

PHYSIKALISCHE SIMULATION VON TSUNAMIWELLEN IM KÜSTENBEREICH

von

J. Grüne¹
R. Schmidt-Koppenhagen²
H. Oumeraci³

ABSTRACT

The most effective measure to decrease disasters from a tsunami event is an integrated coastal zone defence management against tsunami attack. An important tool for this management is an improved knowledge about the hydraulic performance of tsunami waves in near- and onshore areas. A research programme on the physical modeling of tsunami waves have been started in the Large Wave Channel (GWK) of the Coastal Research Centre (FZK). Large-scale model tests are being performed in the Large Wave Channel (GWK) of the Coastal Research Centre (FZK). In this paper first results about tsunami wave generation using solitary wave theory and about tsunami wave run-up on a uniform gentle sloped beach profile are reported.

1. EINLEITUNG

Die Ausbreitung von Tsunamiwellen im Nahbereich der Küstenlinie und ihre Wirkungen auf Strände und auf Strukturen landeinwärts der Wasserlinie hat nach der Tsunami-Kathastrophe im Indischen Ozean im Dezember 2004 eine hohe Priorität in der Diskussion über aktuelle Probleme im Küsteningenieurwesen erlangt. In der Vergangenheit wurden bereits einige Untersuchungen über Tsunamiwellen durchgeführt. Trotzdem ist die Frage: „Wie können wir in einem Laboratorium eine Tsunami-Welle physikalisch erzeugen?“ eine aktuelle Fragestellung in der wissenschaftlichen Diskussion, die verstärkt untersucht werden sollte, denn Tsunamiwellen haben eine deutlich andere Charakteristik als Windwellen.

¹ Dipl.-Ing., Betriebsleiter, Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstrasse 11, Hannover, Germany

² Dipl.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK)

³ Prof. Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK)

Tsunami-Wellen werden im Allgemeinen von seismischen Aktivitäten an den Rändern der Kontinentalplatten, aber auch durch Vulkanausbrüche (z.B. Krakatau) oder durch größere Erdbeben erzeugt. Nach der Erzeugung einer Tsunamiwelle breitet sich diese Welle vom Quellgebiet in Richtung der Küsten aus, wo im Nahbereich der Küstenlinie und im Uferbereich die stärksten Auswirkungen auftreten. Die Verwundbarkeit der Uferlinie hängt stark von den örtlichen topographischen Bedingungen unterhalb und oberhalb der Wasserlinie ab. Dies beeinflusst die hydrodynamische Entwicklung der Tsunamiwelle wie Aufsteilung (shoaling), Reflexion, Transmission, Wellenbrechen, Wellenaufbau und Wellenüberlauf, Wellenrücklauf, Eindringen und Überschwemmung des hinter der Wasserlinie liegenden Landbereichs.

Die bisherigen Diskussionen über Maßnahmen, die die Auswirkungen künftiger Katastrophen infolge Tsunamis wie sie im Indischen Ozean im Dezember 2004 auftraten zu vermindern, konzentrierten sich lediglich auf Früh-Warnsysteme. Solche Systeme sollen ein Tsunami-Ereignis identifizieren und die Ausbreitung bis an die Küstenlinien vorhersagen. Die Nachteile solcher aktiver Warnsysteme sind: Ihre Verlässlichkeit und die daraus folgende rechtzeitige Information der Bevölkerung sowie eine eingeschränkte Wirkung, wenn keine wirksamen Fluchtmöglichkeiten vorhanden sind. Daher erscheinen aus Sicht der Autoren passive Maßnahmen wie Küstenschutz und Siedlungspolitik langfristig wirksamer zu sein.

Solche passive Maßnahmen wie Küstenschutz und Siedlungspolitik können aus einer Mehrfach-Verteidigungsstrategie im Bereich der Küste bestehen. Dies erfordert ein integriertes Management sämtlicher Verteidigungssysteme, das Risikoeinschätzungen und Sicherheitsbewertungen einschließt und das eng mit der Landnutzung und Küstenentwicklung verzahnt ist. Eine Mehrfach-Verteidigungsstrategie kann aus unterschiedlichen Komponenten bestehen, wie sie schematisch in Abb. 1 dargestellt sind:

- (1) natürliche oder künstliche Riffe im Vorlandbereich. Künstliche Riffe können mit innovativen Wellenabsorbern wie z. B. horizontal geschlitzten senkrechten Strukturen, oder mit geotextilen Sandcontainern oder Sandschläuchen konstruiert werden.
- (2) künstliche Schutzbauwerke im Bereich der Uferlinie.
- (3) Mangrovenwälder oder Dünen im Bereich hinter der Uferlinie.
- (4) Höhere Gebäude mit Etagen oberhalb möglicher Wasserstände infolge auflaufender Tsunamiwellen, die als Fluchtbereiche genutzt werden können, insbesondere in Urlaubsgebieten und Touristenzentren.
- (5) Siedlungsmaßnahmen, die auf die örtlichen Entfernungen und das Höhenniveau in Bezug zur Uferlinie abgestimmt sind. Mehrzweckgebäude könnten für die Bevölkerung als Flucht- und Sicherheitsbereiche genutzt werden.

Die Durchführbarkeit und Effizienz jedes dieser möglichen Bestandteile eines Mehrfach-Verteidigungssystems hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab und muss vor einer Ausführung innerhalb eines integrierten Küsten-Verteidigungsmanagements sorgfältig untersucht werden. Ein wichtiges Werkzeug für dieses Management ist ein verbessertes Wissen über das hydrodynamische Verhalten von Tsunamiwellen. Üblicherweise werden numerische oder physikalische Modelle genutzt. Weil die Zuverlässigkeit numerischer Modelle ohne physikalisch ermittelte Kalibrierungsdaten jedoch unsicher ist, sind Daten

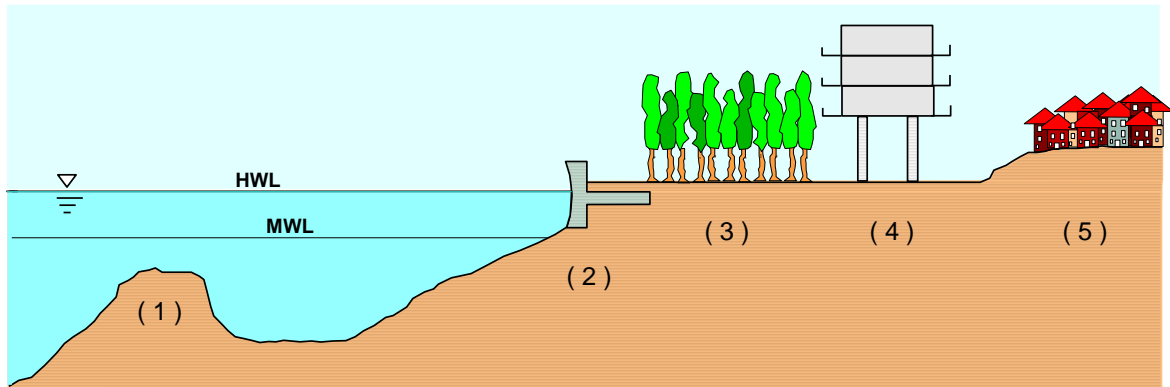


Abb. 1 Schema einer Mehrfach-Verteidigungsstrategie

aus physikalischen Modellen unabdingbar, insbesondere in Anbetracht des Wellenbrechens von Tsunamis im Nahbereich der Küstenlinie. Andererseits müssen Maßstabs- und Modelleffekte in physikalischen Modellen minimiert werden.

Das Forschungszentrum Küste hat ein Forschungsprogramm begonnen, das sich mit der physikalischen Modellierung von Tsunamiwellen im GROSSEN WELLENKANAL (GWK) und ihrer Auswirkung auf Strände befasst. Für die physikalische Generierung von Tsunamiwellen in einem ausreichend großen Maßstab wird eine bestimmte Länge der Wasserlinie und ein großer Hub der Wellenmaschine benötigt. Mit einer Länge der Wasserlinie von etwa 250 m und einem maximalen Hub der Wellenmaschine von 4 m ist der GWK weltweit die größte Einrichtung für solche Simulationen und ermöglicht Untersuchungen mit Tsunamiwellen bis über 1,2 m Höhe. Im Folgenden werden erste Ergebnisse über die Versuche zur Generierung und zum Auflauf von Tsunamiwellen auf Strände beschrieben.

