



Das Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean

German-Indonesian **T**sunami **E**arly **W**arning **S**ystem

GITEWS



Seite 4



Seite 6



Seite 26

I N H A L T

Vorwort	3
EIN KLARES SIGNAL Der Weg zu einem deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnsystem im Indischen Ozean	4
WELLE DES SCHRECKENS Sonntag, 26. Dezember 2004 - Protokoll der Katastrophe	6
NAHTSTELLE SUMATRA Eine der unruhigsten Regionen der Erde: Der Sundabogen vor Indonesien	8
WETTLAUF MIT DER ZEIT Das Frühwarnsystem im Überblick	10
ALARMIERENDE WERTE Das landgestützte Beobachtungsnetz	12
WÄCHTER DES MEERES Das marine Messnetz	14
UNWEGSAMES BECKEN Die Modellierung der Wellenausbreitung	16
STÄNDIGE BEREITSCHAFT Das nationale Warnzentrum in Jakarta	18
DIE LETZTE MEILE Die Alarmierung der Bevölkerung, Ausbildung und Organisation	20
SPÄHER IM ALL Die kontinuierliche Tsunami-Überwachung mit Satelliten	22
DIE GANZE ERDE IM BLICK Das Tsunami-Frühwarnsystem als Teil eines globalen Erdbeobachtungsnetzes	24
WIR SIND GEWARNT Eine stärkere internationale Zusammenarbeit in der Katastrophenprävention	26
Impressum	26
GITEWS-Konsortium und Partner / Bildnachweis	27



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.

GITEWS - Konsortium



Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
(Konsortialführer)



Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI),
Bremerhaven



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR),
Hannover



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Oberpfaffenhofen



Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ),
Eschborn



GKSS Forschungszentrum,
Geesthacht



Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM),
Berlin



Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IfM-GEOMAR),
Kiel



Universität der Vereinten Nationen, Institut für Umwelt und
Menschliche Sicherheit (UNU-EHS),
Bonn

Indonesische Partner

- Staatsministerium für Forschung und Technologie (RISTEK), Jakarta
- Nationaler Dienst für Meteorologie und Geophysik (BMG), Jakarta
- Nationaler Koordinierender Dienst für Vermessung und Kartierung (BAKOSURTANAL), Cibinong
- Nationales Technologiezentrum für Marine Erkundung (BPPT)
- Nationales Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt (LAPAN)
- Nationales Institut der Wissenschaften (LIPI), Bandung
- Staatliche Abteilung für Information und Kommunikation (DEPKOMINFO), Jakarta
- Sekretariat des Nationalen Koordinierungsrates für Katastrophenmanagement und interne Flüchtlinge (BAKORNAS PBP), Jakarta

Bildnachweis:

Alle Abbildungen GFZ Potsdam, außer:
Seite 3: BMBF
Seite 6, 19 oben: J. Borrero / USC-TRC
Seite 7: UN / E. Schneider
Seite 9 rechts: JAMSTEC
Seite 10 oben, 24 oben, 25: ESA
Seite 15, 16 oben, 17 oben: IfM-GEOMAR
Seite 18/19: DLR
Seite 20/21: J. Sopaheluwakan / LIPI

GITEWS soll einen Beitrag dazu leisten, möglichst viele Menschen vor einem drohenden Tsunami rechtzeitig zu informieren und damit zu schützen. Weitere Informationen erhalten Sie unter: <http://www.gitews.de>

Hinweise zum Verhalten bei Tsunamis und starken Erdbeben sowie eine Weltkarte der Erdbebengefährdung finden sich unter: <http://www.gfz-potsdam.de>



GFZ Potsdam, AWI, DLR und GKSS sind Mitglieder der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren

VORWORT



Die extremen Naturkatastrophen der letzten Jahre wie Erdbeben, Vulkanausbrüche, Hochwasser und nicht zuletzt der Tsunami im Indischen Ozean haben uns die zunehmende Verletzlichkeit der modernen Gesellschaft vor Augen geführt. Vorsorge gegen alle Arten natürlicher Bedrohungen ist deshalb heute notwendiger denn je. Deshalb ist Frühwarnung auch für Wissenschaft und Forschung ein Thema mit höchster Priorität. Wir schützen damit Menschenleben und bewahren Wirtschaft und Gesellschaft vor großen Schäden.

Deutsche Forschungseinrichtungen haben innerhalb kürzester Zeit ein Konzept für ein modernes Tsunami-Frühwarnsystem erstellt, das bis November 2008 in großen Teilen realisiert werden soll. Es baut auf erprobten Spitzentechnologien auf. Schon vor dem ersten Jahrestag der Katastrophe konnten die ersten Messeinrichtungen wie Seismometer, Küstenpegel, GPS-Bojen und Ozeanbodeneinheiten für das Frühwarnsystem in Indonesien installiert werden. Die Basis für die gute Kooperation mit Indonesien ist die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit im Rahmen unseres Abkommens über die Wissenschaftlich-Technische-Zusammenarbeit von 1979.

Mit dem schnellen Handeln nach der Tsunami-Katastrophe im Dezember 2004 konnte Deutschland den Menschen in Indonesien und den Anrainerstaaten des Indischen Ozeans Hilfe, Hoffnung und Zuversicht bringen. 500 Millionen Euro werden für den

Wiederaufbau der vom Tsunami betroffenen Region eingesetzt, allein 45 Millionen Euro davon für den Aufbau eines Tsunami Frühwarnsystems.

Die internationale Staatengemeinschaft hat die Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission der UNESCO beauftragt, den Aufbau eines Tsunami Frühwarnsystems für den gesamten Indischen Ozean zu koordinieren. Deutschland und Indonesien liefern dazu den wesentlichen Beitrag. Aus diesem Frühwarnsystem können auch alle anderen Anrainerstaaten für sich Nutzen ziehen. Die Daten, die aus dem deutsch-indonesischen Frühwarnsystem generiert werden, stehen allen Staaten zur Verfügung, um im eigenen Land vor Gefahren zu warnen. Alle Länder der Region sind deshalb eingeladen, sich am Aufbau eines flächendeckenden Frühwarnsystems im Indischen Ozean zu beteiligen.

Für die Zukunft brauchen wir weiterführende Frühwarnsysteme, die auch andere Naturgefahren erfassen und das Risiko für die betroffenen Menschen reduzieren. Die Bundesregierung wird hierzu geeignete Schritte einleiten.

Dr. Annette Schavan, MdB
Bundesministerin für Bildung und Forschung

EIN KLARES SIGNAL

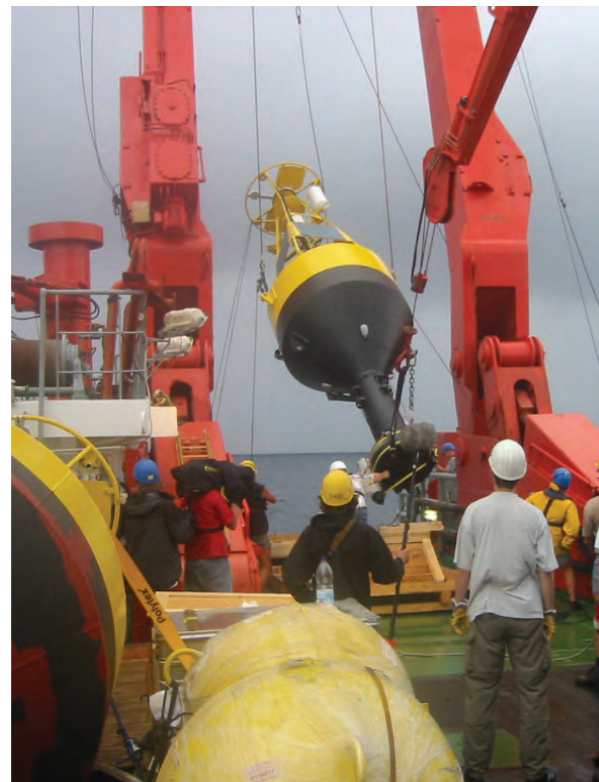
Der Weg zu einem deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnsystem im Indischen Ozean

Nach dem schweren Erdbeben vor Sumatra am 26. Dezember 2004 überrollte ein Tsunami die Küsten rund um den Indischen Ozean. Mehr als 230.000 Menschen kamen ums Leben. Die meterhohen Wellen zerstörten 600.000 Häuser, ca. 1,8 Millionen Menschen verloren ihr Zuhause.

Deutschland sagte rasch seine Unterstützung für den Wiederaufbau in der Region zu. Zudem sollte alles dafür getan werden, dass sich ein solches Desaster nicht wiederholt. Ein Konsortium deutscher Forschungseinrichtungen erarbeitete ein Konzept für ein Tsunami-Frühwarnsystem im Indischen Ozean. Am 14. März 2005 vereinbarten Indonesien und Deutschland in einer gemeinsamen Er-

klärung den Aufbau eines solchen Systems unter der Koordination der Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Kommission (IOC) der UNESCO.

Den meisten Tsunamis geht ein starkes Erdbeben und damit ein klares Signal voraus. Ein dichtes Netz von Seismometern bildet daher die Basis des Warnsystems. Die Messgeräte werden so verteilt, dass sich jedes Erdbeben im Sundabogen, von dem das größte Tsu-



nami-Risiko im Indischen Ozean ausgeht, binnen zwei Minuten an mindestens drei Standorten registrieren lässt. Die ersten deutschen Messstationen konnten bereits 2005 an Land installiert werden.

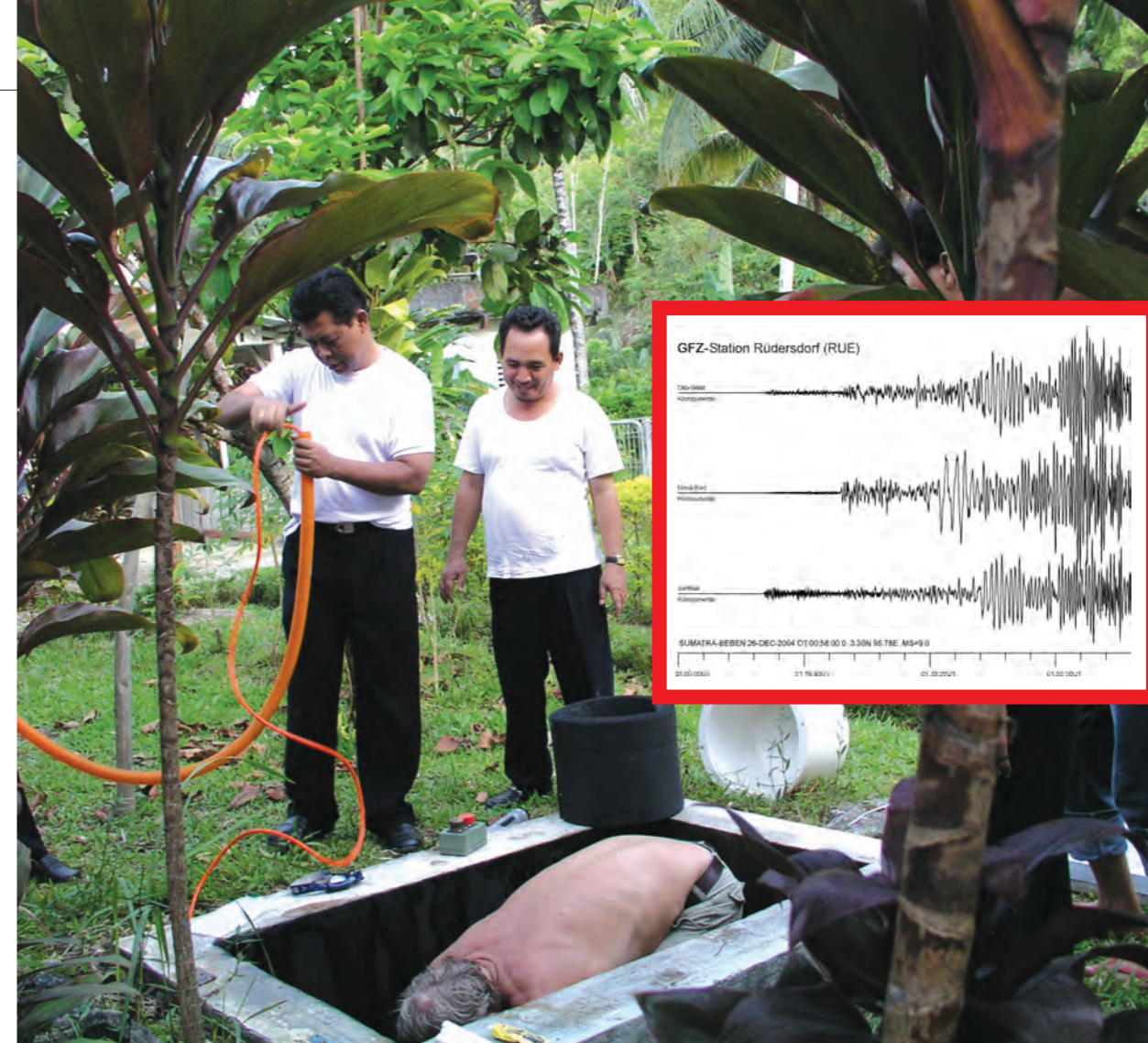
Das deutsche Forschungsschiff „Sonne“ setzte ebenfalls 2005 die ersten GPS-Bojen und Drucksensoren im Indischen Ozean aus, um die Entstehung eines Tsunami frühzeitig erkennen zu können. Diese Sensoren, die längs des Sundabo-

gens am Ozeanboden verankert sind, zeigen den Durchgang einer Tsunami-Welle an, bei der sich nicht nur die Meeresoberfläche hebt und senkt, sondern die gesamte Wassersäule bis zum Grund in Bewegung gebracht wird. Sie senden ihre Daten zu den Bojen an der Wasseroberfläche. Aus der Druckänderung lässt sich damit der Meeresspiegelanstieg ermitteln. Die Meeresspiegelhöhe kann auf der Boje noch durch ein zwei-



Erste Schritte...

