

Tsunami

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

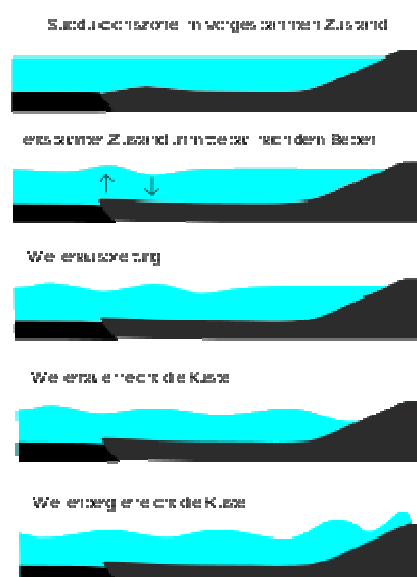
Ein **Tsunami** (jap. 津波, wörtlich ‚Hafenwelle‘), deutsch ehemals **Erdbebenwoge** genannt, ist eine besonders lange Wasserwelle, die sich über sehr große Entfernungen auszubreiten vermag, beim Vordringen in Bereiche geringer Wassertiefe gestaucht wird, sich dadurch an einer flachen Küste zu einer hohen Flutwelle auftürmt und so das Wasser weit über die Uferlinie trägt; beim anschließenden Zurückweichen wird das auf dem überschwemmten Land mitgerissene Material oft weit ins Meer hinausgespült. Ein Tsunami entsteht infolge plötzlicher Hebung oder Senkung von Teilen des Meeresbodens bei einem unterseeischen Erdbeben oder durch das Hineinrutschen großer Erdmassen ins Wasser, äußerst selten auch durch den Einschlag eines Himmelskörpers.

Der Begriff „Tsunami“

Der Begriff *Tsunami* (japanisch für: Hafenwelle) wurde durch japanische Fischer geprägt, die vom Fischfang zurückkehrten und im Hafen alles verwüstet vorfanden, obwohl sie auf offener See keine Welle gesehen oder gespürt hatten. Darum nannten sie die mysteriösen Wellen *Tsu-nami*, das heißt „Welle im Hafen“.

Eine Reihe verheerender Tsunamis zwischen 1945 und 1965 machte dieses Naturphänomen weltweit bekannt und bildete die Grundlage für wissenschaftliche Arbeiten, in deren Folge sich die japanische Bezeichnung als Internationalismus durchsetzte. Die bisher früheste bekannte wissenschaftliche Beschreibung dieses Naturereignisses mit exakter Ursachenanalyse stammt von dem österreichischen Geowissenschaftler Ferdinand von Hochstetter, der es 1868 in seinem Aufsatz *Ueber das Erdbeben in Peru am 13. August 1868 und die dadurch veranlassten Fluthwellen im Pacifischen Ozean, namentlich an der Küste von Chili und von Neuseeland* darstellte.^[1]

Entstehung



Entstehung und Fortpflanzung eines Tsunamis

Tsunamis werden meist (zu etwa 90 %) durch starke Erdbeben unter dem Ozeanboden angeregt; die übrigen entstehen infolge von Vulkanausbrüchen, untermeerischen Erdrutschen oder in sehr seltenen Fällen durch Meteoriteneinschläge.

Tsunamis treten mit ungefähr 79 % am häufigsten im Pazifik auf: Am Rand des Stillen Ozeans, in der Subduktionszone des Pazifischen Feuerrings, schieben sich tektonische Platten der Erdkruste (Lithosphäre) übereinander. Durch die sich ineinander verhakenden Platten entstehen Spannungen, die sich zu einem nicht vorhersehbaren Zeitpunkt schlagartig entladen, wodurch Erd- und Seebeben ausgelöst werden. Dabei werden die tektonischen Platten horizontal und vertikal verschoben. Die vertikale Verschiebung hebt oder senkt auch die darüberliegenden Wassermassen. Durch die Gravitation verteilt sich das Wasser als Wellenberg oder Wellental in alle Richtungen; je tiefer der Meeresbereich, umso schneller. So breitet sich eine Wellenfront in alle Richtungen aus. Meist ist die unterseeische Bruchzone nicht flächen-, sondern linienförmig, dann bewegt sich die Wellenfront v. a. in zwei Richtungen (rechtwinklig von der Bruchlinie weg).

Ein Erdbeben kann nur dann einen Tsunami verursachen, wenn alle drei folgenden Bedingungen gegeben sind:

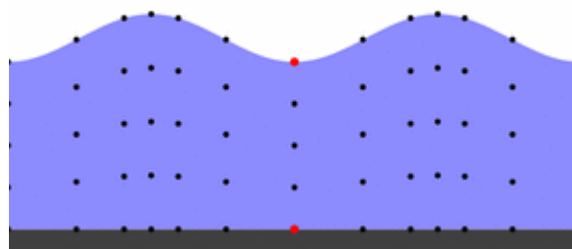
- Das Beben erreicht eine Magnitude von 7 oder mehr.
- Sein Hypozentrum liegt nahe der Erdoberfläche am Meeresgrund.
- Es verursacht eine vertikale Verschiebung des Meeresbodens, welche die darüberliegende Wassersäule in Bewegung versetzt.

Nur ein Prozent der Erdbeben zwischen 1860 und 1948 verursachten messbare Tsunamis.

