

Unstrukturierte finite Elemente Simulationen für die Tsunami-Frühwarnung in Indonesien

Jörn Behrens

Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research

Im Rahmen der Aufbauhilfe der Bundesregierung nach dem Tsunami im Dezember 2004 für die Länder des Indischen Ozeans wird mit Partnern aus Deutschland und Indonesien das Deutsch-Indonesische Tsunami-Frühwarnsystem (GITEWS) entwickelt und in Jakarta installiert. Um innerhalb kürzester Zeit aufgrund weniger verfügbarer Messdaten ein präzises Lagebild erstellen zu können, entwickelt die Arbeitsgruppe Tsunami-Modellierung am Alfred-Wegener-Institut (AWI) die Simulations-Komponente des Tsunami-Frühwarnsystems. Dazu gehört eine sehr genaue und validierte Software zur Simulation der Tsunami-Ausbreitung und -Überflutung, wie auch eine intelligente Datenbank-Anwendung zur Auswahl vorberechneter Szenarien zur schnellen Lagebeurteilung.

Dieser Beitrag beschreibt die Simulationssoftware TsunAWI, welche die Ausbreitung und Überflutung von Tsunami-Wellen mit Hilfe der nicht-linearen Flachwasser-Theorie berechnet. Dabei ist ein kritisches Element in der Simulationskette, ein geeignetes und genaues Gitter zu generieren. Da die Ergebnisse operationell für die Frühwarnung im Katastrophenfall verwendet werden, ist eine detaillierte Evaluierung der Simulationen notwendig. Diese Ergebnisse werden anhand von Beispielen erläutert.

1 Einführung

Der zerstörerische Tsunami am 26. Dezember 2004 im Indischen Ozean regte eine Reihe von Aktivitäten an, mit dem Ziel, das öffentliche Bewusstsein über und die Vorbereitung auf Tsunami-Katastrophen zu stärken. Im Rahmen der 500 Mio. Euro schweren Aufbauhilfe der Bundesregierung für die Region werden etwa 45 Mio. Euro in die Entwicklung und den Aufbau eines Tsunami Frühwarnsystems für den Indischen Ozean investiert. Das Deutsch-Indonesische Tsunami Frühwarnsystem (GITEWS), das in Jakarta/Indonesien installiert wird, ist eine gemeinschaftliche Entwicklung von neun großen Forschungseinrichtungen in Deutschland sowie weiterer Partner in Indonesien [7].

Die Arbeitsgruppe Tsunami-Modellierung am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtzgemeinschaft (AWI) ist für die Entwicklung und Implementierung des Simulationssystems innerhalb des GITEWS Frühwarnsystems verantwortlich. Wegen der extrem kurzen Vorwarn- und Reaktionszeiten können dabei keine Simulationen in Echtzeit durchgeführt werden. Vielmehr basiert das System auf einer Vielzahl vorher berechneter Szenarien. Im Falle eines Erdbebens werden verschiedenartige Sensordaten mit den vorhandenen Szenarien verglichen. Das am besten passende Szenario wird dann ausgewählt und ergibt die wahrscheinliche Tsunami-Situation. Das Simulationssystem (SIM) besteht also aus verschiedenen Komponenten:

- Ein großes Repository von zuvor berechneten Tsunami Szenarien Dateien;
- Einer Simulationssoftware zur Berechnung der Szenarien – hier insbesondere TsunAWI;
- Einen Selektions-Mechanismus zur Auswahl des wahrscheinlichsten Szenarios;
- Eine kleine und schnell zugreifbare Datenbank mit Szenariendaten an indizierten Sensor-Positionen zum Vergleich mit einlaufenden Sensordaten;
- Eine Post-Prozessierungs-Einheit, mit der entsprechende Datenprodukte wie Überflutungskarten automatisch erstellt werden können.

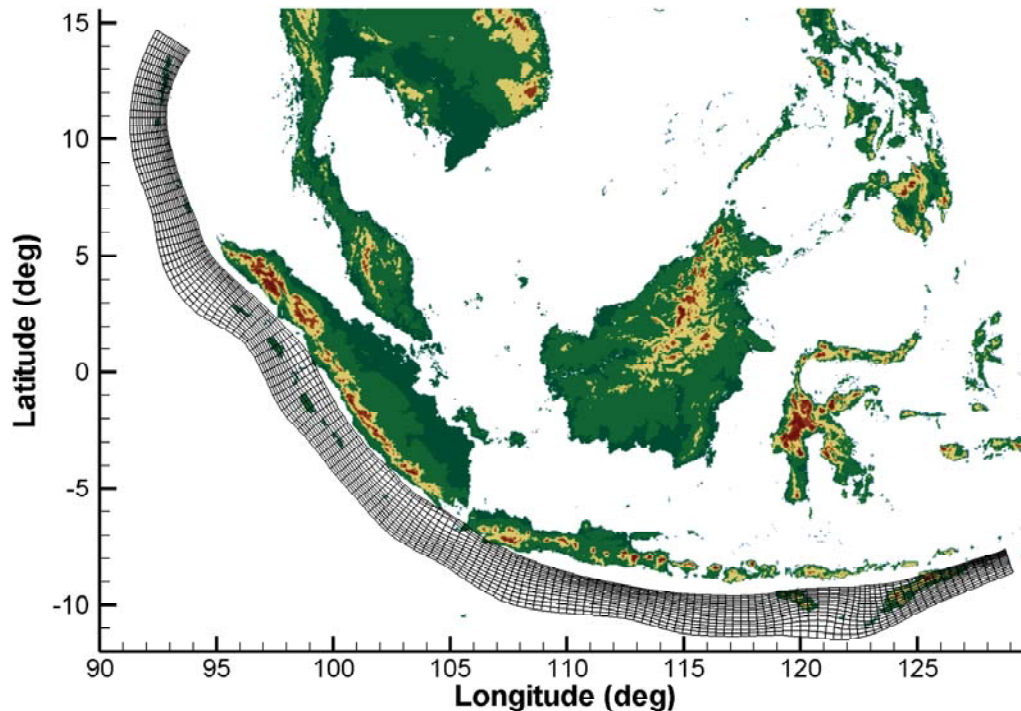


Abb. 1: Gitter mit einzelnen Platten, aus denen die Bodendeformation nach einem Erdbeben berechnet werden kann (Abbildung von A. Babeyko, GFZ Potsdam).

