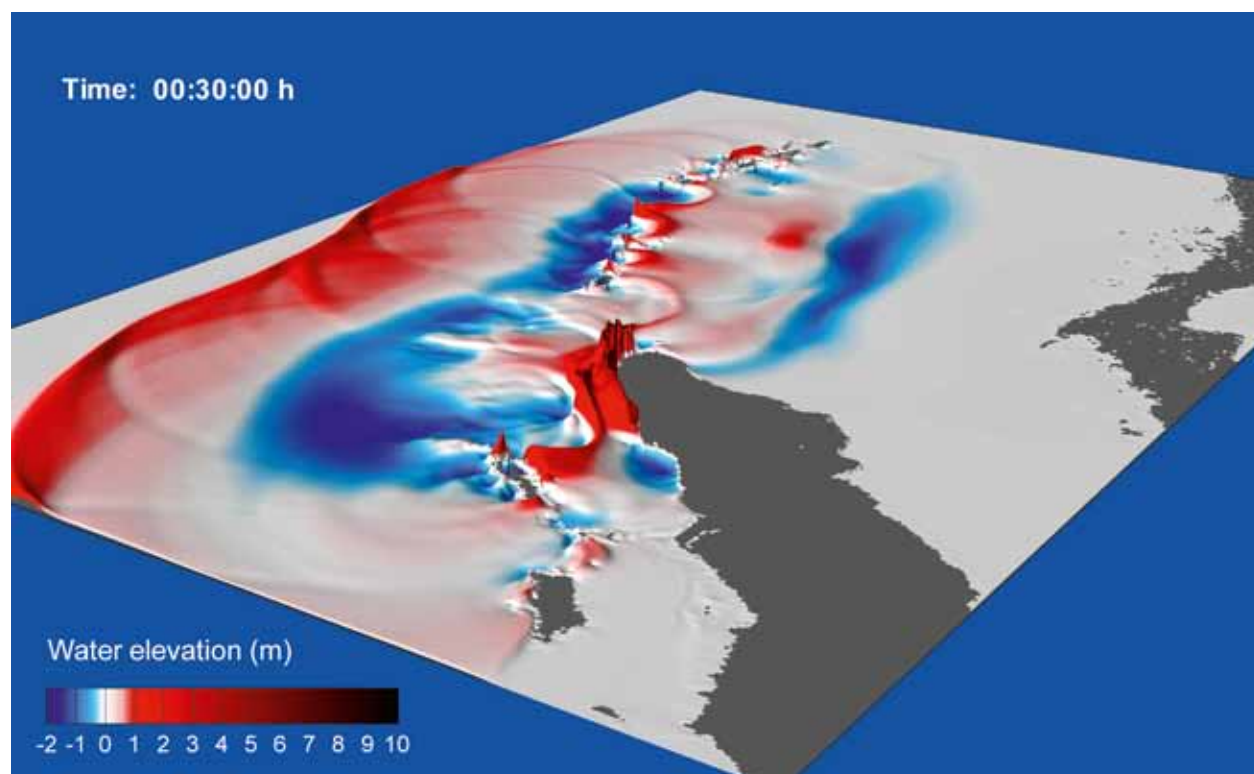


Schnelle und zuverlässige Tsunami-Frühwarnung mit hochpräziser Echtzeit-GNSS-Prozessierung und gleichzeitiger Simulation

Andrey Babeyko, Andreas Höchner, Maorong Ge, Rongjiang Wang, Stephan Sobolev
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Modern near-field tsunami early warning systems must provide a tsunami alarm as early as 5 to 10 minutes after an earthquake. Working within this time limit, traditional seismic methods tend to underestimate the total moment magnitude in case of giant (Sumatra 2004, Tōhoku 2011) as well as slow, ‘tsunami’ (Java 2006, Mentawai 2010) earthquakes. Moreover, representation of a tsunami source as a point-source, i.e. location plus magnitude, is usually insufficient for a reliable near-field early warning. Using numerical simulation of earthquake rupture and associated crustal deformation and tsunami wave’s propagation, we demonstrate that recent high-precision real-time Global Navigation Satellite System (GNSS) arrays may serve as a key component of near-field tsunami early warning system. The main advantage of the GNSS-arrays, placed close to an epicenter, is that they directly measure surface displacements necessary for tsunami source inversion already during the earthquake. Taking the Great March 2011 Tōhoku-oki earthquake as an example, we demonstrate the ability of real-time GNSS to provide qualified tsunami early warning in only three minutes after beginning of the earthquake. To do so, we combine real-time Precise Point Positioning (PPP) processing with fast slip inversion and on-the-fly tsunami simulation. This allows the observation of the earthquake growth in almost real-time (plus about one minute processing overhead) by simultaneously computing tsunami warning levels. Already three minutes after the earthquake begins, GNSS-derived moment magnitude estimation reaches its final value of $M_w = 9.0$ and tsunami forecasting stabilizes as well.



