GFZ
Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
**DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

# Tsunamiwarnung

## Wieviel Mathematik steckt in der Welle?

GITEWS

***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 entwickelte ein Konsortium deutscher Geo- und Meeresforscher das GITEWS (German Indonesian Tsunami Early Warning System), das Ende 2008 den operationellen Betrieb aufgenommen hat und 2011 vollständig in indonesische Hände übergeben wurde.***

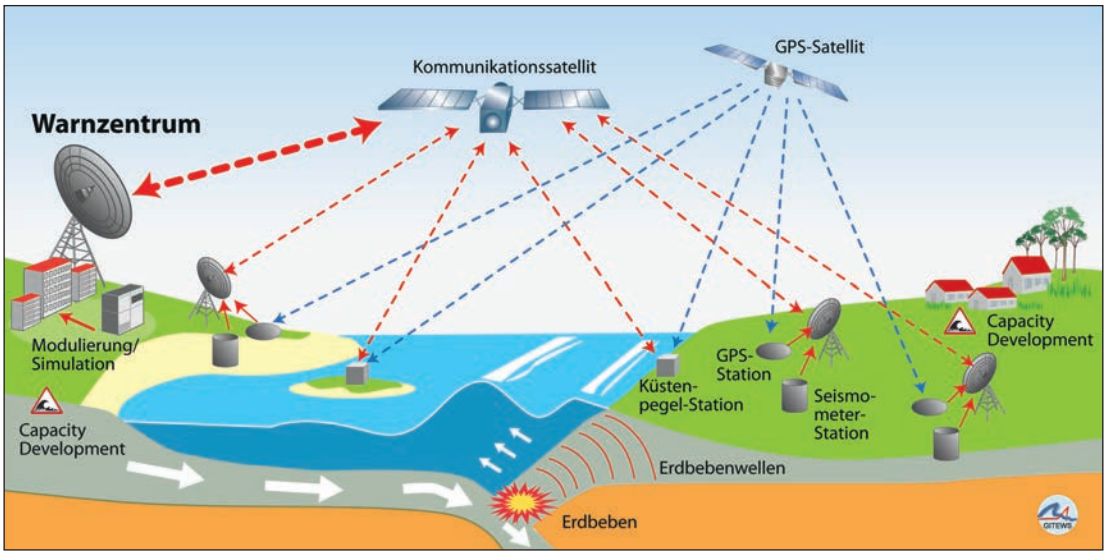
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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 wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

GITEWS-Pegelstation

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
**DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM – GFZ**
Telegrafenberg · 14473 Potsdam
Telefon: +49 (0)331 288-1040
Fax: +49 (0)331 288-1044
e-mail: presse@gfz-potsdam.de

**www.gfz-potsdam.de**




*Das Tsunami-Frühwarnsystem besteht aus verschiedenen Sensoren wie: Seismometer, Küstenpegel und GPS-Empfänger, deren Daten in dem nationalen Warnzentrum zusammenlaufen und ausgewertet werden.*