In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt der Darstellung auf der Szenario-generierenden Software TsunAWI. Bevor mit der Beschreibung der Hintergründe der Tsunami-Modellierung begonnen wird, sollen nun aber ein paar Fakten über die Tsunami-Entstehung im Indischen Ozean genannt werden.

1.1 Tsunamis im Indischen Ozean

Etwa 90% der Tsunamis in Indonesien werden durch Erdbeben verursacht, die eine Meeresboden-Anhebung verursachen [10]. In der Zeit zwischen 1600 und 1999 fanden etwa 100 Tsunamis in der Region statt, was bedeutet, dass etwa alle vier Jahre ein zerstörerischer Tsunami auftritt. Die restlichen 10% der Tsunamis sind durch Vulkan-Eruptionen (9%) oder Hangrutschungen (1%) verursacht.

Während die geologische Forschungsgemeinschaft noch über die Rolle der horizontalen Impuls-Übertragung für die Tsunami Formation debattiert [18], wird in unseren Simulationen lediglich eine vertikale Boden-Deformation als Anfangsbedingung angenommen. In der momentanen Version des Simulationssystems wird auch nur die Tsunami-Anregung durch Erdbeben berücksichtigt, da die Generierung von Tsunamis durch Vulkanausbrüche oder Rutschungen sehr viel komplexer ist und noch weitgehend der theoretischen Fundierung bedarf.

Traditionell wird die Bodenanhebung durch eine statische Bewegung einer einzelnen Erdplatte modelliert (siehe [12], [13]). Die Simulationen in diesem Artikel verwenden jedoch einen fortschrittlicheren Ansatz, bei dem 2250 Mikro-Platten (Patches) von ca. 45x15 km Größe in einem Gitter entlang des Sundagrabens nahe der Indonesischen Küste zum Indischen Ozean (Sumatra, Java, Bali) angeordnet sind (siehe Abbildung 1). Diese Patches werden jeweils durch ein 1D Erdkrustenmodell beschrieben. Größere Erdbeben werden durch mehrere dieser Patches repräsentiert, die nach gängigen Skalierungsfunktionen die Anregungsenergie verteilen.

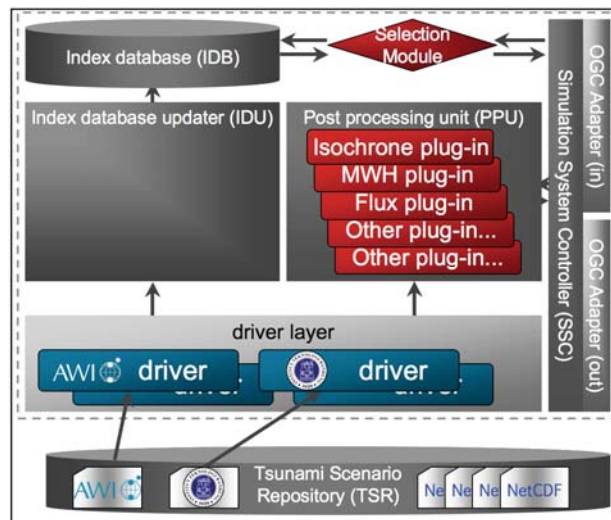


Abb. 2: Interne Struktur des GITEWS Simulations-Systems.

2 Die Rolle der numerischen Simulation im GITEWS Tsunami Frühwarnsystem

Anders als bisherige Tsunami Frühwarnsysteme, die im wesentlichen auf der Auswertung der seismischen (Erdbeben) Parameter für die Erstellung der Lagebeurteilung basieren (siehe [6] und [17]), wird im GITEWS System auf die gleichzeitige Auswertung von verschiedenen Messwerten gebaut. Um innerhalb weniger Minuten ein qualifiziertes Lagebild der Tsunami-Auswirkungen und der Situation im Nahfeld zu erhalten, wird das aktuellste seismische Netzwerk mit Auswertungs-Software SeisComP3 verwendet [22]. Zusätzlich werden Daten aus Wellenpegeln and der Küste sowie im tiefen Ozean (Bojen), sowie GPS-Sensoren zur Messung der Erdboden-Verschiebung in Echtzeit gesammelt.

Die so gewonnenen Daten werden mit den vorher berechneten Szenarien verglichen. Dabei wird der Vergleich durch einen gewichteten 2-Norm Ansatz für mehrfache Sensorwerte realisiert. Eine Vorwärts-Simulation in Echtzeit unter Umgehung von vorberechneten Szenarien wäre dabei im Prinzip auch möglich. Allerdings ist diese Vorgehensweise nicht unbedingt geeignet, denn die Inversion der Quelle (also der Anfangsbedingung) der Tsunami-Ausbreitung ist ein schlecht gestelltes Problem. Mit anderen Worten, ein kleiner Fehler in den Messungen kann zu großen Unterschieden bei der Quellen-Bestimmung führen. Eine Tsunami-Simulation mit diesen eventuell stark gestörten Anfangsbedingungen würde somit den Fehler weiter transportieren und sogar verstärken und somit zu weitgehend falschen Aussagen für die Tsunami-Auswirkungen führen. Daher wird hier die Strategie verfolgt, eine Reihe von kompletten Szenarien im Voraus zu berechnen und dann einen konsistenten (möglicherweise mit Messfehlern behafteten) Datensatz mit den jeweils konsistenten indizierten Szenarien-Daten zu vergleichen. Das Szenario mit der besten Übereinstimmung und weitere gut passende Szenarien werden dann zur Lagebeurteilung und Entscheidungsunterstützung herangezogen.

Das SIM besteht aus mehreren Komponenten, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Die Schnittstellen sind durch Standard-konforme Web-Services nach Open GIS Consortium (OGC) realisiert. Ein Controller steuert die internen Datenflüsse. Die zentrale Logik stellt die Selektions-Einheit bereit. In ihr wird der Multi-Sensor Auswahl-Algorithmus implementiert. Diese Einheit arbeitet mit indizierten virtuellen Sensorwerten aus den zuvor berechneten Szenarien, welche wiederum für den schnellen Zugriff in der vergleichsweise kleinen Index-Datenbank gespeichert sind. Ein Index-Datenbank-Updater füllt die Index-Datenbank automatisch aus Roh-Daten im Szenario-Repository. Um verschiedene Szenarien-Typen und die Integration von Szenarien von Drittanbietern transparent für die internen Module des SIM zu realisieren, wird eine Software-Ebene von Szenario-Treibern (driver) eingesetzt. Schließlich ist eine Post-Processing-Einheit für die Aufbereitung der Daten – beispielsweise als Karte – verantwortlich. Diese Einheit besteht aus verschiedenen Plug-Ins, über die sich mögliche Nutzungen anpassen lassen. Die Post-Processing-Einheit kann entweder nach einem Selektionsprozess oder im Vorhinein mit entsprechenden Szenario IDs angesprochen werden.