...von der Aufzeichnung des Bebens am 26. Dezember 2004 mit dem GEOFON-Netz und dem Aufbau der ersten seismischen Station auf der Insel Nias (Juni 2005) zur Übergabe der ersten Tsunami-Boje an Indonesien in Hamburg, im August 2005 und deren Aussetzung vor der Küste Sumatras im November 2005.



tes, unabhängiges Verfahren, das Globale Positionsbestimmungssystem (GPS), bestimmt werden.

Um die Situation vor der Küste Indonesiens schnell einschätzen zu können, wird in Jakarta ein nationales Warnzentrum eingerichtet, in dem die Daten der verschiedenen Sensorsysteme zusammenlaufen. Im Warnzentrum stehen außerdem für den Ernstfall vorberechnete Computersimulationen

für denkbare Tsunami-Ereignisse zur Verfügung, woraus die möglichen Folgen für einzelne Küstenabschnitte abgeleitet werden können. Ziel ist es, eine erste Warnmeldung nach etwa zehn Minuten über klar definierte Kommunikationswege, beispielsweise Radiosender, ausgeben zu können.

Bis Ende 2008 sollen die verschiedenen Sensorsysteme weitgehend installiert und das Daten-

zentrum einsatzfähig sein. Anschließend ist eine fünfzehnmonatige Betriebsphase mit deutscher Unterstützung vorgesehen. Ein breit angelegtes Aus- und Weiterbildungsprogramm für Wissenschaftler, Techniker und Manager soll den effizienten Betrieb, die Wartung und Weiterentwicklung des Systems sicherstellen.

Im Frühjahr 2010 wird das Tsunami-Frühwarnsystem vollstän-

dig an die indonesische Regierung übergeben. Es soll die betroffene Bevölkerung schnell und verlässlich informieren. Die größten Herausforderungen dabei sind die rasche Ausgabe einer Warnmeldung sowie die Schaffung von Infrastrukturen für den Katastrophenfall. Die deutsch-indonesische Kooperation umfasst daher weitreichende Maßnahmen, um regionale und lokale Organisationen dabei zu unterstützen, Evakuierungspläne auszuarbeiten und die Bevölkerung über die Gefahren durch Tsunamis und Fluchtmöglichkeiten aufzuklären.

Das Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean versteht sich als Teil eines Warnsystems, das auch andere Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüche und Stürme erfassen soll. Im Rahmen des Projekts werden neue Technologien, insbesondere zu einer kontinuierlichen Überwachung der Meeresspiegelhöhe von Satelliten aus, weiterentwickelt. Vernetzt mit anderen globalen Erdbeobachtungssystemen könnten sie einen wichtigen Beitrag dazu leisten, Küstenbewohner in Zukunft weiträumig vor Katastrophen zu warnen und das Verständnis unserer Umwelt auch im Hinblick auf Klimaveränderungen zu verbessern. Die gewonnenen Daten sollen allen Anrainerstaaten zur Verfügung stehen, so dass das Frühwarnsystem nicht nur für Indonesien von Nutzen sein wird.

WELLE DES SCHRECKENS

Sonntag, 26. Dezember 2004 -Protokoll der Katastrophe

Um 1.59 Uhr (MEZ, 7.59 Ortszeit): 150 Kilometer vor der Insel Sumatra reißt tief unter der Meeresoberfläche die Erde auf. Das zweitstärkste jemals gemessene Erdbeben erschüttert Indonesien und die Küstenregion rund um den Golf von Bengalen. Es erreicht eine Stärke von 9,3 auf der Richter-Skala. Noch 10.000 Kilometer entfernt in Europa werden Bodenbewegungen von anderthalb Zentimetern gemessen. Zu einer der schlimmsten Naturkatastrophen der Menschheitsgeschichte wird das Beben jedoch nicht durch die unmittelbar darauf einstürzenden Häuser oder Brücken, sondern durch den dabei ausgelösten Tsunami. In den kommenden Stunden überrollen meterhohe Wellen die Strände des Indischen Ozeans bis hin nach Ostafrika. Sie werden sogar noch im Atlantik und im Pazifik registriert.

2.14 Uhr: Indonesien wird von dem Tsunami am stärksten getroffen. Die anbrandenden Wellen verwüsten die Nordküste der Insel Sumatra und reißen selbst Stahlbetonbauten nieder, die modernen Konstruktionsstandards entsprechen. In Banda Aceh ziehen die Wogen 30.000 Menschen in den Tod, auch im Unterbezirk Meura-



xa überleben nur 10.000 der ehemals 40.000 Einwohner. Offiziellen Schätzungen zufolge fordert der Tsunami allein in Indonesien 170.000 Todesopfer, mehr als 550.000 Menschen werden obdachlos. 3.45 Uhr: Der Tsunami erreicht Sri Lanka. Im Osten und Süden

der Insel zerstören die Wellen 100.000 Häuser, 35.000 Menschen sterben, mehr als eine halbe Million verlieren ihre Bleibe, Hab und Gut. Etwa zur selben Zeit wird auch der Südwesten Thailands

überspült, insbesondere die Provinz Phang Nga und die Touristengebiete um Phuket. Unter den 8.000 Toten und Vermissten sind 2.500 Ausländer aus über 30 Nationen.

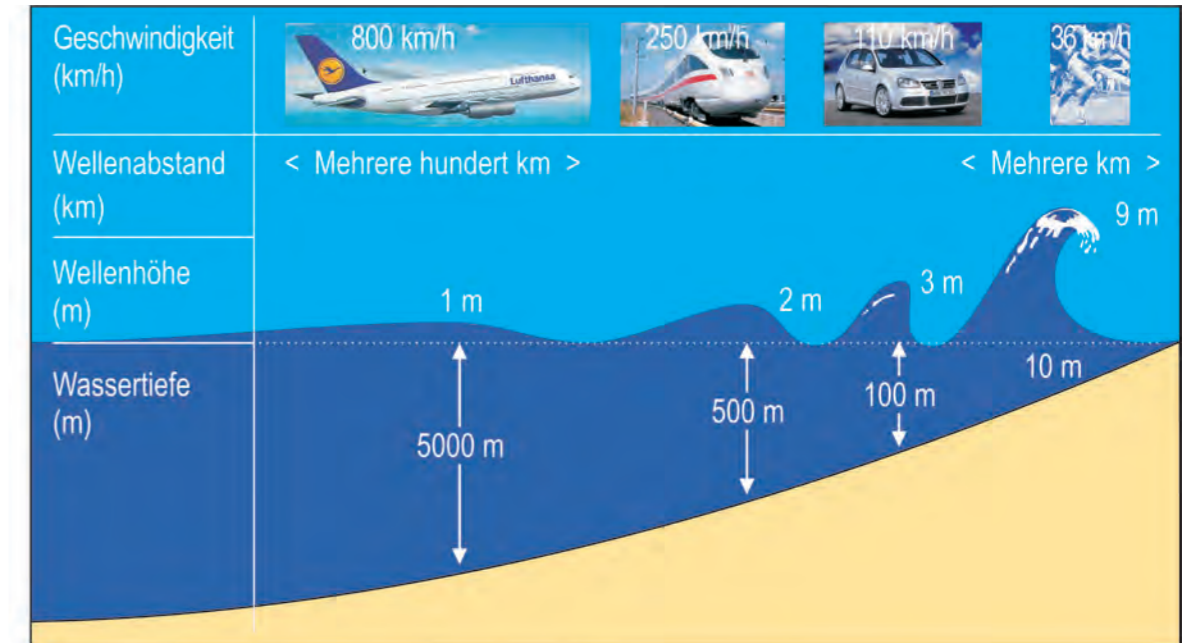


4.45 Uhr: Obwohl seit dem Erdbeben inzwischen fast drei Stunden vergangen sind, trifft der Tsunami auch die Bevölkerung Indiens ohne Vorwarnung, nachdem er zuvor die Inseln der Andamanen und Nicobaren überschwemmt hat. Mehr als 18.000 Menschen ertrinken in den Flutwellen, die sich in dem am schwersten zerstörten Distrikt Nagapattinam bis zu sechs Meter hoch auftürmen. Infolge des Tsunami werden mehr als 600.000 Inder obdachlos. 5.00 Uhr: Der Tsunami zieht über die flachen Inseln der Malediven hinweg. Die wirtschaftli-

chen Grundlagen des Landes, das von Tourismus und Fischerei lebt, werden zu zwei Dritteln zerstört. Mehr als 11.000 Menschen verlieren ihr Zuhause. Gegen 9 Uhr: Inzwischen hat der Tsunami auch die Seychellen hinter sich gelassen und erreicht Ostafrika. Während in Kenia die meisten Strände rechtzeitig evakuiert werden können, kommen in Somalia etwa 300 Menschen ums Leben – sieben Stunden nach dem Beben.

Die große Welle im Hafen

Der Begriff "Tsunami" (jap. 津波 Hafenwelle; aus 津 tsu, Hafen, und 波 nami, Welle) wurde von japanischen Fischern geprägt, die vom Fischfang zurückkehrten und ihre Häfen vom Meer verwüstet vorfanden, obwohl sie auf offener See keinen außergewöhnlichen Wellengang bemerkt hatten. Grund dafür ist Japans Tiefseesteilküste: Die Riesenwellen türmen sich quasi erst kurz vor dem Ufer auf, schlagen über die Hafenufer und zerstören alles, was sich in ihrer Bahn befindet.



NAHTSTELLE SUMATRA

Eine der unruhigsten Regionen der Erde: Der Sunda-bogen vor Indonesien

Die Kräfte, die unseren Planeten gestalten, treten in kaum einer Region so markant in Erscheinung wie in Indonesien. Zwei große Erdplatten treffen vor Sumatra aufeinander, die Spannungen zwischen ihnen führen immer wieder zu heftigen Erdbeben. An der Nahtstelle sind ein vulkanischer Inselbogen und eine Tiefseerinne entstanden.

Die Erdkruste besteht aus etwa einem Dutzend solcher Platten. Sie verschieben sich ständig gegeneinander. Die Kontinente sind durchschnittlich 40 Kilometer dick, ihre Gesteine mehr als zwei Milliarden Jahre alt. Dagegen ist der Ozeanboden mindestens zehnmal jünger und deutlich dünner. Sein Gestein wird an den mittelozeanischen Rücken gebildet und wie auf einem gigantischen Fließband zu den Plattengrenzen ab-