Die meisten Subduktionszonen – Regionen, in denen eine Lithosphärenplatte unter eine andere in den Erdmantel abtaucht – liegen in der Nähe bewohnter Küsten. Entlang dieser Zonen können starke Erdbeben und in deren Folge zerstörerische Tsunami auftreten. Bei solchen Naturkatastrophen bleibt für die Bevölkerung der angrenzenden Küstengebiete wenig Zeit für Rettungsmaßnahmen. Typischerweise dauert es 20 bis 40 Minuten, bis die erste Tsunami-Welle die Küste erreicht. Zieht man davon die Zeit ab, die nötig ist, um die Messdaten, die für eine Frühwarnung nötig sind, zu prozessieren, eine Prognose zu erstellen, sowie eine Warnung zu verbreiten, wird klar, dass zuverlässige Tsunami-Frühwarnung im Nahbereich äußerst anspruchsvoll ist.

Moderne Tsunami-Frühwarnsysteme müssen in der Lage sein, innerhalb von fünf bis zehn Minuten nach einem Erdbeben eine Warnung auszugeben. Bei solch einer kurzen Zeitvorgabe tendieren traditionelle seismische Methoden dazu, im Fall sehr großer Beben (Sumatra 2004, Japan 2011) oder langsamer, sogenannter „Tsunami“-Beben (Java 2006, Mentawai 2010), die Gesamtgröße des Bebens zu unterschätzen (z.B. Lomax und Micheline, 2009; Hoshiba et al., 2011; Duputel et al., 2011).

Infolge des Extrem-Bebens und des Tsunami vor Sumatra 2004 verstärkten sich die Bemühungen, schnellere seismische Methoden zur Bestimmung der tatsächlichen Momentenmagnitude zu entwickeln. Zum Beispiel wurde gezeigt, dass die W-Phasen-Momententensor-Inversionsmethode Lösungen bei Beben mit $M_w = 9,0$ innerhalb von 20 Minuten bestimmen kann (Duputel et al., 2011). Eine andere Lösung (M_{wpd} -Magnitude) basiert auf der Analyse der „Duration-Amplitude“ von seismischen P-Wellen zur raschen Bestimmung des Tsunami-Potentials großer und langsamer Beben (Lomax und Micheline, 2009). Trotz schnellerer und genauerer Magnitudenbestimmung liefern aber auch diese neueren Methoden nicht genügend Daten für eine zuverlässige Nahbereich-Tsunami-Frühwarnung, da sie die Beben- und Tsunami-Quelle als

Punktquelle approximieren. Für eine qualifizierte Prognose sind aber zusätzliche Informationen über die Ausdehnung des Bruchs und die Verteilung der relativen Verschiebungen zwischen den tektonischen Platten unabdingbar (Sobolev et al., 2007; Babeyko et al., 2010). Hochseebojen oder Sensoren am Meeresboden können im Fall transozeanischer Tsunami die sich ausbreitende Welle identifizieren und helfen, zusätzliche Informationen über die Quelle zu bestimmen. Sie sind jedoch für die Nahbereichswarnung aufgrund der knappen Zeitvorgabe nicht verwendbar.

Fortschritte in der Hochpräzisions-Echtzeitverarbeitung von GNSS-Daten – Global Navigation Satellite System, also GPS, Galileo, GLONASS und BeiDou – machen küstennahe GNSS-Arrays zu einer wertvollen Komponente für Tsunami-Frühwarnsysteme (Sobolev et al., 2007; Blewitt et al., 2009). GNSS-Empfänger, welche in der Nähe des Epizentrums liegen, haben entscheidende Vorteile gegenüber Breitbandseismometern und Akzelerometern. Sie minimieren die Antwortzeit und messen direkt die Deformation der Erdoberfläche, die Ursache des Tsunami. Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wurde nach der Tsunami-Katastrophe 2004 daher ein Konzept für ein „GPS-Schild“ zur Tsunami-Frühwarnung vorgeschlagen (Sobolev et al., 2006, 2007) und im Rahmen des unter Federführung des GFZ entwickelten Tsunami-Frühwarnsystems GITEWS (German Indonesian Tsunami Early Warning System, www.gitews.org), das auch auf Daten eines GNSS-Netzwerks zurückgreift, weiterentwickelt (Falck et al., 2010).

Im Folgenden stellen wir die drei Hauptschritte der GNSS-basierten Tsunami-Frühwarnung vor und erläutern diese in einem Rückvergleich am Beispiel des Tōhoku-Ereignisses 2011.

