

Seismologische Untersuchung des nordkoreanischen Kernwaffentests 2006

Andreas Barth, World-Stress-Map-Projekt
andreas.barth@gpi.uni-karlsruhe.de



Einleitung

Am 9. Oktober 2006 fand im Nordosten Nordkoreas ein seismisches Ereignis statt, das etwa eine Woche zuvor von der nordkoreanischen Regierung als Kernwaffentest angekündigt worden war. Mit einer Magnitude von m_b 3,9 war die abgestrahlte seismische Energie für einen Kernwaffentest verhältnismäßig schwach, so dass eine zweifelsfreie Verifizierung anhand konventioneller Methoden nicht möglich war. Wegen der erhöhten Radionukleidkonzentration des Kernspaltungsprodukts Xenon-133 an einer kanadischen Messstation, konnte dieses Ereignis allerdings doch mit hoher Wahrscheinlichkeit als Kernwaffentest identifiziert werden¹. Aufgrund der geringen Magnitude ist es lohnenswert eine seismologische Untersuchung des explosiven Charakters durchzuführen, die nicht als Standardprozedur zur Verifizierung verwendet wird. Hierfür wird die frequenzabhängige Momententensor-Inversion (FMTI) eingesetzt, die in der Forschungsstelle *World-Stress-Map* (WSM) in Karlsruhe entwickelt wurde.

Die WSM ist eine globale Zusammenstellung von Daten zur tektonischen Spannung in der Erdkruste. Diese Informationen werden aus verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen gewonnen, wie z.B. aus geologischen Feldmessungen, Überbohrverfahren, sowie der Analyse von Bohrlochrandausbrüchen und bohrungsinduzierten Zugrissen. Die Hauptquelle ist allerdings die Ableitung von tektonischen Spannungen aus Bruchmechanismen von Erdbeben². Diese Herdmechanismen beschreiben die Vorgänge bei der Entstehung eines Erdbebens im Hypozentrum. Da die Berechnung dieser Mechanismen bisher nur bei

1 Saey et al.: *North Korea: a real test for the CTBT verification system? Part II: noble gas observations*, in: *CTBTO Spectrum* 10 (2007), S. 20-21.

2 Wenzel et al.: *Die Weltkarte der tektonischen Spannungen - Methoden-Ergebnisse-Anwendung*, in: *Fridericana* 63 (2004), S. 19-34.

stärkeren Beben standardisiert durchgeführt wird, wurde im Rahmen des *WSM-Projekts* die *FMTI* entwickelt³, die auch die Analyse schwacher Erdbeben zulässt. Dadurch können tektonische Spannungen in Regionen abgeleitet werden, in denen bisher keine Daten verfügbar waren.

Erdbebenherdmechanismen

Ein tektonisches Erdbeben ist ein Bruchvorgang im spröden Gestein der Kruste, der in der Regel als Versatz auf einer ebenen Fläche stattfindet. Mit der Auswertung von Seismometeraufzeichnungen mehrerer Messstationen kann die Orientierung dieser Herdfläche im Untergrund und die Richtung des Versatzes bestimmt werden. Durch diese geometrischen Angaben ist der Herdmechanismus definiert.

Aufgrund des flächenhaften Bruchvorgangs eines Erdbebens werden seismische Wellen in verschiedene Richtungen verschieden stark abgestrahlt. Die stärksten Amplituden der P-Wellen werden z.B. in einem Winkel von 45 Grad relativ zur Bruchfläche in Richtung des Versatzes erzeugt; in der Ebene der Bruchfläche selbst sind die Amplituden sehr klein. Handelt es sich bei dem seismischen Ereignis allerdings um eine Explosion, dann ist die Abstrahlung isotrop, d.h. die Amplitude der seismischen Wellen ist in allen Richtungen gleich groß. Dieser Sachverhalt wird bei der Momententensor-Inversion ausgenutzt, um ein tektonisches Beben von einer Explosion zu unterscheiden. Somit kann die *FMTI* auch zur Bestimmung des explosiven Charakters des nordkoreanischen Ereignisses dienen, um es von einem natürlichen Beben zu diskriminieren.