2. EXPERIMENTE

Die Experimente wurden im GWK durchgeführt, der eine Gesamtlänge von 330 m, eine Breite von 5 m und eine Tiefe von 7 m hat. Der Längsschnitt des GWK mit dem eingebauten Bodenprofil aus Sand mit einem mittleren Korndurchmesser von $D_{50} = 0,33$ mm ist in Abb. 2 dargestellt. Das eingebaute Profil ermöglicht die schematische Simulation von drei Bereichen hinsichtlich der Ausbreitung einer Tsunamiwelle in Abhängigkeit von der Wassertiefe: Ein tieferer Teil, in dem die Tsunamiwelle erzeugt wird (Bereich der Wellenmaschine) bzw. aus dem sie anläuft, eine erste flache Neigung bis zu einer reduzierten Wassertiefe und eine letzte Neigung von ungefähr 1 : 25 bis oberhalb des Ruhewasserspiegels. Diese drei Bereiche stellen schematisch die aufeinander folgenden Teile der Unter- und Überwassertopographie des Küstenvorfelds und des Uferbereiches dar: Den tieferen Bereich vor dem Küstenvorfeld (Offshore), das Küstenvorfeld (Shelf) und den Strandbereich (Nearshore, Onshore).

Die Oberflächenauslenkungen der Tsunamiwellen wurden entlang der Wasserlinie elektronisch mit Widerstandsdrahtpegeln gemessen. Im Bereich des Strandes oberhalb des Ruhewasserspiegels wurden die Oberflächenauslenkungen visuell mit digitalen Videokameras an einem auf einer Wand des GWK angebrachten Messraster erfasst. Die

Ruhewassertiefe betrug 4.5 m im tieferen Teil bzw. 2.5 m auf dem Küstenvorfeld. Die Gesamtlänge der Wasserlinie von der Wellenmaschinen bis zum Strand betrug 242 m.

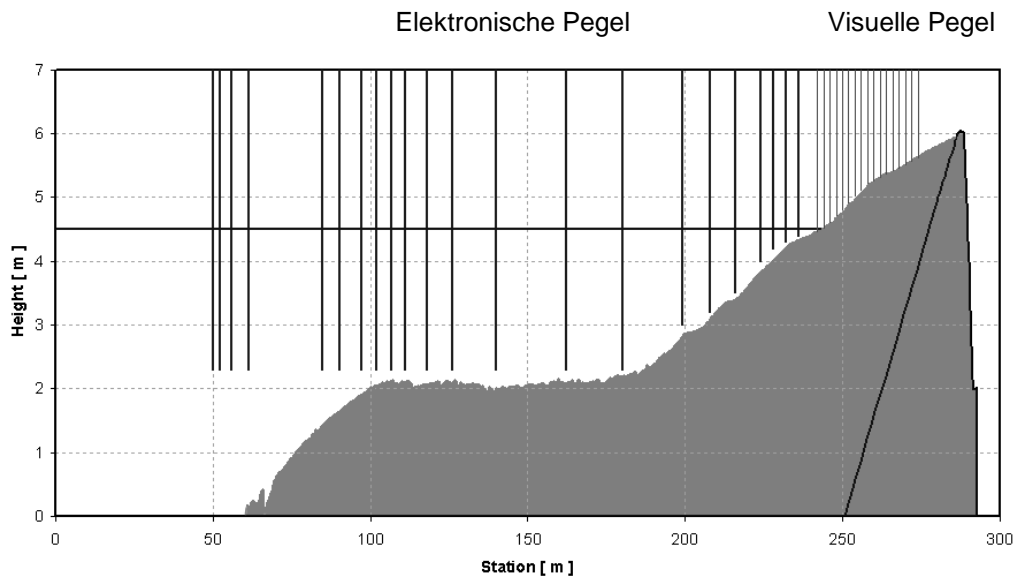


Abb. 2 Längsschnitt des eingebauten Profils im GWK mit Anordnung der Wellenpegel

Für Vortests zur Generierung von Tsunamiwellen wurden einige unterschiedliche Formen von künstlichen Einzelwellen verwendet, die sich über die Lauflänge mehr oder weniger in verschiedene Wellenteile umwandelten. In Hinsicht auf die Beibehaltung ihrer Wellenform über eine längere Entfernung ergaben sich unter Verwendung der Solitär-Wellentheorie die besten Ergebnisse. Alle im Folgenden beschriebenen Ergebnisse sind aus Versuchen mit nach dieser Theorie erzeugten Tsunamiwellen ermittelt worden.