Schritt 1: Übertragung und Prozessierung der Daten

Der erste Schritt in der Tsunami-Frühwarnkette besteht darin, die koseismischen Verschiebungen an der Erdoberfläche zu bestimmen, welche später zur Quelleninversion genutzt werden. Grundsätzlich erzeugen GNSS-Empfänger Rohdaten der Satellitensignale, die prozessiert werden müssen, um die Position der GNSS-Antenne zu bestimmen. Die Herausforderung liegt darin, dass dies sehr schnell und mit sehr hoher Präzision im Zentimeterbereich geschehen muss. Um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen, sind Korrekturdaten zu den von den Satelliten ausgesandten Orbit- und Uhrinformationen nötig. Diese werden mittels Echtzeitverarbeitung der Daten von globalen (IGS International GNSS Service) und regionalen Referenzstationen gewonnen. Am GFZ wird seit 2007 an der Echtzeit-GNSS-Prozessierung für verschiedene Anwendungen in den Geowissenschaften gearbeitet. Die in diesem Rahmen entwickelte Software EPOS-RT (Ge et al., 2009) ist in der Lage, globale Echtzeit-PPP (Precise Point Positioning)-Prozessierung durchzuführen und, je nach Art der verwendeten Korrekturdaten, eine Positionsgenauigkeit von 2 bis 3 cm zu erreichen (Ge et al., 2011; Abb. 1).

Links: Simulation des Tsunami am 26. Dezember 2004 vor der Küste Nordsumatras (Indonesien). Die Welle erreicht die Küstengebiete in Banda Aceh bereits 30 Minuten nach Bebenbeginn – eine Herausforderung für die Tsunami-Frühwarnung im Nahbereich.

Left: Simulation of the Indian Ocean Boxing Day 2004 tsunami near North Sumatra (Indonesia). Note that the tsunami strikes the coast of Banda Aceh as soon as 30 minutes after the earthquake beginning, which illustrates the challenge of the near-field tsunami early warning.



Kontakt: A. Babeyko
(babeyko@gfz-potsdam.de)

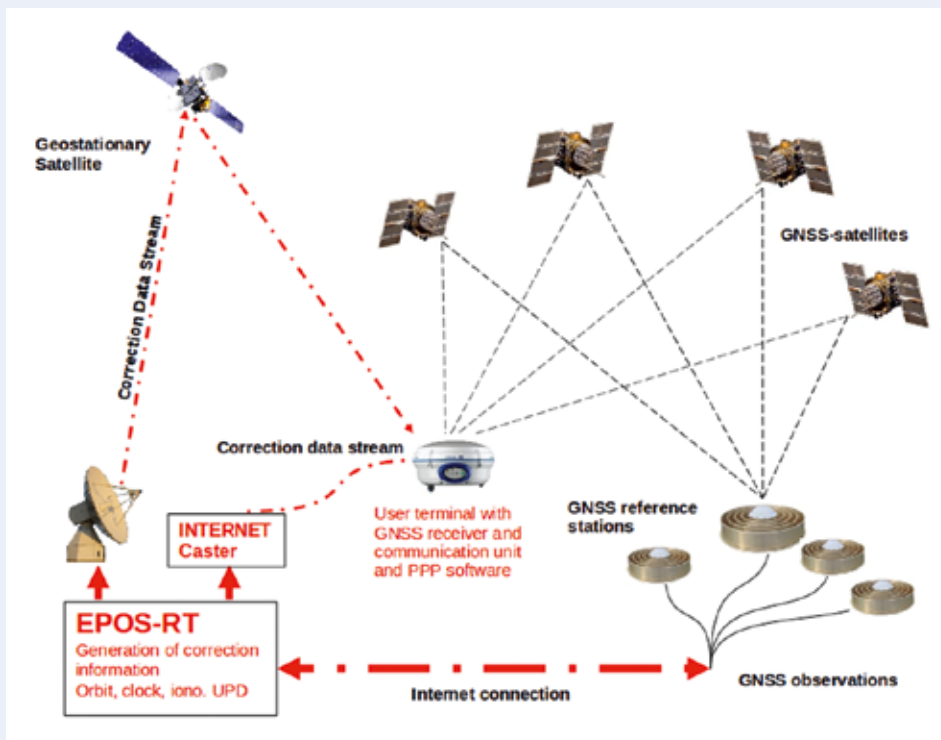


Abb. 1: Prinzip des Hochpräzisions-Echtzeit-PPP (Precise Point Positioning): zusätzlich zur üblichen Positionsbestimmung über GNSS-Satelliten erhält der Empfänger (User terminal) kontinuierlich einen Korrekturdatenstrom, welcher mittels der Software EPOS-RT aus globalen und/oder regionalen GNSS-Beobachtungen errechnet wird.

Fig. 1: Principles of high-precision real-time PPP (Precise Point Positioning) processing: in addition to standard positioning from GNSS satellites, the user terminal constantly receives a correction data stream computed by EPOS-RT software from global and/or regional GNSS observations.

