

Infoblatt

Tsunami

Prof. Dr. Peter Bormann

1. Ursachen und charakteristische Merkmale von Tsunami

Tsunami ist ein japanisches Wort. „tsu“ bedeutet der Hafen und „nami“ die Welle. Ein Tsunami ist folglich eine Welle, die besonders in Häfen und Buchten markant ausgeprägt ist und dort oft große Verheerungen anrichtet. Ein Tsunami entsteht infolge plötzlicher Hebung oder Senkung des Meeresbodens oder durch das Hineinstürzen oder Abrutschen großer Erdmassen ins Wasser und breitet sich als eine Folge sehr langperiodischer gravitativer Meereswellen über große Entfernungen hinweg aus.

Tsunami werden meist (zu etwa 90 %) durch **starke Erdbeben** unter dem Ozeanboden angeregt. Einer der größten Tsunami des 20. Jahrhunderts, mit Auflaufhöhen des Wassers auf das Festland (sog. Runup height) bis zu 70 m über Meeresnormalniveau (ü. N. N.) entstand beim Alaska-Erdbeben vom 28. März 1964 (Magnitude $M_w=9,2$). Bei diesem Beben hob sich die Erdoberfläche in einem Gebiet von etwa 500.000 km², also einem Gebiet größer als Deutschland, an der Küste bis zu 12 m und senkte sich landeinwärts bis zu 2,3 m ab.

Seltener, aber oft nicht weniger gewaltig, sind Tsunami infolge von **Vulkanausbrüchen** oder aufgrund von untermeerischen **Erdbeben**. So überschwemmte vor rund 8000 Jahren eine bis zu 30 m hohe Flutwelle Teile Großbritanniens, Norwegens und Islands. Dieser Tsunami wurde vermutlich ausgelöst durch eine große Rutschung vor der Küste Norwegens, bei der Gesteinsmassen von der Flächenausdehnung Islands 2000 m tief in den Nordatlantik abstürzten. Bei der Explosion des Vulkans Krakatau 1883 in der Sunda-Straße zwischen Java und Sumatra wurden 18 km³ Aschen und Schlacken ausgeworfen. Nach dem Ausbruch stürzte die zuvor 900 m hohe Vulkaninsel in sich zusammen und bildete einen über 200 m tiefen Einsturztrichter (Caldera) im Meer. Dabei entstand ein Tsunami, der in einigen Küstenbuchten Höhen bis zu 35 m erreichte, flachere Küstenbereiche 2 bis 10 km landeinwärts überflutete und 36.000 Todesopfer forderte.

Auch Einschläge großer **kosmischer Projektile** im Meer können die Ursache für riesige Tsunami sein, allerdings sind diese Ereignisse extrem selten. Das Aussterben vieler Saurierarten vor ca. 65 Millionen Jahren wird auf einen Meteoriteneinschlag im Gebiet des heutigen Golf von Mexiko zurückgeführt.

Abb. 1 zeigt schematisch, wie sich der verheerende Tsunami im Indischen Ozean infolge des starken Sumatra-Erdbebens am 26. 12. 2004 gebildet hat. In diesem Gebiet bewegt sich die ozeanische Erdkruste von Westen (links) nach Osten, kollidiert mit der Krustenplatte von Sumatra und wird unter diese geschoben. Man nennt das Subduktion. Diese läuft aber nicht gleichmäßig ab. Im Kontaktbereich verhaken sich die beiden Gesteinsplatten. Das führt dazu, dass die Krustenplatte von Sumatra nach unten und in Richtung Osten (rechts) verbogen wird und dass sich vor der Küste Sumatras ein Tiefseegraben gebildet hat. Am 26. 12. 2004 riss dieser Plattenkontakt auf Grund der enormen, in Jahrzehnten aufgebauten Spannungen auf einer Fläche von über 100.000 km² plötzlich auf. Die Sumatraplatte schnellte um etwa 15 m nach links (Westen) zurück. Das dadurch hervorgerufene Erdbeben der Stärke Mw = 9,3 war das zweitstärkste der letzten hundert Jahre. Der Meeresboden im Bereich der Sumatra-Platte wurde dabei um bis zu 10 m emporgehoben und verursachte eine Aufwölbung bzw. Absenkung der darüber liegenden Wassersäule (Abb. 1, Mitte). Diese begann sich mit mehreren Wellenbergen und Tälern nach allen Seiten auszubreiten (Abb. 1, unten). Die Ausbreitungszeiten für die erste Tsunamiwellenfront des Sumatra-Andamanen-Bebens 2004 durch den Indischen Ozean sind in Abb. 2 dargestellt. Insgesamt forderten die Erdbebenerstürzungen (vor allem auf Sumatra) und der nachfolgende Tsunami an den Küsten Indonesiens und anderer Indik-Anrainerländer ca. 230.000 Menschenleben, zerstörten einige hunderttausend Häuser und hinterließen etwa 3 Millionen Obdachlose. Ein anderes Beispiel für einen verheerenden Tsunami zeigt Abb. 3 mit den Ausbreitungszeiten der Wellenfront durch den Pazifik nach dem Erdbeben vor der Küste Japans am 11.3.2011.

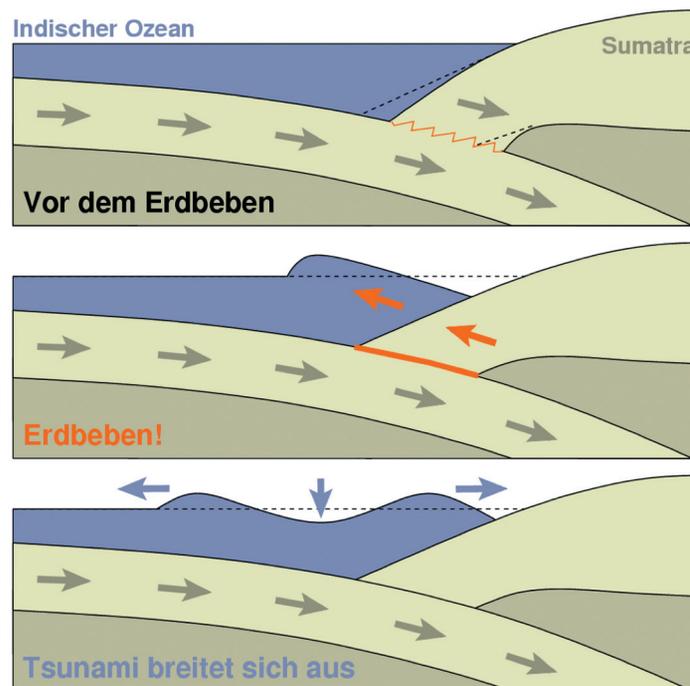


Abb. 1: Schematische Darstellung der Entstehung des Tsunami am 26. 12. 2004.

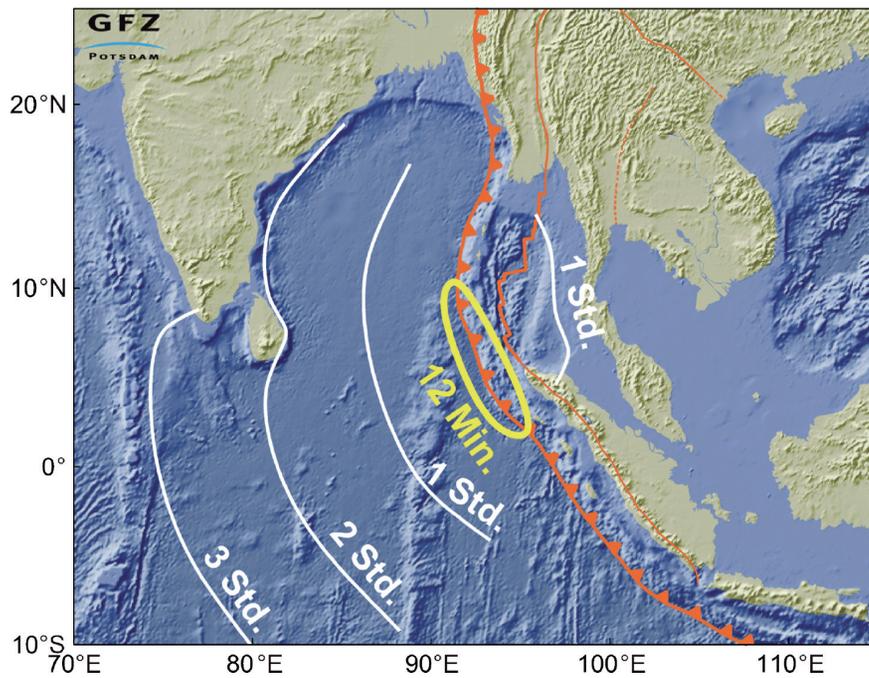


Abb. 2: Ausbreitungszeiten der ersten Wellenfront des Tsunami vom 26.12.04 durch den nordöstlichen Teil des Indischen Ozeans.