Die Generierung der Solitärwellen im GWK basiert auf der von W. H. Munk (1951) beschriebenen ersten Näherung des Boussinesq-Ansatzes. In Abb. 3 sind die Definitionen der Solitärwelle schematisch dargestellt. Mit den ersten zwei Termen der Ausdehnung des Geschwindigkeitspotentials des Boussinesq-Ansatzes ergibt sich die Wellengeschwindigkeit C zu

$$C = \sqrt{g(H + d)}$$

Die Oberflächenauslenkung η als Funktion der Längenkoordinate ergibt sich zu

$$\eta_{(x)} = H \cdot \sec^2 \left[\frac{x}{d} \cdot \sqrt{0.75 \cdot \frac{H}{d}} \right]$$

wobei der Nullpunkt für x unter dem Wellenberg definiert ist. Die Wellenlänge L ist unendlich. Im Vergleich mit einer Airywellen wird die Wellenlänge als eine Näherung zu $L_{98} = 7.6 \cdot d$ definiert. Nach Munk befinden sich 98% des Volumens der Oberflächenauslenkung einer Solitärwelle im Bereich von $X = \pm 3.8 \cdot d$ um den Wellenberg. Nach diesem Ansatz ergibt sich die theoretische Wellenperiode zu $T_{98} = L_{98}/C$.

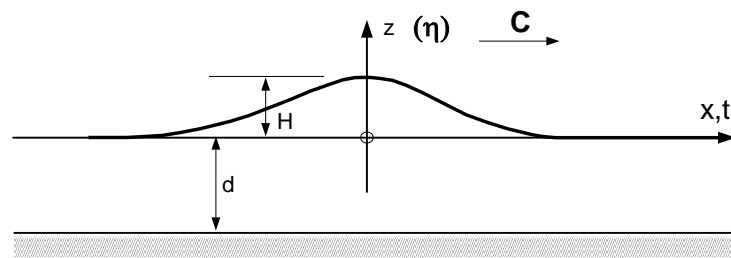


Abb. 3 Definitionen der Solitärwelle

Mit der vorstehend beschriebenen Theorie der Solitärwelle wurden Tsunamiwellen sowohl mit positiver als auch negativer Wasserspiegelauslenkung generiert, wie sie in Abb. 4 dargestellt sind. Der untere Teil in Abb. 4 zeigt eine Tsunamiwelle, die sich aus einer negativen und einer darauf folgenden positiven Oberflächenauslenkungen zusammensetzt. Da im Gegensatz zur Theorie im physikalischen Modell auch negative Oberflächenauslenkungen einer rein positiv generierten Solitärwelle auftreten, wurden die in den Versuchen gemessenen positiven und negativen Oberflächenauslenkungen, bezogen auf den Ruhewasserstand, getrennt ermittelt.

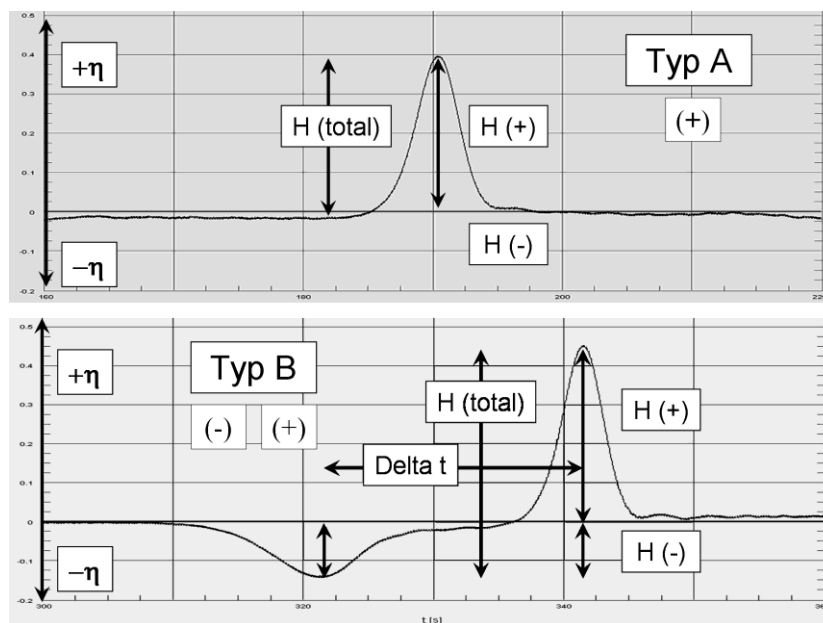


Fig. 4 Definitionen für die Analyse der aufgezeichneten Zeitverläufe von Tsunamiwellen