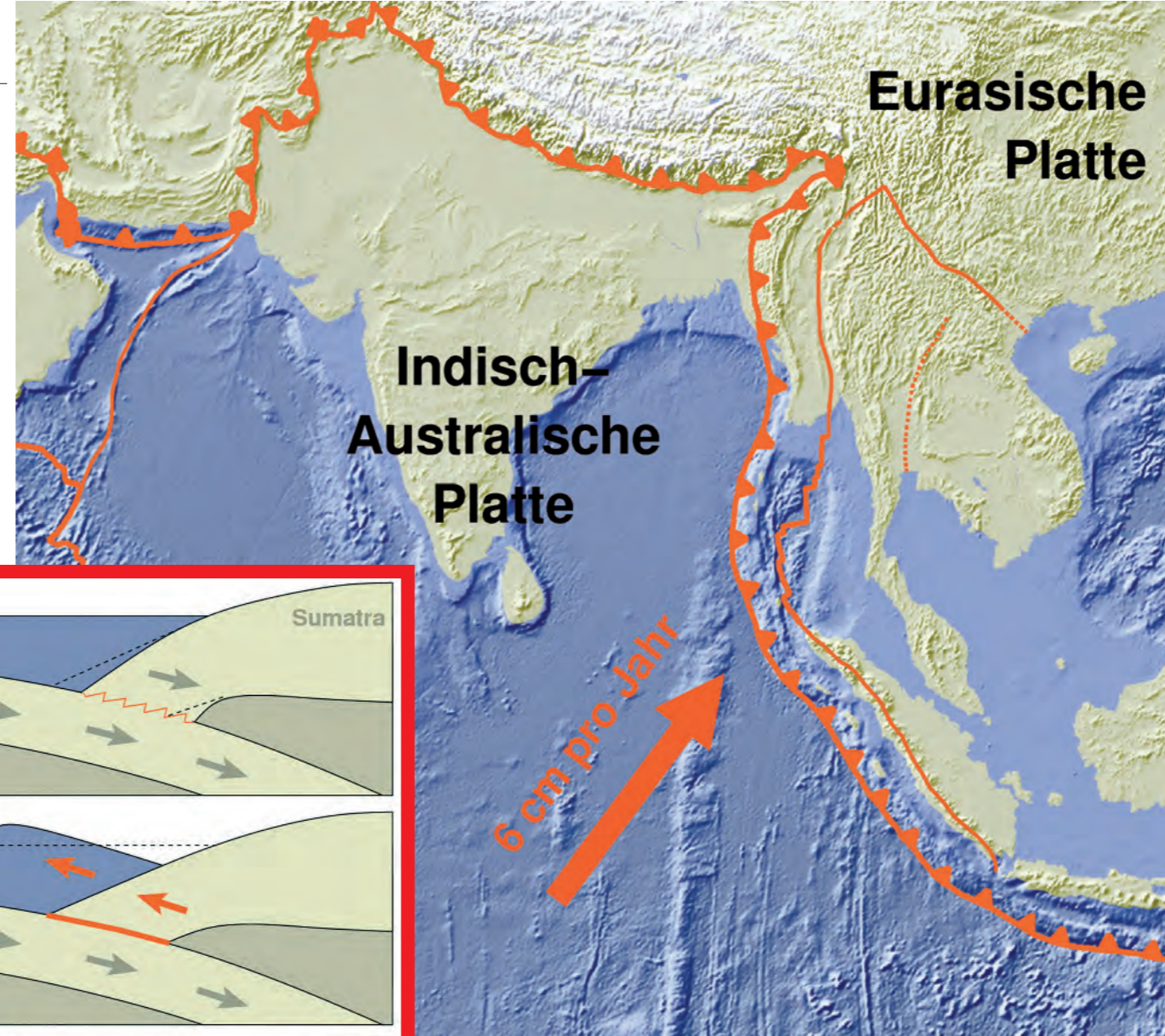
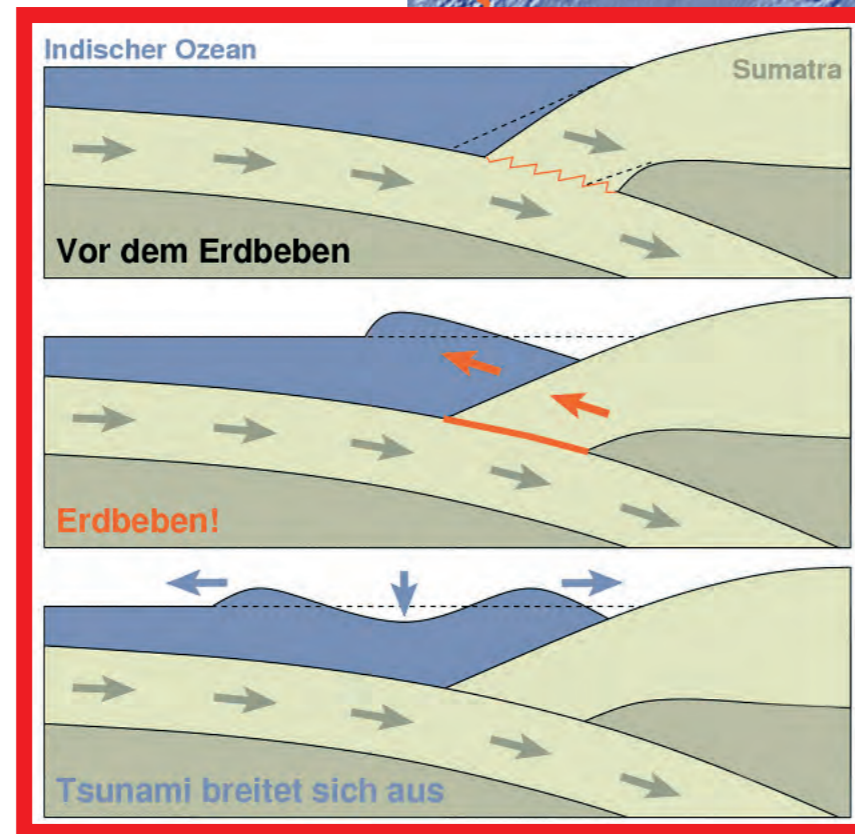
transportiert. Trifft eine Ozeanplatte an ihren Rändern auf eine Kontinentplatte, so taucht ihr vergleichsweise schweres Gestein unter diese ab. Sie wird verschluckt, ihr Material im Erdinneren wieder aufgeschmolzen.

Im Sundagraben vor Indonesien schiebt sich die Indisch-Australische-Platte mit einer Geschwindigkeit von sechs Zentimetern pro Jahr - so schnell wie ein Fingernagel im Jahr wächst - unter ein Anhängsel der Eurasischen Platte. Allerdings nicht ohne Widerstand. Das Fließband ruckelt. Zwischen den ineinander verhakten Gesteinen bauen sich Spannungen auf, die sich immer wieder schlagartig in Form eines Erdbebens entladen können.

Am 26. Dezember 2004 schnellte die Eurasische Platte in dem stärksten je in dieser Region gemessenen Erdbeben plötzlich vor. Im Meeresboden klaffte ein Riss, der sich innerhalb von acht Minuten auf einer Länge von 1.200 Kilometern in Richtung Norden ausbreitete - ein Bruch, etwa so lang wie die Strecke von Berlin bis nach Rom. An der Nahtstelle wurde die Erdkruste dabei um bis zu fünfzehn Meter in der Höhe versetzt.

Die schlimmsten Folgen zeitigten jedoch nicht die Erdstöße selbst, sondern die dadurch ausgelösten Flutwellen: der Tsunami. Bei dem Beben wurde der Meeresboden mancherorts um einige Me-

ter angehoben, andernorts gesenkt. Diese ruckartige Bewegung versetzte den Indischen Ozean in heftige Schwingungen. Die entlang des Bruches entstandenen Wellen breiteten sich nach allen Seiten hin aus und liefen auf die umliegenden Küsten mit bis zu 800 km/h zu.



6 cm pro Jahr

Gewaltige Kräfte

Bei der plötzlichen Entlastung der oberen Platte durch ein Erdbeben kann ein Tsunami ausgelöst werden. Das rechte Bild zeigt eine Unterwasseraufnahme des Meeresbodens vor Sumatra nach dem großen Beben vom 26. Dezember 2004.

Anders als bei einem Sturm schwingt bei einem Tsunami nicht nur die Wasseroberfläche. Hebt oder senkt sich der Ozeanboden, so wird das gesamte darüber liegende Meer mitbewegt - im Fall des Sumatra-Bebens eine etwa 5.000 Meter mächtige Wassersäule. Das macht die gewaltige Energie aus, die in den Riesenwellen steckt und die über viele 1.000 Kilometer zu den umliegenden Küsten transportiert worden ist. Auf dem offenen Ozean waren die vor der Insel Su-

matra gebildeten Wellen zunächst nur etwa 60 Zentimeter hoch und mit einer Wellenlänge von zirka 250 Kilometer für Schiffsbesatzungen kaum wahrnehmbar. Erst in Küstennähe zeigte der Tsunami seine tödliche Gefahr. Der Meeresgrund bremste die Wellen im flachen Küstengewässer, sie türmten sich mehrere Meter auf und rollten aufs Land zu. In einigen Gegenden drückte der Tsunami das Wasser kilometerweit ins Landesinnere. So wurden in Banda Aceh 500 Meter Küste einfach weggespült, während im Hinterland später ein großer Salzsee entstand.



WETTLAUF MIT DER ZEIT

Das Frühwarnsystem im Überblick

Das erste Warnzeichen lässt nicht lange auf sich warten. Bei einem Erdbeben breiten sich die Stoßwellen mit rasender Geschwindigkeit im Untergrund aus, zum Teil mit etwa 30.000 km/h. Man kann daher innerhalb von ein bis zwei Minuten mit Hilfe eines dichten Stationsnetzes von Seismometern in Indonesien feststellen, ob sich ein Beben entlang des Sundabogens ereignet hat.

Derart schnelle Messungen ermöglichen rechtzeitig vor der unter Umständen noch größeren Gefahr eines Tsunami zu warnen. Im Vergleich zu den seismischen Wellen sind die durch ein Beben ausgelösten Flutwellen langsam. Bis nach dem Beben im Dezember 2004 die Küsten Sri Lankas und Thailands überflutet wurden, vergingen eindreiviertel Stunden - bei entsprechenden Vorkehrungen viel Zeit für eine Alarmierung und Evakuierung der Bevölkerung.

An der Küste Sumatras dagegen rollte der Tsunami bereits nach einer Viertelstunde an. Hier liegt die große Herausforderung beim Auf-

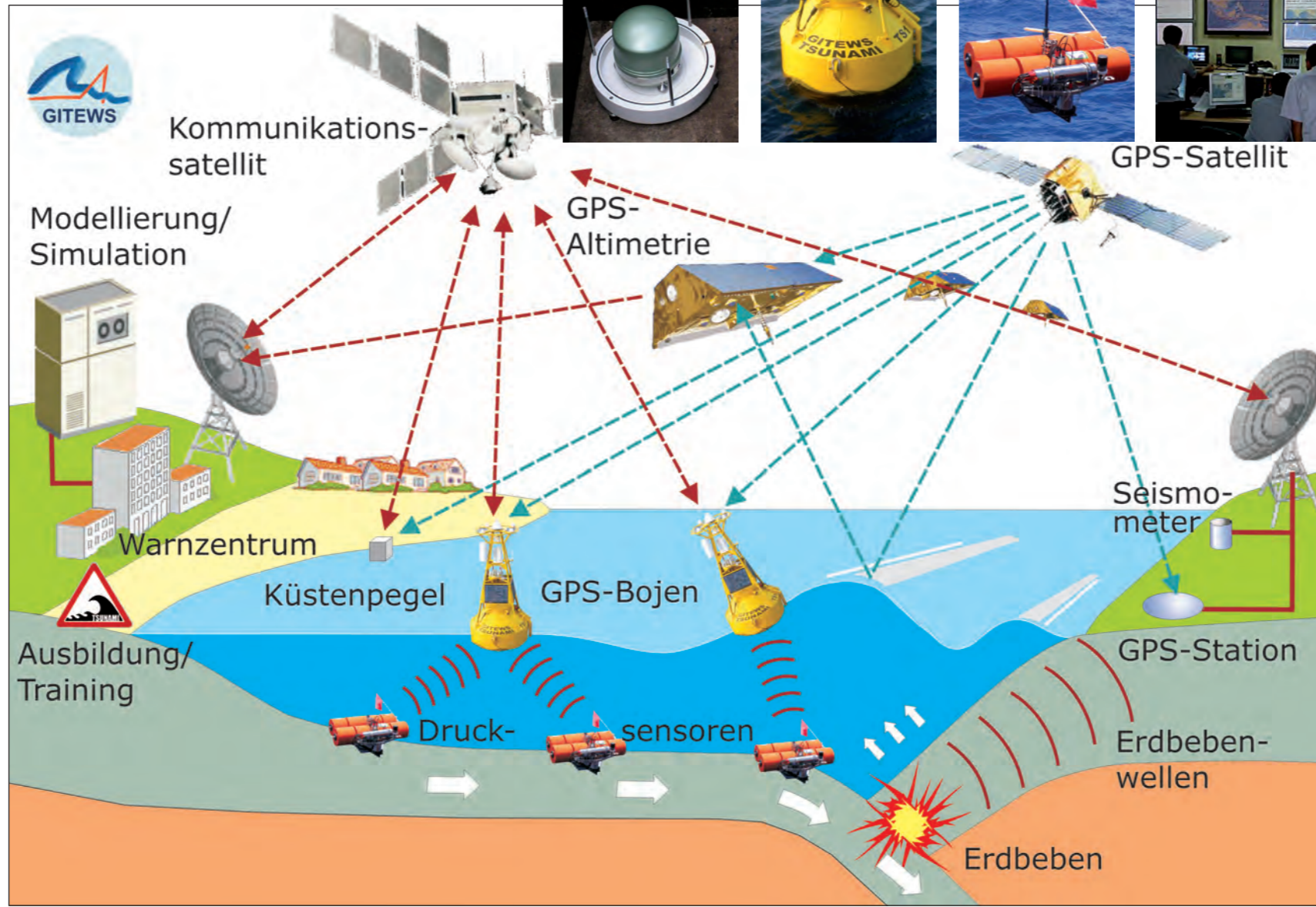
bau des Frühwarnsystems: eine verlässliche Tsunami-Warnung innerhalb von nur zehn Minuten auszugeben, um auch die indonesische Bevölkerung in den gefährdeten Gebieten rechtzeitig warnen zu können.

Allerdings löst nicht jedes heftige Beben einen Tsunami aus. So brach am 28. März 2005 bei einem Beben der Stärke 8,7 ein weiteres Mal der Ozeanboden vor Sumatra auf. Diesmal breitete sich ein Riss mehr als 300 Kilometer aus - doch entgegen den Befürchtungen folgte diesmal kein verheerender Tsunami wie drei Monate zuvor. Allem Anschein nach war bei diesem Erdbeben die vertikale Verschiebung nur sehr klein.