March 11, 2011 Honshu Tsunami -- wave heights (m) and isochrones (hrs)

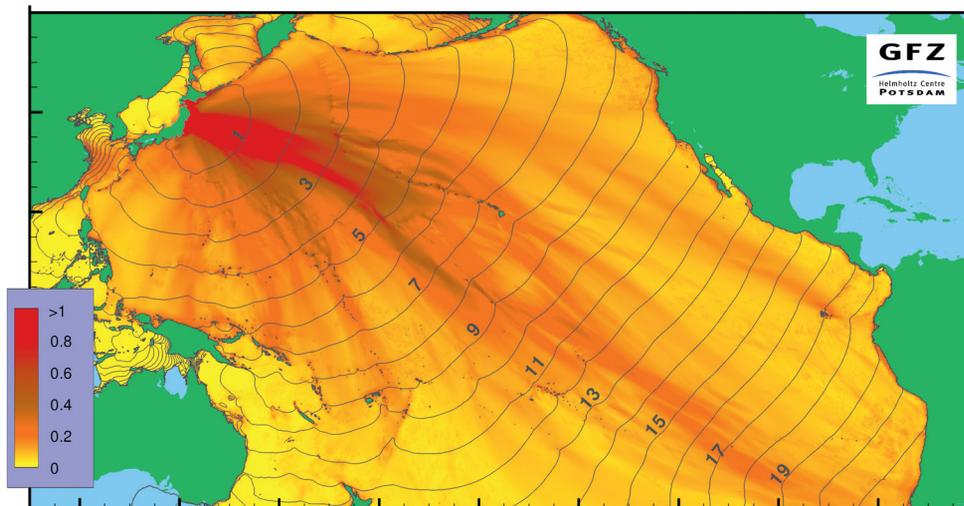


Abb. 3: Wellenhöhen (in Meter, siehe Farbskala) und Isochronen (in Stunden) des Tsunami vom 11.3.2011 (Honshu-Beben, Japan).

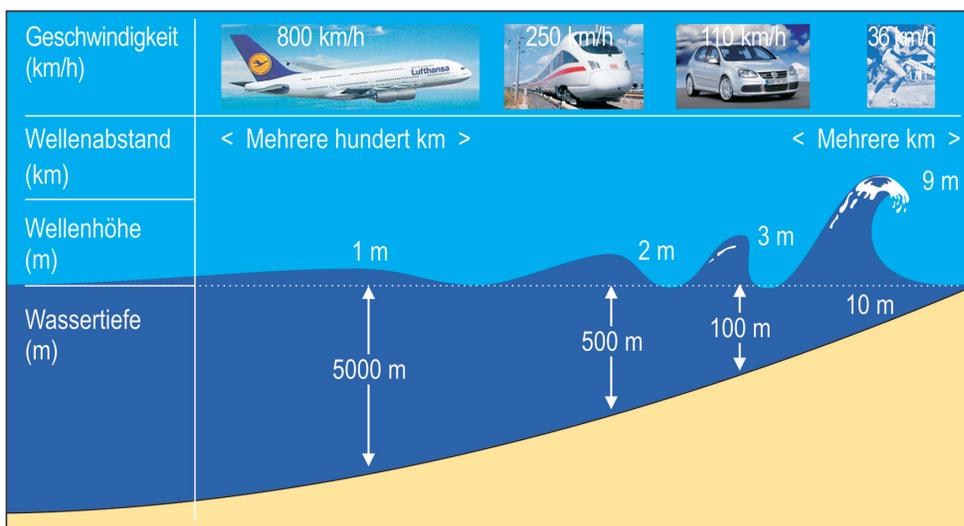


Abb.4: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Wellenlängen, Amplituden und Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Tsunami von der Wassertiefe.

Tsunamiwellen schwingen sehr langsam. Ihre Periode, d. h. der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender Wellenkämme, variiert zwischen mehreren Minuten bis zu etwa zwei Stunden in Abhängigkeit von der Wassertiefe sowie der Art, Größe und räumlichen Orientierung des Anregungsvorgangs im Entstehungsgebiet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tsunami hängt von der Wassertiefe ab. Im tiefen Meer entspricht sie der eines Düsenverkehrsflugzeuges, im flachen Wasser etwa der eines schnellen Radfahrers oder Sprinters. Deshalb verändern sich die Wellenlänge, d. h. der räumliche Abstand aufeinander folgender Wellenkämme und die Wellenhöhe (Amplitude) ebenfalls mit der Wassertiefe (Abb. 4). Je flacher das Wasser, um so kürzer die Abstände zwischen den Wellen und um so größer ihre Amplituden. Die Tsunami-Wellenlängen variieren folglich in einem weiten Bereich zwischen etwa 10 km und 700 km.

Eine Konsequenz dieser Tsunami-Merkmale ist, dass man auf hoher See selbst starke Tsunami mit Amplituden von meist wenigen Zentimetern bis Dezimetern wegen der enormen Wellenlängen von einigen 100 km nicht wahrnimmt. Sie sind deshalb auch keine Gefahr für Schiffe auf hoher See. Erst im Flachwasser der Küstenbereiche türmen sich die gefährlichen Wasserfronten bis zu mehreren Zehner Metern Höhe auf.

Die Wellenperioden, -längen und -höhen sowie die Runup-Höhen von Tsunami werden auch durch den horizontalen Küstenverlauf, das vertikale Profil im Flachwasserbereich sowie durch Eigenschwingungen des Wassers im flachen Kontinentalsaum (Schelf) und in Buchten, in die der Tsunami hineinläuft, beeinflusst. Auch Ebbe-Flut-Bedingungen zum Zeitpunkt des Auftreffens auf die Küste spielen eine Rolle. Steil aus der Tiefsee aufsteigende Atolle mit Ausdehnungen, die viel kleiner sind als die Wellenlängen des Tsunami im offenen Ozean, werden kaum wahrgenommen und nur flach überspült, wie z. B. die Malediven bei dem Tsunami vom 26. 12. 2004. An hohen Steilküsten des Festlandes aber kann der Tsunami zu beträchtlichen Runuphöhen auflaufen, dringt dann aber in der Regel nicht weit ins Hinterland vor. Bei sehr flachem Kontinentalsaum können infolge starker innerer Reibungsverluste im Flachwasserbereich die Tsunamiampplituden oft nicht so stark wie nach Abb. 4 erwartet anwachsen aber dennoch sehr weit ins hinterliegende Flachland vordringen, oft verbunden mit starken und gefährlichen Einwärts- und Rückströmungen hinaus auf das offene Meer. Besonders hohe Tsunamiwellen sind in trichterförmigen Buchten durch die zusätzliche seitliche „Fokussierung“ der Wellen zu erwarten. Detailbeobachtungen des Tsunami vom 12. Juli 1993 im Japanischen Meer nach einem küstennahen Erdbeben der Magnitude $M=7,8$ bestätigen die enormen lokalen Schwankungen der Tsunami-Runup-Höhen. An der Küste von Hokkaido und der vorgelagerten Insel Okushiri, etwa 50 bis 200 km vom Bebenherd entfernt, variierten diese zwischen 1 m und 32 m. Auch an (Halb-) Inselküsten, die auf der Tsunami abgewandten Seite liegen, kann es infolge Beugung bzw. Brechung der langperiodischen Tsunamiwellen im Flachwassersaum noch zu schweren Verwüstungen kommen (z. B. an der SW-Küste Sri Lankas um Galle beim Tsunami vom 26. 12. 2004).

