

Das Sumatra-Andaman-Erdbeben vom 26.12.2004 im Nachweis der SAPOS®-Stationen

Das Erdbeben, das sich am 26. Dezember 2004 gegen 0:58:50 Uhr UTC vor der Küste Sumatras ereignete, kostete durch den von ihm ausgelösten Tsunami mehrere Hunderttausend Menschen das Leben. Das Beben, das inzwischen als Sumatra-Andaman-Beben bezeichnet wird, konnte mehr oder weniger deutlich an fast jedem Punkt der Erde registriert werden und führte dort zu permanenten oder temporären Verformungen der Erdoberfläche. Neben geophysikalischen und geodätischen Sensoren wie Seismometern und Supraleitgravimetern konnten die von dem Beben ausgesandten Wellen auch mit 1 Hz-Daten von GPS-Permanentstationen in Deutschland nachgewiesen werden.

Hintergrund

Das Sumatra-Andaman-Beben war eines der stärksten Erdbeben, das sich jemals auf der Erde zugetragen hat. Die Angaben über die Stärke des Bebens schwanken: anfänglich wurde sie mit einer Stärke von 8.9 bzw. 9.0 angegeben, später mit einer Magnitude von 9.3. Andere Berechnungen kommen auf der Grundlage von GPS-Auswertungen zu einem Ergebnis von ca. 9.2 [Banerjee, Pollitz, Bürgmann, 2005]. Es war somit auch das mit Abstand stärkste Erdbeben, seit es die kontinuierliche Aufzeichnung von GNSS-Beobachtungen gibt, z.B. im Rahmen des Internationalen GNSS-Diensts (IGS).

In zahlreichen Vorträgen, Veröffentlichungen – auch in so renommierten Zeitschriften wie „Nature“ und „Science“ – sowie Beiträgen im Internet ist auf die Verschiebungen eingegangen worden, die sich als Folge des Bebens ergeben haben. Dabei kam der Auswertung von GPS-Beobachtungen eine wesentliche Rolle zu. Es konnte so u.a. bestätigt werden, dass sich

die Verwerfungen vom Erdbebenherd aus nur nach Norden ausgebreitet haben, weil auf Inseln südlich des Epizentrums keine Verschiebungen festgestellt werden konnten [Ohta et al., 2005]. Weiterhin wurden horizontale permanente Verschiebungen festgestellt. Mit Hilfe z.B. eines umfangreichen GPS-Netzes in Thailand sowie für einige IGS-Stationen in der näheren Umgebung Sumatras konnten sowohl temporäre Deformationen als auch permanente Verschiebungen in der Größenordnung von cm bis dm nachgewiesen werden [Vichy et al., 2005]. Selbst bis zu einem Abstand von 4 500 km vom Epizentrum kam es zu permanenten Verschiebungen im mm-Bereich [Banerjee, Pollitz, Bürgmann, 2005].

Die von einem Erdbebenherd ausgehenden Wellen pflanzen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und auf unterschiedlichen Wegen fort [Braile, 2004]. Die primären und sekundären P- und S-Wellen werden als Körperwellen bezeichnet. Sie bewegen sich durch den Erdkörper

hindurch. Entfernt liegende Stationen erreichen sie somit als erste. Die Love- und Rayleigh-Wellen sind Oberflächenwellen, die sich ungefähr parallel zur Erdoberfläche fortbewegen. Die Love-Wellen pflanzen sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 - 4.4 km/s fort, die Rayleigh-Wellen sind geringfügig langsamer. Charakteristikum der Love-Wellen ist, dass die Bewegung der Oberflächenelemente nur in horizontaler Richtung erfolgt und dass diese Bewegung rechtwinklig zur Ausbreitungsrichtung erfolgt. Aus der relativen Lage des Epizentrums des Sumatra-Andaman-Erdbebens zu Deutschland ergibt sich, dass die Ausbreitung der Love-Wellen in westlicher Richtung erfolgte (Abb. 1). Deshalb muss die Bewegung der Oberfläche vornehmlich in der Nord-Süd-Komponente erkennbar sein. Da sowohl Love- als auch Rayleigh-Welle dispersiv sind, ist jedoch anzunehmen, dass die Ausbreitung nicht in einer ebenen Front erfolgt ist.