## Was ist GITEWS?

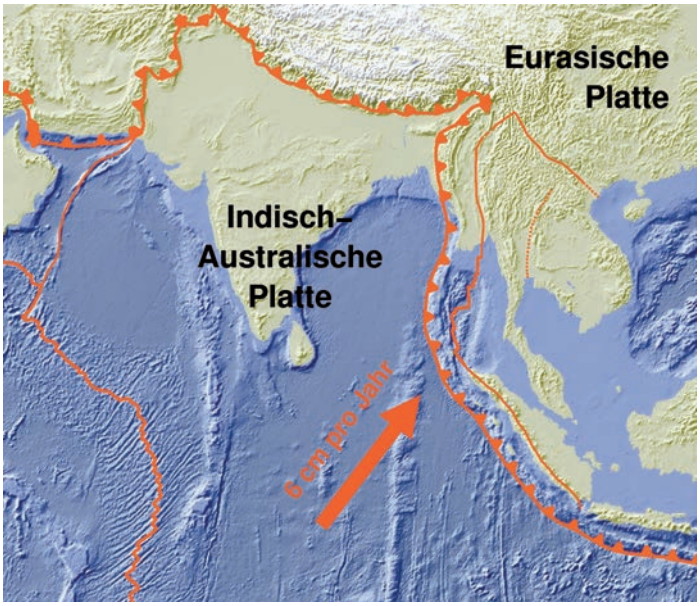
GITEWS ist ein Warnsystem, das aus über 300 unterschiedlichen landgestützten Sensoren besteht, deren Daten in einem nationalen Warnzentrum in Jakarta zusammenlaufen und dort ausgewertet werden. Die Warnung erfolgt auf Basis einer sehr schnellen, präzisen Erdbebenerfassung und –auswertung, die das Kernstück des Warnsystems bildet. Die schnelle Bestimmung von Erdbebenparametern (Lage, Tiefe, Magnitude) durch 160 Seismometer an Land ist die erste und wichtigste Grundlage für die Tsunamivorhersage durch Modellierung und die darauf beruhende Generierung einer Warnmeldung. Das erste Lagebild wird in der Folge durch zusätzliche Daten von GPS-Stationen und Küstenpegeln entlang der Küste Indonesiens weiter erhärtet. Der Nachweis eines Tsunami erfolgt mit Küstenpegeln, die ebenfalls mit GPS-Sensoren ausgerüstet sind. Bei den gewaltigen Datenmengen, die beim Warnsystem anfallen, ist die computergestützte (numerische) Mathematik ein unerlässliches Hilfsmittel.

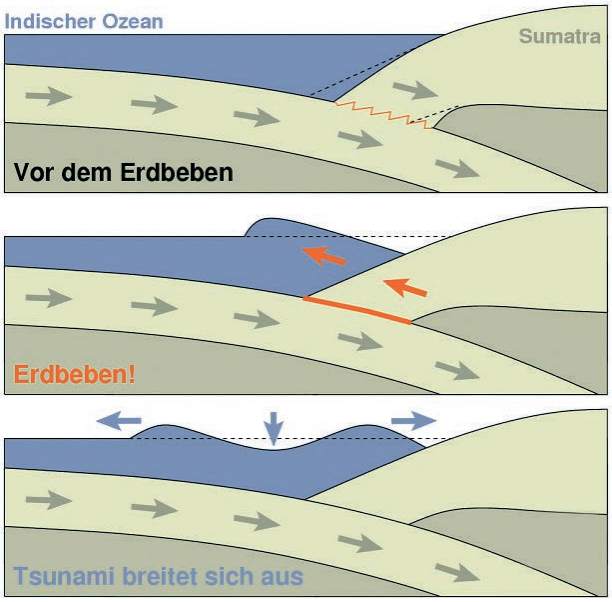
## Wie misst man den Tsunami?

Vor Indonesien treffen zwei große Kontinentalplatten aufeinander, wobei sich die Indisch-Australische Platte mit einer Geschwindigkeit von 6 cm pro Jahr in Richtung Nordosten 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 moderne seismische Stationen installiert, weitere Erdbebenstationen integriert und für die Region des Indischen Ozeans zu einem leistungsfähigen 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. Das System ist in der Lage, auch starke Erdbeben 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, innerhalb weniger Minuten.
Zum Nachweis eines Tsunami dienen Pegelstationen entlang der Küste bzw. auf den vorgelagerten Inseln.

## 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,




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

hilft uns die numerische Mathematik. 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 (dem Erdbeben), 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 von Tiefwassergleichungen; im Kern bedeutet das, dass vor allem die Ozeanbodenbeschaffenheit im flachen Wasser bekannt sein muss. Daher wurde die Küste vor Sumatra seit 2004, auch mit deutscher Hilfe, neu kartiert, um Randbedingungen des Gleichungssystems zu bestimmen.