Ausbreitung

Tsunamis unterscheiden sich grundlegend von Wellen, die durch Stürme entstehen. Letztere werden in Abhängigkeit von der Wassertiefe im Verhältnis zur Wellenlänge als Flachwasserwelle oder Tiefwasserwelle bezeichnet. Bei Tiefwasserwellen hat die Welle keinen Kontakt zum Grund und die tieferen Wasserschichten bleiben unbewegt. Somit hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht von der Wassertiefe ab. Bewegt sich eine solche Welle in flacheres Gewässer, wird sie zur Flachwasserwelle, bewegt also die gesamte Wassersäule und wird dabei langsamer. Aufgrund ihrer großen Wellenlänge sind Tsunamis nahezu überall Flachwasserwellen. Sie bewegen also im Gegensatz zu Windwellen die ganze Wassersäule. Ihre Geschwindigkeit ist daher praktisch überall von der Wassertiefe abhängig.

Tsunamis sind Schwerewellen



Bei der Fortpflanzung eines Tsunamis bewegt sich die gesamte Wassersäule (Größenordnung übertrieben); allerdings nimmt die Bewegungsamplitude, anders als hier dargestellt, mit zunehmender Tiefe ab und erreicht am Boden null.

Wellenausbreitung ist immer dann möglich, wenn eine Auslenkung aus einer Gleichgewichtslage, in diesem Fall ein Anstieg oder Abfall des Wasserspiegels, eine entgegengerichtete Rückstellkraft zur Folge hat. Bei Ozeanwellen wirkt als Rückstellkraft die Schwerkraft, die auf eine möglichst horizontale Wasseroberfläche hinarbeitet. Aus diesem Grund werden Tsunamis zu den Schwerewellen gezählt. Ein Tsunami ist also insbesondere keine Druck- und keine Schallwelle. Kompressibilität, Viskosität und Turbulenz sind nicht relevant. Um die Physik eines Tsunamis zu verstehen, genügt es, die Potentialströmung einer idealen, also reibungsfreien, inkompressiblen und wirbelfreien Flüssigkeit zu betrachten. Mathematisch werden Tsunamis als Lösungen der Korteweg-de-Vries-Gleichung beschrieben.

Die Theorie der Schwerewellen vereinfacht sich in den beiden Grenzfällen der Tief- und der Flachwasserwelle. Normale Wellen, die beispielsweise durch Wind, fahrende Schiffe oder ins Wasser geworfene Steine verursacht werden, sind meist Tiefwasserwellen, da sich ihre Wellenbasis in der Regel über dem Grund des Gewässers befindet, also dort, wo die Welle keine Auswirkungen mehr hat. Ein Tsunami hingegen ist auch im tiefsten Ozean eine Flachwasserwelle, da die gesamte Wassersäule bewegt wird und sich auch am Ozeanboden eine langsamere Bewegung in Richtung der Wellenausbreitung feststellen lässt. Dem entspricht, dass bei Tsunamis die Wellenlänge (Entfernung von einem Wellenberg zum nächsten) viel größer ist als die Wassertiefe. Dabei wird eine wesentlich größere Wassermenge bewegt.

Ein Tsunami wird vereinfacht durch zwei Grundparameter beschrieben:

- seine mechanische Energie E ;
- seine Wellenperiode T : die Zeit, die vergeht, in der zwei Wellenberge denselben Punkt passieren.

Während der Ausbreitung eines Tsunamis bleiben diese beiden Parameter weitgehend konstant, da wegen der großen Wellenlänge die Energieverluste durch Reibung vernachlässigbar sind.

Tsunamis seismischer Natur weisen lange Wellenperioden auf, die sich zwischen zehn Minuten und zwei Stunden bewegen. Durch andere Ereignisse als Erdbeben erzeugte Tsunamis haben oft kürzere Wellenperioden im Bereich von einigen Minuten bis zu einer Viertelstunde. Andere Eigenschaften wie die Wellenhöhe und -länge oder die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängen neben den beiden Grundparametern nur von der Meerestiefe ab.

Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit eines Tsunamis hängt von der Meerestiefe ab: Je tiefer das Meer, desto schneller und je flacher, desto langsamer ist der Tsunami. Die Geschwindigkeit c einer Tsunamiwelle (genauer: ihre Phasengeschwindigkeit) ergibt sich aus der Wurzel des Produktes von Erdbeschleunigung g (9,81 m/s²) und Wassertiefe h ; also gilt:

$$c = \sqrt{g \cdot h}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt somit in Ozeanen (Wassertiefe ca. 5000 m) ca. 800 km/h. Das ist vergleichbar mit der Reisegeschwindigkeit eines Flugzeuges. Tsunamis können also binnen einiger Stunden ganze Ozeane durchqueren und sich bis zu 20.000 km ausbreiten, ohne dabei unmittelbar bemerkt zu

werden. Bei vom Wind erzeugten Wellen dagegen liegen die Geschwindigkeiten zwischen 8 und 100 km/h. Bei niedriger Wassertiefe, also in Küstennähe, verlangsamt sich der Tsunami, wie auf nebenstehender Animation zu sehen ist. Damit verringert sich auch die Wellenlänge, wodurch es zu einem Anstieg der Wellenhöhe und schließlich zum Brechen der Welle kommt.

