

Ein Beben erschüttert die Welt: Sumatra 26.Dezember 2004

Am 26. Dezember 2004, genau ein Jahr nach dem verheerenden Erdbeben in Bam, Iran, welches 30.000 Menschen das Leben kostete, ereignete sich vor Sumatra das zweitstärkste Erdbeben, das je aufgezeichnet wurde. Mit einer Magnitude von 9.3, einer Bruchfläche mit einer Länge von 1300km, der Erzeugung eines verheerenden Tsunamis, ca. 300.000 Todesopfern zählt es zu den größten Naturkatastrophen der Menschheit. Was geschah in der Tiefe? Warum wurde der gewaltige Tsunami erzeugt? Hätte man warnen können? Welche Konsequenzen hat dieses Ereignis für zukünftige Erdbeben? Auf diese Fragen soll hier eingegangen werden.

Wann immer die Erde entlang einer Bruchfläche (Verwerfung) bricht, entstehen seismische Wellen (Kompressionswellen, Schwerwellen und Oberflächenwellen), die mit Geschwindigkeiten von bis zu 13km/s durch das Erdinnere und an der Oberfläche entlang rasen. Die weltweiten seismischen Netze registrieren diese Wellen in „Echtzeit“ und sind in der Regel in der Lage, diese Signal instantan und automatisch auszuwerten und damit die Herdkoordinaten (Epizentrum und Herdtiefe), sowie die Herdzeit und die Magnitude zu bestimmen. Am frühen Morgen des 26.12.2004 (MEZ) erhielten Seismologen, die sich für die automatischen e-mail Warnungen eingeschrieben hatten, eine e-mail, in der die automatisch bestimmten Magnituden zwischen 6.5 und 7.7 schwankten. Wie werden Magnituden bestimmt? Die Magnitudenbestimmung, die in ihrer ursprünglichen Form auf Charles Richter, einem amerikanischen Seismologen, zurück geht, basiert auf der Analyse der Amplituden (Auslenkung) der Bodenbewegungen. Diese wird in der Regel automatisch für die zuerst ankommenden Raumwellen (P- oder S-Wellen) unter der Annahme einer weit entfernten „Punktquelle“ durchgeführt. Diese Annahme erklärt nun, warum die ersten Abschätzungen der Magnituden der Sumatrabeben so daneben lagen: Die gewaltige räumliche Ausdehnung der Bruchfläche führte dazu, dass über mehrere Minuten lang Energie von dem sich nach Norden ausbreitenden Bruch abgestrahlt wurden, die zu einem Signal führten, dass zwar zeitlich sehr lange war, aber durch die große Ausdehnung sich nicht konstruktiv überlagerte. Daher waren die ersten Magnitudenbestimmung fatale Unterschätzungen der tatsächlichen Magnitude des Bebens. Erst die Analyse der Oberflächenwellen führte zu Magnituden, die über dem Wert 8 lagen. Die genau Analyse der Seismogramme unter der Berücksichtigung einer endlich großen Bruchfläche führte dann zu genaueren Abschätzungen, Werten bis zu 9, allerdings erst Stunden nach dem Beben und manueller Auswertung.

Die weltweiten Netze waren in ihren automatischen Auswertalgorithmen auf ein solch starkes Beben, dessen Bodenbewegungen 10 Mal größer waren als die größten Beben, die in den letzten Jahren beobachtet wurden, nicht vorbereitet. Während die Abschätzung der Magnituden für „kleinere“ Beben bis Magnitude 8 recht stabil durchgeführt werden kann, stellt die korrekte Bestimmung der Stärke solch gewaltiger Beben eine große Herausforderung dar. Der Grund ist, dass aufwändige Algorithmen notwendig sind, um endlich große Bruchflächen in Betracht zu ziehen, sowie zahlreiche Beobachtungen von verschiedenen Messpunkten notwendig sind. Mittlerweile sind Anstrengungen im Gange, solche Algorithmen für die nächsten großen Beben in automatischer Form bereitzustellen.

