

Spurensuche nach dem Tsunami

Grosse Fragezeichen bei der Erzeugung der Wellen

Die Modellierung der Erzeugung, der Ausbreitung und des Auflaufens eines Tsunamis auf der Küste ist ein schwieriges Unterfangen. Deshalb sind die Daten, die derzeit an den betroffenen Küsten Asiens gesammelt werden, für die Wissenschaft Gold wert.

H. W. In den durch den Tsunami vom 26. Dezember verwüsteten Gebieten Südostasiens geht neben den Hilfsorganisationen auch eine kleine Gruppe von Wissenschaftern ihrer Arbeit nach. Im Auftrag der Unesco nehmen die Forscher Daten über die Höhe der Flutwellen, die Grösse der überfluteten Fläche und weitere Charakteristika des Tsunami auf, bevor dessen Spuren durch die Aufräumarbeiten gänzlich verschwinden. Einer der beteiligten Tsunami-Forscher, der Schweizer Hermann Fritz vom Georgia Institute of Technology in Savannah, erzählt, dass etwa der Wasserstand anhand von Kleidungsstücken, Meerespflanzen und Trümmerteilen, die sich mehrere Meter über dem Boden in Palmen verfangen haben, und auch anhand von Spuren auf Gebäuden gemessen wird. Zudem werden Augenzeugen interviewt, um herauszufinden, wie viele und wie hohe Wellenberge und wie tiefe Wellentäler wann an einem bestimmten Ort heran rollten.

Tsunami ist nicht gleich Tsunami

Auf diese Weise soll die seltene Gelegenheit genutzt werden, um qualitativ hochwertige Daten für die Verbesserung der heutigen Tsunami-Modelle zu sammeln. Denn obwohl Flutwellen, die am Ufer und insbesondere in Häfen grosse Zerstörungen anrichten und deshalb nach dem japanischen Begriff für «Welle im Hafen» Tsunami genannt werden, schon lange bekannt sind, weiss man erst wenig über die genauen geologischen und physikalischen Prozesse, die bei ihrer Erzeugung, ihrer Ausbreitung und schliesslich bei ihrem Auflaufen an der Küste ablaufen. Ein Tsunami kann, wie im Fall der Flutwellen vom Stephanstag, durch Erdbeben unter Wasser, aber auch durch Erdbeben ins Wasser hinein oder unter Wasser und durch Asteroideneinschläge erzeugt werden. All diesen Ursachen ist gemein, dass dabei jeweils eine grosse Wassermasse aus der Gleichgewichtslage verdrängt wird, was eine oder mehrere Wellen entstehen lässt. Die Form dieser Wellen ist jedoch nicht bei jedem Tsunami gleich, sondern hängt von der Anregung ab.

Tsunamis, die von Erdbeben erzeugt werden, sind auf offenem Meer gewöhnlich kürzer und höher als solche, die durch ein Seebeben hervorgerufen werden. In nahe gelegenen Gebieten führt diese grosse Anfangshöhe von Erdbeben-generierten Tsunamis zu einer gewaltigen Zerstörungskraft. Weil diese aufgrund ihrer geringeren Wellenlänge schneller an Höhe und Energie verlieren, ist ihre Wirkung auf transozeanische Distanzen jedoch schwächer als diejenige von sogenannten tektonischen Tsunamis, wie sie durch Erdbeben erzeugt werden. Besonders schlimm sieht das Szenario im Fall eines Asteroideneinschlags ins Meer aus: Hier geht man zurzeit davon aus, dass die Wellen in der Nähe des Einschlagortes höher sind als bei einem Erdbeben, dass sie aber auf weite Entfernungen ähnlich zerstörerisch wirken wie tektonische Tsunamis.

