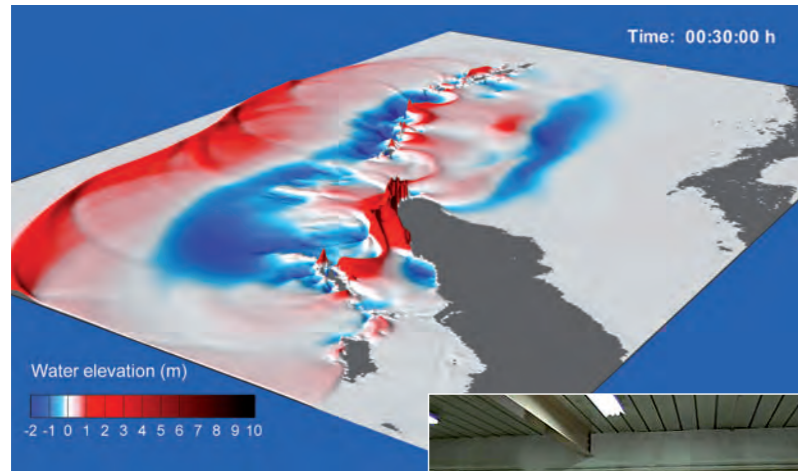


TSUNAMI-WARNUNG



Der Tsunami vor der Küste Sumatras wird ausgelöst durch die vom Erdbeben verursachte Verformung des Meeresbodens. Er breitet sich mit hoher Geschwindigkeit über das offene Meer aus, wird in Küstennähe „aufgestaut“ und überflutet in einem komplizierten Ablauf das Land. Sämtliche Prozesse können angenähert physikalisch modelliert, mathematisch beschrieben und auf einem Computer simuliert werden.



Foto: H. Letz, GFZ
Erdbebenbeobachtung im Warnzentrum in Jakarta, Indonesien.

Verschiebung der GPS-Stationen – die am besten zu der Situation passende vorberechnete Simulation herausgesucht. Dazu werden die gemessenen Parameter mit den Werten aller Szenarien in der Datenbank verglichen, und diejenige Simulation ausgewählt, die die geringste Abweichung aufweist. Diese Simulation wird in eine Gefährdungskarte, in denen die zu erwartende Wellenhöhe und -ankunftszeit für die verschiedenen Küstenbereiche zu erkennen sind, für die betreffenden Küstenabschnitte umgesetzt. Der gesamte Prozess läuft im Daten- und Frühwarnzentrum in wenigen Sekunden automatisiert ab. Die Karten werden dann vom Warnzentrum den zuständigen Behörden in

den betroffenen Gebieten zur Verfügung gestellt, so dass diese ihrerseits alle notwendigen Maßnahmen in die Wege leiten können.

Das Daten- und Frühwarnzentrum: Auslösung des Alarms oder nicht?

Nicht jedes starke Erdbeben löst einen Tsunami aus. Die Entwarnung ist daher genau so wichtig wie die rechtzeitige Warnung. Im Datenzentrum laufen alle Daten zusammen. Hat das automatisch arbeitende Gesamtsystem auf „Alarm“ gestellt, muss im Warnzentrum die Entscheidung getroffen werden, ob alarmiert wird oder nicht. Dabei gibt es verschiedene Abstufungen, in der die Alarmierung verschiedener Organisationseinheiten erfolgt. So wird