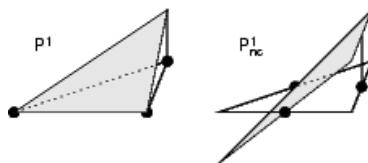


Abb. 3: Konformes P^1 (links) und nicht-konformes P^1_{NC} (rechts) lineares Lagrange Element.

3 Beschreibung des finite Elemente Models TsunAWI

Die Basis aller Szenario-Berechnungen ist die numerische Simulationssoftware TsunAWI, die auf unstrukturierten finite Elemente Gittern basiert [2].

3.1 Flachwasser Gleichungen

Wie die meisten aktuellen operationellen Tsunami Simulationsprogramme (siehe beispielsweise [9] und [20]) verwendet auch TsunAWI die nicht-linearen Flachwassergleichungen als Basis für die Modellierung der Wellenausbreitung. Diese Gleichungen sind gegeben durch

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}H) = 0, \tag{1}$$

für die Kontinuitätsgleichung (Masseerhaltung). Dabei ist $H(\mathbf{x},t)=(\zeta(\mathbf{x},t)+h(\mathbf{x}))$ die Gesamtwassertiefe aus ζ , der Oberflächenauslenkung (sea surface height, SSH) und h der Wassertiefe vom Boden bis zum mittleren Meeresspiegel. $\mathbf{v}(\mathbf{x},t)$ ist die Horizontalgeschwindigkeit in Vektorform mit \mathbf{x} und t den Koordinaten in Raum und Zeit. Die Impulsgleichungen lauten

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} + f \times \mathbf{v} + g\nabla\zeta + \frac{C_d\mathbf{v}|\mathbf{v}|}{\rho H} - \nabla \cdot (A_h\nabla\mathbf{v}) = 0, \tag{2}$$

wobei f der Coriolis Parameter ist, g die Gravitations-Konstante, C_d ist ein Reibungs-Koeffizient, A_h der horizontale Wirbel-Viskositäts-Koeffizient. Diese Gleichungen sind gültig im inneren eines berandeten Gebietes (des Ozeans) und eines beschränkten Zeitintervalls $\Omega \setminus \partial\Omega \times [0, T]$, wobei noch geeignete Randbedingungen auf dem Gebietsrand $\partial\Omega$ angegeben werden müssen. Strahlungs-Randbedingungen werden an den offenen Ozeanrändern verwendet, und so genannte no-slip (reflektierende) oder Überflutungs-Randbedingungen gelten an den Küsten.

3.2 Finite Elemente Diskretisierung

Gleichungen (1) und (2) werden nun in Anlehnung an einen Ansatz von Hanert et al. [8] diskretisiert. Die spezielle Kombination von finiten Elementen besteht aus einem konformen P^1 Element für die Modellgrößen H , ζ , and h . Die Geschwindigkeitskomponenten werden auf einem nicht-konformen P^1_{NC} Element dargestellt, bei dem die Unbekannten auf den Kanten definiert sind (siehe Abbildung 3). Diese Kombination von Elementen hat sich als stabil und frei von numerischen Moden herausgestellt. Bezeichnen wir die Basisfunktionen auf P^1 -Elementen mit ϕ und diejenigen auf P^1_{NC} -Elementen mit \mathbf{w} , so kann man Gleichungen (1) mit dem üblichen Ritz-Ansatz schreiben:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} \phi - H\mathbf{v} \cdot \nabla\phi \right) d\Omega + \int_{\partial\Omega} H\phi\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\Gamma = 0, \quad \forall \phi. \tag{3}$$

Dabei haben wir partielle Integration angewendet, um die Ableitungen auf die Basisfunktionen zu überführen. \mathbf{n} bezeichnet den äußeren Normalenvektor. Analog schreibt sich Gleichung (2):

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{w} - (\nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{w}))\mathbf{v} + (f \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{w} + g\nabla\zeta \cdot \mathbf{w} + \frac{C_d\mathbf{v}|\mathbf{v}|}{\rho H} \cdot \mathbf{w} - (A_h\nabla\mathbf{v}) \cdot \nabla\mathbf{w} \right) d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\mathbf{v}\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{w} d\Gamma = 0, \quad \forall \mathbf{w}. \tag{4}$$

Wieder haben wir partielle Integration verwendet, um die Ableitung von \mathbf{v} auf \mathbf{w} zu übertragen. Darüber hinaus haben wir die Argumente aus Hanert et al. verwendet, um anzunehmen, dass

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot A_h \nabla \mathbf{v}) \cdot \mathbf{w} \, d\Omega \approx \int_{\Omega} (A_h \nabla \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{w}) \, d\Omega. \quad (5)$$

Um nun eine berechenbare Form der Gleichungen zu erhalten, verwenden wir den üblichen Galerkin-Ansatz für die räumliche Darstellung der Größen H , ζ , h , and \mathbf{v} als Linearkombinationen von Basisfunktionen. Zum Beispiel

$$\zeta(\mathbf{x}) \approx \sum_{i=1}^N \zeta_i \phi_i(\mathbf{x}), \quad \mathbf{v}(\mathbf{x}) \approx \sum_{j=1}^M \mathbf{v}_j \mathbf{w}_j(\mathbf{x}),$$

wobei ζ_i und \mathbf{v}_j die Koeffizienten sind, während ϕ_i und \mathbf{w}_j die Basisfunktionen zum i -ten Knoten bzw. zur j -ten Kante darstellen. Das Gebiet Ω wird nun trianguliert, d.h.