Schwerewellen kommen durch die gleichtaktige Bewegung großer Wassermassen zustande. Jedes einzelne Teilvolumen des Wassers bewegt sich dabei nur um winzige Beträge. Für eine Flachwasser-Schwerewelle mit der Amplitude A in einem Gewässer der Tiefe h kann man das sogar quantitativ angeben: Die Geschwindigkeit, mit der sich die an der Welle beteiligte Materie zirkulär bewegt, ist um einen Faktor A/h kleiner als die Phasengeschwindigkeit c der Welle. Für einen großen Tsunami liegt dieser Faktor in der Größenordnung 10^{-5} : Wenn sich eine Welle im offenen Meer mit $c = 200$ m/s (= 720 km/h) ausbreitet, bewegen sich die Wasserelemente nur mit 2 mm/s, was gegenüber Strömungen und Windwellen völlig vernachlässigbar und nicht direkt beobachtbar ist. Zugleich erklärt es den nur geringen Energieverlust der Schwerewelle bei ihrer Wanderung.

Wellenlänge

Tsunamis sind, da ihre Wellenlänge λ viel größer als die Meerestiefe h ist, sogenannte Flachwasserwellen. Typische Wellenlängen bei Tsunamis liegen zwischen 100 und 500 km. Die Wellenlängen von wind erzeugten Wellen erreichen dagegen nur zwischen 100 und 200 Meter. Allgemein gilt für Wellen die Beziehung

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

zwischen Geschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Wellenperiode T .

Mit der Tsunamigeschwindigkeit von oben und der Angabe der Wellenlänge können typische Wellenperioden über

$$T = \frac{\lambda}{c}$$

errechnet werden zu:

$$\frac{100 \text{ km}}{800 \text{ km/h}} < T < \frac{500 \text{ km}}{800 \text{ km/h}} \quad \Rightarrow \quad 7,5 \text{ min} < T < 37,5 \text{ min}$$

T ist die Zeit, die bis zum Eintreffen der zweiten Welle vergeht.

Je größer die Wellenlänge, desto geringer sind die Energieverluste während der Wellenausbreitung. Bei kreisförmiger Ausbreitung ist die Energie, mit der eine Welle auf einen Küstenstreifen auftrifft, in erster Näherung umgekehrt proportional zum Abstand vom Entstehungsort des Tsunamis.

Tiefe (m)	Geschwindigkeit (km/h)	Wellenlänge (km)
10	36	10,6
50	79	23
200	159	49
2000	504	151
4000	713	213
7000	943	282

Geschwindigkeit und Wellenlänge eines Tsunamis in Abhängigkeit von der Wassertiefe^[2]

Amplitude

Die Wellenhöhe (Amplitude) A des Tsunamis hängt von der Energie E und der Wassertiefe h ab. Bei Tsunamis mit großer Wellenlänge gilt:

$$A \sim \sqrt{\frac{E}{r \cdot \sqrt{h}}}$$

Dies bedeutet, dass die Amplitude A bei geringerer Wassertiefe h zunimmt. Im offenen Meer nimmt sie mit zunehmender Entfernung r nur um den Faktor $1/\sqrt{r}$ ab (Kugelwellen, die sich in die Tiefe ausbreiten, nehmen um den Faktor $1/r$ ab). Dies kann man sich veranschaulichen, wenn man einen Stein in eine flache Pfütze wirft. Die Amplitude der Wasserwellen nimmt nur merklich ab, da sich die Energie kreisförmig über einen größeren Wellenkamm verteilt. Der Energieverlust durch die innere Reibung der Wassermoleküle ist verschwindend gering und der Impuls wird nahezu ungeschwächt an die benachbarten Wassermoleküle weitergegeben. Die Energie einer Tsunamiwelle schwächt sich im offenen Meer nur durch ihre geometrische Ausbreitung ab. Tsunamiwellen können daher die Erdkugel mehrfach umrunden. Bei Tsunamis kleinerer Wellenlänge – meist nicht von Erdbeben verursacht – kann die Amplitude mit der Entfernung wesentlich schneller abnehmen.

Auf dem offenen Ozean beträgt die Amplitude selten mehr als einige Dezimeter. Der Wasserspiegel wird somit nur langsam und nur um einen geringen Betrag angehoben und wieder abgesenkt, weshalb das Auftreten eines Tsunamis auf offener See meist gar nicht bemerkt wird.

Die Zerstörungskraft eines Tsunamis wird *nicht* grundsätzlich durch seine Amplitude, sondern durch die Wellenperiode sowie durch die transportierte Wassermenge bestimmt.

Auftreffen auf die Küste

Die Energie der Wellen, die auf dem freien Ozean noch weit verteilt war, konzentriert sich durch nichtlineare Mechanismen, wenn die Tsunamis den Küsten nahe kommen. Dann werden die Wellen gebremst, gestaucht und stellen sich auf.

Erhöhung der Amplitude



Beim Auftreffen auf die Küste erhöht sich die Amplitude; die Wellenlänge und Geschwindigkeit des Tsunamis nehmen ab (siehe Tabelle).

In Küstennähe wird das Wasser flach. Das hat zur Folge, dass Wellenlänge und Phasengeschwindigkeit abnehmen (siehe Tabelle). Auf Grund der Erhaltung der Gesamtenergie (siehe Energieerhaltungssatz) wird die zur Verfügung stehende Energie in potentielle Energie umgewandelt, womit die Amplitude der Welle und die Geschwindigkeit der beteiligten Materie zunehmen. Die Energie der Tsunamiwelle wird dadurch immer stärker konzentriert, bis sie mit voller Wucht auf die Küste auftrifft. Der Energiegehalt eines Wellenzuges ist proportional zu Querschnitt mal Wellenlänge mal Quadrat der Teilchengeschwindigkeit und ist in der oben erwähnten Näherung unabhängig von der Wellenberghöhe h .