bereits nach 5 Minuten, wenn ein starkes Seebeben registriert wurde, ein interner Alarm gegeben und bestimmte Einheiten in den betroffenen Gebieten (Polizei, Feuerwehr, Katastrophenschutz) werden in Bereitschaft versetzt. Im Laufe der nächsten Minuten, wenn Daten von weiteren Messinstrumenten verfügbar und geprüft sind, wird der Alarm entsprechend weiter intensiviert oder auch wieder aufgehoben. Die Warnmeldungen werden über ein Geoinformationssystem mit weiteren Daten wie z.B. Evakuierungskarten, Informationen über Bevölkerungsdichten und kritische Infrastrukturen verschnitten. Im Ergebnis erhält man nach einer Zeit von etwa 10 Minuten ein Warndossier, das als Grundlage für die weiteren Maßnahmen herangezogen werden kann. Die Verteilung der Warnmeldung erfolgt zurzeit in Indonesien direkt vom Warnzentrum in Jakarta aus über verschiedene Kanäle. Wichtigster Kommunikationsweg ist eine direkte Telefonverbindung zu lokalen Polizeistationen, die weitere Aktivitäten wie z.B. Evakuierungen durchführen sollen. Daneben werden über Internet und Fax weitere Institutionen in Indonesien von einer Tsunami-gefährdung unterrichtet. Zusätzlich werden SMS-Meldungen generiert sowie die Rundfunk- und Fernsehkanäle informiert. Ein Naturereignis wie der Tsunami von 2004 kann nicht verhindert werden und solche Katastrophen werden auch bei einem perfekt arbeitenden Alarmsystem weiterhin ihre Opfer fordern. Aber die Auswirkungen einer solchen Naturkatastrophe können mit einem Frühwarnsystem erheblich minimiert werden. Das ist das Ziel von GITEWS. ■

Informationen zum Verhalten bei Starkbeben und Tsunamis finden sich im Merkblatt auf der Homepage des GFZ: <http://www.gfz-potsdam.de>

Weitere Informationen zum Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean: <http://www.gitews.de>

Wissenschaftsjahr 2008
Mathematik
Alles, was zählt

GFZ
Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

TSUNAMI-WARNUNG:

WIE VIEL MATHEMATIK STECKT IN DER WELLE?



Das „German-Indonesian Tsunami Early Warning System“ (GITEWS) ist ein Beitrag der Deutschen Bundesregierung zum Wiederaufbau der Infrastrukturen in der Region des Indischen Ozeans. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES
GEOFORSCHUNGSZENTRUM

Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

Tel.: (0331) 288-1040
Fax: (0331) 288-1044
e-mail: presse@gfz-potsdam.de
www: <http://www.gfz-potsdam.de>

HELMHOLTZ
GEMEINSCHAFT

Stand: 05/08



Der Tsunami vom 26. Dezember 2004 riss fast eine Viertelmillion Menschen in den Tod. Noch Stunden nach dem verheerenden Erdbeben, das die Katastrophe verursachte, starben an den Ufern des Indischen Ozeans viele Menschen, weil sie nicht gewarnt werden konnten. Die Bundesregierung beschloss daher, im Rahmen der deutschen Flutopferhilfe den Aufbau eines Tsunami-Frühwarnsystems für den Indischen Ozean und erteilte der Helmholtz-Gemeinschaft unter Federführung des Deutschen Geoforschungszentrums (GFZ) dazu den Auftrag. Zusammen mit der am stärksten betroffenen Nation Indonesien entwickelt ein Konsortium deutscher Geo- und Meeresforscher das GITEWS (German Indonesian Tsunami Early Warning System), das Ende 2008 den operationellen Betrieb aufnehmen wird und 2010 vollständig aufgebaut in indonesische Hände übergeben wird.