$$\bar{\Omega} = \bigcup_{k=1}^L \bar{\tau}_k, \quad \tau_i \cap \tau_j = \emptyset \quad (i \neq j),$$

wobei τ_k das Innere der Dreiecke oder Elemente des triangulierten Gitters ist (siehe Abschnitt 3.3). Diese Elemente werden eingeführt, um einen beschränkten Träger für die Basisfunktionen zu konstruieren. Wegen der nicht-konformen (d.h. nicht-stetigen) Basisfunktionen für die Geschwindigkeiten muss ein zusätzlicher Term eingeführt werden, um die Glattheit der Lösung zu erzwingen. Dieser Term agiert auf den Elementgrenzen Γ und ist gegeben durch

$$\int_{\Gamma} \langle \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\lambda} \cdot [\mathbf{w}] \, d\Gamma, \quad \Gamma = \bar{\tau}_i \cap \bar{\tau}_j, \quad (6)$$

mit \mathbf{n} dem äußeren Normalenvektor (relativ zur Elementgrenze) und

$$\begin{aligned} \langle \nu \rangle_{\lambda} &= \left(\frac{1}{2} + \lambda \right) \nu|_{\tau_i} + \left(\frac{1}{2} - \lambda \right) \nu|_{\tau_j}, \quad \lambda \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right], \\ [\nu] &= \nu|_{\tau_i} - \nu|_{\tau_j}, \end{aligned}$$

das gewichtete Mittel bzw. der Sprung an der Elementgrenze. Unter Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit (für den Moment) und unter Verwendung weiterer Vereinfachungen wie in [8], erhält man die diskrete Form der Kontinuitätsgleichung

$$\sum_{k=1}^L \int_{\tau_k} \left(\frac{\partial \zeta^h}{\partial t} \phi_l - H^h \mathbf{v}^h \cdot \nabla \phi_l \right) \, d\Omega + \sum_{j=1}^M \int_{\Gamma_j} \left(\sqrt{gH} \zeta^h \phi_l \right) \, d\Gamma = 0, \quad l = 1 : N \quad (7)$$

sowie die diskrete Impulsgleichung

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^L \int_{\tau_k} \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \mathbf{w}_j - \mathbf{v}^h \nabla \cdot (\mathbf{v}^h \mathbf{w}_j) + (f \times \mathbf{v})^h \mathbf{w}_j + g \nabla \zeta^h \mathbf{w}_j + \frac{C_d \mathbf{v}^h |\mathbf{v}^h|}{\rho H^h} \mathbf{w}_j - A_h \nabla \mathbf{v}^h \right) \cdot \nabla \mathbf{w}_j \, d\Omega + \\ + \sum_{j=1}^M \int_{\Gamma_j} \langle \mathbf{v}^h \mathbf{v}^h \cdot \mathbf{n} \rangle_{\lambda} [\mathbf{w}_j] \, d\Gamma = 0, \quad j = 1 : M. \end{aligned} \quad (8)$$

Dabei wurde der Index $k=1:L$ für die L Elemente τ_k des Gitters verwendet, $j=1:M$ für die M inneren Elementgrenzen Γ_j , $l=1:N$ für die N Knoten, und das hochgestellte h bezeichnet die Galerkin-Erweiterung der zugehörigen Größen.

Die Zeitableitung in den Gleichungen wird durch ein explizites zentriertes Differenzenverfahren (leap-frog Schema) realisiert, das beispielsweise auch in [9] verwendet wird. Um numerische Effizienz zu erreichen, wenden wir mass-lumping für die entstehenden linearen Gleichungssysteme an. Auf diese Weise erhält man prognostische explizite Formeln für die Größen \mathbf{v}^h und ζ^h .

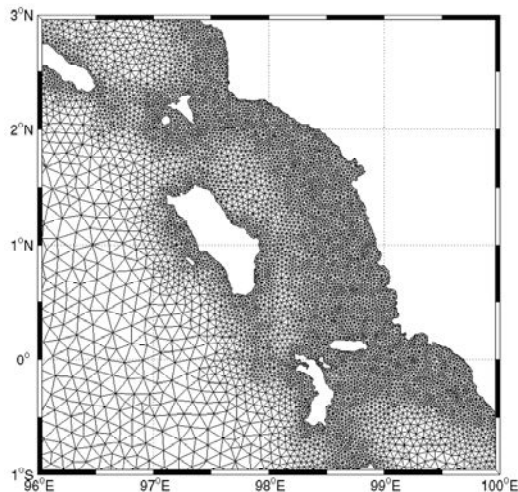


Abb. 4: Ein typisches Gitter für die Berechnung der Tsunami Wellenausbreitung. Der Ausschnitt zeigt die Insel Nias westlich von Sumatra/Indonesien.

3.3 Unstrukturiertes Gitter

Im vorigen Abschnitt wurde das numerische Schema für die Lösung der Flachwassergleichungen für die Wellenausbreitung hergeleitet. Ein wesentlicher Bestandteil jeder Simulation ist jedoch die Gittergenerierung, weil die topographischen Feinheiten im Ozean und an der Küste entsprechend angepasste Triangulierungen erfordern. Da das numerische Verfahren ein explizites Zeitschritt-Verfahren verwendet, müssen starke Stabilitätskriterien – insbesondere die Courant-Friedrichs-Levy (CFL) Bedingung – erfüllt werden. Diese Bedingung verlangt, dass der Zeitschritt Δt und/oder die Gitterweite Δx so eingestellt werden, dass die Courantzahl C für die Wellengeschwindigkeit V durch 1 beschränkt bleibt:

$$C = V \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1.$$

Glücklicherweise helfen die physikalischen Eigenschaften der Wellenausbreitung, um sowohl die Stabilitätsbedingung zu erfüllen, als auch eine erwünscht hohe Auflösung an der Küste zu erzielen. Denn die Wellengeschwindigkeit in linearer Theorie ist proportional zur Wassertiefe, aufgrund der folgenden Beziehung:

$$V \approx \sqrt{gH}.$$

Die Courantzahl wird also etwa konstant sein, wenn die Gitterweite proportional zur Wassertiefe gewählt wird. Zusätzlich sollten schnelle Änderungen der Topographie durch eine höhere Auflösung erfasst werden. Daher ergibt sich als Kriterium für die Wahl der Zellengröße Δx (mit c_t und c_g zwei wählbaren Konstanten):

$$\Delta x \leq \min \left\{ c_t \sqrt{gH}, c_g \frac{h}{\nabla h} \right\}. \tag{9}$$

Die Gittergenerierung startet dann mit gegebenen Bathymetrie- (d.h. der Topographie unterhalb des Meeresspiegels) und Topographie-Daten. Üblicherweise ist ein digitales Geländemodell (digital terrain model DTM bzw. digital elevation model DEM) gegeben. Unsere Simulationen legen meist GEBCO Bathymetrie-Daten zugrunde [19]. Topographiedaten werden meist aus der Shuttle Radar Mission SRTM verwendet [16]. Als weitere Daten kommen zum Einsatz:

- Eine Küstenlinie, definiert als Polygonzug,
- Eine Grenzlinie im offenen Ozean, die das Rechengebiet definiert,
- Eine obere Geländehöhe oder Überflutungsgrenze, die das Gebiet auf dem Land begrenzt. In unseren Gittern ist dies entweder die 50 m Höhenlinie, oder die 7 km Parallele zur Küstenlinie [4].