In unserem Rückvergleich für das Tōhoku-Ereignis 2011 wenden wir diese Methode auf genau die Daten an, wie sie zum Zeitpunkt des Bebens zur Verfügung standen, um die Möglichkeit für eine Tsunami-Frühwarnung zu beurteilen. Wir verwenden GNSS-Rohdaten des GEONET-Netzwerks, welches durch GSI (Geospatial Information Authority of Japan) betrieben wird, von einem Tag vor bis einen Tag nach dem Beben, mit einem Samplingintervall von 30 Sekunden. Im Rahmen des Rückvergleichs werden die GNSS-Rohdaten der PPP-Prozessierung zugeführt, ausschließlich mit quasi-Echtzeit-Informationen verarbeitet und die resultierenden Verschiebungsvektoren in Schritt 2 – der Inversion – verwendet.

Schritt 2: Inversion der Quellparameter

Das GNSS-Prozessierungssystem versorgt das Tsunami-Warnzentrum mit koseismischen Verschiebungsvektoren der Erdoberfläche, welche im nächsten Schritt in Tsunami- bzw. Bebenherdparameter umgerechnet werden. Dies ist ein typisches Inversionsproblem, welches mittels Greenscher Funktionen gelöst werden kann. Dazu wird der dreidimensionale seismogene Bereich der Plattengrenzfläche als System von Patches diskretisiert (Abb. 2a). Für jedes Patch wird nacheinander eine relative tektonische Plattenverschiebung von 1 m angesetzt und die resultierenden Deformationsvektoren an allen Stationen berechnet. Hierfür kann ein einfaches Modell für den homogenen elastischen Halbraum verwendet werden, oder wie in unserem Fall, ein am GFZ entwickeltes realistischeres, geschichtetes Erdmodell (Wang, 2006; viskoelastischer Code PSGRN/PSCMP).

Die berechneten Greenschen Funktionen können genutzt werden, um die beobachteten Deformationen an den Stationen zu invertieren und die relative koseismische Verschiebung zwi-

schen den tektonischen Platten (Slip-Verteilung) zu berechnen. Die Kalibrierung der Inversionsprozedur wird im vor herein mittels synthetischer Vorwärts-Szenarien (checkerboard-, homogene- und realistische Slip-Verteilung) durchgeführt, indem das Vorwärts- mit dem invertierten Modell verglichen und die Gewichtungsterme angepasst und fixiert werden (Hoechner et al., 2008). Je nach Verfahren dauert die Inversion nur einige Sekunden.

Mit der so bestimmten Slip-Verteilung an der Plattengrenzfläche kann die Deformation des Meeresbodens berechnet werden. Diese stellt die Tsunami-Anfangsbedingung dar. Die Berechnung der Tsunami-Ausbreitung und der erwarteten Wellenhöhen und Ankunftszeiten an der Küste ist Gegenstand des dritten Schritts.

Schritt 3: Tsunami-Prognose

Die moderne Tsunami-Prognose beruht ausschließlich auf numerischen Simulationen der Tsunami-Wellenausbreitung. Da die Wellenausbreitung stark durch die Bathymetrie und Reflektionen an der Küste beeinflusst wird, gibt es keine einfachen Relationen wie z. B. zum Erstellen von shake-maps für Erdbeben, die die Verbindung von der Quelle zu Wellenhöhen an der Küste herstellen. Stattdessen muss für jede Quelle die komplette Wellenausbreitung berechnet werden.

Üblicherweise werden Szenarien vorausberechnet und in einer Datenbank abgelegt. Während eines Ereignisses werden ein oder mehrere Szenarien aus der Datenbank gezogen und als Basis für die Frühwarnung verwendet. Dieser Ansatz hat allerdings gravierende Nachteile:

- Die Datenbank enthält Tsunami-Szenarien für vordefinierte, vereinfachte Quellenmodelle, z. B. mit homogener Slip-

Verteilung. Dies stellt für kleinere Ereignisse kein Problem dar, bei großen Beben können aber starke Heterogenitäten auftreten (z. B. Sumatra 2004).

- Die Anzahl der Szenarien ist limitiert, da erheblicher Speicherplatz benötigt wird. Deshalb muss der Parameterraum der Szenarien räumlich und in der Magnitude diskretisiert werden, die Magnitude z. B. typischerweise in Intervallen von 0,2. Dies erscheint relativ fein, aber ein Unterschied von 0,2 in der Magnitude entspricht aufgrund der logarithmischen Skala einem Faktor 2 im seismischen Moment.
- Die abgelegten Szenarien sind statisch. Es ist also aufwendig, neue Daten zu integrieren.
- Schließlich muss diese Datenbank mit erheblichem Aufwand gewartet werden.