Auswertung

Bereits seit mehreren Jahren beschäftigen sich Wissenschaftler mit der Erfassung von Bewegungen der Erdoberfläche aufgrund von Erdbeben in größerer Entfernung vom Erdbebenherd. Dabei lagen die Stationen, die für die Auswertung betrachtet wurden, bis zu einigen tausend km vom Epizentrum des jeweiligen Bebens entfernt. Bevorzugte Gebiete der Analysen waren dabei z.B. Kalifornien und Japan mit ihren dichten Netzen permanenter GPS-Stationen, z.B. [Bock, Prawirodirdjo, Melbourne, 2004], [Miyazaki et al., 2004].

Für die Auswertungen zum Sumatra-Andaman-Erdbeben in Deutschland standen Daten von rund 100 **SAPoS**®-Stationen mehrerer Landesvermessungsbehörden und einige GREF-Stationen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie zur Verfügung. Die Aufzeichnungsrate aller GPS-Stationen betrug 1 Hz. Die hohe Dichte der Stationen mit Stationsabständen von 50 bis 100 km



Abb. 1: Skizzierte Ausbreitung der Oberflächenwellen nach dem Sumatra-Andaman-Erdbeben vom 26.12.2004 (Tag des Jahres 361)

erlaubte es, zahlreiche Basislinien zu untersuchen. Insbesondere war es möglich, von einer Referenzstation aus mehrere Basislinien unterschiedlicher Länge zu Stationen auf ungefähr der gleichen Breite zu bilden. Daneben war es umgekehrt möglich, von verschiedenen Referenzstationen auf ungefähr der gleichen Breite Basislinien zu derselben Rover-Station auszuwerten.

Die Auswertung der Daten erfolgte mit der Berner GNSS-Auswertesoftware in der Version 5.0 [Fridez et al., 2005]. Es wurden doppelt differenzierte L_3 -Phasenbeobachtungen verwendet. Dabei wurden zunächst, wie mit der älteren Version 4.2 auch, die Mehrdeutigkeiten für eine bestimmte Basislinie gelöst. Die neue Version 5.0 bietet die zusätzliche Option der epochenweisen Ausgabe sogenannter kinematischer Koor-

dinaten. Im vorliegenden Fall wurde also die Position der Rover-Station für jede Sekunde ausgegeben. Aus Kapazitätsgründen wurden nur jeweils die ersten sechs Stunden eines Tages ausgewertet.

Aufgrund der begrenzten Genauigkeit der Vertikalkomponente innerhalb der Sekundenauswertung von ca. 20 - 25 mm Standardabweichung wurden keine Untersuchungen der Höhenkomponente durchgeführt, da die zu erwartende Deformation in Vertikalrichtung in derselben Größenordnung wie die Streuung lag. Für diese Analyse kommen spezielle Verfahren zeitlicher und räumlicher Filterung in Frage [Bock, Prawirodirdjo, Melbourne, 2004].

Für die Darstellung an dieser Stelle wurden verschiedene Basislinien zwischen brandenburgischen SAPOS®-Stati-

