können.

Warum lassen sich Erdbeben nicht kurzfristig vorhersagen? Noch in den neunziger Jahren war die Hoffnung groß, so genannte Vorläufer identifizieren zu können, die eine kurzfristige Vorhersage erlauben. Vorläufer sind physikalische Parameter bzw. deren Kombination (z.B. Grundwasserspiegel, Neigung, kleine Vorbeben) die sich *kurz* vor einem Beben verändern. Im Nachhinein können immer wieder solche Phänomene entdeckt werden, die sich vor einem großen Erdbeben verändert haben. Allerdings hat sich bis jetzt kein einziges dieser Vorläuferphänomene im allgemeinen auf andere Erdbeben übertragen lassen – Grundvoraussetzung dafür dass es zur Vorhersage einsetzbar wäre. Große Erdbeben sind Individualisten! Erdbeben mit Magnitude 7 oder größer verändern den Spannungszustand einer Region dermaßen, dass ein in Epizentrum und Bruchvorgang ähnliches Beben auf sehr lange Zeit unwahrscheinlich ist. Daher lassen sich schwer von einem Beben auf das nächste allgemeingültige Aussagen bezüglich Vorhersage machen.

Die Schwierigkeiten bei der Erdbebenvorhersage hängen mit den großen Raum- und Zeitskalen zusammen, die bei Erdbebenprozessen eine Rolle spielen. Durch die Bewegung der Kontinentalplatten von bis zu mehreren cm pro Jahr entstehen an den Verwerfungsflächen der Plattenränder zum Teil über Jahrzehnte (manchmal Jahrhunderte) Spannungen, die sich dann durch Erdbeben entladen. Der Zeitpunkt eines Bebens, sowie dessen Größe hängt mit der Detailstruktur der Verwerfung (zum Beispiel den elastischen Eigenschaften, der Porosität, des Flüssigkeitsgehalts, der Geometrie der Bruchfläche in der Tiefe u.s.w) zusammen. Wenn man sich die Größe einer Bruchfläche für ein starkes Erdbeben vor Augen führt (z.B. 100km x 20km für ein Beben mit Magnitude 7) lässt sich erahnen, dass nicht möglich erscheint, an die Detailinformation zu gelangen, welche Voraussetzung dafür wäre, den stark nichtlinearen Bruchvorgang vorherzusagen.

Aus diesen Gründen gewinnt eine neue Technik in der Seismologie eine immer größere Bedeutung: die Berechnung von Erdbebenszenarien auf Supercomputern. Die Regionen, in denen mit großen Erdbeben zu rechnen ist, sind in der Regel gut bekannt. Erdbeben finden im allgemeinen an existierenden Bruchflächen (z.B. San-Andreas Verwerfung, Nord-Anatolische Verwerfung) statt, die sich nicht selten an der Erdoberfläche durch topographische Anomalien bemerkbar machen. Die Kartierung dieser Verwerfungen ist daher ein wichtiges Feld der Geologie. Durch die zahlreichen seismischen Netze lässt sich die seismische Aktivität dieser Verwerfungen kontinuierlich beobachten.

Die Bodenbewegungen nach einem Erdbeben hängen von zahlreichen Faktoren ab: der Stärke und Tiefe des Bebens; der Struktur, welche die Wellen auf ihrem Weg durchlaufen; dem speziellen Bruchvorgang. Diese Faktoren kann man bei der Simulation von Erdbeben im Computer berücksichtigen. Ein ganz besonders wichtiger Faktor ist das seismische Geschwindigkeitsmodell. Gibt es zum Beispiel durch Sedimentschichten nahe der Oberfläche niedrige seismische Geschwindigkeiten, stellt dies bei großen Erdbeben eine größere Gefahr dar: diese Niedriggeschwindigkeitszonen können zu erheblicher Verstärkung der Bodenbewegungen auch bei großer Distanz vom Epizentrum führen. Tatsächlich sind zahlreiche erdbebengefährdete Regionen (z.B. Los Angeles, San Francisco, Mexico City) auf solchen Sedimentschichten gebaut. Im Department für Geo- und Umweltwissenschaften sind in den letzten Jahren aufwändige Rechenprogramme entwickelt worden, die es erlauben, Erdbebenszenarien für seismisch gefährdete Regionen zu berechnen.

Wir brauchen dazu nicht in die Ferne schweifen: auch in Deutschland gibt es mehrere Regionen, in denen Erdbeben mit Magnituden um 6 möglich

sind. Ein Beispiel ist das Kölner Becken, das sich auch durch Sedimentschichten mit einer Tiefe von bis zu 2km auszeichnet. 1992 gab es in dieser Region ein Erdbeben mit Magnitude 5.9 mit Epizentrum nahe der Stadt Roermond. Dieses Beben haben wir mit einem geeigneten seismischen Geschwindigkeitsmodell für diese Region auf dem Computer simuliert (siehe Abbildung). Trotz eines relativ einfachen Modells stimmen die berechneten Bodenbewegungen gut mit Beobachtungen überein. Solche Simulationen erlauben uns, für die gesamte Region Maximalamplituden der Bodenbewegungen (Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung) zu berechnen. Daraus lassen sich mit Hilfe empirischer Beziehungen die seismischen Intensitäten abschätzen, einem Maß für Schäden an der Oberfläche. Eine der zentralen Fragen, die es für die seismisch aktiven Regionen zu beantworten gilt, ist, wie detailliert die Struktur der Region bekannt sein muss, um zuverlässige Berechnungen machen zu können.