Diese vielfältigen Einflüsse erschweren genaue Vorausberechnungen der Höhe und zeitlichen Aufeinanderfolge von Tsunamiwellen sowie der Größe der Überflutungsgebiete an gefährdeten Küsten. Solche Szenarien können nur für konkrete und genau bekannte bzw. angenommene Tsunamiquellen und Küstensituationen für die erste Welle annähernd ermittelt werden. Vorhersagen für die Runup-Höhen späterer Wellen werden in der Regel immer unsicherer, da dann neben Details der Küstenform und Flachwasserbathymetrie auch noch komplizierte Interferenzphänomene zwischen ein- und rückströmenden Wassermassen sowie mit angeregten Eigenschwingungen des Wassers im Schelfsaum und in Buchten hinzukommen. Die möglichen Überschwemmungsgebiete, nach denen die Evakuierungszonen und Zufluchtsräume durch Katastrophenmanager festzulegen sind, sollten deshalb nicht zu klein angenommen werden.

Erkennungsmerkmale von Tsunamis

Oggleich zerstörerische Wellen und weiträumige Überschwemmung flacher Küstenbereiche das Hauptmerkmal großer Tsunami sind, geht deren Eintreffen an der Küste oft ein – im Vergleich zu den Meereszeiten – sehr rascher Anstieg oder auch Abfall des Wasserspiegels innerhalb weniger Minuten voraus (s. Abb. 1). Das ist ein sicheres, aber meist unbekanntes oder ignoriertes Frühwarnzeichen. Ob der Meeresspiegel ansteigt oder absinkt, ist abhängig von der Art und räumlichen Orientierung der Tsunami Ursache, der Ausbreitungsrichtung der Wellen, der Orientierung von Küstenbuchten u. a. Einflüssen. Vor der Küste Thailands sank z. B. der Pegel am 26. 12. 2004 vor der Ankunft der ersten Tsunamiwelle um mehrere Meter. Wäre dieser Zusammenhang allgemein bekannt gewesen und hätten die Menschen an der Küste daraufhin sofort die Flucht in höhergelegene Bereiche des Hinterlandes oder in die oberen Etagen solide gebauter und gegründeter Hochhäuser ergriffen, dann wären viele tausend Menschenleben gerettet worden.

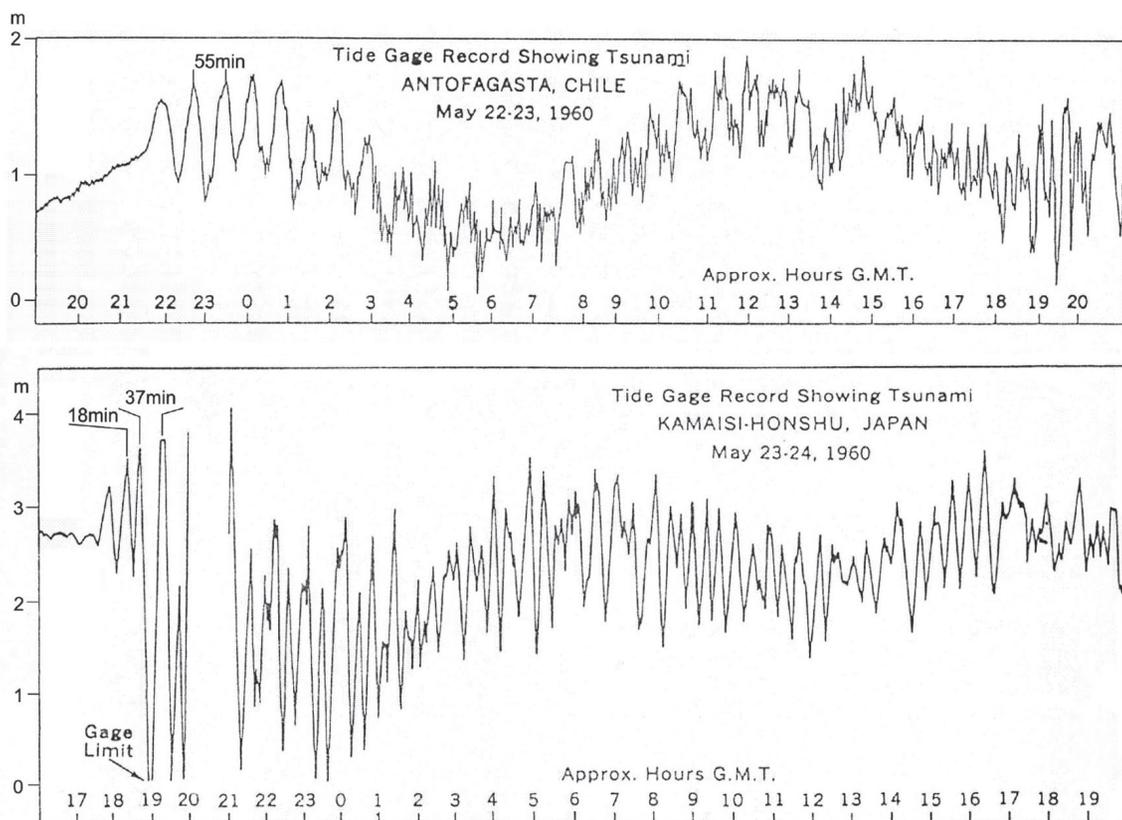


Abb. 5: Pegelregistrierungen von Ebbe und Flut in Antofagasta, Chile (oben) und Kamaishi, Japan (unten), überlagert durch die kürzeren Perioden von Tsunamiwellen des Chile-Bebens 1960.

Die meisten Tsunami dringen nicht weiter als einige hundert Meter ins flache Küstenhinterland vor, bei den stärksten können es aber auch mehrere Kilometer sein. So haben an einigen Küstenabschnitten Chiles im 18., 19. und 20. Jahrhundert Tsunami mehrfach Überschwemmungen von 2 bis 3 km und beim Sumatra-Beben 2004 an Küsten Thailands, der Nikobaren und Nordsumatras von 2 km bis maximal 7 km landeinwärts verursacht. Der Tsunami beim Krakatau-Ausbruch 1883 drang in der Pepper Bay von Java sogar bis max. 10 km ins Land vor. Im Mündungsgebiet breiter Flüsse sind Tsunamieffekte, u. a. durch Rückstau, sogar noch weiter ins Festland hinein nachweisbar, z. B. bis zu 30 km entlang des Imperial Rivers in Chile nach dem Beben von 1960. Abb. 5 zeigt Registrierungen des Meeresspiegels in Antofagasta (Chile) und Kaimaisi (Honshu, Japan) zwischen dem 22. und 24. Mai 1960. Man erkennt deutlich die etwa 12-stündige Periode

der Meereszeiten (Ebbe-Flut). Sie ist überlagert durch wesentlich schnellere Schwankungen mit Perioden zwischen etwa 18 und 55 Minuten und z. T. viel größeren Amplituden. Das sind Tsunamiwellen, die durch das Chile-Beben vom 22. Mai 1960, dem bisher stärksten instrumentell aufgezeichneten Erdbeben (Magnitude 9,5), angeregt wurden.

Aus Abb. 5 ergeben sich weitere wichtige Tsunamimerkmale:

- Die Perioden eines Tsunami können erheblich variieren, nicht nur in verschiedenen Richtungen und Entfernungen vom Entstehungsort, sondern auch für aufeinander folgende Wellenberge am gleichen Ort;
- Die erste Tsunamiwoge ist meistens nicht die größte. Spätere Wogen, manchmal sogar erst die fünfte oder sechste, können um ein Vielfaches stärker sein. Da diese späten Wellen oft erst viele Stunden nach der ersten Woge eintreffen, dürfen Zufluchtsorte auf keinen Fall nach dem Rückzug der ersten Welle(n) verlassen werden! (siehe Punkt 7).
- Auch in sehr großen Entfernungen vom Entstehungsgebiet können Tsunami noch gefährlich sein. Beim Chile-Tsunami 1960 kamen in Japan noch über 250 Menschen ums Leben.