3. ERGEBNISSE

Die Abbildungen 5 bis 10 zeigen Photos von einer Tsunamiwelle an einigen Stationen bei ihrer Ausbreitung entlang des GWK. Abb. 5 zeigt die Welle im Bereich des Küstenvorfeldes (Shelf), wo bereits ein leichtes Aufsteilen (Shoaling) zu beobachten ist. Die Tsunamiwelle in Abb. 6 ist bereits vom Aufsteilen sowohl auf dem Küstenvorfeld als auch auf dem Strandbereich beeinflusst und befindet sich kurz vor dem Brechen. Abb. 7 zeigt die Welle unmittelbar nach dem Brechen.

Der Beginn des Wellenaufbaus ist in Abb. 8 und das Erreichen des maximalen Aufbaus in Abb. 9 dargestellt. Abb. 10 zeigt den Rückfluss des durch den Aufbau transportierten Wassers direkt oberhalb des Ruhewasserstandes. Sowohl während des Aufbaues als auch während des Rückflusses wurde ein ausgeprägter Transport von Sandmaterial auf dem Strand beobachtet.



Abb. 5 Tsunami im Bereich des Küstenvorfeldes (Shelf)



Abb. 6 Tsunami kurz vor dem Brechen



Abb. 7 Tsunami direkt nach dem Brechen



Abb. 8 Beginn des Wellenaufbaus



Abb. 9 Maximaler Wellenaufbau



Abb. 10 Rückfluss des Auflaufwassers

Die Umhüllenden der gemessenen Oberflächenauslenkungen sind in Abb. 11 für eine Welle exemplarisch dargestellt, getrennt für die positiven (maximalen) Werte zwischen Wellenberg und Ruhewasserspiegel und für die negativen (minimalen) Werte zwischen Wellental und Ruhewasserspiegel.

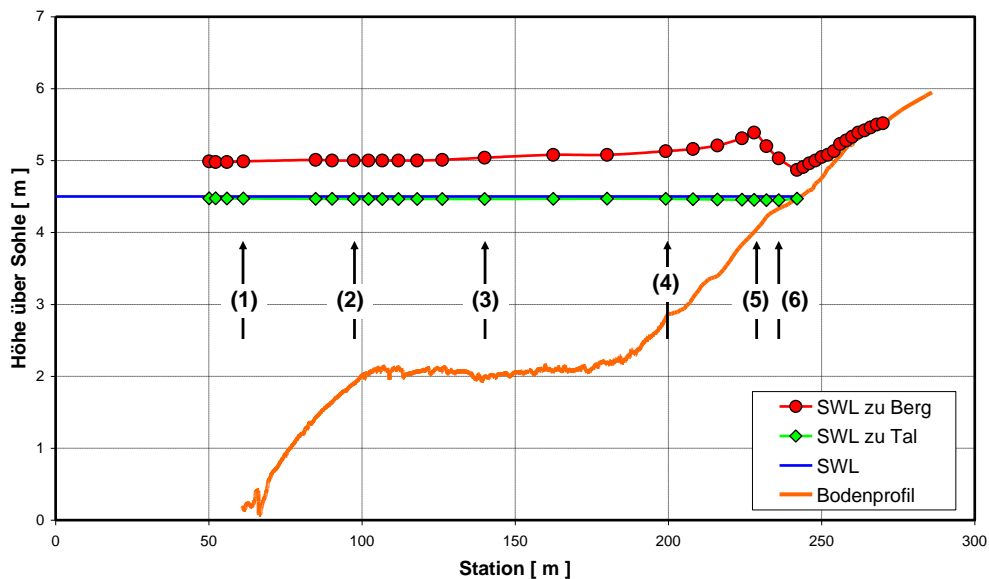
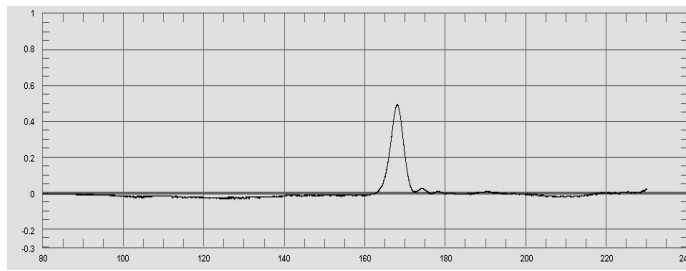