Mit diesen Eingabewerten wird mittels einer automatischen Delaunay Triangulierungs-Software (triangle von J.R. Shewchuk [14]) ein Gitter des Gebietes erzeugt. Schließlich werden Gitterglättungs-Techniken verwendet, um die Gitterqualität zu erhöhen. Ein Ausschnitt aus einem typischen Gitter ist in Abbildung 4 dargestellt.

3.4 Überflutungs-Berechnung

Die Berechnung der Überflutungs-Randbedingungen folgt den Ideen von Lynett et al. [11]. Dabei werden Gitterzellen als feucht, trocken oder teilweise feucht definiert. Im expliziten Zeitschritt-Verfahren wird die Impulsgleichung mit Wassertiefen-Werten aus dem vorherigen Zeitschritt auf der rechten Seite gelöst, während die Kontinuitätsgleichung mit den soeben berechneten Geschwindigkeits-Werten aus der Impulsgleichung gelöst wird. In der Impulsgleichung muss für Zellen, die an der Grenze zwischen feuchten und trockenen Zellen liegen, der Gradiententerm extrapoliert werden. Im Prinzip müsste der Impuls auch in der Kontinuitätsgleichung extrapoliert werden, dieser Schritt wird jedoch zur Vereinfachung und unter Inkaufnahme eines leichten Masseverlustes im Überflutungsschema vernachlässigt.

Es wird also lediglich in der Kontinuitätsgleichung eine Extrapolation von Werten von ζ in die trockenen Zellen durchgeführt. Zwei Verfahren werden dabei angewendet:

- Eine lineare Extrapolation basierend auf der finite Elemente Darstellung von ζ ,
- Eine lineare Ausgleichs-Methode nach den kleinsten Fehlerquadraten, welche die nächsten feuchten Nachbarknoten in die Berechnung einbezieht. Dieses Verfahren ergibt leicht bessere Ergebnisse in Bezug auf die Glattheit und Genauigkeit der Lösung, ist allerdings sensitiver gegenüber Störungen in der Topographie.

Diese Überflutungs-Berechnung wurde mit Hilfe eines analytischen Testfalls validiert. Die Ergebnisse werden im nächsten Kapitel beschrieben.

4 Validierung von TsunAWI

Um für den operationellen Betrieb eingesetzt zu werden, muss die Tsunami Simulations-Software validiert und getestet werden. Neben den üblichen Tests auf Korrektheit und Fehlerfreiheit, wird ein Satz von zunehmend komplexen Funktionalitätstests verwendet. Diese Tests sind mit einer internationalen Gruppe von Tsunami-Wissenschaftlern abgestimmt. Einfache Tests umfassen die Überprüfung der Fluktuation der Masse, welche von TsunAWI exakt erhalten wird. Diese Eigenschaft resultiert aus dem gewählten Diskretisierungsschema (Kontinuitätsgleichung in Flussform verbunden mit strukturerehaltender finite Elemente Form). Analytische Testfälle in quasi-eindimensionaler Formulierung bilden die nächste Komplexitätsstufe der Tests. Ein solches Beispiel ist die Prüfung des Verfahrens, das Zurückweichen und anschließende Überfluten eines ebenen, leicht geneigten Strandabschnitts zu zeigen. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

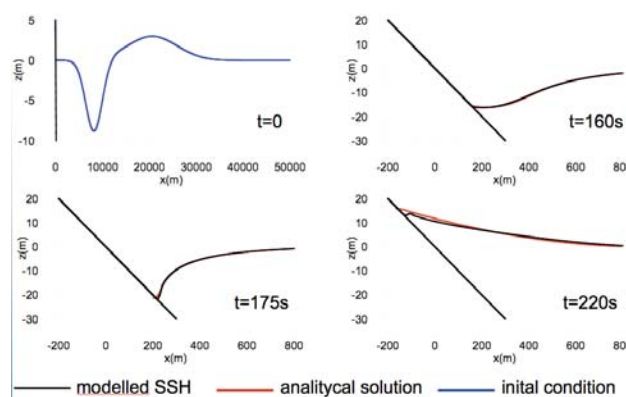


Abb. 5: Ergebnis eines analytischen Testfalls für die Berechnung des Trockenfallens und der Überflutung eines ebenen Strandabschnitts. Simuliertes (schwarz) gegen analytisches (rot) Ergebnis.

Laborexperimente bilden die nächste Stufe von Tests. Und schließlich gibt es von einigen Tsunami-Ereignissen Feldmessungen, die von der Tsunami-Simulation realitätsnah wiedergegeben werden müssen. Der Tsunami vom 26. Dezember 2004 (Großer Andamanen-Sumatra Tsunami) hat tragischerweise eine große Anzahl wertvoller Messdaten geliefert, die nun zur Modell-Evaluierung verwendet werden können [23]. Andere Tsunamis, die für Evaluierungen herangezogen werden, sind der Hokkaido Nansei-Oki Tsunami von 1993 [15], und der Java Tsunami vom 17. Juli 2006 [5]. Schließlich können auch Modellvergleiche zur Validierung von Simulationsergebnissen dienen.

All diese Tests wurden mit TsunAWI erfolgreich durchgeführt. Eine umfassende Dokumentation wird in Kürze verfügbar sein.