Typische Amplituden beim Auftreffen eines Tsunamis auf die Küste liegen in einer Größenordnung von zehn Metern; am 24. April 1771 wurde in der Nähe der japanischen Insel Ishigaki von einer Rekordhöhe von 85 Metern in flachem Gelände berichtet. In Ufernähe einer Tiefseesteilküste kann die Amplitude auf etwa 50 Meter ansteigen. Läuft ein Tsunami in einen Fjord, so kann sich die Welle auf weit über 100 Meter aufstauen.

In der Lituya Bay in Alaska wurden Wellen nachgewiesen, die zwar nicht über 100 Meter Höhe hinaus gingen, aber einen 520 Meter hohen Hügel überrollten (Megatsunami). Diese gigantischen Wellen entstanden jedoch nicht als Fernwirkung eines Erdbebens, sondern durch Wasserverdrängung im Fjord selbst: Heftige Erdbeben ließen Berghänge in den Fjord rutschen und brachten diesen schlagartig zum Überlaufen.

Das Auftürmen der Wassermassen passiert nur durch die allmähliche Verflachung des Wassers, die dadurch bedingte Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit der Wellenlängen, was zur Erhöhung der Amplituden der Wassermassen führen muss. Ist zudem die Küste noch buchtenförmig, dann kommt es zusätzlich noch zu einer lateralen Überlagerung oder Fokussierung der Wassermassen, was die durch das vertikale Wasserprofil bedingte Amplitudenerhöhung noch wesentlich weiter verstärken kann, insbesondere bei auftretenden Resonanzen (Wellenlängen in der Größenordnung der linearen Buchtdimensionen). An hohen Steilküsten des Festlandes kann der Tsunami zwar zu beträchtlichen Brandungshöhen auflaufen, dringt dann aber in der Regel nicht weit ins Hinterland vor. Ferner werden steil aus der Tiefsee aufsteigende

Atolle mit Lineardimensionen viel kleiner als die Wellenlänge des Tsunamis im offenen Ozean kaum wahrgenommen und nur flach überspült.

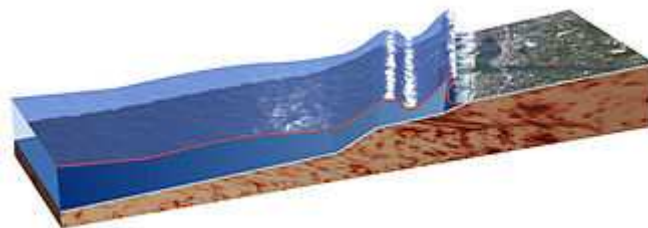
Brechungseffekte

Die Änderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bei Annäherung des Tsunamis an die Küste hängt vom Tiefenprofil des Meeresbodens ab. Je nach örtlichen Gegebenheiten kann es zu Brechungseffekten kommen: So wie Licht beim Übergang von Luft in Wasser oder Glas seine Richtung ändert, so ändert auch ein Tsunami seine Richtung, wenn er schräg durch eine Zone läuft, in der sich die Meerestiefe ändert. Je nach Ursprungsort des Tsunamis und Unterwassertopographie kann es dabei zur Fokussierung des Tsunamis auf einzelne Küstenbereiche kommen. Dieser Effekt ist von der Trichterwirkung eines Fjords nicht scharf zu trennen und kann sich mit dieser überlagern.

Zurückweichen des Meeres

Wie ein akustisches Signal, so besteht auch ein Tsunami nicht aus *einer einzelnen* Welle, sondern aus einem ganzen Paket von Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden. Wellen unterschiedlicher Frequenz breiten sich mit leicht unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Deshalb addieren sich die einzelnen Wellen eines Paketes in von Ort zu Ort und von Minute zu Minute unterschiedlicher Weise. Ein Tsunami kann an einem Punkt der Küste zuerst als Wellenberg oder zuerst als Wellental beobachtet werden. Ist die Ursache des Tsunamis ein Hangabrutsch oder Herunterbrechen einer Kontinentalplatte, so wird Wasser zur Sohle hin beschleunigt. Wasser wird verdrängt, und es entsteht zunächst ein Wellental. Danach bewegt sich das Wasser wieder zurück, und der Wellenberg entsteht. Beim Eintreffen der Welle an der Küste zieht sich zunächst die Küstenlinie zurück, unter Umständen um mehrere 100 Meter. Wenn der Tsunami eine unvorbereitete Bevölkerung trifft, kann es geschehen, dass die Menschen durch das ungewöhnliche Schauspiel des zurückweichenden Meeres angelockt werden, statt dass sie die verbleibenden Minuten bis zur Ankunft der Flutwelle nutzen, um sich auf höher gelegenes Gelände zu retten.