Um die Bevölkerung schnell und zuverlässig alarmieren zu können, basiert das Frühwarnsystem im Indischen Ozean daher auf einem Zusammenspiel mehrerer Komponenten:

1) Das landgestützte Beobachtungsnetz

Voll automatisierte Seismometer überwachen die Region kontinuierlich und können ein Erdbeben in kurzer Zeit erkennen, lokalisieren und seine Stärke ermitteln. Sie verfolgen auch den möglicherweise minutenlangen Bruchvorgang. Dafür werden die Messstationen zusätzlich mit Empfängern des Globalen Positionsbestimmungssystems (GPS) ausgerüstet. Sie erlauben eine präzise Bestim-



mung der Verschiebung der Erdkruste (Seiten 12 und 13).

2) Das marine Messnetz

Ob tatsächlich ein Tsunami entstanden ist, kann nur durch Messungen im Ozean selbst festgestellt werden. Hierzu bedarf es einer Reihe von Bojensystemen entlang des Sundabogens. Die Bojen sind mit Druckmessgeräten am Ozeanboden verbunden, um Meeresspiegelschwankungen frühzeitig zu erkennen. Bei Ausfall der Drucksensoren, werden Meeresspiegeländerungen auch mit GPS-Sensoren erfasst. Laufen die Wellen dann auf die Küste zu, wird ihre Höhe noch einmal sowohl an den vorgelagerten Inseln als auch entlang der Küste mit Hilfe von Wasserstandspegeln gemessen (Seiten 14 und 15).

3) Die Modellierung der Wellenausbreitung

Sobald die Messgeräte einen möglichen Tsunami ausgemacht haben, gilt es abzuschätzen, an welchem Teil der Küste sich der Tsunami zu gefährlicher Höhe aufstauen könnte und wann dort die Wellen eintreffen würden. Solche Modellrechnungen sind zeitraubend. Daher werden denkbare Szenarien bereits im Vorfeld für die gesamte Region erstellt, um im Ernstfall anhand der aktuellen Daten das wahrscheinlichste Szenario schnell zur Verfügung zu haben (Seiten 16 und 17).

4) Das nationale Warnzentrum

Sämtliche Daten der verschiedenen Messstationen laufen über Satellit in einem Lagezentrum in Jakarta zusammen. Die nationalen Verantwortlichen analysieren das Risiko und geben eine Warnung aus, wenn es Anzeichen dafür gibt, dass nach einem starken Beben ein Tsunami folgen könnte. Diese Warnmeldung wird über vorgegebene Kommunikationskanäle, beispielsweise Radiosender, verbreitet. Sie beinhaltet Angaben zu den zu befürchtenden Schäden für die Bevölkerung und die Infrastruktur (Seiten 18 und 19).

5) Die Alarmierung der Bevölkerung, Ausbildung und Organisation

Nur mit gut ausgebildetem Personal lässt sich das Warnsystem betreiben. Deshalb werden in Schulungen und Workshops den Mitarbeitern zusätzliche fachliche und organisatorische Fähigkeiten vermittelt. Außerdem erhalten Wissenschaftler und Doktoranden die Möglichkeit, zu Forschungsaufenthalten nach Deutschland zu kommen. Eine weitere wichtige Aufgabe dieses „Capacity Buildings“ ist auch die Aufklärung der Bevölkerung über die Gefahren von Tsunamis und die richtige Verhaltenweise: beginnend mit der Schule bis hin zu Evakuierungsübungen (Seiten 20 und 21).

ALARMIERENDE WERTE

Das landgestützte Beobachtungsnetz

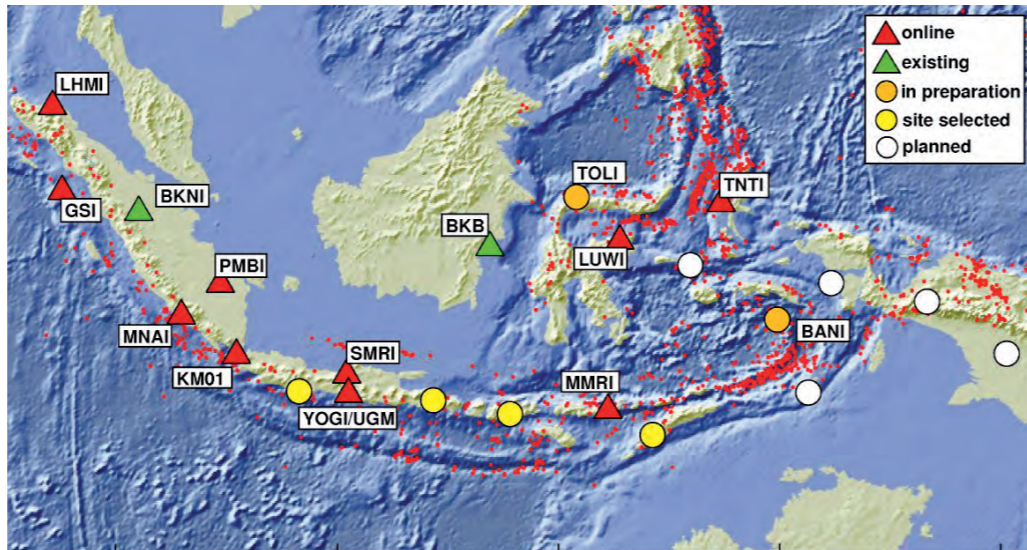
Ein Erdbeben ist ein gewaltiger Ruck, bei dem sich innerhalb kürzester Zeit Millionen Tonnen Gestein gegeneinander verschieben. Ein Teil dieser Energie breitet sich im Erdinneren und an der Erdoberfläche wellenförmig aus. Diese seismischen Wellen können mehrmals um den ganzen Globus laufen.

Elf Minuten nach dem Erdbeben vom Dezember 2004 erreichten die vom Sundabogen ausgehenden Stoßwellen Europa. Das in Potsdam entwickelte GEOFON-Erdbebenmessnetz registrierte das Beben automatisch und wertete die Daten aus. Nur zwei Minuten später wurde - ebenfalls ohne menschliches Eingreifen - eine Erdbebenmeldung im Internet verbreitet, E-Mails und SMS-Nachrichten gingen an angeschlossene Nutzer.

Bisher sind die Stationen dieses Netzes hauptsächlich in Europa konzentriert und mit Messnetzen anderer Länder verbunden. Für die Tsunami-Frühwarnung wird das GEOFON-Netz in der Region des

gesamten Indischen Ozeans ausgeweitet. Die ersten vier deutschen Stationen wurden bereits 2005 installiert, geplant sind 30 bis 40 weitere Stationen, von denen die Hälfte in Indonesien installiert wird. Außerdem bauen Indonesien, Japan und China ihre Erdbebenbeobachtung aus und schon vorhandene Messstationen werden für den voll automatischen Betrieb und die notwendige Satellitenkommunikation aufgerüstet. Das komplette Überwachungssystem in der Region soll insgesamt mehr als 160 Stationen umfassen.

An den jeweiligen Standorten messen Seismometer die Erdbebewegungen kontinuierlich und in einem breiten Frequenzbereich. Vor allem entlang des Sundabogens, der sich über 5.000 Kilometer erstreckt. Viele Stationen werden parallel zur Küste und auf den vorgelagerten Inseln aufgebaut. Um ein möglichst genaues Bild künftiger Beben zu erhalten, ist aber auch eine flächenhafte Verteilung erforderlich. Grundsätzlich gilt: Je näher die Stationen am Epizentrum liegen, umso schneller registrieren sie das Beben, aber umso schwieriger ist es, die für eine Charakterisierung des Bebens relevanten Informationen aus den Daten herauszufiltern. An weiter entfernten Stationen treffen die seismischen Wellen zwar etwas später ein, aber erst mit diesen Messungen können Ort und Stärke der Erschütterungen präzise ein-



Signale in Echtzeit

Die bislang aufgestellten Erdbebenstationen (Bilder links) liefern ihre Daten über Satellitenverbindungen in nahezu Echtzeit beim Zentrum in Jakarta ab. Dort werden die Informationen über eine große Satelliten-Antenne aus dem ganzen Land gesammelt. Es ist vorgesehen alle Messpunkte mit Echtzeit-Kommunikation auszustatten.

begrenzt werden.

Es sollte nicht mehr als ein bis zwei Minuten dauern, um ein Beben vor Indonesien bei der vorgesehenen Dichte an Messgeräten an drei bis vier Standorten automatisch zu erfassen und auszuwerten.

Nach weiteren zwei bis drei Minuten wird man imstande sein, die Lage des Epizentrums und die Erdbebenstärke genauer abzuschätzen.

Ort und Stärke eines Bebens liefern erste Anhaltspunkte für die mögliche Entstehung einer Tsunami-Welle. Maßgebend für die Modellrechnungen sind nun möglichst rasche Zusatzinformationen darüber, wie der Bruch in der Erdkruste verläuft und wie lang er ist.

Seismometer in einem weiten Umfeld können den Bruchvorgang während des gesamten Bebens verfolgen. Ein Bild davon, wo die stärksten Verschiebungen

der Erdkruste aufgetreten sind, soll sich ergänzend dazu aus punktgenauen GPS-Messungen ergeben. Die Satellitennavigation mit dem Globalen Positionsbestimmungssystem (GPS) ermöglicht heute eine sehr präzise Standortbestimmung für jeden Punkt auf der Erde. Mit dem Verfahren lässt sich daher auch feststellen, ob sich durch ein Beben die Lage an Messgeräten an drei bis vier Standorten automatisch zu erfassen und auszuwerten. Nach weiteren zwei bis drei Minuten wird man imstande sein, die Lage des Epizentrums und die Erdbebenstärke genauer abzuschätzen. Ort und Stärke eines Bebens liefern erste Anhaltspunkte für die mögliche Entstehung einer Tsunami-Welle. Maßgebend für die Modellrechnungen sind nun möglichst rasche Zusatzinformationen darüber, wie der Bruch in der Erdkruste verläuft und wie lang er ist. Seismometer in einem weiten Umfeld können den Bruchvorgang während des gesamten Bebens verfolgen. Ein Bild davon, wo die stärksten Verschiebungen

Für ein Frühwarnsystem ist es erforderlich, ein rasches Bild über derartige Verwerfungen zu bekommen. GPS zeichnet die Bodenbewegungen in der Bruchzone daher in Zukunft fortlaufend auf. Die Empfänger für die Satellitensignale werden auf den vorgelagerten Inseln im Sundabogen installiert. Diese Kombination zweier miteinander in Verbindung stehender GPS-Stationen gestattet es, mögliche Fehler bei der Positionsbestimmung zu minimieren.

Zusammen mit entsprechenden Referenzstationen auf dem Festland liefern sie detaillierte Informationen über seitliche Verschiebungen und Hebungs- oder Senkungsraten.

WÄCHTER DES MEERES

Das marine Messnetz

Als das deutsche Forschungsschiff „Sonne“ im November 2005 eine knapp sieben Meter lange Boje auf hoher See aussetzte, war ein wichtiges Etappenziel beim Aufbau des Frühwarnsystems erreicht. Die gelb gestrichene Boje und ihr Gegenstück tief unten am Ozeanboden waren Prototypen jener Messgeräte, die einen Tsunami schon auf offenem Ozean erkennen sollen.