5 Beispiele für die Anwendung von TsunAWI

Eine der wichtigsten Anwendungen eines Tsunami-Ausbreitungsmodells im Rahmen von Frühwarnung ist die Bereitstellung von Ankunftszeiten. Die einfache Berechnung der Ankunftszeiten mit Hilfe linearer eindimensionaler Strahl-Verfolgungs-Verfahren mag für vorläufige Schadens-Einschätzungen noch durchführbar sein. Im Falle von komplexen Küstengeometrien und vor allem im Nahfeld (also in der Nähe des Tsunami-Herdes) ist dieser Ansatz jedoch nicht ausreichend. Daher ist die Visualisierung der Isochronen (Linien gleicher Ankunftszeit) ein effektiver Weg, die Situation zu erfassen und Unterstützung bei der Warnentscheidung der lokalen Warnzentren zu geben. Ankunftszeit-Information ist aber auch für die Vorbereitung auf eventuelle Ereignisse wichtig. Katastrophen-Manager müssen die zeitlichen Beschränkungen kennen, um ihre Hilfsmaßnahmen zu planen.

Für die vorsorgende Schadens- und Risikoerhebung sind weitere Informationen von Interessen. In den Tsunami-Szenarien, die mit TsunAWI berechnet werden, sind folgende Werte abrufbar:

- Ankunftszeit der ersten Welle;
- Meeresspiegel-Höhe (SSH, ζ) alle 60 Sekunden;
- Maximale SSH;
- Maximale absolute Geschwindigkeit;
- Maximale Flussdichte (für die Erhebung von Auswirkungen auf Gebäude);
- Anfangs Boden-Auslenkung.

Diese Werte liegen auf den Gitterknoten vor. Die Roh-Daten werden im NetCDF-Format gespeichert, das ein Plattform-unabhängiges selbst beschreibendes binäres Datenformat bereit stellt. Das Post-Processing-Modul des SIM bereitet diese Daten zu ESRI SHP Dateien auf, die sich für die Visualisierung und Analyse in Geo-Informationssystemen (GIS) eignen.

Grundsätzlich werden TsunAWI Ergebnisse für zwei wesentliche Zwecke genutzt:

1. Um einen Satz von Szenarien für das Tsunami Repository des SIM zu generieren,
2. Um Szenarios für die Schadenserhebung und Überflutungsstudien zu erzeugen.

Wir zeigen im Folgenden Beispiele dieser beiden Anwendungsfälle.

5.1 Szenarien Berechnungen und Sensitivitätsanalyse

Eine große Zahl von vorher berechneten Szenarien dient als Basis für mögliche zu erwartende Situationen im SIM Tsunami Repository. Jedes der Szenarien stellt eine mögliche Lokation und Stärke eines Tsunami-auslösenden Erdbebens mit der dazugehörigen Erdkrustenverschiebung an bekannten GPS-Stationen, sowie der entsprechenden Meeresboden-Anhebung dar. Im Nahfeld ist die exakte Kenntnis der Anregung wichtig für die präzise Einschätzung der Gefährdungssituation.

Werfen wir beispielsweise einen Blick auf Padang, der Hauptstadt der Provinz West-Sumatra mit etwas unterhalb einer Million Einwohnern. Nach gängiger Expertenmeinung ist diese Stadt von einem größeren Erdbeben mit Stärke bis zu 8,5 bedroht, weil die Kontinentalplatten dort blockiert sind [3]. Um die Verletzlichkeit Padangs zu untersuchen, muss die Sensitivität gegenüber der Erdbebenlage untersucht werden. Hierfür wird eine Reihe von Szenarien betrachtet. Es zeigt sich, dass nahe zusammen liegende Ereignisse zu sehr unterschiedlichen Auswirkungen führen können. Die spezielle Situation Padangs, in der die vorgelagerte Mentawai Inselgruppe die Tsunami Energie für Erdbeben im tiefen Ozean von Padang fernhält, diese Tsunami Energie für Erdbeben in Küstennähe aber einfängt, ergibt eine sehr hohe Sensitivität gegenüber der exakten Lage der Bruchzone (siehe Abbildung 6).

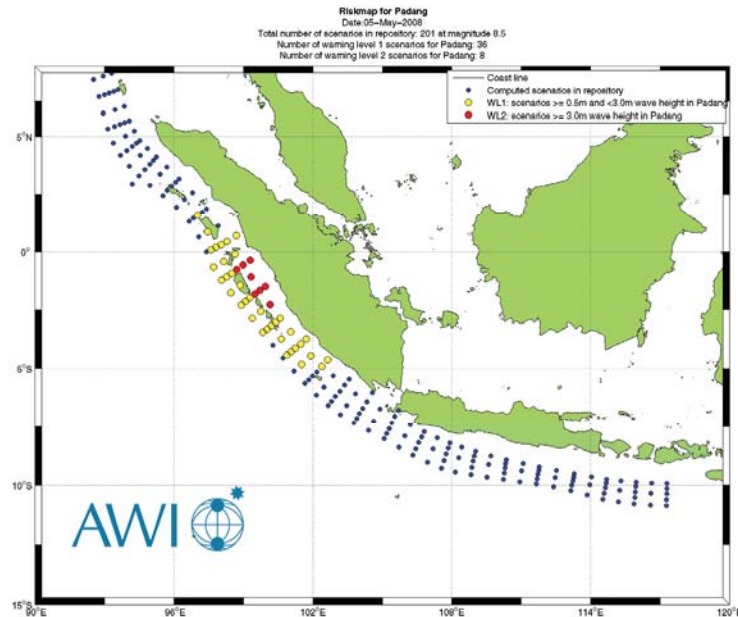


Abb. 6: Epizentren von Tsunami-Szenarien der Erdbebenstärke 8,5, die in Padang Warnstufe 1 (gelb, Wellenhöhe an der Küsten zwischen 0.5 und 3 m) und Warnstufe 2 (rot, > 3 m) auslösen.