2. Wo entstehen Tsunami und wo können sie Schäden anrichten?

Die meisten starken Erdbeben ereignen sich in so genannten **Subduktionszonen** (Verschluckungs-zonen). Dort kollidiert ozeanische Erdkruste mit kontinentaler Erdkruste oder mit einer anderen ozeanischen Krustenplatte, wird unter diese geschoben und sinkt in den heißen Erdmantel ein. Dabei bauen sich ständig Spannungen in der Erdkruste auf, die sich von Zeit zu Zeit durch Erdbeben, darunter auch sehr starken, entladen. Fast der gesamte Randbereich des Pazifik, in dem etwa 80% der weltweit durch Beben ausgelösten Energie freigesetzt wird, besteht aus Subduktionszonen und Vulkangürteln („Ring of Fire“, siehe Abb. 6). Daher entstehen dort auch die meisten Tsunami. Aber auch in anderen Ozeanen und Meeren wie dem Atlantik, dem Indischen Ozean und im Mittelmeer sind verheerende Tsunami bekannt. Allerdings verursachen nur etwa 10 bis 20% der starken Be-

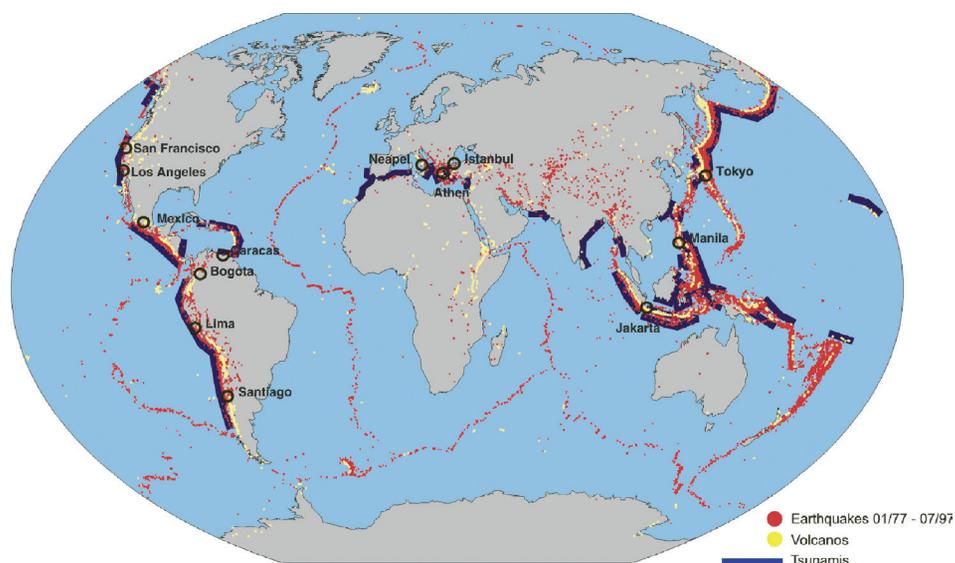


Abb. 6: Weltweite Verteilung der wichtigsten Erdbeben-, Vulkan- und Tsunami-Zonen, zusammengestellt vom GFZ Potsdam (2000). Vereinzelt starke Tsunami können aber auch an anderen Orten entstehen bzw. Auswirkungen haben, wie z. B. der Sumatra-Tsunami vom 26.12.04 an den Küsten Somalias, Kenias und Tansanias.

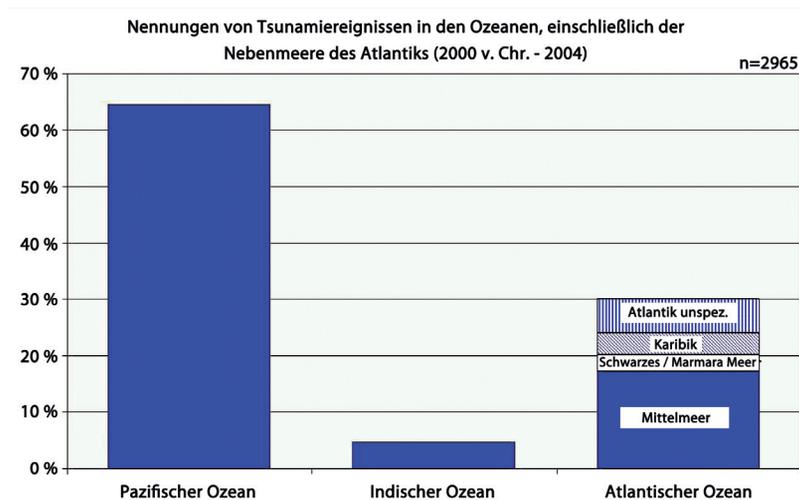


Abb. 7: Alle bis zum Jahre 2004 erfassten Nennungen von Tsunami (z. T. unsicher) aus einer Zusammenstellung verschiedener internationaler Datenbanken (nach [2]).

ben mit Magnituden über 6,5 im Bereich der Meere und Ozeane auch Tsunami, und bei Magnituden $M < 7,5$ haben diese in der Regel nur lokale Auswirkungen im Umkreis bis zu wenigen 100 km vom verursachenden Herd entfernt.

Von den in den letzten 140 Jahren recht zuverlässig erfassten Tsunami entfallen knapp 25% auf Japan. Zu gleichen Teilen von etwa 10% waren die Westküsten Südamerikas, Nord- und Mittelamerikas, Indonesien, die Philippinen sowie Neuguinea und die Solomon-Inseln betroffen. Mit je etwa 6% folgen Kurilen-Kamtschatka, Alaska und Neuseeland. Auf die Mittelmeerregion, Hawaii sowie auf die Küstengebiete im Atlantischen Ozean entfallen in diesem Zeitraum jeweils nur rund 2 bis 3% der festgestellten Tsunami.

Abb. 7 zeigt die in internationalen Tsunami-Datenbanken seit 2000 v. u. Z. bis 2004 dokumentierten Tsunami für den Pazifik, den Indischen Ozean (Indik) und den Atlantik (einschließlich seiner Nebenmeere). Von den erfassten Ereignissen mit Todesopfern entfallen 79% auf den Pazifik, 14% auf den Atlantik und 7% auf den Indik. Diese Häufigkeitszahlen sind jedoch wegen der unterschiedlichen kulturellen Entwicklung der Regionen im Verlaufe der Menschheitsgeschichte weder vollständig noch repräsentativ für die tatsächliche langfristige Häufigkeit des Auftretens starker Tsunami. Sie sagen auch nichts über deren mögliche Gefährlichkeit aus. Das beweist das Beben vom 26.12.04 mit dem opferreichsten Tsunami der Menschheitsgeschichte ausgerechnet im Indik.

3. Häufigkeit des Auftretens gefährlicher Tsunami

Im Vergleich zu Erdbeben, Vulkanausbrüchen und Erdrutschen/Lawinen sind Tsunami seltene Ereignisse. Eine Zusammenstellung verschiedener Datenbanken ergibt für den Zeitraum von 2000 v. u. Z. bis heute weltweit knapp 3000 Eintragungen, darunter viele mit dem Vermerk „irrtümliche“ bzw. „fragliche“ bis „sehr fragliche“ Tsunami. Über 2000 (70%) dieser Eintragungen entfallen allein auf die letzten 200 Jahre, nicht weil die Häufigkeit von Tsunami zugenommen hat, wohl aber deren Erfassung und Dokumentierung. Weniger als die Hälfte dieser Ereignisse werden als „definitive“ bzw. „wahrscheinliche“ Tsunami geführt. Von diesen erreichten seit 1562 etwa 100

Tsunami maximale Runup-Höhen von 10 m und mehr und 26 Tsunami Runup-Höhen über 30 m (bis maximal 500 m bei einem riesigen Felsabbruch in die Lituya Bay, einem Fjord in Alaska). Eine verlässlichere Häufigkeitsstatistik seit 1868 zeigt, dass im langjährigen Mittel in einem Zeitraum von 10 Jahren gefährliche maximale Runup-Höhen von >2 m 23mal, >8 m 8mal und >32 m nur einmal beobachtet wurden ([2]).