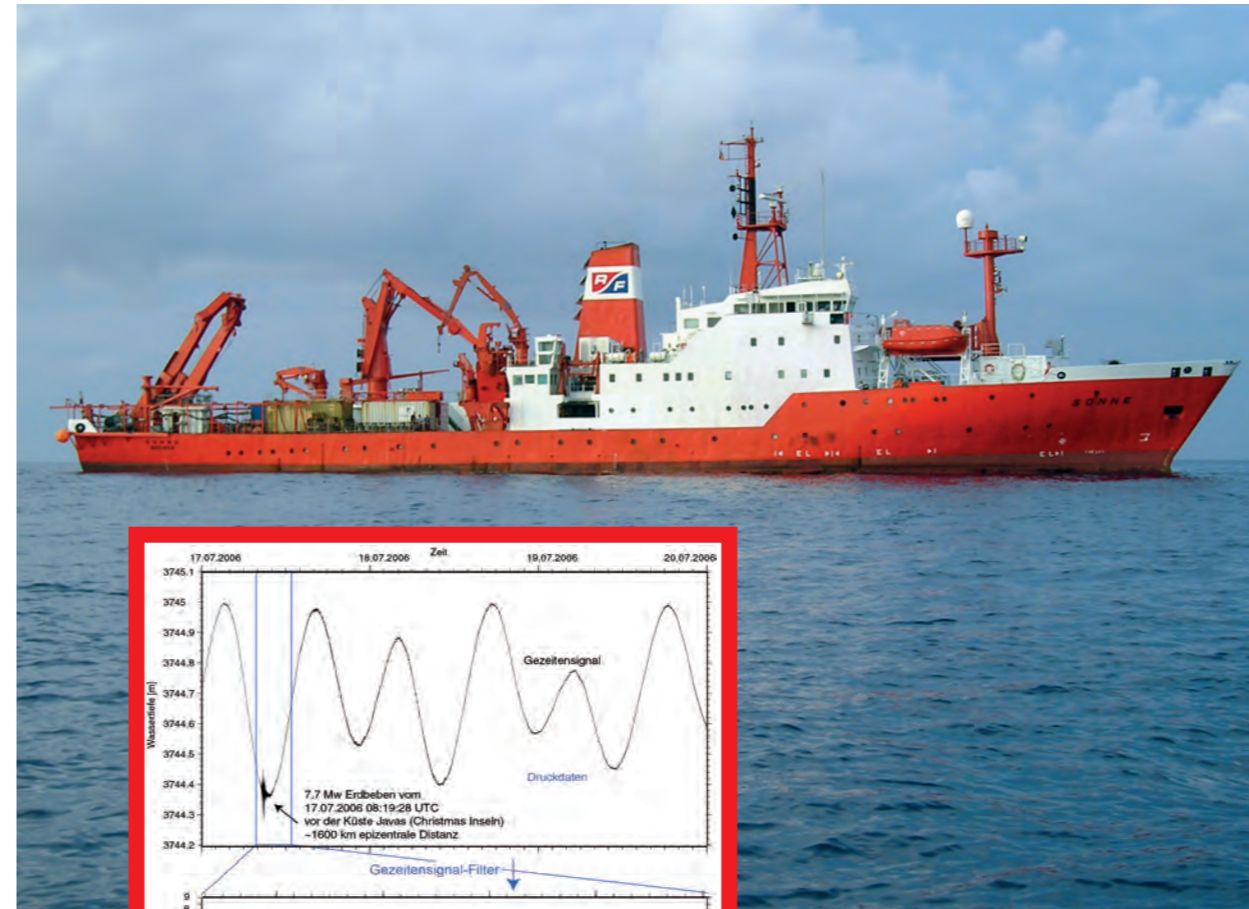
Der Alarm kommt aus bis zu 5.000 Metern Tiefe. Der Ozeanbodendrucksensor zeichnet den Durchgang der Welle auf. Das ist möglich, weil sich bei einem Tsunami das gesamte Wasservolumen bewegt: von der Meeresoberfläche bis hinunter zum Ozeanboden. Alle 15 Sekunden misst ein Sensor am Meeresboden den Druck, der von der auf ihm lastenden Wassersäule ausgeht.

Es gibt gute Gründe dafür, den Tsunami am Ozeanboden zu messen. Ein Bodendrucksensor kann Schwankungen des Meeresspiegels von wenigen Millimetern erfassen. Das Verfahren ist auch deshalb so elegant, weil ein Messgerät in solcher Tiefe den kurzfristigen Seegang nicht sieht. Es ist blind für kleine, vom Wind getrie-

bene Oberflächenwellen und hält nur den gemittelten Wasserstand fest.

Mehrmals täglich sendet die Unterwassereinheit die gesammelten Daten über ein akustisches Signal an die Boje. Im Ernstfall jedoch, wenn der Wasserpegel einen Schwellenwert überschritten hat, wird dies sofort gemeldet. Der Drucksensor wird durch ein Seismometer ergänzt, welches zusätzlich ein Beben gleich an Ort und Stelle ermitteln kann. Die Boje selbst ist die Relaisstation für die Datenübertragung zwischen dem Messgerät am Ozeanboden und einem Satelliten, über den die Kommunikation mit dem Warnzentrum erfolgt. Sie zeichnet auch meteorologische Einflüsse auf, registriert unter anderem den Luftdruck und die Windgeschwindigkeit. Insbesondere Änderungen des Luftdrucks könnten einen Tsunami vortäuschen. Sie sind bei der Berechnung der Wasserhöhe ebenso zu berücksichtigen wie die regelmäßigen Gezeiten.

Das Frühwarnsystem umfasst zehn Bojen und Ozeanbodeneinheiten. Sie werden bis 2009 in einer Kette entlang des Sundabogens aufgereiht und verfolgen rund um die Uhr den Wasserstand. Nicht nur über die Drucksensoren am Meeresboden, sondern unabhängig davon, um eine größere Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten, auch mit einem zweiten Verfahren: Auf den Bojen



Alarm aus der Tiefe

Mit dem Forschungsschiff "Sonne" wurden 2005 zwei Bojen und Drucksensoren ausgesetzt. Letztere zeichnen am Meeresboden Veränderungen auf, die im Alarmfall über die Bojen ans Warnzentrum gesendet werden.

sind GPS-Geräte angebracht. Über diese Empfänger stehen sie mit Navigations-Satelliten in Verbindung, die inzwischen in großer Zahl um die Erde kreisen. Aus der Laufzeit, die die GPS-Signale vom Satelliten zur Boje benötigen, lässt sich der Abstand zum Satelliten berechnen und bei Kenntnis der Satellitenbahn auch die Meeresspiegelhöhe. Ziel ist es, die Daten direkt vor Ort an der Boje, zu analysieren. In der ersten Phase soll die gewünschte Messgenauigkeit jedoch im Zusammenspiel der Boje mit einer Referenzstation an Land erreicht werden.

Auf offenem Meer ist ein Tsunami nur wenige Dezimeter hoch, an der Küste können sich die Wellen jedoch meterhoch auftürmen. Hier sollen Pegelstationen verlässliche Angaben über den jeweils aktuellen Wasserstand liefern. Im Katastrophenfall ist dies eine wichtige Voraussetzung dafür, Rettungsmaßnahmen gezielt einzuleiten und weiter entfernt liegende Gebiete rechtzeitig zu warnen. Auf der Seeseite der Sumatra vorgelagerten Inseln und entlang der indonesischen Küste wird das Pegelnetz entsprechend modernisiert und erweitert. Vorgesehen sind unter anderem Stationen mit jeweils zwei Druckpegeln und einem Radarpegel, die die Wasserhöhe bei Bedarf alle 15 Sekunden an das Warnzentrum übermitteln.

UNWEGSAMES BECKEN

Die Modellierung der Wellenausbreitung

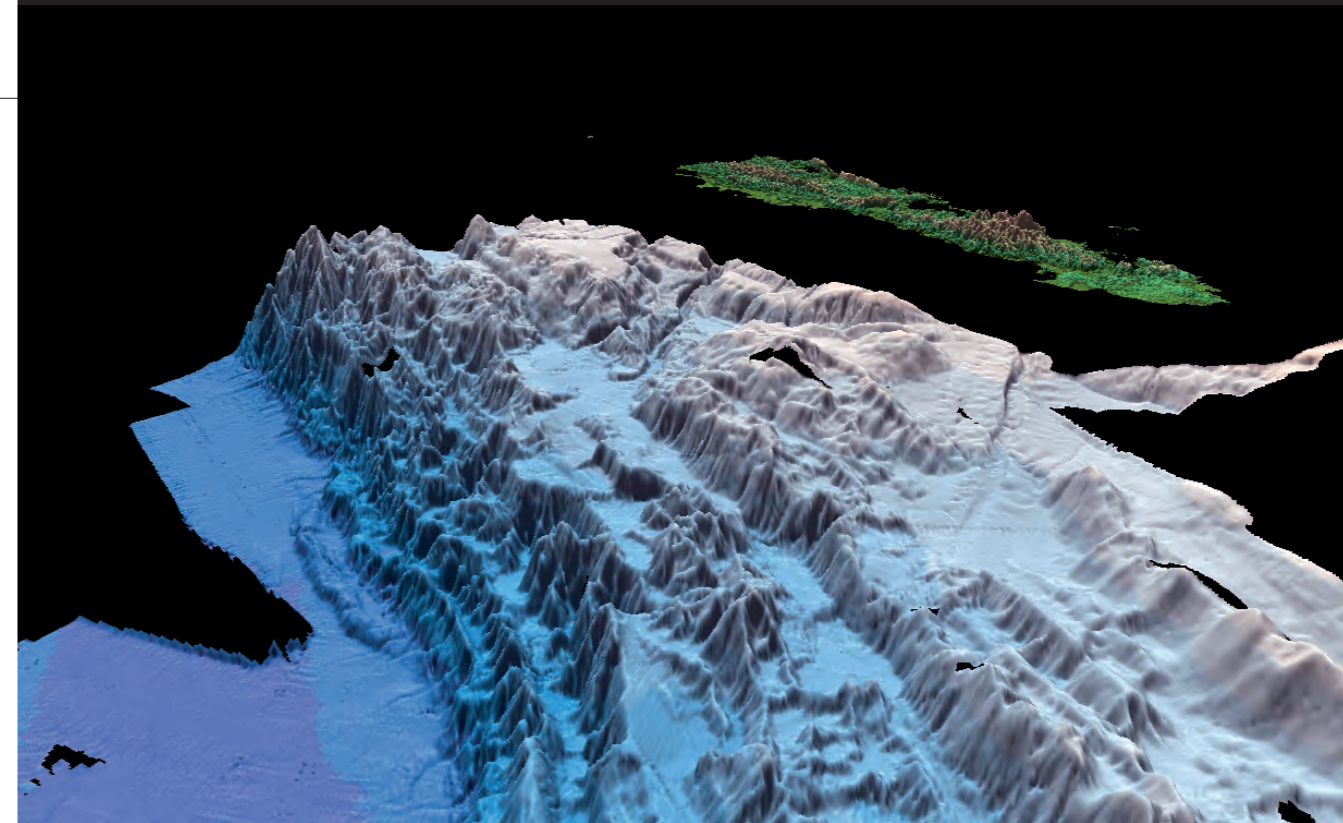
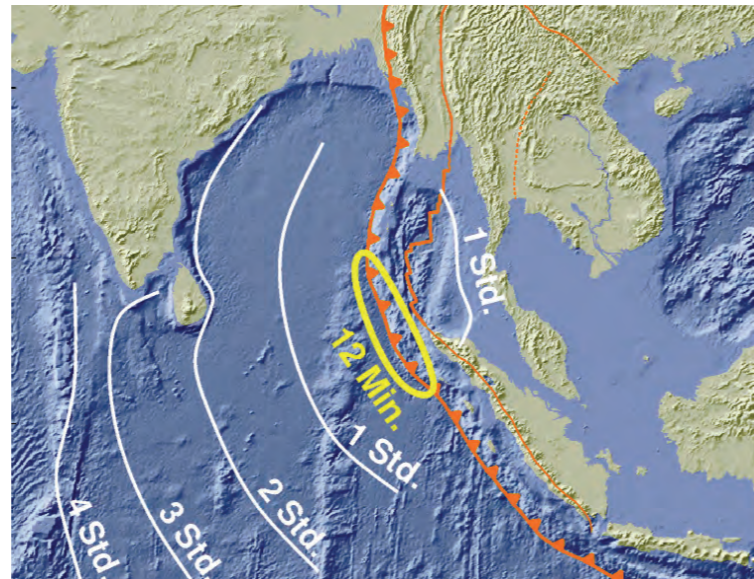
Es war nicht ein einziger Schlag, der den Indischen Ozean am 26. Dezember 2004 in Bewegung versetzte. Die Tsunami-Welle ging von einem 1.200 Kilometer langen Bruch aus. Entlang dieses Risses überlagerten sich die Wogen zu einer breiten Wasserfront, die auf die umliegenden Küsten zulief, Strände, Städte und Dörfer überspülte. An manchen Stellen wurden die Wellen reflektiert oder sie umrundeten Inseln. Nach den verheerenden Überflutungen schwang der gesamte Indische Ozean noch einen Tag lang nach.

Um Vorhersagen über Tsunamis machen zu können, benötigt man zunächst Informationen über das Beben. Je nachdem wie stark sich der Ozeanboden bei dem Beben hebt oder senkt, steigt oder fällt auch der Meeresspiegel. Wie sich die so entstandene Welle anschließend ausbreitet und wo sie letztlich an die Ufer schlägt, hängt dagegen vom Relief des Meeresbodens und seinem Übergang zur Küste ab.

Den Indischen Ozean rahmt ein schmaler Flachwassergürtel ein: der Schelf. Vor dieser Schelfzone fällt der Meeresboden steil ab, je nach Region bis auf 4.000 oder 6.500 Meter Wassertiefe. Der Sundagraben ist stellenweise noch tiefer. Inselketten, Unterwassergebirge und Rücken unterteilen den Ozean in mehrere Becken.

Die zerklüftete Gebirgslandschaft am Grund des Ozeans wurde unter anderem mit dem deutschen Forschungsschiff „Sonne“ vermessen, um verlässliche Kenntnisse über die Wassertiefen zu erhalten. Denn die Geschwindigkeit eines Tsunami hängt allein von der Wassertiefe ab: je tiefer das Wasser, umso schneller die Welle.

In einem 7.000 Meter tiefen Ozean breitet sich die Tsunami-Welle mit 950 Kilometern pro Stunde aus, so schnell wie ein Jumbojet. Auf offenem Meer erstreckt sie sich über Hunderte Kilometer, hat dabei aber nur eine unauffällige Höhe von wenigen Dezimetern. In Küstennähe hingegen sinkt die Geschwindigkeit rapide und beträgt in 10 Meter flachem Wasser bereits weniger als 40 Stundenkilometer. Dafür steigt die Wellenhöhe auf bis zu mehrere Dutzende Meter an. Thailand hat einen sehr ausgedehnten Flachwasserbereich, so dass der Tsunami im Dezember 2004 recht lange brauchte, um die thailändische Küste zu erreichen – genauso lan-



Gebiete im Inselfschatten. Anderswo gibt es dagegen trichterförmige Buchten oder Mündungen von Flüssen, in die die Wassermassen hineinlaufen und höher und schneller werden. Ähnliches gilt im Hinterland. Eine Kanalisierung gibt es hier zum Beispiel in breiten Straßen in Städten mit Betonbauten, durch die die Wassermassen strömen, wohingegen dichte Mangrovenwälder die Fluten bremsen und aufhalten können.