Seismische Daten

Wegen des schwachen Signal-Rauschen-Verhältnisses der seismischen Aufzeichnungen ist eine quantitative Bestimmung der explosiven Komponente des Ereignisses allein nicht möglich. Deshalb wird ein Vergleich mit einem natürlichen Erdbeben durchgeführt, das am 16. April 2002 mit einer Magnitude von m_b 4,0 in etwa 35 km Entfernung stattgefunden hat. Die räumliche Nähe ist wichtig, damit die Laufwege der seismischen

3 Barth et al.: *Frequency sensitive moment tensor inversion for light to moderate magnitude earthquakes in eastern Africa*, in: *Geophys. Res. Lett.* 34 (2007), L15302.

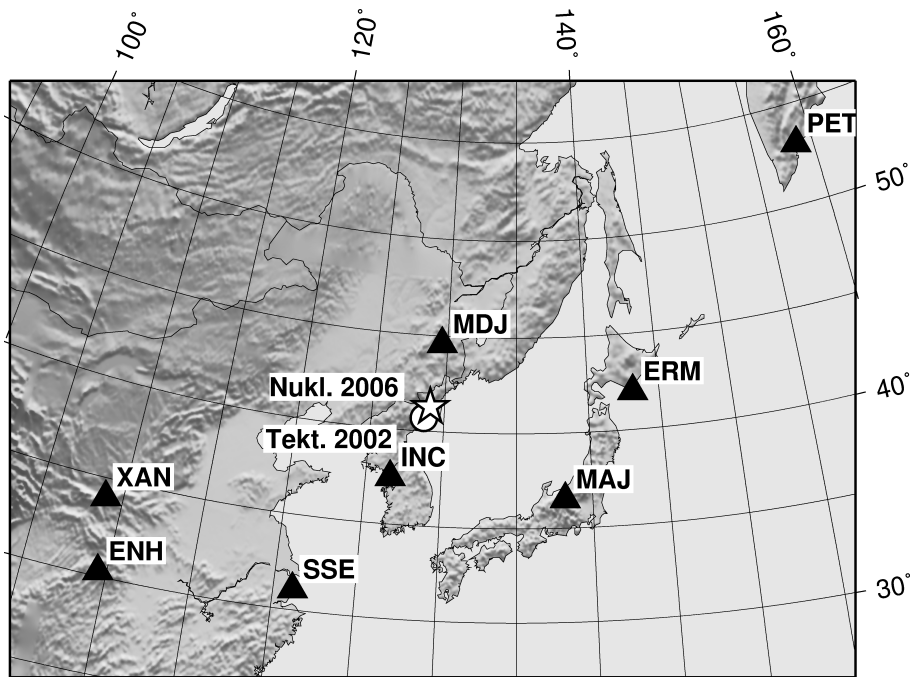


Abbildung 1: Lokalisation des vermeintlichen nordkoreanischen Nukleartests in 2006 (Stern) und des tektonischen Erdbebens 2002 (Kreis). Dreiecke repräsentieren seismische Stationen, deren Daten verwendet werden.

Wellen durch die Erde für beide Ereignisse vergleichbar sind. Abb. 1 zeigt die Epizentren der beiden seismischen Ereignisse und der Seismometer, deren Messdaten zur Auswertung herangezogen werden. Alle Seismometer besitzen drei Komponenten, die in der Vertikalen und den beiden horizontalen Richtungen (Nord-Süd und Ost-West) Bodenbewegungen aufzeichnen. Für die Auswertung der Seismogramme werden die Horizontalkomponenten mathematisch rotiert, so dass eine Komponente in Richtung des Bebens weist (radial) und eine senkrecht dazu (transversal). Dadurch können longitudinale P- und Rayleigh-Wellen von den transversalen S- und Love-Wellen getrennt prozessiert werden.