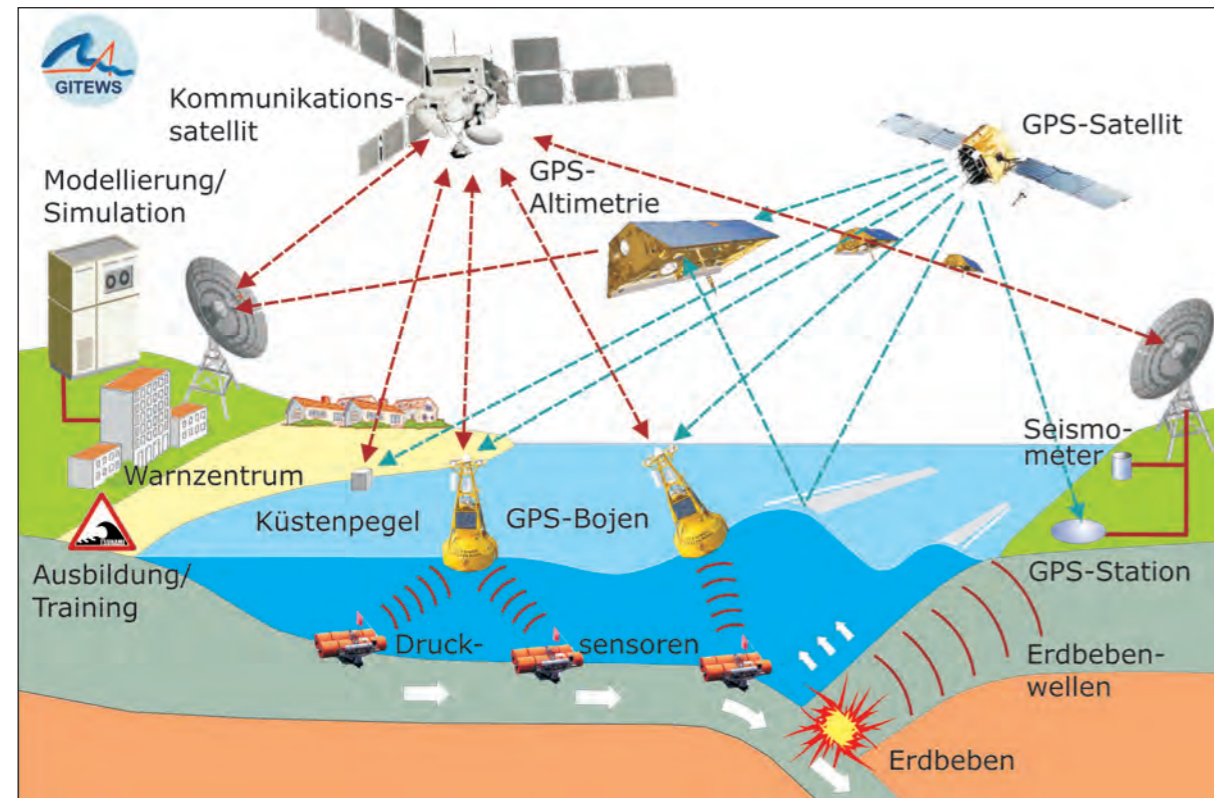
Was ist GITEWS?

GITEWS ist ein Warnsystem, das aus verschiedenen, voneinander unabhängigen Sensorsystemen besteht, deren Daten in einem nationalen Warnzentrum in Jakarta zusammenlaufen und dort ausgewertet werden. Da über 90% aller Tsunamis von Seebeben ausgelöst werden, ist die schnelle Erfassung und Aus-

wertung von Erdbeben das Kernstück für den Tsunami-Alarm. Aber auch die wesentlich selteneren Auslöser wie Hangrutschungen und Vulkanausbrüche müssen erfasst werden. Erzeugt ein solches Ereignis einen Tsunami, muss dieser gemessen, gemeldet und bewertet werden. Dazu dienen verschiedene Sensoren unter Wasser, an Land, auf Bojen und satellitengestützte Messungen. Bei den gewaltigen Datenmengen, die hier anfallen, ist die computer-gestützte (numerische) Mathematik ein unerlässliches Hilfsmittel.

Wie misst man den Tsunami?

Vor Indonesien treffen zwei große Kontinentalplatten aufeinander, wobei sich die Indisch-Australische Platte mit einer Geschwindigkeit von 6 cm pro Jahr unter die Eurasische Platte schiebt. Diese Kollisionszone, die weitgehend parallel zur Küste Indonesiens verläuft, wird Sundabogen genannt. Bei diesem Subduktionsprozess kommt es immer wieder zu heftigen Erdbeben. Wissenschaftler des GFZ haben dort mittlerweile 12 moderne seismische Stationen installiert und diese über Satellitenkommunikation mit etwa 100 internationalen Erdbebenstationen in der Region des Indischen Ozeans zu einem leistungsfähigen



Das Tsunami-Frühwarnsystem besteht aus verschiedenen Sensoren wie Seismometer, Meteo-, Druck- und GPS-Sensoren der Boje, Pegeln und GPS-Sensoren, deren Daten in einem nationalen Warnzentrum zusammenlaufen und ausgewertet werden.