Warum ist die automatisch Magnitudenabschätzung so wichtig? Nun, die Magnitude ist ein Mass für die Stärke des Bebens an der Quelle und hängt direkt mit der (durchschnittlichen) Verschiebung der beiden Bruchflächen zueinander zusammen. Das Mass dieser Verschiebung (gigantische 20m beim Sumatrabeben) ist aber maßgeblich dafür verantwortlich, ob bei einem Beben, dessen Epizentrum unter dem Meer liegt, die Gefahr eines Tsunamis besteht oder nicht. Die Magnitude alleine reicht aber nicht aus, um diese Gefahr zuverlässlich abzuschätzen. Die zweite wichtige Information ist der so genannte Herdmechanismus, der letztendlich beschreibt, in welche Richtung die beiden Verwerfungsflächen sich gegeneinander bewegen. Ist dies hauptsächlich in horizontaler Richtung (Beispiel: San-Andreas Verwerfung in Kalifornien) so ist keine Tsunami zu erwarten. Um eine Tsunami anzuregen, sind vertikale Verschiebungen der Bruchflächen

zueinander notwendig. Im Falle des Sumatrabebens hat sich der Meeresboden auf einer gewaltigen Fläche bis zu 5m gehoben und damit ein riesiges Wasservolumen in wenigen Sekunden deplaziert. Dies ist die „Quellregion“ der Tsunami von wo aus in alle Richtungen die verheerenden Wellen ihren Lauf nehmen. Diese Wellen sind formal den seismischen Oberflächenwellen ähnlich und breiten sich – in Abhängigkeit der Meerestiefe – mit bis zu 700km/h aus.

Wäre mit den oben beschriebenen Problemen im Falle des Sumatrabebens eine Frühwarnung möglich gewesen? Das Problem mit dem Sumatrabeben ist die Tatsache, dass sich das Epizentrum nur wenige Kilometer vor der Küste Sumatras befand. Damit waren die Chance für eine rechtzeitige Frühwarnung – selbst im Falle einer korrekten Abschätzung der Tsunamigefahr – für die Region Banda Aceh gering bzw. unmöglich. Allerdings wurden in dieser Region vom Erdbeben ausgestrahlten seismischen Wellen gespürt und hätten bei entsprechender Information der Bevölkerung dazu führen können, dass man sich landeinwärts begibt. Dem muss man entgegenhalten, dass das ebenfalls gewaltige „Nachbeben“ in der selben Region mit einer Magnitude von 8.7. im März 2005 keine Tsunami anregte. Wie konnte dies sein, obwohl sich die Bruchflächen auch hier vor allem in vertikaler Richtung zueinander verschoben? Genau wie Tsunamiwellen, die vom tiefen Wasser auf eine flache Küstenregion treffen, verstärkt werden, gibt es das umgekehrte Phänomen: vertikale Bodenbewegungen nach einem Beben in flachen Küstenregionen führen zwar zu einer Tsunami, dessen Wellen werden aber dann beim Übergang in tiefere Gewässer abgeschwächt. Daher wurde nach dem Beben im März nur eine kleinere Tsunami beobachtet.

Seismologen hatten das große „Nachbeben“, welches sich im März ereignete, „vorhergesagt“. Was ist da dran? Die *deterministische* Vorhersage eines Erdbebens, d.h. die genaue Vorhersage des Ortes, der Zeit, und der Stärke eines Erdbeben bleibt – möglicherweise für immer - ein Traum der Geo-wissenschaftler. Grund dafür sind vor allem, die komplexen physikalischen Prozesse in der Tiefenzone, in der Brüche entstehen, und das völlige Fehlen direkter Information über die physikalischen Eigenschaften des Materials in der Tiefe. Allerdings sind große Fortschritte erkennbar in der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit zukünftiger Beben in einer bestimmten Region. Erdbeben führen nur teilweise zu einer „Entspannung“ der Kruste in den Regionen der größten Verschiebungen. An den Rändern eines großen Bruches sind die Spannungen nach einem Bruch in der Regel höher als zuvor. Dies führt zum einen zu dem bekannten Phänomen der Nachbeben, die in Stärke und Zahl in der Regel mit der Zeit abnehmen. Zum anderen besteht allerdings auch die Möglichkeit, dass in der Region um das Hauptbeben weitere große Erdbeben „gezündet“ werden. Genau dies ist in Sumatra passiert. Wenn über Jahrzehnte hinaus in einer seismisch aktiven Region ein Teil einer Bruchfläche durch geringe Aktivität auffällt, kann dies ein Hinweis sein, dass sich dort große Spannungen aufladen, die dann in einem großen Beben entladen werden. Das erste Sumatrabeben hat eine solche Region getroffen, und das zweite Sumatrabeben wurde durch die Spannungserhöhung der Kruste als Folge des ersten Bebens quasi gezündet. Die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit zukünftiger Beben in bestimmten Regionen als Funktion der Geschichte der Seismizität in der größeren Umgebung ist heute eine der spannendsten Entwicklungen in der Erdbebenforschung. Dies könnten bedeuten, dass wir in der Zukunft - ähnlich einer Wettervorhersage, bei der eine Regenwahrscheinlichkeit angegeben wird – die Wahrscheinlichkeit für Erdbeben in einer bestimmten Region ermittelt wird. Diese wird sich mit jedem kleineren und größeren Erdbeben in der Region ändern, da jedes Erdbeben das Potential hat „Vorbeben“ für ein weiteres größeres Beben zu sein. In Kalifornien wird ein solches System zur Zeit getestet.