In Abb. 2 sind Seismogramme der nächstgelegenen Station *MDJ* dargestellt. Deutlich sind Unterschiede zwischen den beiden Wellenformen zu erkennen. Das fragliche Ereignis von 2006 zeigt einen sehr starken P-Wellen-Einsatz, der charakteris-

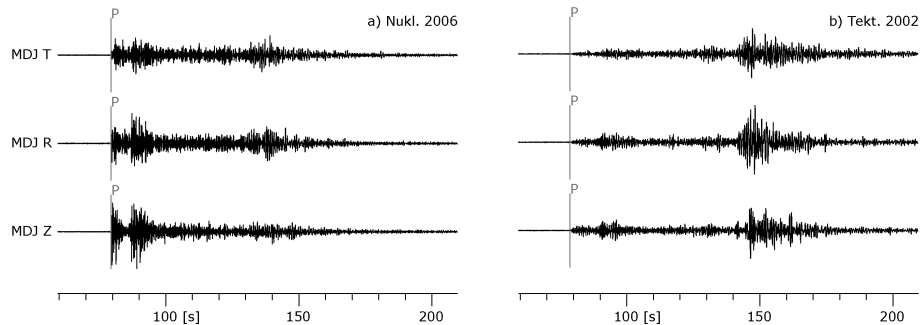


Abbildung 2: Hochfrequente Seismogramme der Station MDJ in ca. 370 km Entfernung zum Epizentrum. a) mutmaßlicher Nukleartest, 9.10.2006, b) tektonisches Erdbeben, 16.4.2002. Dargestellt sind die drei Komponenten: Z (vertikal), R (radial) und T (transversal). Die graue Linie kennzeichnet den Einsatz der P-Wellen.

tisch für eine Explosion ist. Das Beben von 2002 hingegen weist schwächere P-Wellen auf.

Von beiden seismischen Ereignissen werden ausschließlich Daten der selben Seismometer verwendet, die sich im Abstand von 370 km bis 2600 km zu den beiden Epizentren befinden und in Südkorea, China, Japan und Russland liegen⁴.

Erdmodelle

Die Wellenform des Seismogramms, das an einer Messstation aufgezeichnet wird, wird nicht nur durch den Herdmechanismus sondern auch durch die Ausbreitungseigenschaften von seismischen Wellen in der Erde beeinflusst. Um also den Herdmechanismus rekonstruieren zu können, benötigt man ein hinreichend gutes Modell der elastischen Eigenschaften der Erde mit dem man die Wellenausbreitung realistisch simulieren kann. Die notwendige Genauigkeit des Modells orientiert sich dabei an der Größe der Wellenlängen, die von Interesse sind. Für die Untersuchung des Quellmechanismus reicht es aus verhältnismäßig große Wellenlängen zu verwenden (z.B. größer als 100 km), deren Ausbreitung mit einem groben Erdmodell

⁴ Die Seismometer gehören zu den beiden Netzwerken *Global Seismograph Network* und *New China Digital Seismograph Network*. Die Seismometerdaten wurden über das *IRIS Data Management System* (<http://www.iris.edu>) bezogen.

berechnet werden kann, das nur laterale Änderungen auf eben dieser Längenskala enthält.

Abb. 3 zeigt einen Vergleich synthetisch berechneter Seismogramme einer reinen Explosion für zwei verschiedene Erdmodelle. Im ersten Modell wird angenommen, dass sich die seismischen Geschwindigkeiten innerhalb der Erde nur mit der Tiefe (eindimensional) ändern und vernachlässigt damit sämtliche horizontal veränderlichen Strukturen⁵. Das zweite Modell beinhaltet dreidimensionale Eigenschaften der Erde und modelliert seismische Wellen unter Einfluss von Topographie, der Mächtigkeit der Erdkruste und Variationen der seismischen Geschwindigkeiten im Erdmantel⁶. Vergleicht man die dargestellten Wellenformen, so zeigen sich vor allem Unterschiede im hinteren Teil des Wellenzuges. Diese zusätzlichen Signale stammen aus Reflektionen und Streuungen der Wellen an 3D-Strukturen. Es ist auffällig, dass deutliche Amplituden auf der Transversalkomponente registriert werden, während eine Explosion primär keine transversalen Wellen generiert. Diese Anteile sind demnach Wellenkonversionen an Schichtgrenzen des 3D-Modells zuzuschreiben. Die Ersteinträge hingegen bleiben weitgehend unbeeinflusst, weil die hier betrachteten Wellenlängen verhältnismäßig groß im Vergleich zu den 3D-Strukturen sind. Daraus folgt, dass die 3D-Effekte nur eine geringe Auswirkung auf die Wellenformen haben und für die Analyse des Herdmechanismus das einfachere 1D-Erdmodell verwendet werden kann.