Rasche Fortschritte in der Computerleistung in den letzten Jahren eröffnen die Möglichkeit für einen alternativen Ansatz ohne vorberechnete Szenarien mittels on-the-fly (d. h. Echtzeit-)Berechnung der Tsunami-Ausbreitung. Diese on-the-fly Tsunami-Simulationen verwenden relativ einfache numerische

Approximationen für die Wellenausbreitungsgleichungen. Die darauf basierenden Simulationsalgorithmen sind sehr schnell und verfügen über genügend Genauigkeit für die Berechnung der Wellenausbreitung im offenen Meer. Da man mit diesen Methoden die Überflutung an der Küste nicht detailliert berechnen kann, verwendet man stattdessen verschiedene Amplifikationsschemata, um die Wellenhöhe an der Küste aus den naheliegenden tieferen Positionen zu errechnen. Dies ist ein verbreiteter Ansatz, der z. B. auch am japanischen Tsunami-Frühwarnsystem verwendet wird.

Abb. 3 stellt unser Tsunami-Ausbreitungsmodell für das Tōhoku-Ereignis 2011 dar und wurde mit der GFZ-Software „easyWave“ berechnet. Die Anfangsbedingung entspricht der Quelleninversion 180 Sekunden (siehe Schritt 2) nach Bebenbeginn. Während die Auswirkung an der japanischen Küste innerhalb von nur knapp zehn Sekunden berechnet werden kann, benötigt die Simulation für die transozeanische Ausbreitung aufgrund der längeren Simulationsrechenndauer und des sich adaptiv vergrößernden Rechengitters erheblich mehr Zeit.

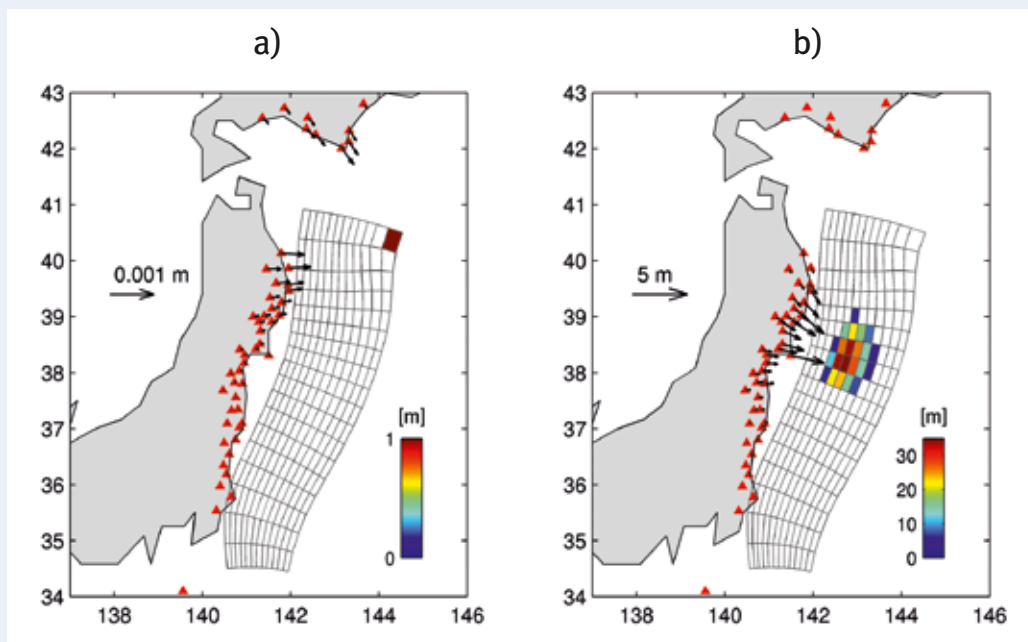


Abb. 2: Inversion der durch GNSS bestimmten Erdoberflächenverformung in Erdbeben- und Tsunami-Quellparameter am Fallbeispiel des Tōhoku-Ereignisses 2011. a) Konzept der Greenschen Funktionen: Ansetzen einer normierten Verschiebung an jedem einzelnen Patch des diskretisierten seismogenen Platteninterfaces (Gitter) und Berechnung der resultierenden Verformung (Vektoren) an jeder GNSS-Station (Dreiecke). b) Nach Echtzeitmessung der koseismischen Stationsverschiebungen (Vektoren) werden die vorberechneten Greenschen Funktionen verwendet, um diese in eine durch das Erdbeben ausgelöste relative koseismische Verschiebung zwischen den tektonischen Platten (Slip-Verteilung) rückzuprojizieren.

Fig. 2: Inversion of GNSS-derived surface displacements into earthquake and tsunami source parameters of the case example Tohoku event of 2011. a) Concept of Greens' functions: application of unit slip at every single patch of the discretized seismogenic plate interface (grid), and computation of response dislocations (vectors) for all GNSS-stations (triangles). b) After measuring real-time coseismic station displacements (vectors), the pre-computed Greens' functions are used to back-project them into earthquake slip distribution.