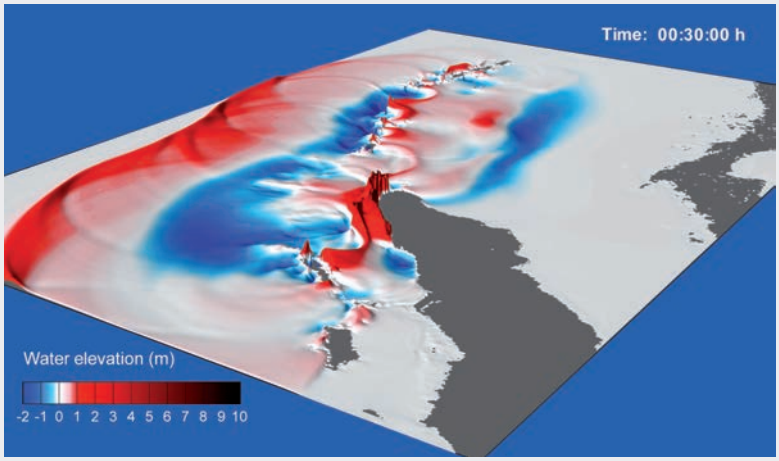
## Ausbreitungsszenarien

Aufgrund der extrem knappen Vorwarnzeit können solche Modelle bisher nur unzureichend in Echtzeit berechnet werden. Daher wurden mögliche Szenarien im Voraus berechnet. Mehr als 3000 Simulationen für verschiedene Erdbebenlokationen entlang des Sundabogens mit unterschiedlichen Bebenstärken und Risslängen wurden vorab berechnet und in einer Datenbank abgelegt. Im Falle eines durch das Erdbebenmonitoringsystem detektierten Seebebens wird mit den gemessenen Parametern – Erdbebenlokation, Bebenstärke, und der Verschiebung der GPS-Stationen – die am besten zu der Situation passende vorberechnete Simulation herausgesucht. Dazu werden die gemessenen Parameter mit den vorausberechneten Werten aller Szenarien in der Datenbank verglichen, und diejenige Simulation ausgewählt, die die größte Übereinstimmung 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 bilden dann die Grundlage für Warnmeldungen, die entsprechend den vorhergesagten Wellenhöhen und Tsunamiankunftszeiten für jedes Warnsegment entlang der betroffenen Küste den zuständigen Behörden und der Bevölkerung übermittelt werden, so dass diese ihrerseits alle notwendigen Maßnahmen wie zum Beispiel Evakuierungen, 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. 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 neben einer direkten Telefonverbindung zu lokalen Polizeistationen, die weitere Aktivitäten wie z.B. Evakuierungen einleiten sollen, die Verbreitung der Warnmeldung über Radio und Fernsehen an die betroffene Bevölkerung. Daneben werden über Internet und Fax weitere Institutionen in Indonesien von einer Tsunamigefährdung unterrichtet. Zusätzlich werden SMS-Meldungen generiert.

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.




*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 überschwemmt das Land. Sämtliche Prozesse können angenähert physikalisch modelliert, mathematisch beschrieben und auf einem Computer simuliert werden.*

*Kontrollraum im Nationalen Tsunami-Frühwarnzentrum am BMKG in Jakarta, Indonesien.*

10/12

Informationen zum Verhalten bei Starkbeben und Tsunamis finden sich in den Merkblättern auf der Homepage des GFZ: **www.gfz-potsdam.de**

Weitere Informationen zum Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean: **www.gitews.de**

HELMHOLTZ | GEMEINSCHAFT

GFZ

Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

GITEWS

# Wie schnell ist ein Tsunami?

Mithilfe eines hydrodynamischen Gleichungssystems lassen sich Tsunami-Modellierungen durchführen.

Ein solches Modell setzt gute Kenntnis 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 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)

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

g: Erdbeschleunigung = 9,81 m/s² ≈ 10 m/s²
d: Wassertiefe

So ergibt sich bei einer Wassertiefe von 4000 m:

$$v = \sqrt{10 \cdot 4000}\ \text{m/s} = 200\ \text{m/s} = 720\ \text{km/h}$$

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 läßt sich der Verstärkungsfaktor a ermitteln, der zur Berechnung der Wellenhöhe am Strand dienen kann. Die Formel für den Verstärkungsfaktor a der Wellenhöhe im flachen Wasser (Green’s Law) ist:

$$a = \sqrt{\sqrt{\frac{d_0}{d_1}}} \qquad (2)$$

$d_0$: Wassertiefe im tiefen Wasser (Ursprungsart)
$d_1$: Wassertiefe im flachen Wasser (Beobachtungsort)

z. B. für Entstehung in 1024 m Tiefe und Beobachtung in 4 m Tiefe:

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

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**