Momententensor-Inversion

Die Momententensor-Inversion erlaubt die direkte Berechnung jenes Herdmechanismus, der die seismischen Daten am besten erklärt⁷. Die mathematische Beschreibung des Herdmechanismus erfolgt dabei durch den seismischen Momententensor, der über die Eigenschaften der Wellenausbreitung in der Erde eindeutig mit den Messdaten, d.h. den Seismogrammen, verknüpft ist.

5 Dziewonski & Anderson: *Preliminary reference Earth model*, in: *Phys. Earth Planet. Int.* 25 (1981), S. 297-356.

6 Komatitsch et al.: *The Spectral-Element Method, Beowulf Computing, and Global Seismology*, in: *Science* 298 (2002), S. 1737-1742.

7 Giardini: *Moment tensor inversion from mednet data - large worldwide earthquakes of 1990*, in: *Geophys. Res. Lett.* 19 (1992), S. 713-716.

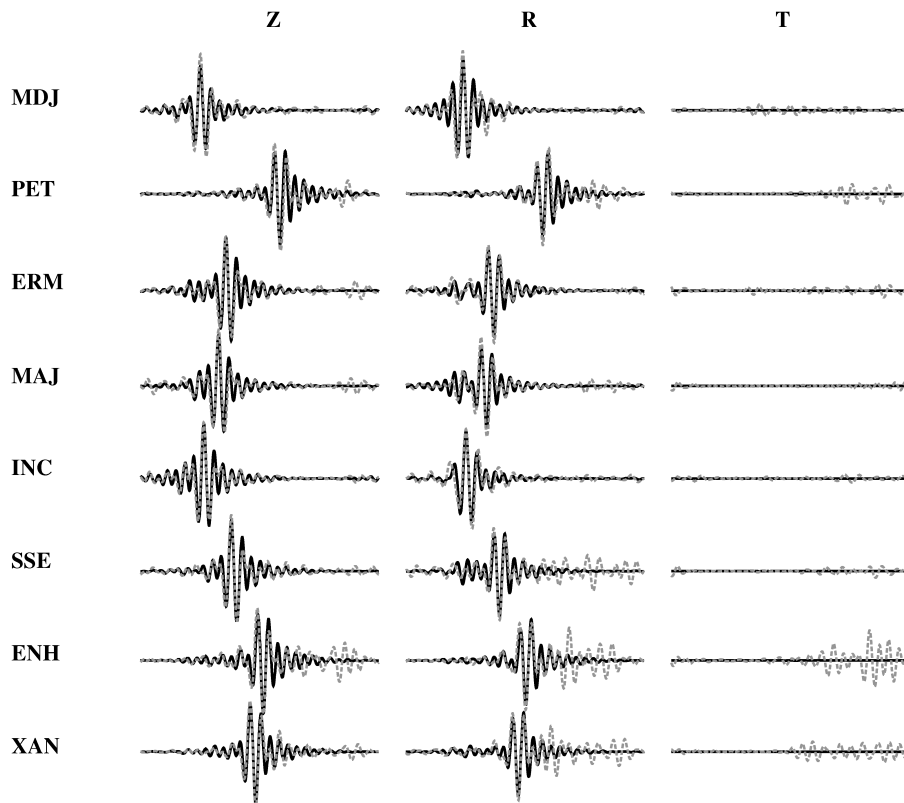


Abbildung 3: Synthetische seismische Wellenformen einer reinen Explosionsquelle für verschiedene Seismometer (vergl. Abb. 1). Erste Spalte: Vertikalkomponente (Z), zweite und dritte Spalte: Horizontale Radial- (R) und Transversalkomponente (T). Schwarze, durchgezogene Linien zeigen Berechnungen für das eindimensionale Erdmodell, graue, gestrichelte Linien für das dreidimensionale Modell. Die Länge der Spuren beträgt jeweils 1000 s für ein Frequenzband von 14-27 mHz.