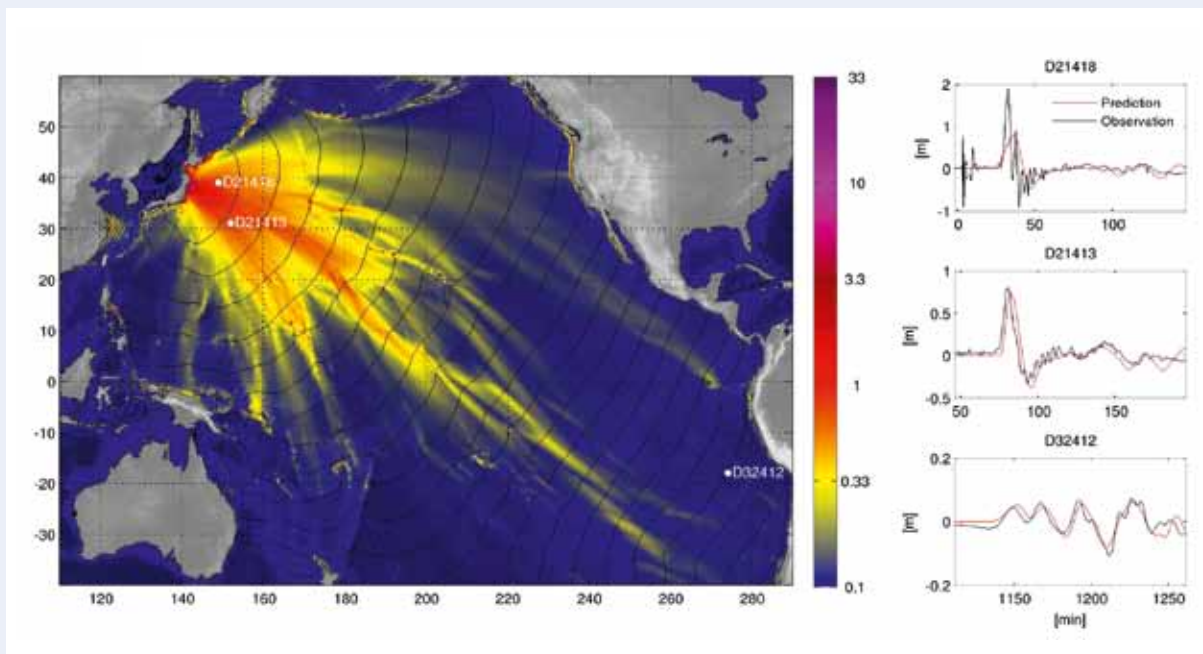


Abb. 3: Tsunami-Ausbreitungsmuster (maximale Wellenhöhe, on-the-fly berechnet), basierend auf GNSS-Daten am Fallbeispiel des Tōhoku-Ereignisses 2011, welche drei Minuten nach Bebenbeginn verfügbar waren. Ein Vergleich der Modellprognose mit unabhängigen späteren Beobachtungen (US DART-Bojen) zeigt eine gute allgemeine Übereinstimmung, aber auch die Tatsache, dass die ausschließlich GNSS-basierte Inversion nicht in der Lage ist, einige kleinskalige Quellenkomplexitäten aufzulösen (siehe die kurzwelligen Spitzen bei DART 21418).

Fig. 3: Tsunami propagation pattern (maximum wave heights) computed on-the-fly and corresponding to GNSS-data available at 3 minutes after beginning of the Tōhoku earthquake 2011. Comparison of model with independent, later observations (US DART buoys) shows good overall fit but also the fact that GNSS-only based inversion cannot resolve some small-scale source complexity (see short wavelength peaks at DART 21418).

Zusammenführung der einzelnen Schritte

Die drei erwähnten Schritte können nun angewendet werden, um ein „Replay“ des Tōhoku-Ereignisses durchzuführen. „Replay“ meint hierbei, dass die Situation nachgestellt wird, wie sie in einem Warnzentrum, das an das GEONET-Netzwerk angeschlossen ist, stattfinden würde. Wie bereits ausgeführt, werden die Rohdaten durch EPOS-RT verarbeitet, die resultierenden Stationsverschiebungen zur Slip-Verteilung an der Quelle invertiert, die Meeresbodendeformation und schließlich die Wellenausbreitung berechnet sowie die Warnlevel bestimmt. Diese Prozessierung läuft als Schleife, bis eine stabile Lösung erreicht wird.

Abb. 4 zeigt Momentaufnahmen für die Tsunami-Prognose, dargestellt in drei Reihen und beginnend bei einer Minute nach dem Bebenbeginn. Die angegebene Zeit (links) entspricht der unteren Grenze, welche durch die Physik bestimmt wird, also für Bruchpropagation plus Ausbreitungszeit der seismischen Wellen bis zu den Stationen. Ungefähr eine Minute muss für die drei Prozessierungsschritte hinzugefügt werden.