Das Sumatrabeben ist das erste „große“ Beben, das im zeitalter digitaler Messtechnik weltweit aufgezeichnet wurde. Es stellt damit – von geo-wissenschaftlicher Seite – einen Datensatz dar, dessen Wert nicht überschätzt werden kann. Heute sind – weltweit vernetzt – ca. 1500 seismische Messstationen im Einsatz. Hinzu kommen Tausende Messstationen der lokalen seismischen Netze (z.B. unser bayerisches Erdbebennetz mit 21 Stationen) welche

permanent die Bodenbewegungen aufzeichnen. Die globalen Auswirkungen des Sumatrabebens waren – vom wissenschaftlichen Standpunkt – gewaltig. Die Messstationen in Bayern beobachteten eine horizontale Bodenbewegung beim Durchgang des seismischen Wellenfeldes von sage und schreibe 3cm. Diese Maximalamplitude wurde beim Durchgang der horizontal polarisierten Oberflächenwellen (Love-Wellen) erzeugt. Die Periode dieser – zumindest für kurze Zeit – sinusartigen Bodenbewegungen lag bei 80 Sekunden. Daher wurde diese langsame Bewegung von der Bevölkerung nicht gespürt und richtete natürlich hier in Bayern auch keinen Schaden an. Die Oberflächenwellen, die von großen Erdbeben abgestrahlt werden, laufen allerdings viele Male um die Erde und regen anderen ganzen Planeten zu Schwingungen an, die über Wochen anhalten. Diese so genannten Eigenschwingungen, sind formal den Schwingungen einer Glocke identisch. Die Analogie lässt sich noch weiter spielen. Jede Glocke hat einen tiefsten Ton, der sich durch die Geometrie der Glocke sowie durch deren Materialeigenschaften charakterisiert. Ein solcher Ton wird durch eine Frequenz f (in Hertz) charakterisiert, der sich aus der Umkehrung der Periode T (in Sekunden oder Minuten) der Schwingungen ergibt. Die Erde hat – bedingt durch ihre Kugelform und ihre Materialeigenschaften - einen tiefsten Ton mit einer Periode von 53,9 Minuten, also einer knappen Stunde. Darauf bauen sich – wie bei jedem Musikinstrument – die Obertöne auf, deren Amplitudenverhältnis zueinander den „Klang“ eines Instruments charakterisieren.

Damit gilt auch die Umkehrung: wenn ich die angeregten (Ober-töne) der Erde kenne, dann müsste es möglich sein, die Materialeigenschaften des Erdinnern zu bestimmen. Diese Art der „seismischen Tomographie“ wird schon seit zwei Jahrzehnten durchgeführt und hat zu dem Bild des Erdinnern geführt, das wir heute haben. Allerdings gibt es noch viele offene Fragen. Das Sumatrabeben hat mit seiner gewaltigen Energiefreisetzung zu einem einzigartigen Datensatz geführt, an dem Wissenschaftler über Jahre arbeiten werden.

Nach einer Naturkatastrophe wie im Dezember bleibt die Frage, welchen Beitrag wir Geowissenschaftler leisten können, um die Schäden solcher Naturereignisse in Zukunft vermindern zu können. Sicher wird es möglich sein, zuverlässigere Algorithmen zu entwickeln, um Magnituden in Echtzeit besser bestimmen zu können. Wir werden bessere Karten der Ozeanboden erstellen, um Tsunami-simulationen präziser zu machen. Wir können Frühwarnsysteme installieren (wie in vielen Pazifikstaaten bereits geschehen) die zumindest in bestimmten Regionen Schäden verhindern könnten. Die sicherste Frühwarnung ist allerdings sicher das Vermitteln eines Basiswissens über solche Naturphänomene, die im Lehrplan von Schulen (hier in Deutschland und anderswo) mit der Lupe gesucht werden müssen. Vielleicht hätte man damit – zumindest in den Regionen weit weg von Sumatra - verhindern können, dass Menschen faszinierend vor einem sich in Minuten zurückziehenden Meer stehen, ohne sich der herannahenden tödlichen Gefahr bewusst zu sein.