Wegen der komplexen

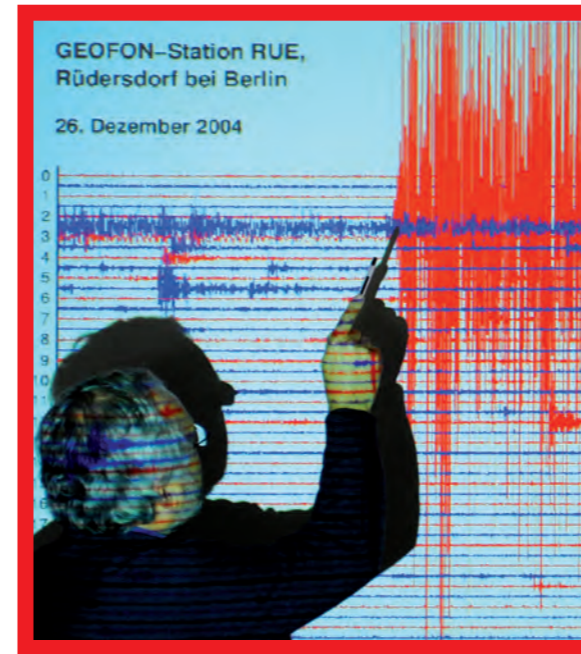
Topografie des Meeresbodens und der Küste ist es sehr aufwendig, die Wellenausbreitung und das Gefährdungspotenzial mit Hilfe von Computersimulationen zu bestimmen. Entsprechende realitätsnahe Rechnungen müssen bereits vor dem möglichen Katastrophenfall gemacht werden: für Hunderte potenzielle Bebenherde entlang des Sundabogens und für unterschiedliche Erdbebenstärken. Im Falle eines Bebens greift man dann zu dem Simulationsmodell, das mit den aktuellen Daten am besten übereinstimmt

ge wie bis zu den deutlich weiter entfernten Küsten im Nordosten Indiens und Sri Lankas. Besonders abrupt ändert sich das Verhalten eines Tsunami an der Schelfkante. Die Welle wird plötzlich gebremst, von hinten schiebt aber immer mehr Wasser nach. Unter Umständen wird der Tsunami in zwei oder drei Wellen geteilt. Auf dem immer flacher werdenden Schelf bäumt sich die Welle mehr und mehr auf, bis sie instabil wird und bricht. Das Wasser läuft schließlich wie eine meterhohe Wand auf den Strand zu.

Wie stark gefährdet die einzelnen Küstenabschnitte sind, lässt sich nur unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten vorhersagen. Wo sich große Inseln vor der Küste aneinander reihen wie vor Sumatra, liegen manche

Gebirge am Meeresboden

Für die Simulation der Wellenlaufzeiten und -höhen spielt die Kenntnis der Struktur des Meeresbodens eine große Rolle.



STÄNDIGE BEREITSCHAFT

Das nationale Warnzentrum in Jakarta

Die entscheidende Schnittstelle des Tsunami-Frühwarnsystems ist das rund um die Uhr besetzte nationale Warnzentrum. Hier laufen per Satellit sämtliche Daten aus Erdbeben- und GPS-Messungen sowie die Wasserstandshöhen der Bojensysteme und Küstenpegel ein. Sie müssen dem Dienst habenden Personal im Warnzentrum schnellstmöglich zur Verfügung stehen, damit anhand dieser Informationen eingeschätzt werden kann, ob und an welcher Stelle ein Tsunami in welcher Stärke entstanden sein bzw. auf die Küste treffen könnte.

Im Ernstfall zieht die Schaltzentrale die vorbereiteten Katastrophenszenarien aus einer Datenbank. Sie enthalten Abschätzungen für die Laufzeit der Welle und die zu erwartende Wellenhöhe und Angaben zu den Risikogebieten. Diese Informationen gehen mit einer Warnmeldung an die Regierung, die gefährdeten Provinzen, lokale Behörden, Hilfsorganisationen und die Öffentlichkeit, um rasche Evakuierungsmaßnahmen einzuleiten, den Schaden zu begrenzen und humanitäre Hilfs-

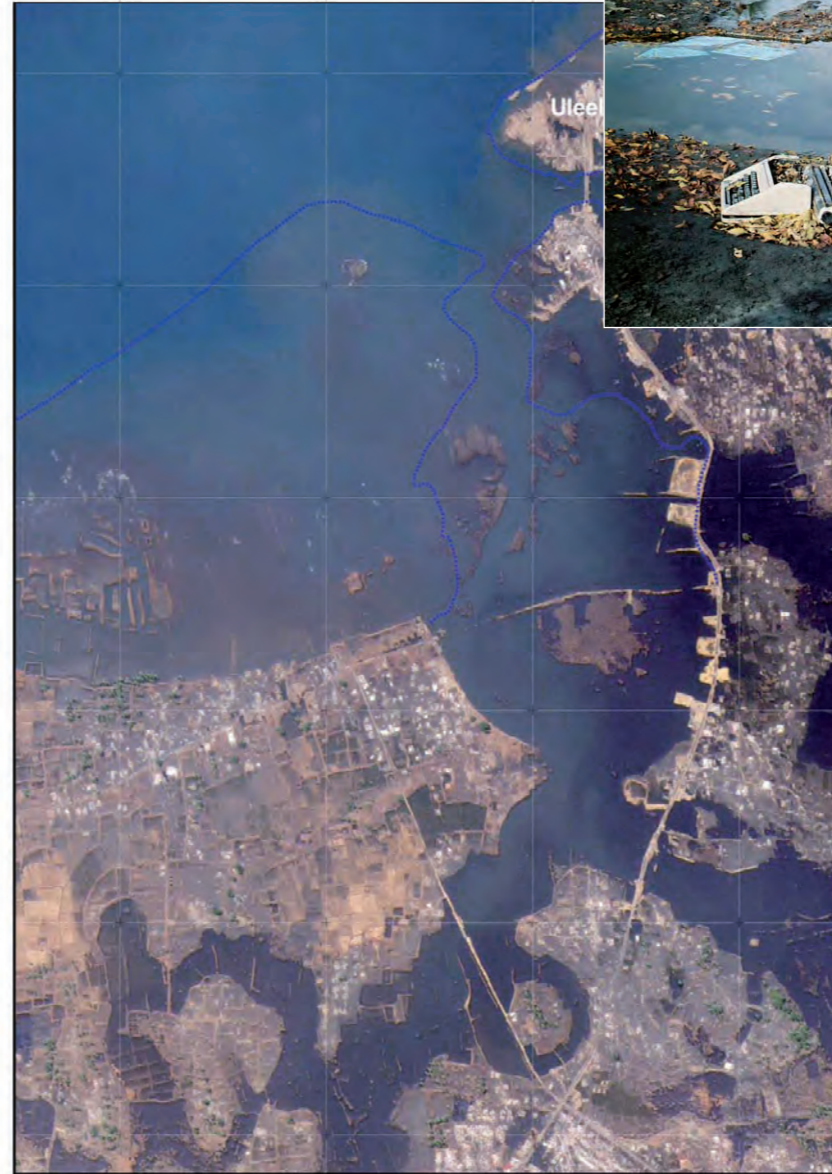
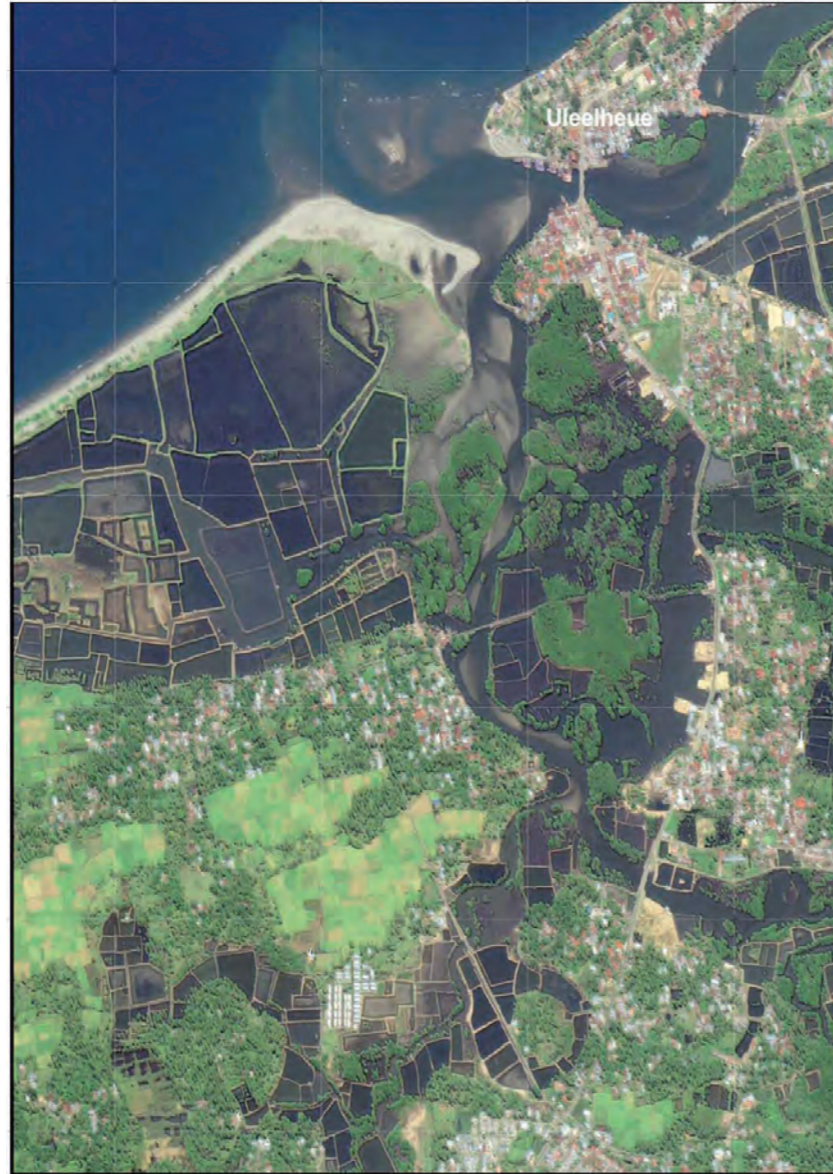
maßnahmen auf den Weg zu bringen.

Unabdingbare Voraussetzungen für die schnelle Warnung sind ein adäquates Kommunikationsnetz und klare Kommunikations- und Kommandostrukturen. Die seismischen Daten werden rund um die Uhr registriert. Bei jedem aufgezeichneten Beben lassen sich Stärke und Lage des Herdes zunächst grob abschätzen. Stellt sich heraus, dass es sich um ein Beben handelt, das einen Tsunami auslösen könnte, wird das gesamte Frühwarnzentrum in erhöhte Alarmbereitschaft versetzt.

Im Warnzentrum wird die Situation anhand der aktuellen Messergebnisse ständig bewertet, wobei zur schnellen Entscheidungsfindung auf mehrere Datenbanken zurückgegriffen wird.

Dort sind auch die Modellrechnungen hinterlegt. Mit Inbetriebnahme des Systems werden möglichst viele denkbare Szenarien für Tsunami-Ereignisse im Indischen Ozean für die gesamte Region durchgerechnet worden sein. So steht im Warnzentrum nach kurzer Zeit das Szenario zur Verfügung, das am besten zu den kontinuierlich einlaufenden Messparametern passt. Daraus ergibt sich, wann die Wellen in welcher Höhe in welchen Abschnitten der Küste eintreffen könnten.

Insbesondere für Entscheidungsträger ist es wichtig, sich möglichst schnell einen Überblick über



das Ausmaß einer möglichen Katastrophe machen zu können. Für sie gilt es zu wissen, welche Fläche und welche Teile einer Stadt betroffen sein werden, wie viele Menschen dort leben, ob Verkehrswege wie Brücken gefährdet und welche Industrien in der Region ansässig sind. Das Warnzentrum verfügt dazu über topographische Karten und aktu-

Bild der Verwüstung

Die Satellitenbilder zeigen einen Teil des nordwestlichen Küstenstreifens von Banda Aceh (Indonesien) vor und nach der dem zerstörerischen Tsunami, der am zweiten Weihnachtsfeiertag 2004 viele Anrainerländer des Indischen Ozeans heimsuchte. Die Flutwelle spülte fast die gesamte dicht bevölkerte Nehrung und große Teile der für Aquakulturen benutzten Felder weg. Banda Aceh war eine der am schwersten beschädigten Städte.

elle Datensätze zu Besiedlungsstrukturen, Bevölkerungsdichte, demographischen Entwicklungen, Transportnetzwerken, Infrastruktur und Industrie. Alle relevanten Informationen werden in vorgefertigte Dokumente eingelesen und an die zuständigen Stellen verschickt.