Bemerkenswert ist, dass das Beben beobachtet und zugleich – während des Bruchvorgangs – eine Tsunami-Warnung bestimmt werden kann. Nach einer Minute (plus eine Minute Prozessierungszeit) beträgt der maximale invertierte Slip ungefähr 6 m (siehe Tabelle in Abb. 4). Die geschätzte Magnitude beträgt bereits $M_W = 8,4$ und die Warnlevel zeigen einen „major Tsunami“ für die Sendai-Präfektur an. 30 Sekunden später erreicht die Magnitude $M_W = 8,7$. Für ausgedehnte

Küstengebiete werden bereits mehr als 10 m maximale Wellenhöhe prognostiziert. Das Slip-Modell stabilisiert sich etwa drei Minuten nach Beginn des Bebens. Die Magnitude erreicht den endgültigen Wert von $M_W = 9,0$ und die maximale prognostizierte Wellenhöhe beträgt 29 m.

Die Qualität der GNSS-basierten Tsunami-Prognose kann beurteilt werden, indem die Warnlevel mit Feldmessungen an der Küste in den Wochen nach dem Beben (Mori et al., 2012) verglichen werden. Dieser Vergleich (Abb. 4, rechts) zeigt die gute Übereinstimmung der Prognose für das Tōhoku-Ereignis. Die Fallstudie demonstriert, dass die herausfordernde Aufgabe der Tsunami-Frühwarnung im Nahbereich enorm von der Kopplung neuer GNSS-Prozessierungsalgorithmen und numerischer Modellierung profitieren kann. Das japanische GEONET-Netzwerk wurde bisher nicht für die Tsunami-Frühwarnung eingesetzt, da die erforderlichen Technologien erst in den letzten Jahren entwickelt wurden.

Ausblick

Die Arbeiten des GFZ werden dazu beitragen, dass Echtzeit-GNSS-Netzwerke zukünftig als wichtige Komponente der Tsunami-Frühwarnung genutzt werden können. Beispielsweise ist geplant, in Chile, ebenfalls ein Land mit hoher Tsunami-Exposition, ein GNSS-Netzwerk mit mehr als 120 Stationen entlang der Pazifikküste mit Unterstützung des GFZ aufzubauen und so die technische Basis für eine schnelle Tsunami-Frühwarnung zu schaffen.