Messnetz verbunden. Die Positionierung der Seismometer und der Aufbau des Netzwerks folgen der Forderung, dass ein Erdbeben, egal an welcher Stelle des Gebiets es auftritt, innerhalb von 2 Minuten an mindestens drei Stationen des Netzes registriert wird und somit eine erste Lokalisierung sehr schnell erfolgen kann. Die Lokalisierung und Magnitudenbestimmung wird dann im Laufe der folgenden Minuten durch die Einbeziehung weiterer Stationen immer sicherer und genauer. Bereits heute ist das System in der Lage, auch starke Erdbeben dort innerhalb von vier Minuten zu erfassen und zu bestimmen - eine enorme Leistung, die auf der von Seismologen und Informatikern des GFZ Potsdam entwickelten Software SeisComP3 beruht.

Darüber hinaus ermöglichen Stationen an Land mit dem Satellitennavigationssystem GPS die Bestimmung des Bodenversatzes, der durch das Erdbeben hervorgerufen wird. Da aber nicht jedes Seebeben einen Tsunami erzeugt, muss dieser im Ozean gemessen und verifiziert werden. Dazu dienen einerseits Druck-sensoren, die entlang des Sundabogens vor der Küste Indonesiens auf dem Meeresboden ausgebracht werden. Wandert der Tsunami über den Sensor, so ändert sich der Wasserdruck durch die Meeresspiegeländerung. Diese Veränderung wird am Meeresboden erfasst und mit Hilfe eines Unterwassermobils zu einer Boje übertragen, von wo die Daten dann per Satellit an das Warnzentrum gesendet werden.

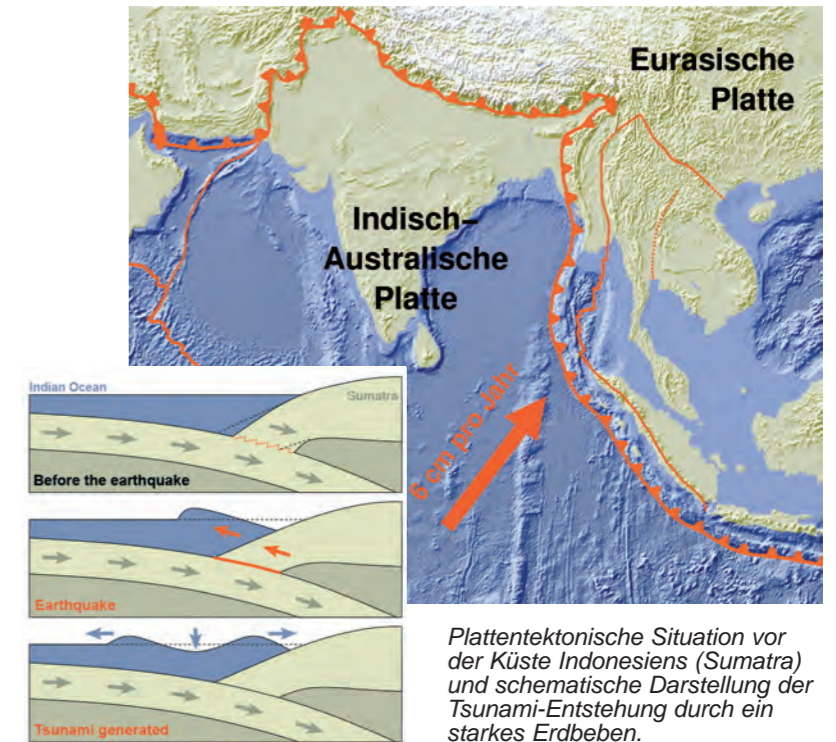
Der Tsunami kann andererseits noch mit GPS-Geräten registriert werden, die auf diesen Bojen installiert sind, oder aber entlang der Küste bzw. auf den vorgelagerten Inseln mit Pegelstationen. Um sowohl bei den Bojen, den Unterwassereinheiten und den Küstenpegeln die durch Wind und Gezeiten erzeugten Meeresspiegeländerungen von einem Tsunami zu unterscheiden, setzt man leistungsfähige mathematische Filter ein, so dass die Tsunamiwelle mit mehreren unabhängigen Verfahren zuverlässig erkannt werden kann.