Im Katastrophenfall verschafft sich das Warnzentrum weitergehende Informationen über die aktuelle Lage. Dazu gehören insbesondere Daten von Erdbeobachtungssatelliten. Sie können dabei helfen, den entstandenen Schaden zu beurteilen und Hilfsmaßnahmen abzustimmen. Das nationale Lagezentrum in Jakarta ist eingebunden in ein internationales Netzwerk von Warnzentren im Indischen Ozean, dessen Aufbau von der UNESCO koordiniert wird, um den schnellen Informationsaustausch mit den Nachbarländern zu fördern.

DIE LETZTE MEILE

Die Alarmierung der Bevölkerung, Ausbildung und Organisation

Als die erste Tsunami-Welle Banda Aceh am 26. Dezember 2004 überspült und auf ihrem Weg alles mit sich fortgerissen hatte, kehrten viele der Überlebenden zu früh an die Strände zurück, um nach Vermissten zu suchen. Sie ahnten nicht, dass mit der für die langen Tsunami-Wellen typischen Verzögerung noch eine zweite und dritte Woge auf sie zukommen würde und liefen in ihr Unglück.

Die Katastrophe in Indonesien hat in vieler Hinsicht deutlich gemacht, wie wichtig es ist, das Wissen um die Gefahr solcher Tsunamis fest in der Bevölkerung zu verankern. Die Menschen in den gefährdeten Gebieten waren nicht darüber informiert, was es bedeuten kann, wenn sich nach einem Erdbeben das Meer plötzlich zurückzieht oder wenn eine erste Flutwelle die Küste bereits verwüstet hat.

Die wichtigste und schwierigste Etappe eines Tsunami-Frühwarnsystems ist die Warnung der betroffenen Menschen in den Küstenregionen – der letzte Kilometer. Lebensrettende Maßnahmen werden nur greifen, wenn die Warnung die Bevölkerung sowohl schnell als auch in verständlicher Form erreicht und wenn möglichst viele die potenzielle Gefahr bereits kennen. Schon ein starkes Beben sollte eine erhöhte Wachsamkeit in der Bevölkerung nach sich ziehen. Voraussetzung dafür ist, dass Kenntnisse über die Zusammenhänge von Erdbeben und Tsunamis in den Schulunterricht und in die Erwachsenenbildung hineingetragen werden. Der Alarm selbst kann über Rundfunk und Fernsehen verbreitet werden, typischerweise kommen Sirenen und Lautsprecheranlagen zum Einsatz. Da es in einigen ländlichen Gebieten in Indonesien keinen Strom gibt, werden auch Moscheen und andere Einrichtungen einbezogen, die mit ihren Lautsprechern die Warnmeldung verbreiten können.

Die Menschen in den gefährdeten Regionen müssen außerdem wissen, wohin sie im Katastrophenfall flüchten sollen. Entsprechende Sicherheitszonen müssen anhand von Risikokarten und Fluchtplänen ausgewiesen werden. Evakuierungsübungen tragen dazu bei, den Einzelnen mit Katastrophenschutzmaßnahmen vertraut zu machen.



Information und Training

...spielen bei der Ausbildung von Entscheidungsträgern eine große Rolle. Die Evakuierung der Bevölkerung muss für den Ernstfall geprobt werden. Mit anschaulichem Schulungsmaterial in der Landessprache und regelmäßigen Alarmierungsübungen wird bereits frühzeitig ein Gefahrenbewusstsein entwickelt.



Für die beteiligten Institutionen gilt es, das Frühwarnsystem effizient zu betreiben und Schritt für Schritt zu verbessern. Vor allem die Kommunikation zwischen den nationalen und regionalen Institutionen sowie den lokalen Entscheidungsträgern sollte reibungslos verlaufen. Dazu bedarf es klar abgestimmter Zuständigkeiten, wobei auch lokale Belange frühzeitig in das Frühwarnkonzept einzubringen sind.

Das „Capacity Building“ umfasst ein breites Aus- und Weiterbildungsprogramm. Vorgesehen sind Trainingseinheiten, die den Mitarbeitern die Möglichkeit geben, ihre individuellen und organisatorischen Fähigkeiten zu erweitern. Die einzelnen Workshops befassen sich mit der Kommunikationsinfrastruktur, Managementaufga-

ben sowie mit fachlichen und technischen Aspekten der Frühwarnung. Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker aus den Anrainerstaaten werden dabei vor Ort in die Funktionsweise des Systems, seine Wartung und Weiterentwicklung eingearbeitet.

Etablierte Forscher können sich im Rahmen eines akademischen Ausbildungsprogramms weiter qualifizieren. Ihnen werden gemeinsame Forschungsarbeiten mit deutschen Institutionen ermöglicht. Über vier Jahre hinweg sind jeweils sechs Gastwissenschaftler zu einem ein- bis zweimonatigen Aufenthalt in Deutschland eingeladen.

Außerdem erhalten acht Doktoranden aus Indonesien und den Nachbarländern eine dreijährige Ausbildung an den verschiedenen beteiligten Institutionen in Deutschland. Während dieser Zeit werden sie in den Aufbau des Systems eingebunden und bleiben ständig mit den Institutionen ihres Heimatlandes in Verbindung. Geplant sind jährliche Rückreisen von sechs bis acht Wochen sowie gemeinsame Seminare in Indonesien und Deutschland. Das gesamte Aus- und Weiterbildungsprogramm ist eng mit der UNESCO abgestimmt.

SPÄHER IM ALL

Die kontinuierliche Tsunami-Überwachung mit Satelliten

In zehn oder zwanzig Jahren könnte ein Tsunami-Frühwarnsystem dank neuer Technologien ganz anders aussehen als heute. Anstatt die Wellenbewegungen mit Bojen und Küstenpegeln nur punktuell zu messen, wäre es wünschenswert, den Ozean aus dem Weltraum zu überwachen und so ein Gesamtbild der Tsunami-Entstehung und -Ausbreitung zu bekommen.

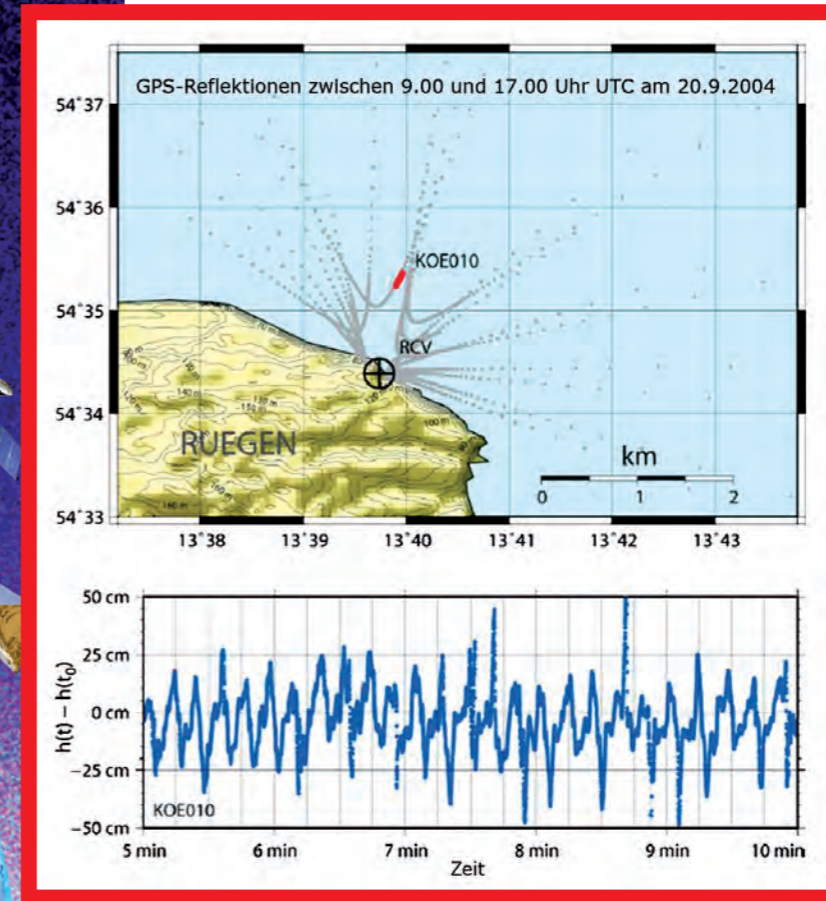
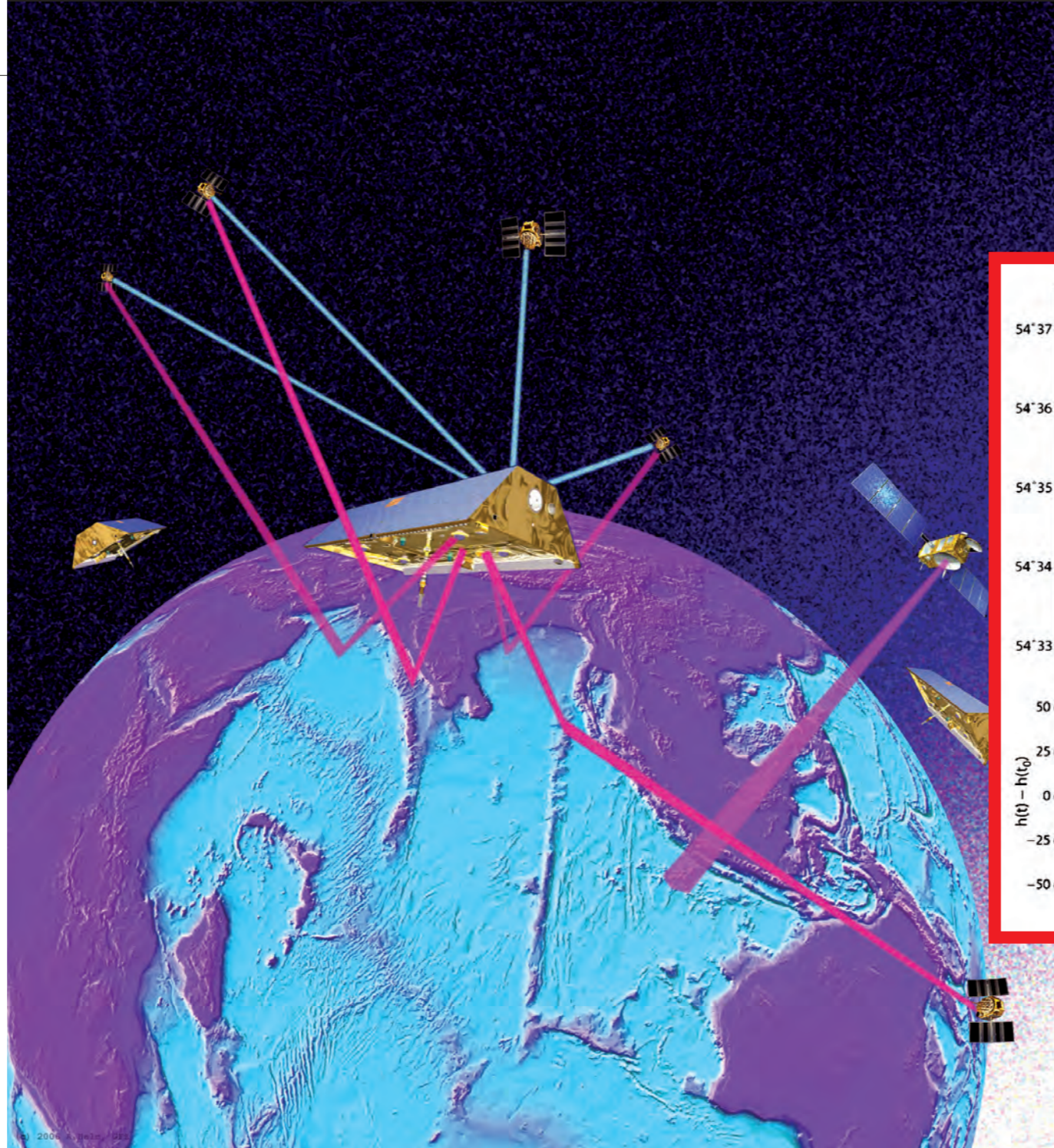
Dass dies möglich sein sollte, zeigen bereits heute unter anderem Satellitenbeobachtungen vom 26. Dezember 2004. In den Stunden nach dem Beben überflogen der französisch-amerikanische Satellit Jason-1, der europäische Satellit Envisat und der amerikanische Satellit Geosat den Indischen Ozean und zeichneten per Radar nacheinander die Wellenhöhen auf. Anhand dieser Daten rekonstruierten Wissenschaftler nachträglich den Weg, den der Tsunami genommen hatte. Sie stellten dabei auch fest, dass die Tsunami-

Wellen auf dem offenen Meer nicht mehr als 60 Zentimeter hoch waren.

Die genannten Satelliten arbeiten mit einem aktiven Radarsystem. Ihre Antenne sendet Radarwellen in Form von kurzen, aufeinander folgenden Signalen aus. Diese Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und werden an der Meeresoberfläche reflektiert. Die Satellitenantenne registriert das zurückgeworfene Signal, aus der Laufzeit lässt sich dann die zurückgelegte Strecke bestimmen - und damit der Abstand des Satelliten von der Meeresoberfläche.