5.2 Überflutungs-Berechnung für Bali

Eine der bekanntesten Touristenregionen Indonesiens liegt auf Bali. Viele Resorts und Hotels liegen direkt am Strand. Die Region um Denpasar mit einem internationalen Flughafen mit ca. 1,5 Mio Check-ins pro Jahr hat eine Bevölkerung von etwa 500.000. Große Teile des Territoriums liegen niedriger als 25 m über dem Meeresspiegel und sind daher mögliche Überflutungsregionen. Um Planungsgrundlagen für künftige Tsunami-Vorbereitungen bereit zu stellen, wurden Überflutungs-Berechnungen für die Region um Denpasar durchgeführt. Genaue Topographie und Bathymetrie Daten, speziell für den küstennahen Bereich, ist notwendig für realitätsnahe Ergebnisse. Das Gitter, das in diesen Berechnungen verwendet wird, hat eine Zellengröße von etwa 80 m in Küstennähe und an Land. Die Überflutungskarte für den schlimmsten anzunehmenden Fall ist in Abbildung 7 dargestellt. Sie zeigt zerstörerische Wasserstände von 5 m für ein Erdbeben der Stärke 8,5 etwa 150 km südwestliche von Denpasar. Zu beachten ist, dass der Flughafen besonders hohe Wasserstände zu verkraften hat, was für eventuelle zukünftige Evakuierungs- und Hilfsmaßnahmen berücksichtigt werden muss. Überflutungsgrenzen, die mehr als 3 km von der Küstenlinie entfernt im Inland liegen, lassen an einigen Stellen auch horizontale Evakuierungs-Pläne nicht ausreichend erscheinen, so dass an vertikale Evakuierungen gedacht werden muss.

6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde ein neues, auf unstrukturierten finite Elemente Gittern basierendes Tsunami Ausbreitungs- und Überflutungsmodell, TsunAWI, vorgestellt. Es verwendet die nicht-linearen Flachwassergleichungen und beinhaltet Coriolis Term, Bodenreibung und Viskosität als Antriebsterme. Das Diskretisierungs-Schema implementiert lineare Lagrange-Elemente, die konform sind für die Störung des Meeresspiegels und nicht-konform für die Geschwindigkeiten.

Fortschrittliche semi-automatische Gittergenerierung erlaubt die sehr genaue und lokal hohe Auflösung an der Küste bei gleichzeitiger grober Auflösung (und daher Effizienz) im tiefen Ozean. Dieser nahtlose Übergang von großer zu kleiner Gitterweite muss nicht mit künstlichen numerischen Effekten (wie Reflexionen an Gittergrenzen) erkauf werden.

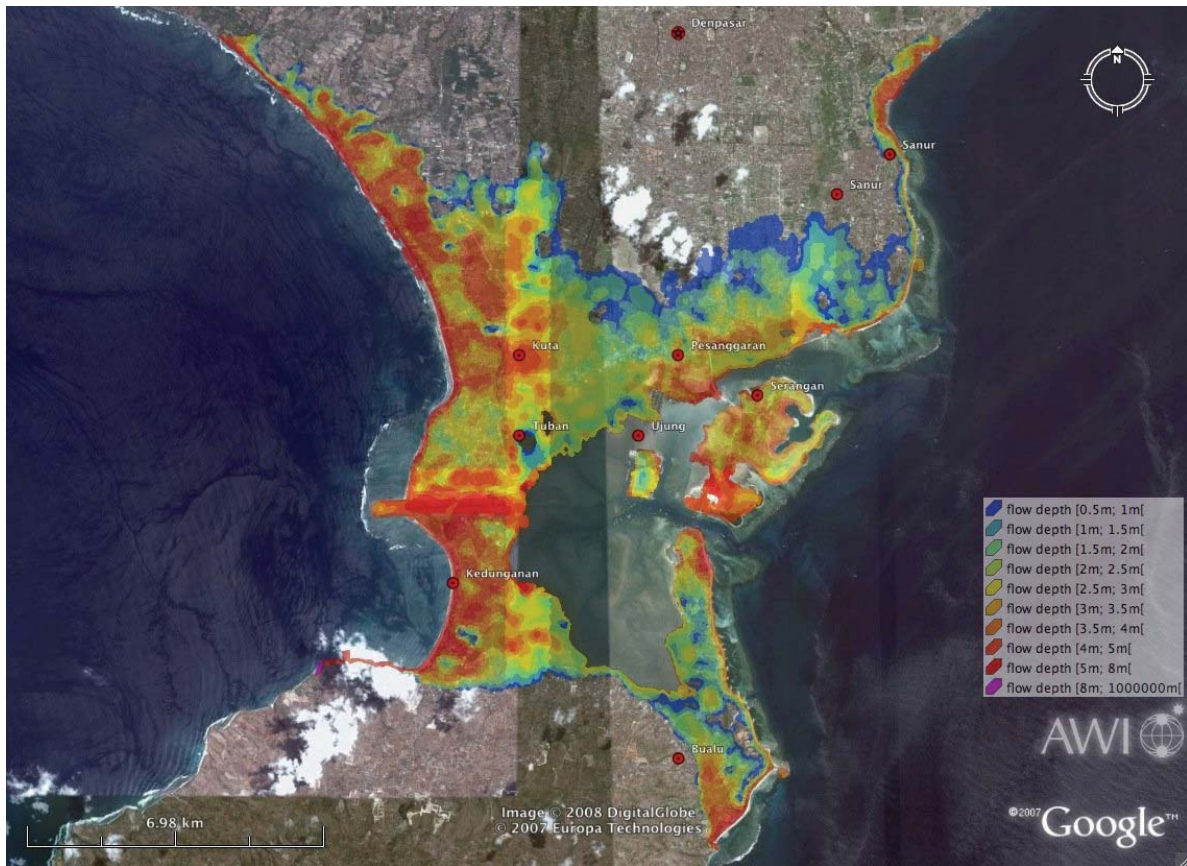


Abb. 7: Überflutungskarte für Denpasar, Bali/Indonesien.

TsunAWI ist anhand von analytischen Testfällen wie auch Modellvergleichen und realen Feld-Messungen validiert. Es hat sich als sehr genaues und nützliches Simulations-Tool für Überflutungs-Studien, Sensitivitäts-Analysen und Gefahreneerhebungen herausgestellt. Tsunami Szenarien, die mit TsunAWI erstellt wurden, sind im Simulationssystem des GITEWS Tsunami Frühwarnsystems im Einsatz, welches im November 2008 in Jakarta/Indonesien installiert wird.

Zukünftige Entwicklungen werden eine grundlegende Code-Überarbeitung betreffen, um mit gängigen Software-Entwicklungs-Standards schritt zu halten und die Wartbarkeit zu erhöhen. Parallelisierung ist ein weiterer wichtiger Entwicklungsstrang, um noch detailliertere Simulationen in noch kürzerer Zeit durchführen zu können, und um später eine Echtzeitfähigkeit zu erzielen. Weitere Tests sind ebenfalls geplant, um die Stabilität und Zuverlässigkeit der Software weiter zu erhöhen.