Modellierung eines Tsunami

Alle erfassten Informationen treffen in Echtzeit im Daten- und Warnzentrum ein. Um die vielen Einzelmessungen der unterschiedlichen Instrumentensysteme zu

einem schnell interpretierbaren Gesamtbild mit den wichtigen Informationen, z.B. Ankunftszeit des Tsunami an verschiedenen Küstenabschnitten oder erwartete Wellenhöhe, zusammenzufassen, hilft uns die numerische Mathematik. Im Fall des Sumatra-Bebens von 2004 schlugen die Wellen bereits eine Viertelstunde nach dem Erdbeben auf der Küste auf. Niemand kann in dieser Zeit eine Stadt evakuieren. Aber im Voraus berechnete Szenarien können die Einsatzplanung für die Hilfskräfte optimieren helfen. Für weiter entfernte Küstenabschnitte oder gar andere Länder lässt sich vorausberechnen, wann der Tsunami dort ankommt, wie stark seine Kraft sich auswirken wird und welche Küstenabschnitte gefährdet sind und somit evakuiert werden müssen. Dazu dient die mathematische Simulation. Mithilfe eines numerischen Verfahrens zur Lösung hydrodynamischer Gleichungen werden Tsunami-Modellierungen durchgeführt. Das klingt allerdings einfacher, als es ist, denn ein solches Modell setzt gute Kenntnisse vom auslösenden Prozess, von der Wassertiefe, von der Topographie des Meeresbodens und der Küstenbeschaffenheit voraus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit

eines Tsunami hängt von der Wassertiefe ab. Im tiefen Meer entspricht sie der Geschwindigkeit eines Verkehrsflugzeuges, im flachen Wasser etwa der eines schnellen Radfahrers. Das hydrodynamische Gleichungssystem unterscheidet sog. Flachwassergleichungen; im Kern bedeutet das, dass vor allem die Oze-

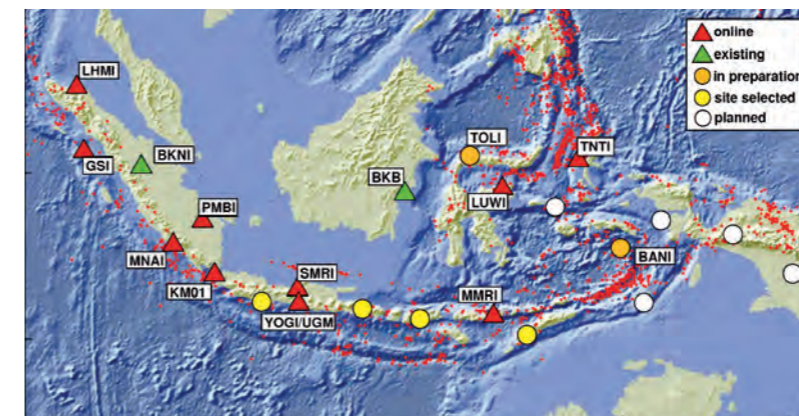


Plattentektonische Situation vor der Küste Indonesiens (Sumatra) und schematische Darstellung der Tsunami-Entstehung durch ein starkes Erdbeben.

anbodenbeschaffenheit im flachen Wasser bekannt sein muss. Daher wurde die Küste vor Sumatra seit 2004, auch mit deutscher Hilfe, neu kartiert. Das ist für die Bestimmung der Randbedingungen des Gleichungssystems unerlässlich.