Auf dieser Grundlage werden die Daten des mutmaßlichen Nukleartests in 2006 und des tektonischen Erdbebens in 2002 invertiert, um die Größe des explosiven Anteil zu bestimmen. Zusätzlich wird auf die seismischen Daten des letzteren künstliches Rauschen addiert, um zu analysieren, wie sich dies auf die Berechnung des explosiven Anteils auswirkt. Hierfür wird statistisch verteiltes Rauschen generiert, dessen Amplitude bis zu 5% der maximalen Amplitude der Orginalseismogramme beträgt. Wegen der geringen Magnitude der

beiden seismischen Ereignisse und des daraus resultierenden geringen Signal-Rauschen-Verhältnisses, wird eine Studie durchgeführt, die den Einfluss verschiedener Parameter auf die Momententensor-Inversion untersucht.

Parameterstudie

Bei der durchgeführten Parameterstudie wird die Auswirkung von Variationen in der Dämpfung der Inversion und des Frequenzbandes untersucht. Dafür werden die Wellen mit verschiedenen Bandpässen gefiltert, so dass 8 mHz breite Frequenzbänder entstehen (z.B. 18-26 mHz, entsprechend einer Wellenlänge von ca. 150-220 km). Dieses Vorgehen ermöglicht eine Einschätzung der Stabilität des Ergebnisses. Für ein stabiles Ergebnis führen kleine Veränderungen des Frequenzbandes nur kleine Unterschiede im explosiven Anteil herbei. Starke Änderungen des explosiven Anteils hingegen deuten auf eine instabile Bestimmung hin. Der zweite analysierte Parameter ist die Inversionsdämpfung, welche notwendig ist, um bei überbestimmten Problemen (große Datenmengen) Datenanteile zu unterdrücken, die durch den Momententensor nicht erklärt werden können. Die Dämpfung kontrolliert somit die Anpassung inkonsistenter Teile der Seismogramme.

Ergebnis

Der explosive Anteil, der mit Hilfe der *FMTI* für die seismischen Ereignisse berechnet wurde, ist in Abb. 4 gezeigt. Für alle drei Fälle ist jede Parameterkombination der Studie graphisch dargestellt. Im Vergleich mit dem Erdbeben von 2002 (*Fall B*) ist der erhöhte explosive Anteil des vermeintlichen Nukleartests in 2006 (*Fall A*) für Dämpfungen kleiner als 10^{-1} deutlich zu sehen. Die starke Dämpfung von 10^{-1} unterdrückt hingegen den schwer auflösbaren explosiven Anteil für *Fall A*. In beiden Fällen kann der explosive Anteil nicht endgültig quantifiziert werden, da er zu stark von der Wahl der Inversionsdämpfung abhängt.

Der Effekt des künstlichen Rauschens (*Fall B+R*) ist stark frequenzabhängig, erhöht aber für die meisten Frequenzbänder (mittlere Frequenz 16-19 mHz, 22-25 mHz) den explosiven Anteil für mittlere und schwache Dämpfungen. Das Rauschen erzeugt somit Instabilitäten in der Inversion, die bei kleinen Änderungen des Frequenzbandes zu großen Änderungen