Abb. 8 zeigt für die Dekaden des 20. Jahrhunderts die **Häufigkeit von Tsunami mit und ohne Schäden**. Danach gab es im vergangenen Jahrhundert im Mittel nur etwa 10 Tsunami pro Jahr, von denen aber nicht mehr als 1 bis 2, manchmal sogar nur einer in 2 Jahren, Schäden verursacht haben. Fast 90% der Tsunami wurden durch Erdbeben angeregt oder ausgelöst. Bedingung ist, dass die Erdbeben ausreichend flach und stark genug sind, um die Erdkruste bis zum Meeresboden hin aufzureißen. Das ist aber nur für Erdbeben mit Magnituden $M > 6$ der Fall. Im langjährigen Mittel ereignen sich auf der Erde jährlich etwa 200 Beben dieser Stärke. Aber nur etwa 10 bis 20% dieser Beben erzeugen auch eine hinreichend starke vertikale Bewegung des Meeresbodens, um einen Tsunami anzuregen. Nennenswerte Schäden verursachen aber nur Tsunami mit Runup-Höhen von 2 m und mehr. Diese werden, von Ausnahmen abgesehen, in der Regel nur durch Beben mit $M > 7$ erzeugt. Davon gibt es im Mittel pro Jahr weltweit nur etwa 17 Beben (schwankte im 20. Jahrhundert zwischen etwa 5 bis 40 pro Jahr). Nur etwa jedes zehnte von ihnen erzeugt auch einen nennenswerten Tsunami. Allerdings können gelegentlich auch vergleichsweise schwache bzw. sehr langsam ablaufende Erdbeben, die an nahegelegenen Küsten nicht oder nur als schwache Erschütterungen wahrgenommen werden, große untermeerische Erdbeben bzw. Meeresbodenverrückungen und damit Tsunami zur Folge haben. Das war z. B. der Fall bei den Tsunami 1992 in Nicaragua (Runup max. 9 m) und 1998 in Papua Neuguinea (Runup max. 15 m) mit großen Schäden und zahlreichen Toten, sowie beim Mentawai-Tsunami vor der Küste von Sumatra 2010 mit Runup-Höhen von 10 m und mehr.

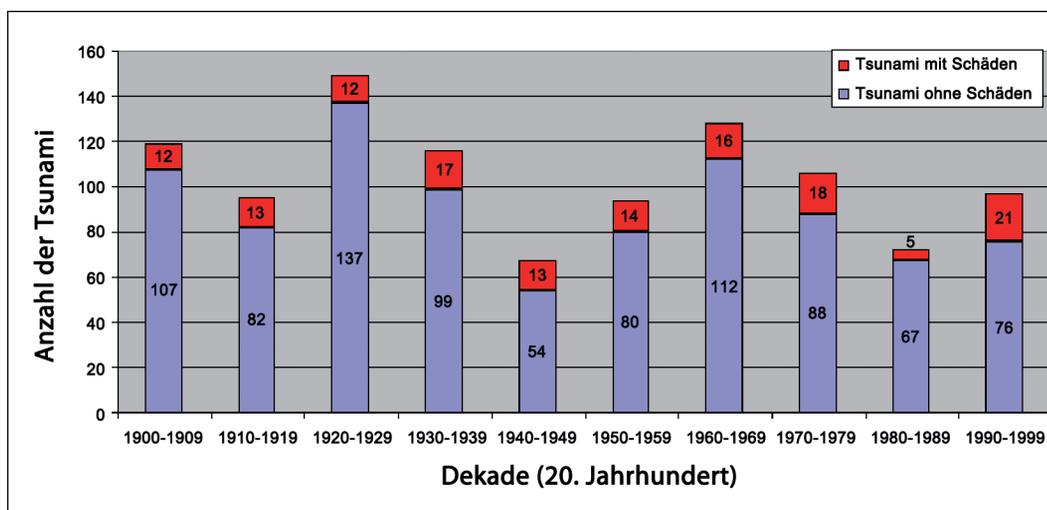


Abb. 8: Anzahl von Tsunami mit und ohne Schäden in den Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts (zusammengestellt nach Angaben des National Geophysical Data Center und der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) der USA)

4. Tsunamischäden und -gefährdung

Im Vergleich zu direkten Schäden infolge von Erdbeben, Vulkanausbrüchen oder Erdrutschen/Steinlawinen, die meist nur lokal bzw. in räumlich begrenzten Gebieten auftreten, können Tsunami noch an tausenden von Kilometern entfernten Küsten Verwüstungen anrichten und Menschenleben fordern. Anliegen dieses Abschnitts ist es, auf Besonderheiten aufmerksam zu machen, die für Entscheidungen betreffs Wohnen, Arbeit und Erholung in tsunamigefährdeten Gebieten und das Verhalten nach einer solchen Katastrophe wichtig sind.

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 Tsunami von 1992 in Nikaragua, wo vor allem Kinder, die in strandnahen Fischerhütten auf dem Boden schliefen, in dem mancherorts nur 1 bis 1,5 m ansteigenden Wasser ertranken.

Bei Wellenhöhen über 2 m werden Leichtbauten aus Holz, Blech, Lehm u. ä., bei Wellen > 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 mindestens 5 m Höhe widerstehen. Deshalb können die oberen Etagen von Stahlbeton-Hochhäusern/-Hotels im Falle sehr kurzer Vorwarnzeiten und geringer Fluchtchancen im Freien ebenfalls als Zufluchtstätten genutzt werden. Das gilt auch für speziell errichtete stabile Tsunami-Fluchtunterkünfte für die Unterbringung vieler Leute in ufernahen Siedlungsgebieten. Mit dem Bau solcher „Shelter“ wird z. B. derzeit in Indonesien begonnen.

Tsunami 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 Hafenbereiche und Fischersiedlungen stehen oft noch lange unter Wasser und sind unbewohnbar geworden. Dazu kommen Gefahren aus leck-geschlagenen Fässern mit Treibstoffen und Chemikalien, Flutungen von Kläranlagen oder Fäkaliengruben und oftmals auch noch hunderte, ja tausende 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 leck-geschlagenen Tanks in Häfen. Auch Küstenbiotope (Mangrovenwälder, Korallenriffe u. a.) können durch Tsunami schwer beschädigt und nachhaltig gestört werden. Und wie das Beispiel der Katastrophe von Fukushima nach dem sehr starken Japanerdbeben vom 11. März 2011 ($M_w = 9.0$) und dem dadurch ausgelösten Tsunami zeigt, sind Atomkraftwerke in unmittelbarer Küstennähe besonders gefährdet, wenn es – trotz hoher Schutzmauern – durch eindringendes Meerwasser zu einem Kurzschluß und Ausfall der Notstromaggregate und damit der Sicherheitstechnik für die Reaktorkühlung etc. kommt.

5. Tsunamifrüherkennung und -warnung

Die Möglichkeiten zur rechtzeitigen Erkennung und Warnung wachsen mit der Entfernung einer gefährdeten Küste vom Entstehungsort des Tsunami. Existieren im Entstehungsgebiet bereits lokale/nationale Überwachungsnetze (wie derzeit z. B. in Alaska, Indien, Indonesien, Australien, Neuseeland, Japan und Kamtschatka; für einige andere Gebieten sind solche Systeme in Entwicklung), dann sind Ortungen sowie Abschätzungen zur Stärke und Gefährlichkeit eines Tsunami und daraufhin sofort ausgelöste Warnungen bereits innerhalb von 5 bis 10 min. möglich, je nach Entwicklungsstand der Technik. Für Küstenabschnitte, die weiter als 50 bis 150 km (abhängig von der Wassertiefe und damit Tsunami-Laufzeit, s. Abb. 4) vom Herd entfernt liegen, besteht damit eine reale Chance für Frühwarnungen. Küstenbewohnern bleiben dann einige Minuten Zeit, sich in Sicherheit zu bringen.