Ausbreitungsszenarien

Aufgrund der extrem knappen Vorwarnzeit können solche Modelle nicht in Echtzeit berechnet werden. Daher berechnet man mögliche Szenarien im Voraus. So wurde eine große Anzahl von Simulationen (> 1000) für verschiedene Erdbebenlokationen entlang des Sundabogens mit unterschiedlichen Bebenstärken und Risslängen vorbereitet und in einer Datenbank abgelegt. Im Falle eines durch das Erdbebenmonitoringsystem und die ozeanografischen Messungen festgestellten Tsunami wird mit den gemessenen Parametern - Erdbebenlokation, Bebenstärke, Wellenhöhe im Ozean und an den Küstenpegeln sowie der



Aufgebaute und geplante deutsche seismologische Stationen in Indonesien. Die schnelle Erfassung und Auswertung des Erdbebens ist eine wesentliche Komponente des Tsunami-Frühwarnsystems

WIE SCHNELL IST EIN TSUNAMI?

Mithilfe eines hydrodynamischen Gleichungssystems lassen sich Tsunami-Modellierungen durchführen.

Ein solches Modell setzt gute Kenntnis vom auflösenden Prozess, von der Wassertiefe, von der Topographie des Meeresbodens und der Küstenbeschaffenheit voraus.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Tsunami hängt von der Wassertiefe ab. Im tiefen Meer entspricht sie der eines Verkehrsflugzeuges, im flachen Wasser etwa der eines schnellen Radfahrers. Das hydrodynamische Gleichungssystem unterscheidet sog. Flachwassergleichungen von Tiefwassergleichungen; im Kern bedeutet das, dass vor allem die Ozeanbodenbeschaffenheit im flachen Wasser bekannt sein muss.

Dann ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit v des Tsunamis aus der Gleichung (1)

$$v = \sqrt{g \cdot d} \quad (1)$$

g : Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$ 10 m/s^2
 d : Wassertiefe

So ergibt sich bei einer Wassertiefe von 6250 m:

$$v = \sqrt{10 \cdot 6250} \text{ m/s} = 250 \text{ m/s} = 900 \text{ km/h}$$

Daraus folgt auch, dass sich die Abstände aufeinander folgender Wellenkämme und die Wellenhöhe ebenfalls mit der Wassertiefe verändern. Je flacher das Wasser, umso kürzer die Abstände zwischen den Wellen und umso größer die Wellenhöhen.

Wichtigste Voraussetzungen für die Modellierung, speziell im Flachwasserbereich und für das Auflaufen der Welle auf die Küste sind deshalb genaue Kenntnisse der Topographie des Ozeanbodens und der Küste, des Küstenverlaufs und der Bebauung oder des Bewuchses der Küstenregion.

Unter dem „Run-Up“ versteht man das Einlaufen einer Tsunami-Welle in die oft sehr flachen Küstengewässer und in das Landesinnere. Dabei unterliegt die Welle wesentlichen Änderungen, wie zum Beispiel das Aufsteilen oder das Brechen der

Welle im Flachwasserbereich. Diese Phänomene können nicht mit den erwähnten Flachwassergleichungen mathematisch beschrieben werden. Um zum Beispiel das Aufspalten der Welle in Wellen unterschiedlicher Frequenzen oder die Entstehung einer wellenförmigen Bore zu erfassen, werden so genannte Boussinesq-Gleichungen benutzt, die im Vergleich zu den nicht-linearen Flachwassergleichungen zusätzliche Terme gleicher oder höherer Ordnung beinhalten.

Daraus lassen sich Verstärkungsfaktoren a ermitteln, die zur Berechnung der Wellenhöhe am Strand dienen können. Die Formel für den Verstärkungsfaktor a der Wellenhöhe im flachen Wasser (Green's Law) ist:

$$a = \sqrt{\frac{d_0}{d_1}}$$

d_0 : Wassertiefe im tiefen Wasser
 d_1 : Wassertiefe im flachen Wasser

z.B. für 1024 m und 4 m Wassertiefen:

$$a = \sqrt{\frac{1024 \text{ m}}{4 \text{ m}}} = \sqrt{256} = \sqrt{16} = 4$$

Ein Tsunami, der im tiefen Wasser 3 m hoch ist, würde an der Küste also auf 12 m Höhe verstärkt.



Informationen zum Verhalten bei Starkbeben und Tsunamis finden sich im Merkblatt auf der Homepage des GFZ:

<http://www.gfz-potsdam.de>

Weitere Informationen zum Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean:

<http://www.gitews.de>