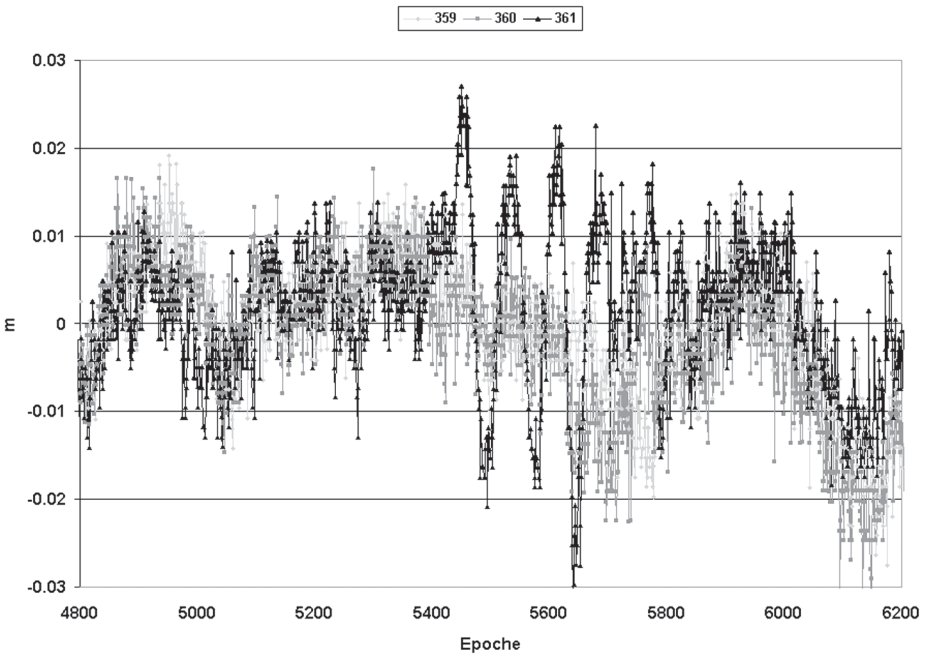


Abb. 2: Nord-Süd-Komponente der Basislinie Perleberg (0005) - Schwedt (0017), 160 km, für drei aufeinanderfolgende Tage 359 – 361; Differenzen gegen jeweiligen Mittelwert; Kurven um jeweils 236 Sekunden pro Tag verschoben

onen berechnet, welche sich auf ungefähr derselben Breite befinden. Beispiele für Auswertungen mit GREF- und SAPOS®-Stationen in Bayern und Rheinland-Pfalz sowie Stationen an der Küste finden sich in [Söhne, Schwahn, Ihde, 2005]. Alle betrachteten Vektoren haben nahezu West-Ost-Ausrichtung. Wegen der Ausbreitung der Wellen in nahezu westlicher Richtung und der daraus resultierenden Bewegung der Partikel in Nord-Süd-Richtung war aus Nord-Süd orientierten Basislinien keine Information über Verschiebungen zu gewinnen. Als Referenzstation wurde jeweils die westliche Station gewählt. Dadurch wurde die Roverstation zuerst von dem zu detektierenden Signal erfasst.

Die von Ost nach West durchlaufenden Oberflächenwellen beeinflussten nicht nur

die kinematische Station, sondern auch die festgehaltene Referenzstation. Je nach Länge der Basislinie ergaben sich daraus unterschiedliche Muster. Bei einer langen Basislinie bewegte sich die kinematische Station bereits wieder in ihre Ausgangslage zurück, ehe die Referenzstation von der Deformation erfasst wurde. Bei kürzeren Basislinien wurde die Referenzstation bereits frühzeitig von der Bewegung aufgrund der Love-Welle erfasst.

Abb. 2 zeigt die Nord-Südkomponente der Basislinie Perleberg - Schwedt für die drei aufeinanderfolgenden Tage 24.12. - 26.12.2004. Die Kurven sind jeweils um 236 Sekunden gegeneinander verschoben. Damit wird berücksichtigt, dass sich dieselbe Satellitenkonstellation nicht nach genau einem Erdtag, sondern