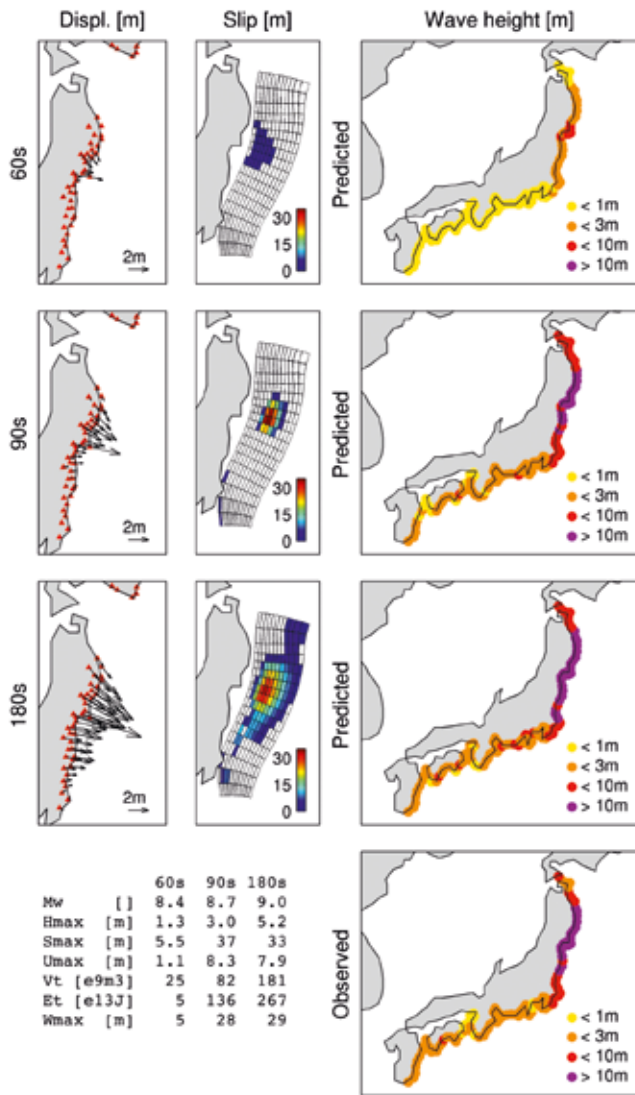


Abb. 4: Datenprozessierung und Tsunami-Vorhersage nach 60, 90 und 180 Sekunden Erdbebenzeit (obere drei Reihen). Die Echtzeit-GNSS-Verschiebungsvektoren (linke Spalte) werden invertiert, um die Slip-Verteilung an der Bruchfläche zu erhalten (mittlere Spalte). Diese Quellmodelle werden verwendet, um die geschätzten maximalen Wellenhöhen an der Küste zu berechnen (rechte Spalte). Die rechte untere Tafel zeigt die gemessenen Wellenhöhen. Die Tabelle enthält Schlüsseleigenschaften der drei Erdbeben- und Tsunami-Modelle. Mw: Momentenmagnitude, Hmax: maximale beobachtete horizontale Verschiebung an den GNSS-Stationen, Smax: maximaler invertierter Slip an der Bruchfläche, Umax: maximale modellierte Anhebung des Meeresbodens, Vt: anfängliches Tsunami-Volumen, Et: anfängliche potentielle Tsunami-Energie, Wmax: geschätzte maximale Wellenhöhe an den Küstenpunkten.

Fig. 4: Data processing and resulting tsunami forecasts for the three moments of time (in rows): 60, 90 and 180 seconds after the earthquake origin time. Real-time GNSS displacements (left panels) are inverted for slip at the fault (middle panels). These source models are used to compute estimated coastal tsunami wave heights (right panels). Lower right panel: Observed wave heights. The table contains key characteristics of the three succeeding earthquake and tsunami models. Mw: moment magnitude, Hmax: maximum observed horizontal displacement at the GPS stations, Smax: maximum inverted slip at the fault, Umax: maximum modeled uplift at the sea floor, Vt: initial tsunami volume, Et: initial tsunami potential energy, Wmax: maximum estimated wave height at the coastal points of interest.

Literatur

- Babeyko, A. Y., Hoechner, A., Sobolev, S. V. (2010): Source modeling and inversion with near real-time GPS: a GITEWS perspective for Indonesia. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 10, 7, 1617-1627, 10.5194/nhess-10-1617-2010.
- Blewitt, G., Hammond, W., Kreemer, C., Plag, H.-P., Stein, S., Okal, E. (2009): GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems. - *Journal of Geodesy*, 83, 3-4, 335-343, 10.1007/s00190-008-0262-5.
- Duputel, Z., Rivera, L., Kanamori, H., Hayes, G. P., Hirshorn, B., Weinstein, S. (2011): Real-time W phase inversion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. - *Earth Planets Space*, 63, 7, 535-539, 10.5047/eps.2011.05.032.
- Falck, C., Ramatschi, M., Subarya, C., Bartsch, M., Merx, A., Hoeberechts, J., Schmidt, G. (2010): Near real-time GPS applications for tsunami early warning systems. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 10, 2, 181-189, 10.5194/nhess-10-181-2010.
- Ge, M., Chen, J., Gendt, G. (2009): EPOS-RT: Software for Real-time GNSS Data Processing, (Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-8933), General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2009).
- Ge, M., Dousa, J., Li, X., Ramatschi, M., Wickert, J. (2011): A novel-real-time precise positioning service system: global precise point positioning with regional augmentation, 3rd International Colloquium Galileo Science (Copenhagen, Denmark 2011).
- Hoechner, A., Babeyko, A. Y., Sobolev, S. V. (2008): Enhanced GPS inversion technique applied to the 2004 Sumatra earthquake and tsunami. - *Geophysical Research Letters*, 35, L08310, 10.1029/2007GL031333.
- Hoshiba, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., Shimoyama, T., Hirano, K., Yamada, Y., Ishigaki, Y., Kikuta, H. (2011): Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) - *Earthquake Early Warning and observed seismic intensity*. - *Earth Planets Space*, 63, 7, 547-551, 10.5047/eps.2011.05.031.
- Lomax, A., Michelini, A. (2009): Mwpd: a duration – amplitude procedure for rapid determination of earthquake magnitude and tsunamigenic potential from P waveforms. - *Geophysical Journal International*, 176, 1, 200-214, 10.1111/j.1365-246X.2008.03974.x
- Mori, N., Takahashi, T., The 2011 Tohoku earthquake tsunami joint survey group (2012): Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami. - *Coastal Engineering Journal*, 54, 1, 1250001-1, 10.1142/S0578563412500015.
- Sobolev, S. V., Babeyko, A. Y., Wang, R., Galas, R., Rothacher, M., Stein, D., Schröter, J., Lauterjung, J., Subarya, C. (2006): Towards Real-Time Tsunami Amplitude Prediction. - *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 87, 37, 374, 378.
- Sobolev, S. V., Babeyko, A. Y., Wang, R., Hoechner, A., Galas, R., Rothacher, M., Sein, D. V., Schröter, J., Lauterjung, J., Subarya, C. (2007): Tsunami early warning using GPS-Shield arrays. - *Journal of Geophysical Research*, 112, B08415, 10.1029/2006JB004640.
- Wang, R., Lorenzo Martín, F., Roth, F. (2006): PSGRN/PSCMP - a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. - *Computers and Geosciences*, 32, 4, 527-541, 10.1016/j.cageo.2005.08.006.