Bei regionalen Tsunami, z. B. in Neben- und Binnenmeeren wie dem Mittelmeer, Schwarzen Meer, Japanischen Meer, der Karibik, dem Golf von Bengalen, etc. sind für fernere Küsten in einigen hundert bis 2000 km Entfernung Warnungen schon 1 bis 3 Stunden vor dem Eintreffen des Tsunami möglich. Voraussetzungen für ein funktionierendes Frühwarnsystem sind neben einer Vielzahl verschiedener moderner Sensoren zur Gewinnung der erforderlichen Daten deren sofortige Weiterleitung (z. B. über Satelliten), Verarbeitung in nahezu Realzeit und umgehende Einspeisung der daraus abgeleiteten Erkenntnisse in nationale und internationale, weltweit offene Informationssysteme und Weitergabe an Alarmierungszentren und deren umgehende dezentrale Weitergabe an die Zivilschutzeinheiten und Bevölkerung in gefährdeten Küstenbereichen.

Für den Pazifischen Ozean bestehen bereits für das Tsunami Warnsystem seit 1965 ein operatives Zentrum in Honolulu, Hawaii (PTWC – Pacific Tsunami Warning Center) und ein Warnsystem bei der Japanese Meteorological Agency in Tokyo. Diese werden ergänzt durch ein internationales Informationszentrum (ITIC – International Tsunami Information Center, <http://itic.ioc-unesco.org/index.php>). Im Indischen Ozean sind drei Frühwarnzentren operativ: das Indonesische Frühwarnsystem beim Meteorologisch-Geophysikalischen Dienst in Jakarta, das Indische Warnsystem bei INCOIS in Hyderabad und das Australische Warnsystem beim Bureau of Meteorologie in Melbourne. Für den Indischen Ozean gibt es ebenfalls ein internationales Informationszentrum, das Jakarta Tsunami Information Centre (JTIC, <http://www.unesco.org/new/en/unesco/partners-donors/the-actions/sciences/jakarta-tsunami-information-centre-jtic/>)

Erhalten Sie entsprechende Informationen über die Medien, dann befolgen Sie strikt die offiziellen Anweisungen. Falls offizielle Frühwarnsysteme existieren (s.o.), werden Tsunamiwarnungen oder -alarme (vereinbarte Sirensensignale), bzw. Meldungen über Fernsehen, Internet, Radio oder SMS verbreitet.

Organisierte Reaktionen und Evakuierungen sind aber nicht mehr möglich bei lokalen Tsunami, die unmittelbar vor der Küste entstehen und auch nicht beim Eintreffen entfernt entstandener Tsunami, für die es keine offiziellen Vorwarnungen gibt. Aber selbst dann besteht noch eine gute Chance, das eigene Leben und das anderer Menschen zu retten, wenn man die Natur aufmerksam beobachtet und ungewöhnliche Erscheinungen richtig zu deuten weiß. Woran erkennt man eine unmittelbare Tsunamifahr, die eine **sofortige Reaktion** eines jeden Einzelnen erfordert?

- Hält man sich im Küstenbereich auf und verspürt starke Erderschütterungen, die länger als etwa 20 s andauern, dann ist dies eine akute Warnung, dass ein Tsunami möglich und sofortiges Handeln angebracht ist (siehe Punkt 7) ungeachtet der Tatsache, dass nur wenige der gefühlten Beben auch tatsächlich einen gefährlichen Tsunami anregen;

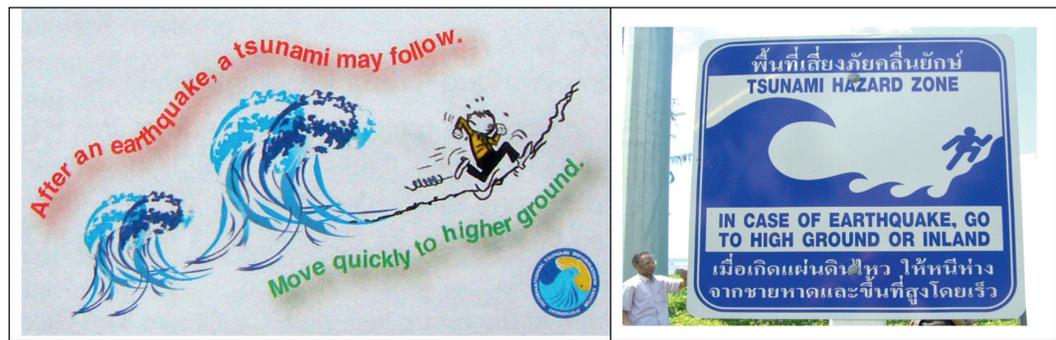
- Wichtig zu wissen ist, dass sich Erderschütterungen wesentlich schneller als Tsunamiwellen ausbreiten. Deshalb wurde das Erdbeben vom 26. 12. 2004 vor Sumatra in der Provinz Aceh bereits 15 min. vor dem Eintreffen der Tsunamiwelle verspürt. Das wäre genügend Vorlaufzeit für richtiges Tsunami-Verhalten vieler Küstenbewohner gewesen. Bei Tsunami infolge entfernter Beben oder auch (u. U. sogar naher) untermeerische Hangrutschungen und Vulkanausbrüche, gibt es aber meist keine oder nur sehr schwache vorherigen Erschütterungswahrnehmungen. Bei fast allen Tsunami geht aber der ersten großen Welle ein – im Vergleich zu Ebbe und Flut – relativ schneller **Anstieg** oder **Abfall** des Wasserspiegels voraus, oft um mehrere Meter innerhalb von 5 bis 10 min. Beides sind **untrügliche Anzeichen** dafür, dass in Kürze (weniger als 20 min; abhängig von der Periode der nachfolgenden Tsunami-Wellen) die erste große Wellenfront die Küste erreicht.

Aufmerksame Naturbeobachtung und sofortige verantwortungsbewusste Reaktion jedes Einzelnen kann folglich Menschenleben retten. Alle Personen, die sich am Strand oder der Küste aufhalten und **entweder starke Erderschütterungen** verspüren **oder ein ungewöhnliches Verhalten des Meerespiegels** beobachten, sollten alle Personen in ihrem Umkreis darauf aufmerksam machen und zum sofortigen Verlassen des Strandes und aller anderen flachen und damit überflutungsfährdeten Küstengebiete auffordern (siehe Punkt 7).

6. Welche Fragen sollte man in tsunamigefährdeten Regionen stellen?

Personen, die sich in den am meisten tsunamigefährdeten Regionen der Erde in Küstengebieten zeitweilig aufhalten oder wohnen, sollten nachfolgend aufgeführte Fragen stellen und Auskünfte dazu beim Hotelmanagement, bei örtlichen Behörden, der Polizei, bei Katastrophen- bzw. Zivilschutzorganisationen u. ä. einholen:

- Steht das Hotel/Wohnhaus/Arbeitsgebäude etc. im Falle eines starken Tsunami im Überflutungsgebiet?
- Wenn ja, welcher Gebäudeklasse bezüglich Höhe, Stabilität und Solidität der Gründung ist das Gebäude, das bezogen bzw. in dem gearbeitet werden soll, zuzuordnen?
- Können im Falle hoher (mehr als 3-geschossiger) Gebäude mit glaubhafter Stabilität im Ernstfall die höheren Stockwerke als Zufluchtsort benutzt werden (siehe Punkt 4.)?
- Wie weit sind die nächstgelegenen Erhebungen und andere geeignete Zufluchtsorte (z. B. hohe stabile Gebäude oder spezielle Tsunamischutzunterkünfte/Tsunami Emergency Shelters) entfernt?
- Gibt es für den Ort/die Bucht etc. bereits einen Evakuierungsplan für tsunamigefährdete Areale (ausgewiesene maximale Impakt- und Überflutungszonen) mit empfohlenen Fluchtwegen, Sammelstellen, Tsunami-Schutzunterkünften?
- Gibt es Evakuierungsschilder und -zeichen? (z. B. wie in Abb. 9 innerhalb der Tsunami-Hazard-Zone oder Hinweisschilder auf Fluchtwege, Sammelplätze, Shelter)?