Bei der Modellierung von tektonischen Tsunamis nahm man bisher an, dass ein Erdbeben den als elastisch angenommenen Meeresgrund sofort deformiert. Die daraus resultierende Hebungen

oder Senkungen des Bodens werden direkt in ein plötzliches Ansteigen beziehungsweise Abfallen des Meeresspiegels übersetzt. Im Fall des Tsunami vom 26. Dezember, des grössten, der je in der Tsunami-Forschung mit Modellen nachgebildet worden sei, sei aber aufgrund der bisherigen seismischen Auswertungen klar, dass dieses einfache Modell nicht ausreicht, sagt Costas Synolakis von der University of Southern California in Los Angeles. So sei der Bruch stellenweise wohl viel zu langsam erfolgt, um eine plötzliche Hebung des Meeresspiegels zur Folge zu haben. Jetzt werden komplexere Modelle für die Erzeugung von Tsunamis durch Erdbeben diskutiert; anhand der genau erfassten Höhe und Wirkung des Tsunamis im Indischen Ozean soll auf dessen Ursache geschlossen werden.

Die Diskussion um die Erzeugungsmechanismen ist auch bei den von Erdbeben generierten Tsunamis noch nicht abgeschlossen, obwohl nach Meinung von Dan Cox, dem Leiter des Hinsdale Wellenforschungs-Laboratoriums im amerikanischen Gliedstaat Oregon, auf diesem Gebiet in den neunziger Jahren grosse Fortschritte erzielt werden konnten. So wurden historische Beispiele studiert und physische Modelle gebaut, an denen sich die Erzeugung von Wellen durch einen Erdbeben nachbilden lässt. Im Laboratorium in Oregon steht dazu einer der grössten Wellenkanäle der Welt. In diesem über hundert Meter langen Bassin gleitet ein massiver rechteckiger Klotz auf einer Rampe ins Wasser, um eine Welle zu erzeugen, die anschliessend das Becken durchquert und am anderen Ende aufläuft. Dabei wird die Bewegung der Wellen mit elektronischen Sensoren aufgezeichnet, anschliessend werden diese mit numerischen Modellen verglichen.

Die komplizierte Modellierung der Ursache und Wellenform kann zusätzlich dadurch erschwert werden, dass Tsunamis in einigen Fällen sowohl durch ein Erdbeben als auch durch einen nachfolgenden Erdbeben erzeugt werden. Dies war zum Beispiel 1946 vor den Aleuten der Fall, als ein Erdbeben einerseits direkt einen Tsunami auslöste, andererseits auch einen Unterwasser-Erdbeben, der dann wiederum einen Tsunami zur Folge hatte. Solche Unsicherheiten sind der kleinen Gemeinde von Tsunami-Forschern ein besonderer Dorn im Auge, weil die aus der Erzeugung resultierenden Daten entscheidend sind für die Simulation des weiteren Verlaufs der Welle.

Gut bekannte Wellen-Ausbreitung

Die Computermodelle für die Ausbreitung von Tsunamis basieren laut Roland Fähr von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich auf einer Anzahl dreidimensionaler Gleichungen, welche die Bewegung der Wellen vollständig beschreiben. Die Gleichungen könnten jedoch für ein Gebiet mit der Ausdehnung des Indischen Ozeans auch bei einer Zusammenschaltung sämtlicher Computer der Welt nicht gelöst werden, weshalb in der Modellierung vereinfachende Annahmen getroffen werden müssten. Eine der fundamentalsten Annahmen ist, dass es sich bei einem Tsunami

um eine Flachwasserwelle handelt, das heisst um eine Welle, deren Wellenlänge mindestens zwanzigmal grösser ist als ihre Amplitude. Beobachtungen legen nahe, dass dies für Tsunamis auf offener See eine gute Näherung ist. Bei Flachwasserwellen hängt die Geschwindigkeit aufgrund der Wellengleichung direkt von der Wassertiefe ab: Je tiefer das Wasser, desto schneller bewegt sich die Welle. Für die Modellierung ist deshalb eine genaue Kenntnis der örtlichen Meerestiefe nötig.

Eine weitere Vereinfachung kann dadurch erzielt werden, dass man Wasser als eine inkompressible Flüssigkeit betrachtet und die Reibung der Wasserteilchen aneinander vernachlässigt. Der Reibungsfaktor, der zum Energieverlust der Welle führt, ist so nur noch von der Reibung an der Küstenlinie und in einem geringeren Mass von der Reibung am Boden abhängig. Auch beim Energieverlust der Wellen gebe es zwar noch immer offene Fragen, so Cox, dennoch sei die Wellenausbreitung von den drei Stufen eines Tsunamis – der Erzeugung, der Ausbreitung und dem Auflaufen – die am besten bekannte.