Stokes-Strömung



Darstellung eines Tsunamis beim Auftreffen auf die Küste

Wenn die Amplitude A eines Tsunamis in der Nähe der Küste gegen die Wassertiefe h nicht mehr vernachlässigbar klein ist, so wandelt sich ein Teil der Schwingung des Wassers in eine allgemeine horizontale Bewegung um, genannt Stokes-Strömung. In unmittelbarer Küstennähe ist eher diese schnelle Horizontalbewegung als das Ansteigen des Wasserspiegels für die Zerstörung verantwortlich.

In Küstennähe hat die Stokes-Strömung eine theoretische Geschwindigkeit von

$$v \approx \frac{A^2}{2h^2} \cdot c$$

mit der Phasengeschwindigkeit des Tsunamis $c = \sqrt{g \cdot h}$ und der Fallbeschleunigung $g \approx 10 \text{ m/s}^2$, also:

$$\frac{v}{18 \text{ km/h}} \approx \left(\frac{A}{h} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{h}{10 \text{ m}}}$$

Die Stokes-Strömung erreicht somit mehrere Dutzend km/h.

Gefahren und Schutz

Tsunamis zählen zu den verheerendsten Naturkatastrophen, mit denen der Mensch konfrontiert werden kann, denn ein mächtiger Tsunami kann seine zerstörerische Energie über Tausende von Kilometern weit mitführen oder sogar um den ganzen Erdball tragen. Ohne schützende Küstenfelsen können schon drei Meter hohe Wellen mehrere hundert Meter tief ins Land eindringen. Die Schäden, die ein Tsunami beim Vordringen verursacht, werden noch vergrößert, wenn die Wassermassen wieder abfließen. Die Gipfelhöhe eines Tsunamis hat nur bedingte Aussagekraft über seine Zerstörungskraft. Gerade bei niedrigen Landhöhen kann auch eine niedrige Wellenhöhe von nur wenigen Metern ähnliche Zerstörungen wie ein großer Tsunami mit Dutzenden Metern anrichten.

Am 26. Dezember 2004 wurden durch den großen Tsunami in Südostasien mindestens 231.000 Menschen getötet. Ausgelöst wurde die Welle durch eines der stärksten Erdbeben seit Beginn der Aufzeichnungen. Die verheerende Wirkung beruhte hier vor allem auf dem großen Wasservolumen, das pro Kilometer Küstenlinie auf das Land traf, während die Wellenhöhe mit zumeist nur wenigen Metern vergleichsweise niedrig war.

Gefahrenzonen



Tsunami-Warnschild am Strand von Ko Samui, Thailand

Am häufigsten entstehen Tsunamis am westlichen und nördlichen Rand der pazifischen Platte, im pazifischen Feuerring.

Japan musste aufgrund seiner geografischen Lage in den letzten tausend Jahren die meisten Todesopfer durch Tsunamis beklagen; in dieser Zeit starben über 160.000 Menschen. In den letzten 100 Jahren richteten

jedoch nur 15 Prozent der 150 registrierten Tsunamis Schäden an oder kosteten Menschenleben. Heutzutage verfügt Japan über ein effektives Frühwarnsystem, und für die Bevölkerung finden regelmäßig Trainingsprogramme statt. Viele japanische Küstenstädte schützen sich durch das Errichten riesiger Deiche, z. B. eines zehn Meter hohen und 25 Meter breiten Walls auf der Insel Okushiri.

In Indonesien dagegen wirkt heute noch die Hälfte der Tsunamis katastrophal, denn die meisten Küstenbewohner sind über die Anzeichen, die einen Tsunami ankündigen, nicht informiert. Meistens ist auch das Land sehr flach und die Wassermassen fließen bis ins Landesinnere. *Siehe auch:* Erdbeben im Indischen Ozean 2004 und Seebeben vor Java Juli 2006.

Auch an den europäischen Küsten treten Tsunamis auf, wenn auch wesentlich seltener. Da die afrikanische Platte sich nach Norden unter die eurasische Platte schiebt, können durch Erdbeben im Mittelmeer und im Atlantik ebenfalls Tsunamis entstehen.

Auch ein Meteoriteneinschlag kann einen Tsunami auslösen. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Himmelskörper auf dem Meer aufprallt, ist größer, als dass er auf Boden trifft, da Meere den größten Teil der Erdoberfläche ausmachen. Um einen Tsunami auszulösen, sind jedoch sehr große Meteoriten nötig.

Auswirkungen

An Land geschwemmte Schiffe und zerstörte Holzhäuser in Japan 2011



Am Flughafen Sendai reichten die Überflutungen im März 2011 fünf Kilometer landeinwärts.

Im Vergleich zu direkten Schäden infolge von Erdbeben, Vulkanausbrüchen, Erdbeben oder Steinlawinen, die meist nur lokal oder in räumlich relativ eng begrenzten Gebieten auftreten, können Tsunamis noch an Tausenden von Kilometern entfernten Küsten Verwüstungen anrichten und Menschenleben fordern.

Einer Küste vorgelagerte Riffe, Sandbänke oder Flachwasserbereiche können die Zerstörungskraft von Tsunamiwellen reduzieren, manchmal auch spezielle Wellenbrecher-Bauwerke, wie sie an einigen besonders gefährdeten Küstenabschnitten Japans errichtet wurden. Es gibt aber auch Beispiele dafür, dass notwendige Durchlassbereiche in solchen Schutzbauten die Durchflussgeschwindigkeit und Wellenhöhe des Tsunamis lokal gefährlich erhöhten und damit auch die Schäden im eigentlich zu schützenden Bereich verstärken.