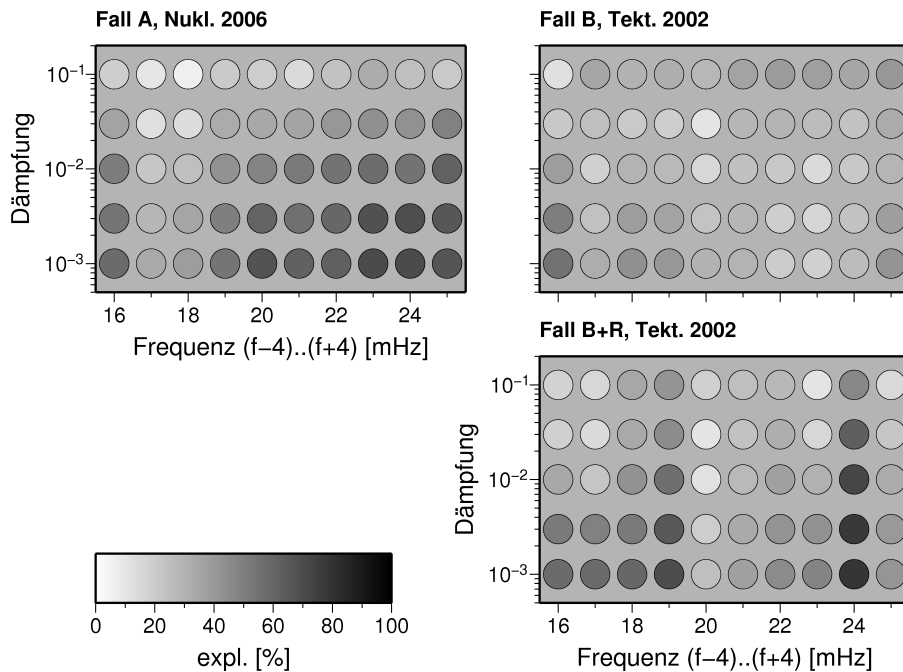


Abbildung 4: Ergebnis der Parameterstudie. Nukleartest (Fall A), tektonisches Erdbeben unverändert (Fall B) und plus künstliches Rauschen (Fall B+R). Die Größe der explosiven Komponente in Prozent ist in Graustufen angegeben. Schwarz bedeutet ein hoher, weiß ein niedriger explosiver Anteil. Horizontale Achse: mittlere Frequenz des 8 mHz breiten Frequenzbandes. Vertikale Achse: Inversionsdämpfung.

des explosiven Anteils führen. Dies ist auf die statistischen Eigenschaften des Rauschens zurückzuführen, die sich unterschiedlich auf jede Frequenz auswirken.

Diskussion

Ist der erhöhte explosive Anteil des Kernwaffentests also nur ein Artefakt des seismischen Rauschens? Nein, denn im Gegensatz zu Fall B+R sind für Fall A keine frequenzbedingten Instabilitäten sichtbar (Abb. 4), sondern vielmehr ein stabiler Bereich mit deutlich erhöhtem explosiven Anteil für höhere Frequenzen und schwächere Dämpfungen. Das künstliche Rauschen destabilisiert also offensichtlich das Inversionsergebnis und resultiert in einem pseudo-explosiven Anteil. Eine detailliertere Betrachtung von Fall B+R zeigt zudem

eine starke, künstliche Erhöhung der Erdbebenmagnitude (nicht abgebildet), die ein zusätzlicher Hinweis auf die verfälschende Wirkung des künstlichen Rauschens ist.

Die Studie hat gezeigt, dass das nordkoreanische Ereignis von 2006 mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Explosion darstellte. Der nukleare Charakter hingegen kann einzig mit der Messung von Zerfallsprodukten (Radionukleiden) nachgewiesen werden. Aufgrund seiner schwachen Magnitude ist die Anwendung der *FMTI* konventionellen seismischen Methoden überlegen, da nur so die verhältnismäßig schwachen Signale ausgewertet werden können. Die Inversionsdämpfung und das Frequenzband sind dabei von entscheidender Bedeutung. Somit kann die frequenzabhängige Momententensor-Inversion sowohl zur Bestimmung neuer Spannungsdaten für das *World-Stress-Map-Projekt* verwendet werden, als auch ein weiteres Indiz zur Verifizierung des nordkoreanischen Ereignisses als Kernwaffentest beitragen⁸.

⁸ Kubrik: *Dr. Strangelove or: How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb*, 1964.