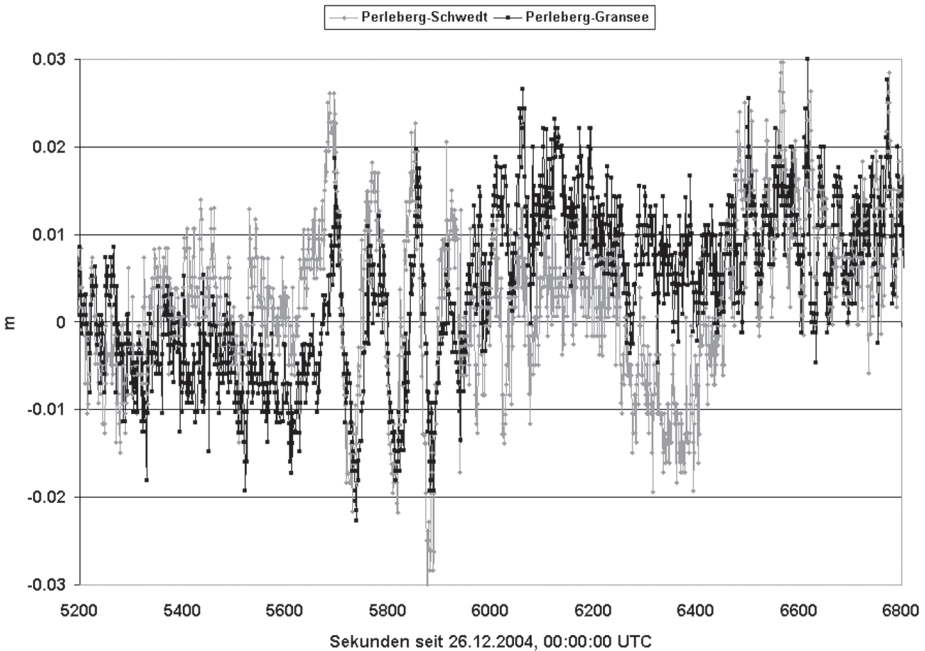


Abb. 3: Nord-Süd-Komponente der Basislinien Perleberg (0005) - Gransee (0016) und Schwedt (0017), 86 bzw. 160 km, für Tag 361 (26.12.2004); Differenzen gegen jeweiligen Mittelwert

nach 86 164 Sekunden, einem Sterntag wiederholt [Bock, Prawirodirdjo, Melbourne, 2004]. Deutlich ist zu erkennen, dass zum ersten sich die langperiodischen Schwankungen in allen Tagen wiederfinden – sie reflektieren die identische Satellitenkonfiguration in Verbindung mit stationsabhängigen Effekten – und dass zum zweiten am Tag 361 ein deutlich abweichendes Signal in den Daten enthalten ist, dass den ankommenden Love-Wellen zuzuschreiben ist.

Die hohe Auflösung der Ergebnisse erlaubt es, das zeitlich unterschiedliche Eintreffen der Love-Wellen an den einzelnen Stationen nachzuvollziehen. Abb. 3 zeigt die Nord-Südkomponenten von Gransee und Schwedt bezogen auf die Referenzstation Perleberg. Man erkennt, dass im weiter östlich gelegenen Schwedt die Verschiebungen etwas eher einsetzen und die maximale Nordverschiebung ca. neun Sekunden früher erreicht wird. Aus dem Eintreffen der Wellen ca. 2 120 Sekunden nach dem Beben ergibt sich bei einer Entfernung von knapp 9 000 km tatsächlich eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 4.2 km/s für die Love-Wellen.

Dank

Für die Bereitstellung der mitunter sehr umfangreichen Datenmengen der SAPOS®-Stationen sei den Kolleginnen und Kollegen der Landesvermessungsbehörden herzlich gedankt.

Literaturverzeichnis

Banerjee, P., Pollitz, F. F., Bürgmann, R.: “The size and duration of the Sumatra-Andaman earthquake from far-field static offsets”, *Science* 10.1126/science.1113746, Vol. 308, S. 1769 - 1772, 2005

Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Melbourne, T. I.: “Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L06604, 2004

Braile, L.: “Seismic Wave Demonstrations and Animations”, <http://www.eas.purdue.edu/~braile>

Fridez, P. et al.: “Bernese GPS Software”, <http://www.bernese.unibe.ch>

Miyazaki, S. et al.: “Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1-Hz GPS data”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L21603, doi:10.1029/2004GL021457, 2004

Ohta, Y. et al.: “Large surface wave of Sumatra earthquake captured by the long baseline kinematic analysis of 1-Hz GPS data”, Poster präsentiert auf der EGU-Generalversammlung in Wien, 2005

Söhne, W., Schwahn, W., Ihde, J.: “Earth surface deformation in Germany following the Sumatra Dec 26, 2004 earthquake using 1 Hz data”, Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Wien, 1 - 4 Juni 2005, Mitteilungen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2005 (in Vorbereitung)

Vigny, C. et al.: “Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia”, *Nature* 436, S. 201 - 206, 2005