Erfahrungen aus Japan besagen, dass Tsunamiampplituden unter 1,5 m in der Regel keine Gefahr für Menschen und Bauwerke darstellen. Es gibt aber Fälle, wie der nächtliche Einbruch des Tsunamis von 1992 in Nicaragua, wo vor allem Kinder, die auf dem Boden in Fischerhütten am Strand schliefen, in dem mancherorts nur 1 bis 1,5 m ansteigenden Wasser ertranken. Bei Wellenhöhen über 2 m werden Leichtbauten aus Holz, Blech, Lehm, bei Wellen über 3 m Höhe auch Bauten aus Betonblocksteinen meist total zerstört. Bei Wellenhöhen über 4 m steigt auch die Zahl der Todesopfer drastisch an. Solide Stahlbetonbauten können dagegen Tsunamiwellen von bis zu 5 m Höhe widerstehen. Deshalb können die

oberen Etagen von Stahlbeton-Hochhäusern oder -Hotels im Falle sehr kurzer Vorwarnzeiten und geringer Fluchtchancen im Freien ebenfalls als Zufluchtstätten genutzt werden.^[3]

Tsunamis dringen oft hunderte Meter, besonders hohe Wellen sogar einige Kilometer weit in flache Küstengebiete vor und verwüsten dort nicht nur menschliche Siedlungen, sondern machen auch landwirtschaftliche Nutzflächen und Brunnen durch Versalzung und Versandung unbrauchbar. Da die Wassermassen mehrmals vordringen und zurückströmen, sind die Überflutungsgebiete mit Schlamm und Sand, zertrümmerten Gegenständen und Gebäudeteilen übersät. Schiffe in Häfen werden aufs Land geworfen, Straßen blockiert, Eisenbahngleise unterspült und somit unbrauchbar. Niedrig gelegene Hafengebiete und Fischersiedlungen stehen oft noch lange unter Wasser und sind unbewohnbar geworden. Dazu kommen Gefahren aus leckgeschlagenen Fässern mit Treibstoffen und Chemikalien, Flutungen von Kläranlagen oder Fäkaliengruben und Leichen von Menschen und Tieren. Insbesondere in tropischen Regionen erhöht das die akute Gefahr von Trinkwasservergiftungen, Ausbruch von Seuchen u. Ä. Die direkten Tsunamischäden werden oft noch verstärkt durch den Ausbruch von Feuer infolge gebrochener Gasleitungen und elektrischer Kurzschlüsse, oft in Verbindung mit ausgelaufenem Treibstoff aus gestrandeten Schiffen und Fahrzeugen oder leckgeschlagenen Tanks in Häfen. Auch Küstenbiotope (Mangrovenwälder, Korallenriffe u. a.) können durch Tsunamis schwer beschädigt und nachhaltig gestört werden.

Frühwarnsysteme

Tsunami-Frühwarnsysteme machen sich zunutze, dass bestimmte Informationen über das mögliche Auftreten eines Tsunamis gewonnen werden können, bevor der Tsunami selbst seine zerstörerische Kraft entfalten kann. Seismische Wellen breiten sich viel schneller aus als die Tsunamiwelle selbst. Ist z. B. ein ausreichend dichtes Netz seismischer Stationen verfügbar, lassen sich daher bereits nach wenigen Minuten genaue Rückschlüsse über den Ort und die Stärke eines Erdbebens ziehen, und damit eine möglicherweise davon ausgehende Tsunamigefahr prognostizieren. GPS-Stationen messen zentimetergenau die Verschiebung der Erdoberfläche, die sich auf den Meeresboden extrapolieren lässt und eine präzise Prognose der Tsunamigefahr ermöglicht. Bojen messen die Tsunamiwelle direkt noch auf hoher See, sodass eine Vorwarnzeit bleibt.

Viele Staaten haben in den letzten Jahrzehnten technische Frühwarnsysteme eingerichtet, die durch das Aufzeichnen seismographischer Plattenbewegungen Tsunamis schon bei der Entstehung erkennen können, sodass durch den gewonnenen Zeitvorsprung die gefährdeten Küstengebiete evakuiert werden können. Dies gilt vor allem für den Pazifischen Ozean. Dort wurde zwischen 1950 und 1965 ein Netz von Sensoren am Meeresboden und anderen wichtigen Stellen eingerichtet, das kontinuierlich alle relevanten Daten misst und über Satellit an das Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) in Honolulu auf Hawaii meldet. Dieses wertet die Daten laufend aus und kann innerhalb von 20 bis 30 Minuten eine Tsunami-Warnung verbreiten. Da die betroffenen Staaten über ein effektives Kommunikationssystem und regionale Notstandspläne verfügen, besteht im Katastrophenfall eine gute Chance, dass rechtzeitig Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden können.

Einige Küstenstädte in Japan schützen sich durch bis zu zehn Meter hohe und 25 Meter breite Deiche, deren Tore innerhalb von wenigen Minuten geschlossen werden können. Außerdem beobachten Leute vom Küstenschutz mit Kameras den Meeresspiegel auf Veränderungen. Ein Frühwarnsystem gibt bei Erdbeben der Stärke 4 automatisch Tsunamialarm, sodass die Einwohner evakuiert werden können.