Es gibt bereits einige Satelliten, die die Höhe des Meeresspiegels auf diese Weise messen. Allerdings sind sie vergleichsweise groß und teuer. Eine Alternative besteht darin, die Tsunami-Beobachtung aus dem Weltraum an bereits existierende und gegenwärtig im Aufbau befindliche Satellitennavigationssysteme wie das Globale Positionsbestimmungssystem (GPS) zu koppeln.

Derzeit kreisen 24 amerikanische GPS-Satelliten um die Erde. Mit dem europäischen System Galileo wird sich diese Zahl bis 2010 mehr als verdoppeln. Schon heute können an jedem Ort der Erdoberfläche jederzeit die Signale von mindestens vier solchen Satelliten empfangen werden. In der Satellitennavigation nutzt man die Laufzeiten dieser unterschiedlichen Signale, um den eigenen Ort zu



Neue Technologien

Erste Versuche der Beobachtung der Meeresspiegellhöhe mittels Satelliten haben vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Denkbar ist, dass diese Technologie in Zukunft auch bei der Frühwarnung zum Einsatz kommen könnte.

bestimmen. Sie erlauben auch die Messung der Meeresspiegellhöhe.

Zwar sind die Signale der GPS-Satelliten nicht so stark wie die der eigens für Höhenmessungen bestimmten Erdbeobachtungssatelliten. Aber sie werden genauso an der Meeresoberfläche gestreut. Zusätzliche Kleinsatelliten können diese reflektierten GPS-Signale in einer niedrigen Umlaufbahn einfangen und gleichzeitig den Abstand zum GPS-Satelliten messen. Aus der Kombination dieser Daten ergibt sich dann die Höhe des Meeresspiegels (siehe Grafik).

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Empfängersatelliten kein aktives Radarsystem benötigen, sondern nur ein aktives GPS- und Kommunikationssystem. Die Tsunami-Beobachtung aus dem All kommt vielmehr mit spezialisierten Kleinsatelliten aus, die in geringer Höhe um die Erde kreisen. Langfristig könnte man auf diese Weise mit wenigen preiswerten Satelliten sämtliche Ozeane überwachen. Diese Kleinsatelliten könnten zudem eine Reihe zusätzlicher Aufgaben übernehmen, etwa im Rahmen der Klimamodellierung. Mit dem deutschen Geoforschungssatelliten CHAMP sind bereits erste Tests für ein solches System durchgeführt worden.

DIE GANZE ERDE IM BLICK

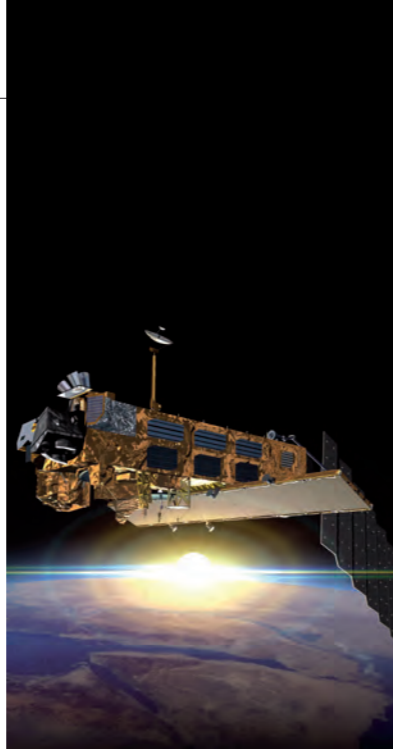
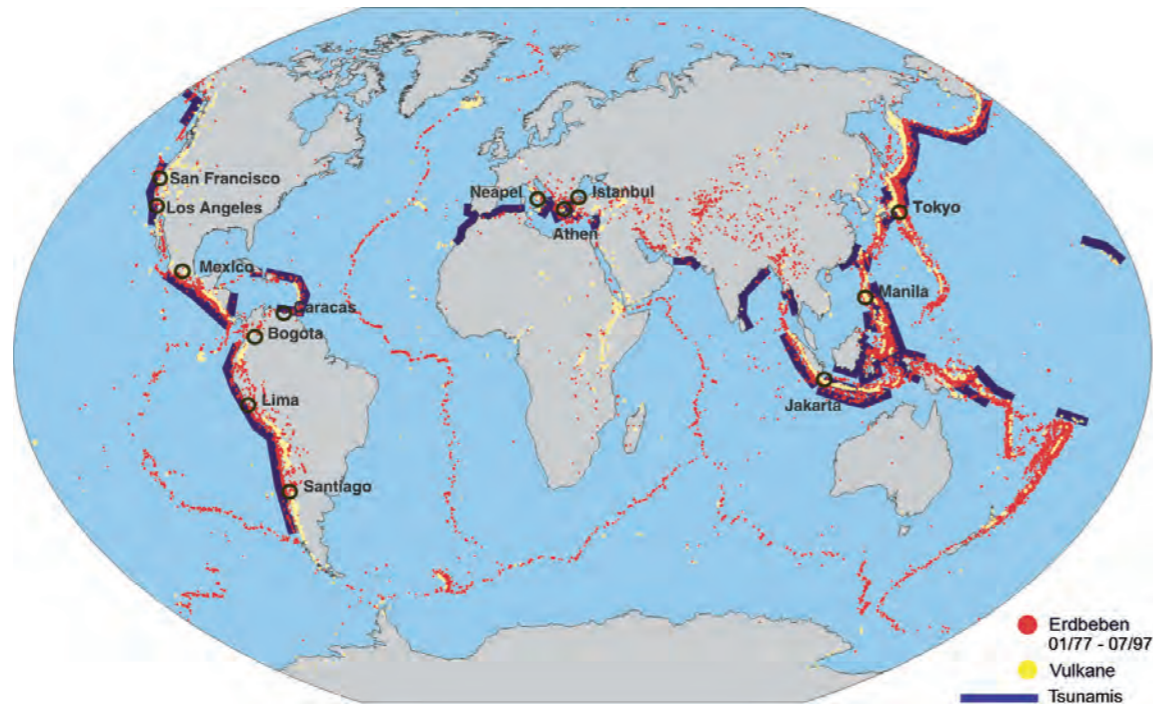
Das Tsunami-Frühwarnsystem als Teil eines globalen Erdbeobachtungsnetzes

Die Tsunami-Katastrophe im Dezember 2004 hat die Diskussion darüber, wie die Menschen an den Küsten der Ozeane künftig vor einer solchen Gefahr gewarnt werden können, neu in Gang gebracht. Die Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission (IOC) der UNESCO verfolgt das Ziel, ein weltumspannendes Tsunami-Frühwarnsystem einzurichten. Bereits seit 1960 koordiniert die IOC ein regionales Warnsystem im Pazifik. Es blieb für Jahrzehnte das einzige seiner Art, obschon oft betont wurde, wie wichtig es ist, ähnliche Systeme in anderen Regionen zu installieren.

Im Januar 2005 erhielt die IOC von den Vereinten Nationen den Auftrag, die Maßnahmen der Anrainerstaaten beim Aufbau eines Tsunami-Frühwarnsystems im Indischen Ozean zu koordinieren. Zentrales Anliegen der deutsch-in-

donesischen Initiative ist es, in der von Erdbeben am stärksten gefährdeten Region, dem Sundabogen, verlässliche und langfristig nutzbare Strukturen für ein solches Warnsystem zu schaffen. Das deutsche und das indonesische Forschungsministerium unterzeichneten hierzu am 14. März 2005 einen entsprechenden Kooperationsvertrag.

Sämtliche Aktivitäten innerhalb des deutsch-indonesischen Projekts zur Einrichtung eines Frühwarnsystems für den Indischen



Vielfältige Gefahren

Naturgefahren wie Erdbeben, Tsunamis oder Vulkansausbrüche sind nahezu weltweit verbreitet. Einige Regionen der Erde, wie Indonesien, sind jedoch besonders gefährdet. Rechts im Bild ist die Hauptstadt Jakarta hervorgehoben; gut erkennbar sind auch die Vulkankegel auf der Insel Java.

Ozean sind mit dem IOC abgestimmt. Die Daten und Informationen für eine schnelle Warnung der Bevölkerung sollen allen Anrainerstaaten des Indischen Ozeans zur Verfügung stehen. Das System ist so flexibel angelegt, dass auch die seismischen oder ozeanographischen Messnetze an-

derer Länder der Region eingebunden werden können.

Langfristig lässt sich ein solches System auf andere Gebiete der Erde übertragen. Angesichts der Erdbebengefahr in der Karibik oder im Mittelmeer erwägt die IOC auch in diesen Gebieten die Einrichtung eines Tsunami-Früh-

warnsystems. Dort stellen sich aufgrund der kurzen Distanzen und Vorwarnzeiten ähnliche Herausforderungen an Technologie und Management wie im Indischen Ozean.

Das Konzept für das deutsch-indonesische Frühwarnsystem sieht außerdem eine spätere Vernet-

zung mit weiteren globalen Monitoring-Systemen vor. Ziel internationaler Bemühungen ist es, in den kommenden Jahren ein globales geophysikalisches Beobachtungsnetz (GEOSS) aufzubauen. Das Koordinierungsgremium zwischen den teilnehmenden Staaten ist in Genf angesiedelt, Europa leistet hierzu mit der Schaffung eines Verbundes von Erdbeobachtungssystemen (GMES) einen wichtigen Beitrag.

Heutzutage gelten Navigationsatelliten als Leitsterne im Straßen-, Flug- und Schiffsverkehr. Erdbeobachtungsatelliten könnten die neuen Leitsterne der Katastrophenprävention werden, denn sie liefern mehr als nur eindrucksvolle Bilder. Seit Jahren spielen sie eine immer größere Rolle für die Warnung vor extremen Wetterereignissen, bei der Diagnose von Naturkatastrophen wie Stürmen, Flutwellen oder Waldbränden und die dadurch entstehenden Schäden. Auch die fortschreitende Wüstenbildung oder der Rückgang von Gletschern im Rahmen der Klimaveränderung liegen im Fokus der Erdbeobachtungsatelliten. Erst durch eine international vernetzte, kontinuierliche Erfassung von Daten über unsere Umwelt lässt sich verfolgen, wie sich die natürlichen Gleichgewichte, die sich über Jahrtausende eingestellt haben, durch menschliche Aktivitäten verändern.



WIR SIND GEWARNT

Eine stärkere internationale Zusammenarbeit in der Katastrophenprävention

Erdbeben treten an Stellen auf, wo starre Blöcke der Erdkruste aneinander stoßen. Wenn sich die Spannung zwischen solchen Platten plötzlich entlädt und eine von ihnen schlagartig vorrückt, kann sie den gesamten darüber liegenden Ozean anheben und eine gewaltige Tsunami-Welle auslösen. Es ist davon auszugehen, dass Indonesien wegen seiner unmittelbaren Nachbarschaft zum seismisch aktiven Sundabogen auch in Zukunft am häufigsten und am stärksten von solchen Tsunami-Ereignissen im Indischen Ozean betroffen sein wird.

Der Tsunami im Dezember 2004 verwüstete Strände und Dörfer und riss Häuser und Fahrzeuge weg. Es gab keine zuverlässigen Daten über das starke Beben und keine Möglichkeit, die Menschen vor der heranrollenden Katastrophe zu warnen. Selbst die Wellen, die mit anderthalb Stunden Verzö-

gerung Thailand und Sri Lanka und noch später Indien erreichten, rissen Zehntausende in den Tod, weil Informationen nicht weiter gegeben wurden und weil Evakuierungspläne für einen solchen Katastrophenfall fehlten.

Das Tsunami-Frühwarnsystem, das nun in deutsch-indonesischer Kooperation entsteht, trägt entscheidend dazu bei, dass die Region künftig besser für die Vorhersage von Tsunamis gerüstet sein wird: durch eine geeignete Technik, verlässliche Informationen und eine rasche Kommunikation. Es ist Teil eines von der Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Kommission (IOC) der UNESCO koordinierten Warn-

systems und als solcher ein Meilenstein der internationalen Zusammenarbeit in der Katastrophenprävention.

Das Ausmaß der Tsunami-Katastrophe im Indischen Ozean hat der Weltöffentlichkeit deutlicher denn je vor Augen geführt, welche Bedeutung der Entwicklung von Frühwarnsystemen und der Erdbeobachtung künftig zukommt. Sie können der Menschheit unschätzbare Dienste dabei leisten, die Folgen von Naturkatastrophen wie Erdbeben und Tsunamis, Vulkanausbrüchen und Stürmen zu begrenzen und unser Wissen um globale und regionale Umweltveränderungen zu erweitern.

I M P R E S S U M

Herausgeber:
GeoForschungsZentrum Potsdam
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Verantwortlich:
Dr. Jörn Lauterjung, Dr. Alexander Rudloff, Dr. Ute Münch

Konzept und Text:
Thomas de Padova

Layout:
Otto Grabe

Druck: Brandenburgische
Universitätsdruckerei
2. Auflage, Juni 2008