Der Quelltext der Software TsunAWI wird unter einer GPL-artigen Softwarelizenz freigegeben werden, die es Wissenschaftlern und Ingenieuren erlaubt, in Tsunami-gefährdeten Gebieten eigene Simulationen durchzuführen.

7 Danksagungen

Der Autor bedankt sich bei den Mitgliedern der Tsunami-Modellierung am Alfred-Wegener-Institut für ihre wertvollen Beiträge: Alexey Androsov, Lars Mentrup, Florian Klaschka, Sven Harig, Widodo Pranowo, und Haiyang Cui. Abbildung 7 wurde mit einem Tool zur Erzeugung von Google Earth kml-Dateien von Pascal Schmitt erzeugt. Teile der ursprünglichen Implementierung von TsunAWI stammen von Dmitry Sein und Dmitry Sidorenko. Abbildung 1 wird mit freundlicher Genehmigung von A. Babeyko wiedergegeben.

8 Literatur

- [1] Babeyko, A. Y. and Sobolev, S. V.: "Modeling Stress in the Subducting Slab With Complex Elasto-Visco-Plastic Rheology", EOS Trans. AGU, 2006, Vol. 87, Abstract T13C-0521.
- [2] Behrens, J., Androsof, A., Braune, S., Danilov, S., Harig, S., Schröter, J., Sein, D. V., Sidorenko, D., Startseva, O., Taguchi, E.: "TsunAWI Technical Documentation Part I: Mathematical, numerical and implementation concepts", Tsunami Project Documentation No. 004, 2007, Bremerhaven, Germany.
- [3] Borrero, J. C., Sieh, K., Chlieh, M., and Synolakis, C. E.: "Tsunami inundation modeling for western Sumatra", PNAS, 2006, Vol. 103, pp. 19673–19677.
- [4] Braune, S., Harig, S., Behrens, J., Schröter, J., and Hiller, W.: "Erzeugung eines geeigneten Finite-Elemente-Gitters für Tsunami-Simulationsrechnungen aus mehreren Datenquellen", in *Angewandte Geoinformatik 2007. Beiträge zum 19. AGIT-Symposium Salzburg* (Strobl, J. and Blaschke, T. and Griesebner, G.), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007, pp. 85–90.
- [5] Fritz, H. M., Kongko, W., Moore, A., McAdoo, B., Goff, J., Harbitz, C., Uslu, B., Kalligeris, N., Suteja, D., Kalsum, K., Titov, V., Gusman, A., Latief, H., Santoso, E., Sujono, S., Djulkarnaen, D., Sunedar, H., and Synolakis, C. E.: "Extreme runup from the 17 July 2006 Java tsunami", *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, p. L12602 ff.
- [6] Furumoto, A. S. and Tatehata, H. and Morioko, C.: "Japanese Tsunami Warning System", *Science of Tsunami Hazards*, 1999, Vol. 17, pp. 85–105.
- [7] GITEWS Homepage: <http://www.gitews.de>.
- [8] Hanert, E., Le Roux, D. Y., Legat, V., and Deleersnijder, E.: "An efficient Eulerian finite element method for the shallow water equations", *Ocean Modelling*, 2005, Vol. 10, pp. 115–136.
- [9] Imamura, F., Yalciner, A. C., Ozyurt, G.: "Tsunami Modelling Manual", 2006.
- [10] Latief, H., Puspito, H. T., and Imamura, F.: "Tsunami Catalog and Zones in Indonesia", *Journal of Natural Disaster Science*, 2000, Vol. 22, pp. 25–43.
- [11] Lynett, P. J., Wu, T.-R. and Liu, P. L.-F.: "Modeling wave runup with depth-integrated equations", *Coastal Engineering*, 2002, Vol. 46, pp. 89–107.
- [12] Mansinha, L. and Smylie, D. E.: "The displacement fields of inclined faults", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, Vol. 61, pp. 1433–1440.
- [13] Okada, Y.: "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, Vol. 75, pp. 1135–1154.
- [14] Shewchuk, J. R.: "Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator", in *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering* (Lin, M. C. and Manocha, D.), Springer Verlag, 1996, Vol. 1148, pp. 203–222.
- [15] Shuto, N. and Matsutomi, H.: "Field Survey of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake Tsunami", *PAGEOPH*, 1995, Vol. 144, pp. 649–663.
- [16] Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): <http://www.dlr.de/srtm/>.
- [17] Sokolowski, T. J.: "The U.S. West Coast and Alaska Tsunami Warning Center", *Science of Tsunami Hazards*, 1999, Vol. 17, pp. 49–55.
- [18] Song, Y. T., Fu, L.-L., Zlotnicki, V., Ji, C., Hjorleifsdottir, V., Shum, C. K., and Yi, Y.: "The role of horizontal impulses of the faulting continental slope in generating the 26 December 2004 tsunami", *Ocean Modelling*, 2008, Vol. 20, pp. 362–379.
- [19] The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO): "GEBCO 1-minute global bathymetric grid", <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/grid/1mingrid.html>.
- [20] Titov, V. and Gonzalez, F. J.: "Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model", NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112, 1997, Seattle, WA, USA.
- [21] Wang, R., Martin, F. L., and Roth, F.: "Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust—FORTRAN programs EDGRN/EDCMP", *Computers & Geosciences*, 2003, Vol. 29, pp. 195–207.
- [22] Weber, B., Becker, J., Hanka, W., Heinloo, A., Hoffmann, M., Kraft, T., Pahlke, D., Reinhardt, J., Saul, J., and Thoms, H.: "SeisComp3 - automatic and interactive real time data processing", *Geophysical Research Abstracts*, 2007, Vol. 9, p. 09219.
- [23] Wijetunge, J. J.: "Tsunami on 26 December 2004: Spatial Distribution of Tsunami Height and the Extent of Inundation in Sri Lanka", *Science of Tsunami Hazards*, 2006, Vol. 24, pp. 225–239.

Der Autor

Jörn Behrens (Joern.Behrens@awi.de)
 Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research,
 27570 Bremerhaven, Germany