Leider besitzen einige von der Gefahr betroffene Staaten diese Systeme noch nicht, und deren Informationsnetz ist so schlecht ausgebaut, dass eine Vorwarnung nur eingeschränkt oder überhaupt nicht möglich ist. Dies betrifft insbesondere den Indischen Ozean. Zudem kommt es vor, dass Behörden aus Angst vor dem Verlust der Einnahmequelle Tourismus Tsunami-Warnungen nicht weiterleiten.

Die Staaten am Indischen Ozean haben nach der Flutkatastrophe in Südasien 2004 beschlossen, ein Tsunami-Frühwarnsystem einzurichten.

Indonesien hat ein deutsches Frühwarnsystem geordert - das German Indonesian Tsunami Early Warning System (GITEWS) - das im Auftrag der deutschen Bundesregierung vom Geoforschungszentrum (GFZ) Potsdam und sieben weiteren Institutionen entwickelt wurde, das November 2008 in Testbetrieb ging und seit März 2011 in operativem Betrieb ist. Durch seismische Sensoren und GPS-Technologie erlaubt dieses komplexe System noch exaktere Vorhersagen als das PTWC. Anfangs waren auch Bojen im Einsatz, die an der Meeresoberfläche schwammen. Diese erwiesen sich jedoch als wenig zuverlässig.^[4]

Malaysia hat das Malaysian National Tsunami Early Warning System (MNTEWS) errichtet, das derzeit eine Alarmierung der Bevölkerung innerhalb von zwölf Minuten nach dem Ereignis ermöglicht. Für 2012 wurde die Verkürzung der Alarmzeit auf zehn Minuten angekündigt.^[5]

Taiwan nahm am 14. November 2011 ein unterseeisches seismisches Beobachtungssystem in Betrieb. Die in etwa 300 m Meerestiefe an einem Unterseekabel befestigten Komponenten des Frühwarnsystems sind über eine Strecke von 45 km verteilt und sollen die Vorwarnzeit für Tsunamis und Erdbeben weiter verkürzen.^[6]

Die Koordination der vorhandenen Systeme zu einem weltweiten System wird seit Mitte 2005 vorangetrieben. Für die Erkennung von den Erdbeben werden die seismologischen Auswertungen der UNO herangezogen, die normalerweise für die Überwachung des vollständigen Atomteststoppvertrages CTBT verwendet werden. Dazu müssen nur die Meldesysteme in die nationalen Alarmsysteme integriert werden, da die Erkennungsmöglichkeiten schon vorhanden sind. Die Meldungen dieser künstlichen durch Nuklearexplosionen hervorgerufenen oder natürlichen Erdbeben laufen in Wien bei der Atomteststoppvertragsorganisation CTBTO zusammen.

Seit 2007 wird ein Tsunami-Frühwarnsystem, das Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-eastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas (NEAMTWS) im Atlantik und im Mittelmeerraum aufgebaut.

Bei allen Frühwarnsystemen besteht das Problem, dass Falschalarme bei einer unnötigen Evakuierung hohe Kosten verursachen können und das Vertrauen der Menschen in die Prognosen untergraben.

Verhaltensweisen bei akuter Tsunami-Gefahr und Tsunami-Warnung

Bei einem Aufenthalt in tsunamigefährdeten Küstenregionen wird u. a. Folgendes empfohlen:

- Halten Sie sich in Küstennähe auf und verspüren Sie ein starkes Erdbeben, dann eilen Sie sofort zu einem hochgelegenen oder küstenfernen Zufluchtsort, da starke küstennahe Erdbeben Tsunamis verursachen können. Allerdings folgt einem solchen Beben nur in etwa 10 bis 20 % der Fälle auch ein gefährlicher Tsunami. Dennoch sollten Sie nicht voreilig wieder in tiefere küstennahe Gebiete zurückkehren, sondern möglichst eine offizielle Entwarnung abwarten, es sei denn, dass Sie von Ihrer

Position aus sicher einschätzen können, dass den Erschütterungen innerhalb etwa einer Stunde kein Tsunami gefolgt ist.

- Sind Sie an der Küste und nehmen Sie einen unerwarteten schnellen Anstieg oder Abfall des Wasserspiegels innerhalb von Minuten wahr, dann eilen Sie ebenfalls sofort zu einem hochgelegenen oder küstenfernen Zufluchtsort. In keinem Fall sollten Sie in plötzlich trockene Meeresbuchten hinauslaufen. Die erste hohe Welle folgt mit Sicherheit innerhalb einiger Minuten.
- Nehmen Sie die starken Erdbebenerschütterungen innerhalb eines Gebäudes wahr, dann verhalten sie sich entsprechend erdbebenspezifischer Anweisungen.^[3] Befindet sich das Gebäude in einem potenziellen Tsunami-Überflutungsgebiet, dann verlassen Sie das Gebäude sofort nach Abklingen der Erschütterungen und eilen Sie zu einem höheren oder küstenferneren Zufluchtsort (Ausnahme: solide und durch das Beben nicht geschädigte Stahlbeton-Hochhäuser).
- Informieren Sie Menschen in Ihrer Nähe über Ihre Wahrnehmungen und warnen Sie diese entsprechend.
- Werden Sie dennoch von der Welle erfasst, dann sollten Sie, wo immer möglich, versuchen, sofort auf einen hohen, stabilen Felsen oder auf ein stabiles Haus zu steigen oder sich an einem Baum oder Mast festzuhalten, daran so hoch wie möglich zu klettern und zu verharren. Nur so können Sie u. U. vermeiden, von nachfolgenden Wellen erfasst oder durch die anschließend rückflutenden Wassermassen ins offene Meer hinausgespült zu werden. Auch wenn das umgebende Wasser nicht mehr strömt und sich wie ein See beruhigt hat, sollten Sie noch nicht von Ihrem erhöhten, sicheren Standort heruntersteigen, denn das Wasser könnte in Kürze entweder zum Meer zurückströmen oder die nächste Welle könnte umgehend kommen. Wenn dann schlussendlich alles Wasser ins Meer zurückgeströmt ist, wird sich die Überflutung z. B. alle 30 bis 60 Minuten mit abklingender Intensität wiederholen.
- Sichere Zufluchtsorte sollten auf keinen Fall nach Rückzug der ersten Welle(n) bereits wieder verlassen werden. Man muss ggf. mehr als fünf Stunden auf den höher gelegenen Zufluchtsorten ausharren und sollte in tiefliegende Küstenbereiche erst nach offizieller Entwarnung zurückkehren.