Tsunami-Warnposter/-schilder; links: Poster des UNESCO/IOC-NOA International Tsunami Warning Center (ITIC) in Honolulu, rechts: Warnschild an Stränden in Thailand (Foto: P. Bormann).

7. Vorbeugende und akute Verhaltensregeln in Tsunamigebieten

- Wissen ist Sicherheit! Geben Sie Ihr Wissen über Tsunami an andere weiter. Das kann helfen, Menschenleben bei zukünftigen Ereignissen zu retten.
- Obgleich Tsunami sehr gefährlich und verheerend sein können, so ereignen sie sich doch sehr selten. Deshalb sollten Sie sich Ihre Freude am Erlebnis des Meeres und der Strände auch in tsunamigefährdeten Ländern nicht nehmen lassen, aber zugleich ein aufmerksamer und wissender Naturbeobachter sein, auch wenn jahrzehntelang nichts Außergewöhnliches passiert ist.

7.1 Verhalten beim Aufenthalt im Freien

- Befinden Sie sich in tief liegenden Küstengebieten bzw. an einem Flussufer nahe der Mündung ins Meer und verspüren ein heftiges Erdbeben, dann warnen Sie auch andere Menschen in Ihrer Nähe und eilen so schnell wie möglich in **höher gelegene Gebiete** im Hinterland oder an der Küste.
- Beachten Sie, dass Tsunamiwellen direkt an der Küste oft Höhen von über 10 m und im seltenen Extremfall von mehr als 30 bis 50 m erreichen können. Im Hinterland schwächen sich die Tsunamiwogen schnell ab, sie können aber flache Küstenbereiche viele hundert Meter bis zu einigen Kilometern weit landeinwärts überfluten. Hügel von mehr als 10 m Höhe in einigen hundert Metern Küstenentfernung können aber bereits ein sicherer Zufluchtsort sein.

Aber: je höher hinaus und weiter weg Sie in der verbleibenden Vorwarnzeit kommen, um so sicherer sind Sie.

- Sind geeignete Zufluchtsstellen im Freien jedoch zu weit von Ihrem Standort entfernt, dann suchen Sie nach Möglichkeit Schutz in höheren Etagen eines stabilen modernen Hochhauses/Hotels oder in ausgewiesenen Tsunami-Schutzsheltern.
- Werden Sie dennoch von der Tsunamiwelle ergriffen und mitgerissen, dann sollten Sie, wenn irgend möglich, versuchen sich an einem Baum, Masten oder vorbeidriftenden gut schwimmenden größerem Gegenstand festzuhalten, emporzuklettern und dort zu verweilen bevor Sie die oft gefährlich starke Rückströmung ergreift und zusammen mit all dem Driftgut weit ins offene Meer hinaus spült. Das kann die Lebensrettung sein.

- Ein Tsunami besteht aus einer ganzen Serie hoher Wellen, manchmal mehr als 10. Sie folgen aufeinander in Abständen von etwa 10 bis 60 Minuten (gelegentlich bis zu 2 Stunden). **Die erste Welle ist nur selten die stärkste**, manchmal erst die fünfte oder sechste (siehe Abb. 5 unten). Deshalb besteht die Tsunamigefahr oft noch für viele Stunden nach Ankunft der ersten Welle. Zu frühe Rückkehr zur flachen Küste kann tödlich sein! Deshalb verbleiben Sie geduldig an Ihrem sicheren Zufluchtsort, bis offizielle Entwarnung durch Polizei- oder Zivilschutzkräfte gegeben wird!
- Gleiches gilt, falls Sie am Strand oder an der Küste einen unerwarteten, nicht gezeitenbedingten (6-stündigen) sondern relativ schnellen Anstieg oder Rückgang des Meeresspiegels im Verlauf von Minuten beobachten. Beides sind untrügliche Vorwarnzeichen für eine bald darauf folgende erste große Tsunamiwelle. In keinem Falle folgen Sie Neugierigen, die bei Meeresrückzug in trocken gefallene Buchten hinauslaufen, um Fische oder Muscheln aufzulesen! Vielmehr warnen Sie diese Personen eindringlich und flüchten sie umgehend in höher gelegene Gebiete landeinwärts. Sie haben nur wenige Minuten Vorsprung vor der Welle!
- Gleiches gilt, falls Sie sich am Strand oder im Freien innerhalb der Überflutungszone aufhalten und durch ein Alarmsignal vor einem unmittelbar bevorstehenden Hereinbruch eines Tsunami gewarnt werden.
- Empfangen Sie auf offener See in Ihren Boot oder Schiff eine Tsunamiwarnung für Ihren Küstenbereich, dann fahren Sie auf keinen Fall in einen Hafen oder eine Bucht ein. Ein Tsunami kann dort außer brechenden Wellen und gefährlichen plötzlichen Schwankungen des Wasser-niveaus auch unvorhersagbare gefährliche Strömungen verursachen. Halten Sie mindestens einige Kilometer Küstenabstand und fahren Sie in den Hafen erst ein, wenn die Hafenbehörden diesen wieder für sichere Navigation und Ankerung freigeben.
- Befinden Sie sich z. Z. der Tsunami-Warnung in einem Hafen, dann sollten Sie folgendes beachten: Die meisten großen Häfen stehen unter der Kontrolle einer Hafenbehörde oder eines Leitsystems für den Schiffsverkehr. Nehmen Sie sofortigen Kontakt mit diesen Behörden auf. Bei Alarmzustand sind Sie verpflichtet allen Anweisungen der Hafenbehörden zu folgen, erforderlichenfalls auch der Anweisung zum Verlassen des Hafens.
- Kleine Häfen oder Buchten haben keine solchen Behörden. Wenn Sie eine Tsunamiwarnung empfangen und diese Ihnen Zeit lässt, Ihr Schiff oder Boot in tiefes Wasser zu manövrieren, dann sollten Sie dies in geordneter Weise unter Beachtung der Sicherheit auch anderer Wasserfahrzeuge in Ihrer Umgebung umgehend tun. Denn in tieferem Wasser ist ein Tsunami kaum gefährlich bzw. können seine Wellen in einigem Abstand von der Küste und vor dem Brechen noch ausgesteuert werden, ähnlich wie Wellen auf stürmischer See.
- Für Führer kleiner Boote mag es aber sicherer sein, vor allem im Falle lokaler Tsunami mit sehr kurzer Vorwarnzeit bzw. bei gefährlicher stürmischer See außerhalb des Hafens, das Boot am Pier zu belassen, sich selbst umgehend aufs Festland zu begeben und höheres Terrain aufzusuchen.
- In allen oben genannten Fällen mit kurzen Vorwarnzeiten sollte man auf keinen Fall versuchen, noch irgendwelche Sachgegenstände in Sicherheit bringen zu wollen oder in niedrige Gebäude zurückzukehren, falls diese im möglichen Überschwemmungsgebiet liegen. Alle noch gesunden erwachsenen Personen sollten laufend davoneilen. Autofahren kann bei hunderten oder tausenden Menschen in panischer Flucht auf verstopften Straßen schlimmere

Folgen haben als der Tsunami selbst. Autos sollten deshalb nur benutzt werden, um (Klein-) Kinder und behinderte oder alte Menschen in Sicherheit zu bringen.

- Halten Sie sich im Freien im Küstengebiet auf und erhalten über Handy, Funk, Sirenen oder durch Mitbürger eine Tsunamiwarnung mit längerer Vorlaufzeit von Stunden, dann begeben Sie sich, falls die Zeit es zulässt, zunächst in Ihre Wohnung oder Ihr Hotel und informieren Sie umgehend Ihre Familie, Bekannten und Freunde am Ort. Weiteres siehe im Abschnitt „Verhalten bei Aufenthalt in Gebäuden“.
- Bei langer Vorwarnzeit werden die örtlichen Behörden in der Regel geordnete Evakuierungen im zu erwartenden Überflutungsgebiet anweisen und die Menschen zu sicheren Sammelplätzen oder Notunterkünften dirigieren. In einer solchen Situation werden auch Busse und andere Fahrzeuge eingesetzt bzw. deren private Nutzung toleriert. Diesbezüglichen Anweisungen der Ordnungskräfte sind zu befolgen.
- Bei unzureichender Vorwarnzeit oder ausbleibenden neueren Instruktionen ohne Entwarnung verhalten Sie sich aber wie oben angegeben und suchen Zuflucht in einem höher gelegenen Ort oder Gebäude außerhalb des zu erwartenden Impakt- und Überflutungsgebietes. Verbleiben Sie dort, bis Entwarnung gegeben wird.