Läuft die Front einer Welle in flacheres Gewässer, so nimmt ihre Geschwindigkeit ab, die nachfolgenden Wellenzüge aber befinden sich noch immer in tieferem Gewässer und bewegen sich dementsprechend schneller fort. Dies führt zu einer «Stauchung» der Wellenlänge und lässt die zuvor flachen Wellen zu hohen Wasserwänden anwachsen. Wie die Beobachtung zeigt, wird dabei das Wasser an der Küste in vielen Fällen von der Welle regelrecht angesaugt und zieht sich deshalb weit zurück. In dieser Situation kann der Tsunami nicht mehr als Flachwasserwelle beschrieben werden. Seine Höhe und wie weit er ins Landesinnere vordringt, kann von kleinsten Merkmalen der Küstenlinie abhängig sein. Ein drastisches Beispiel dafür ist der Tsunami vom Jahr 1992 in Nicaragua, der in der Ortschaft El Transito eine gewaltige Höhe von elf Metern erreichte, während im nur einen Kilometer entfernten Playa Hermoza selbst die Sonnenschirme am Strand stehen blieben. Um Zonen bestimmen zu können, die durch Tsunamis besonders gefährdet sind, muss daher die Topographie der Küste sehr genau vermessen sein. Dies allein genügt jedoch noch nicht, um die Schädigung durch einen Tsunami voraussagen zu können. Die Gewalt eines Tsunamis hängt nämlich auch von seiner Geschwindigkeit ab. So kann eine Welle mit einer Höhe von einem Meter und einer Fliessgeschwindigkeit von zwanzig Metern pro Sekunde einen grösseren Schaden anrichten als eine zwei Meter hohe Welle, die sich mit nur einem Meter pro Sekunde fortbewegt.

Validierung der Modelle notwendig

All diese Eigenschaften eines Tsunamis erschweren es, die präzise Form und Wirkung der Wellen vorherzusagen, vor allem dann, wenn schon die Erzeugungsmechanismen nicht genau bekannt sind. Dies lässt sich am besten am Beispiel der kanarischen Insel La Palma zeigen: Hier klafft im Gestein ein Riss, der bei einem Ausbruch des Vulkans Cumbre Vieja zu einem Abbruch der westlichen Bergflanke ins Meer führen könnte. Der dadurch erzeugte Tsunami würde sich quer über den Atlantik bewegen. Ob er allerdings an der Ostküste Amerikas noch grossen Schaden anrichten könnte, hängt davon ab, wie gross und wie schnell die abbrechende Masse wäre; die unter Experten diskutierten Werte für die Wellenhöhe in New York reichen von 1 bis zu 25 Metern. Diese grosse Diskrepanz erklärt sich allerdings auch dadurch, dass einige Modelle die

komplizierten nichtlinearen Effekte vernachlässigen, die beim Auftreffen der Welle auf die Küste eine Rolle spielen, und deshalb das Auftürmen der Welle überschätzen.

Zum besseren Verständnis der Eigenschaften eines Tsunamis ist laut Vasily Titov von der amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) die Validierung der bestehenden Modelle anhand von gesammelten Daten unerlässlich. Für den Tsunami von Ende Dezember hat die NOAA deshalb erstmals die Höhenmessungen des Meeresspiegels von vier Satelliten ausgewertet. Sie machen sichtbar, wie sich die einige Zentimeter hohen Wellen über den Indischen Ozean ausgebreitet haben. Für ein Frühwarnsystem ist die Übertragung und Analyse von Satellitendaten allerdings noch viel zu langsam; die heute beste Möglichkeit zur Tsunami-Warnung ist die Placierung von hochempfindlichen Druckmessern am Meeresgrund. Synolakis weist jedoch darauf hin, dass Warnsysteme keine rein technologische Angelegenheit seien. Auch die nötige Infrastruktur und Evakuationspläne müssten vorhanden sein, um die Bevölkerung damit vertraut machen zu können. Nur so kann man der Gewalt des nächsten Tsunami vielleicht einen Schritt voraus sein.