Typische Phänomene von Tsunamis

- Tsunamis bestehen aus einer Serie aufeinanderfolgender, sehr langperiodischer Meereswellen. Diese werden zumeist durch starke untermeerische Erdbeben, aber auch durch Vulkanausbrüche oder Hangrutschungen verursacht.
- Die meisten Tsunamis ereignen sich im Pazifischen Ozean, es gibt sie aber auch in allen anderen Ozeanen und Meeresgebieten. Obgleich Tsunamis selten sind, stellen sie eine große Gefahr dar. Ein sicherer Schutz vor Tsunamis ist nicht erreichbar, außer man vermeidet in potenziell tsunamigefährdeten Gebieten Siedlung und Bebauung in niedrig gelegenen (weniger als 30 m ü. NN) Gebieten.

- Tsunamis können innerhalb weniger Minuten an den Küsten nahe ihres Ursprungs große Zerstörungen anrichten und viele Menschenleben fordern. Starke Tsunamis entfalten ihre Wirkung aber auch an weit entfernten Küsten, da sie sich im Verlauf von Stunden über ganze Ozeanbecken hinweg ausbreiten können.
- Die Geschwindigkeit, mit der sich Tsunamis ausbreiten, ist abhängig von der Wassertiefe. In tiefen Ozeanen erreicht sie über 800 km/h und in flachem Wasser beträgt sie etwa 30 bis 50 km/h.
- Ein Tsunami besteht meist aus mehreren Wellenbergen, die im Abstand von einigen zehn Minuten bis zu über einer Stunde aufeinanderfolgen und häufig erst in späteren Wellenbergen zu maximalen Höhen an der Küste auflaufen.
- Die Abstände zwischen den Wellenbergen betragen auf tiefer offener See einige 100 km und verkürzen sich in Flachwasserbereichen bis auf etwa zehn Kilometer.
- Die Wellenhöhen sind auf tiefer offener See gering, meist kleiner als 80 cm und auf Grund der großen Wellenlängen für Schiffe ungefährlich und nur mittels spezieller Bojen oder Satellitenaltimetrie feststellbar. Bei Annäherung an die Küste, vor allem in flachen Buchten, können sich die Wassermassen aber über zehn Meter, in Extremfällen auch mehr als 30 bis 50 m hoch auftürmen, flaches Land hinter der Küste bis zu mehreren Kilometern landeinwärts überfluten und verheerende Verwüstungen anrichten.^[3]
- Personen an Land nehmen einen herannahenden Tsunami nicht unbedingt als Welle wahr, sondern als einen unvermittelten, im Vergleich zu Ebbe und Flut viel schnelleren Abfall oder auch Anstieg des Meeresspiegels. Sie bemerken z. B., dass plötzlich Wasser über den kurz zuvor noch trockenen Boden läuft und sie einige Momente später vielleicht bereits hüfthoch im Wasser stehen und Autos wie Streichholzschachteln weggeschwemmt werden. Der Meeresspiegel steigt ggf. weiter schnell um mehrere Meter an und überflutet tieferliegende Küstenbereiche. Anschließend läuft das Wasser in umgekehrter Richtung wieder ab zum Meer und verfrachtet beim Abfließen zerstörte Gebäude und Trümmer kilometerweit auf das offene Meer hinaus.

Fragen zum Text

1. Was versteht man unter einem Tsunami?
2. Wie entsteht ein Tsunami?
3. Wie breitet sich ein Tsunami aus?
4. Was kann man über die Geschwindigkeit von Tsunamis sagen?
5. Was kann man über die Wellenlänge von Tsunamis sagen?
6. Was kann man über die Geschwindigkeit von Tsunamis sagen?
7. Was kann man über die Wellenhöhe (Amplitude) von Tsunamis sagen?
8. Warum erhöht sich die Wellenhöhe beim Auftreffen auf die Küste?
9. Erkläre Brechungseffekt und das Zurückweichen des Meeres.
10. Was versteht man unter der Stokes-Strömung?
11. Was kann man über die Gefahren und die Gefahrenzonen von Tsunamis sagen?
12. Welche Auswirkungen haben Tsunamis?
13. Beschreibe die verschiedenen Frühwarnsysteme.
14. Wie soll man sich bei Tsunami-Gefahr und Tsunami-Warnung verhalten?
15. Was sind typische Phänomene von Tsunamis?