7.2 Verhalten bei Aufenthalt in Gebäuden

- Spüren Sie in einem Gebäude in Küstennähe und im potentiellen Tsunami-Überschwemmungsgebiet ein starkes Erdbeben, dann flüchten Sie sofort unter einen stabilen (Schreib-)Tisch oder Türrahmen in einer tragenden Innenwand und halten Sie sich dort fest, solange die Erschütterungen anhalten. Mehr Informationen dazu können Sie dem **GFZ-Merkblatt Erdbeben** entnehmen. Nach Abklingen der Erschütterungen verlassen Sie sofort das Gebäude, falls es im flachen Küstengebiet liegt, niedrig gebaut oder von schlechter Bausubstanz ist. Leicht- und Billigbauten aus Holz, Lehm oder Betonblöcken werden nach Erfahrungen aus Japan von Tsunamiwellen mit mehr als 2 bis 3 m Höhe zerstört. Sie bieten deshalb in Strandnähe bei einem kräftigen Tsunami keine Überlebenschancen.
- Gut gegründete Bauwerke in verstärkter Betonbauweise halten dagegen auch noch Tsunamiwellen von mindestens 5 m Höhe stand. Sind solche Gebäude/Hotels hoch genug (mehr als 3 Stockwerke), dann können Flure in den oberen Etagen ggf. einen sicheren Zufluchtsort selbst in Strandnähe bzw. niedrig liegenden Küstenabschnitten bieten. Da unmittelbar nach Abklingen starker Erdbebenererschütterungen in einem Küstengebiet mit dem Eintreffen der ersten Tsunamiwelle schon nach Minuten zu rechnen ist, ist der Verbleib in höheren Gebäudeetagen dann der unter Umständen weiten Flucht in höheres Gelände vorzuziehen.
- Schalten Sie Handy, Radio oder Fernsehen auf Empfang in Erwartung präzisierter Meldungen des Frühwarndienstes und Anweisungen des Katastrophenmanagements, der Polizei oder anderer offizieller Kräfte. Verbleiben Sie, falls nicht anders von offizieller Stelle ausdrücklich angewiesen, an ihrem Zufluchtsort bis Entwarnung gegeben wird. Verlassen Sie in keinem Fall das Gebäude nach der ersten oder zweiten Tsunamiwelle!
- Sollten flüchtende Menschen Sie informieren, dass plötzlicher Wasserrückgang oder -anstieg an der Küste auf einen möglichen, unmittelbar bevorstehenden Einfall eines starken Tsunami hinweist, und befinden Sie sich in einem niedrigen oder nicht stabil gebautem Gebäude in der potentiellen Überflutungszone, dann verlassen Sie dieses umgehend. Suchen Sie auf kürzestem Wege ein höher-

gelegenes und/oder küstenferneres Zufluchtsgebiet auf. Befinden Sie sich aber z. Z. der Warnung in höheren Etagen eines sehr stabil gebauten Gebäudes, dann verbleiben Sie dort, falls nicht ausdrücklich andere Anweisungen von Zivilschutzkräften gegeben werden.

- Im Falle einer Tsunamiwarnung über offizielle Medien mit einer Vorlaufzeit von mehr als einer Stunde für Ihren Küstenbereich ist Umsicht und Ruhe angesagt. Schalten Sie Radio, TV, Handy etc. ein und warten Sie auf aktuelle Informationen und Instruktionen durch Kräfte des Katastrophen-/Zivilschutzes oder der Polizei. Informieren Sie Ihre Familienmitglieder, Mitbewohner und Freunde im Ort und schalten Sie umgehend alle Hauptschalter für Strom, Gas und Wasser ab (Havarie- und Brandgefahr!). Versorgen Sie sich und Ihre Angehörigen umgehend mit einer Notverpflegung und -bekleidung und nehmen Sie Bargeld, Wertsachen, wichtige persönliche Dokumente, Kofferradio, Handy u. ä. an sich. Erwarten Sie mögliche Evakuierungsanweisungen.
- Verlassen Sie umgehend Ihr Aufenthaltsgebäude, falls dieses im flachen küstennahen Bereich liegt, niedrig und/oder leicht gebaut ist und suchen Sie einen sicheren, höher gelegenen Ort auf. Befinden Sie sich dagegen in einem Hochhaus (mehr als 3 Stockwerke) in stabiler Stahlbeton- oder Stahlskelettbauweise dann suchen Sie Flure in oberen Stockwerken als Zuflucht auf. Anderenfalls schließen Sie sich den Flüchtenden im Freien an. Autos sollten nur benutzt werden, falls noch genügend Zeit vorhanden und keine Panik/Verstopfung auf den Straßen herrscht (z. B. Verkehrsregelung durch Polizei oder Zivilschutzkräfte) bzw. wenn Kinder, alte, kranke und/oder behinderte Personen in Sicherheit zu bringen sind.
- Liegt Ihr(e) Wohnung/Hotel/Arbeitsplatz im Überschwemmungsbereich eines Tsunami und ist eine geordnete Evakuierung angesagt, dann leisten Sie den Anweisungen der offiziellen Kräfte unbedingt Folge. Gibt es aber nach einer akuten Tsunamiwarnung keine weiteren Anweisungen bzw. Entwarnung bis spätestens etwa einer halben Stunde vor dem erwarteten Eintreffen des Tsunami, dann sollten Sie kein Risiko eingehen und keine weitere Zeit verlieren. Handeln Sie dann eigenverantwortlich unter Berücksichtigung obiger genereller Verhaltensregeln.
- Haben Sie die Evakuierungszone mit einem Fahrzeug verlassen, dann kehren Sie nach dem Tsunami nicht mit diesem (oder nur mit ausdrücklicher Genehmigung der Katastrophenschutzkräfte!) in das Gebiet der Verwüstungen zurück. Anderenfalls können Sie Räumungs- und Bergungsarbeiten stören.

Literaturhinweise

- [1] **Anonym (2002):** Tsunami – the great waves. Revidierte Fassung, erarbeitet von der U.S. National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), UNESCO/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), International Tsunami Information Center (ITC), Laboratoire de Geophysique, France (LDG)
- [2] **Römer, H.(2005):** Eine internationale Tsunamidatenbank – Erstellung und erste Auswertungen. Praktikumsarbeit am GFZ Potsdam
- [3] **Bolt, B. (1984):** Erdbeben. Eine Einführung. Springer-Verlag Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo. 236 S.
- [4] **Der Spiegel (12/2011):** Fukushima – was wirklich geschah, S. 88-106.

[5] Webseiten von Tsunami-Informationszentren:

- ITIC – International Tsunami Information Center, <http://itic.ioc-unesco.org/index.php>
- Jakarta Tsunami Information Centre (JTIC, <http://www.unesco.org/new/en/unesco/partners-donors/the-actions/sciences/jakarta-tsunami-information-centre-jtic/>)
- West Coast and Alaska Tsunami Warning Center, <http://wcatwc.arh.noaa.gov/>
- Indian National Tsunami Early Warning System, <http://tsunami.incois.gov.in/>

Danksagung:

Der Autor dankt Dr. Lauterjung für die kritische Durchsicht des Textes und wertvolle Hinweise und Ergänzungen.

Bitte beachten Sie: Die Aussagen und Empfehlungen sind nach bestem Wissen erstellt worden. Dennoch kann das Deutsche GeoForschungsZentrum nicht verantwortlich gemacht werden und keinerlei Haftung für Schäden übernehmen, die durch die Beachtung dieser Hinweise entstehen.