Bild: Snapshot Erdbebensimulation Kölner Becken

Erdbeben in Bayern?

Ja, auch in Bayern gibt es Regionen, in denen Erdbeben stattfinden. Dazu gehören außer dem Alpenrand auch das Altmühltal und der Bereich Marktredwitz. Auch wenn in Bayern nicht mit großen Schadensbeben zu rechnen ist, reichen die Magnituden (bis zu 4) aus, um Schwingungen anzuregen, die von der Bevölkerung gespürt werden. Um diese Seismizität permanent beobachten, und die Bevölkerung gegebenenfalls informieren zu können, wird zur Zeit ein modernes Erdbebennetz mit 20 neuen Seismometern eingerichtet. Dieses Projekt wird vom Staatsministerium für Landes- und Umweltfragen finanziert. Das dem Department für Geo- und Umweltwissenschaften der LMU angehörende Geophysikalische Observatorium Fürstenfeldbruck führt dieses Projekt in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Geologischen Landesamt durch.

Eine Besonderheit der *bayerischen* Erdbeben ist die Tatsache, dass es sich – zum Beispiel im Bereich Bad Reichenhall – um so genannte Schwarmbeben handelt. Diese sind durch ein langsames An- und Abschwellen der Zahl und Stärke von Erdbeben gekennzeichnet. Beobachtungen dieser Schwarmbebenaktivität deuten auf einen Zusammenhang mit atmosphärischen Einflüssen (z.B. Niederschlag, Luftdruckschwankungen, Pegelstände) hin. Um diese Zusammenhänge genauer untersuchen zu können, wurde im Schwarmbebengebiet Bad Reichenhall, im Gebiet des Hochstaufens, ein dichtes Seismometernetz sowie Wetterstationen installiert. Die Daten werden über ISDN-Leitungen alle 30 Minuten in das Datenzentrum des Geophysikalischen

Observatoriums übermittelt und sofort automatisch im Internet veröffentlicht (www.erdbeben-in-bayern.de). Ziel dieser Beobachtungen ist es, den Spannungsaufbau, sowie die Verbindungen zwischen Fluiden und Bruchprozessen zu verstehen. Dadurch dass die Beben in einem sehr begrenzten Volumen und in niedriger Tiefe stattfinden, handelt es sich hier um ein ideales Freiluftlabor.

Bild: Hochstaufer

Das IQN – Georisiken: Forschung und Lehre im internationalen Verbund

Die Seismologie ist – bedingt durch ihr Forschungsobjekt – seit langer Zeit ein sehr internationaler Wissenschaftszweig. Im Jahr 2001 wurde – zur Unterstützung dieser Kooperation im Rahmen des Programms Internationale Qualitätsnetze (IQN) des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) an unserem Department das IQN-Georisiken eingerichtet. Ziel ist es, Studenten, Doktoranden, post-docs und Professoren der internationalen Partner an Forschung und Lehre der LMU zu beteiligen. Das mit ca. 500.000€ finanzierte Projekt stellt Stipendien für eine Forschergruppe mit Doktoranden sowie für Kurzaufenthalte zur Verfügung.

Die am Netz beteiligten Institute (z.B. Universität Princeton, USA, Universität von Peking, China, Universität von Paris, Frankreich, sowie weitere Institutionen in Indonesien, Japan, Australien, Neuseeland) schicken Studenten der Geowissenschaften für Projekte in Seismologie und Vulkanologie an die LMU. Einer der attraktiven Aspekte des Netzes ist die Möglichkeit, direkt mit Daten der beteiligten Regionen zu arbeiten. Es werden zur Zeit – in Zusammenarbeit mit dem China Seismological Bureau – Erdbeben für den Raum Peking simuliert. So können regionale Aspekte mit den an der LMU entwickelten Computerprogrammen zur Simulation von Erdbeben verknüpft werden.

Durch dieses Netz sollen für zukünftige Studenten - des sich im Aufbau befindlichen gemeinsamen Studiengangs Geowissenschaften (B.Sc. und M.Sc) mit der TU – Austauschmöglichkeiten mit den Partnern eröffnet werden.

Weitere Information, Echtzeitdaten zu Erdbeben, sowie Literaturhinweise finden Sie auf den Seiten www.geophysik.uni-muenchen.de, www.erdbeben-in-bayern.de, sowie www.iqn-georisiken.de . Ich bedanke

mich bei Michael Ewald, Toni Kraft und Tarje Nissen-Meyer für die Bereitstellung ihrer Abbildungen.