Abb. 11 Umhüllende der positiven und negativen Oberflächenauslenkungen einer Tsunamiwelle

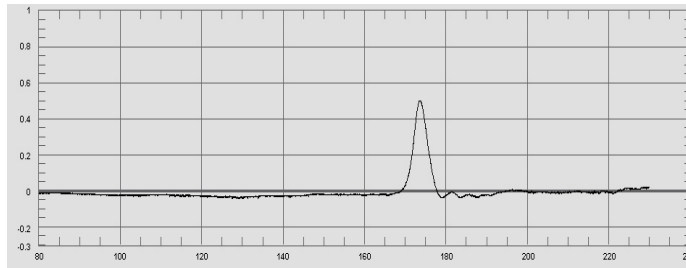
Die zeitlichen Verläufe dieser Tsunamiwelle an 6 unterschiedlichen Stationen (vergleiche Abb. 11) sind in Abb. 12 dargestellt. Der Einfluss der örtlichen Unterwassertopographie auf die Entwicklung der Wellenform an den einzelnen Stationen ist deutlich zu erkennen, ebenso wie in Abb. 13, in der die räumliche Verteilung der Oberflächenauslenkungen und der gesamten Wellenhöhe H_{Total} dargestellt ist. Während die Form der Tsunamiwelle im tieferen Bereich nahezu konstant bleibt, beginnen die Änderungen der Wellenform und das Aufsteilen im Bereich des Küstenvorlandes und nehmen im Strandbereich deutlich zu.

Der Einfluss der Unterwassertopographie auf die Ausbreitung der Tsunamiwellen wird auch deutlich durch die in Abb. 14 dargestellten räumlichen Verteilungen der Gesamtwellenhöhen H_{Total} aller untersuchten Wellen. Es ist offensichtlich, dass die Aufsteilung der Wellenhöhen stark von der örtlichen Beziehung zwischen Wellenhöhe und relativer Wassertiefe d/H abhängt. Die Aufsteilung von Tsunamis auf dem Küstenvorfeld nimmt mit zunehmender Wellenhöhe H bzw. mit abnehmender relativer Wassertiefe d/H zu. Tsunamis mit geringen Wellenhöhen werden nur auf dem Strand aufgesteilt.

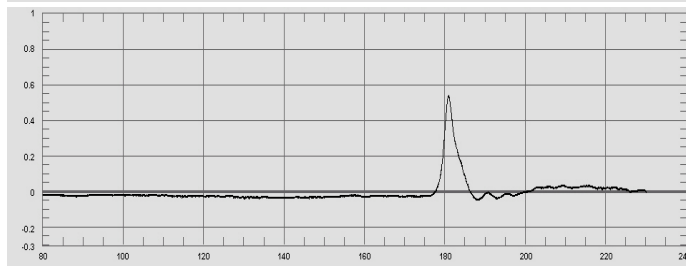
In Abb. 15 sind die gemessenen maximalen Wellenaufläufe R_{tsu} in Abhängigkeit von den generierten Wellenhöhen dargestellt. Die Auflaufwerte R_{tsu} sind mit denjenigen Aufläufen aufeinander folgender regelmäßiger Wellen R_{reg} verglichen, die mit den gleichen Wellenhöhen H und Perioden T_{98} unter Verwendung eines mit großmaßstäblichen Versuchen im GWK verifizierten Ansatzes berechnet wurden.



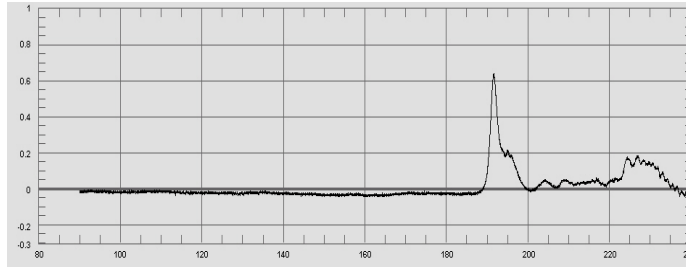
(1) Station 61.3 m



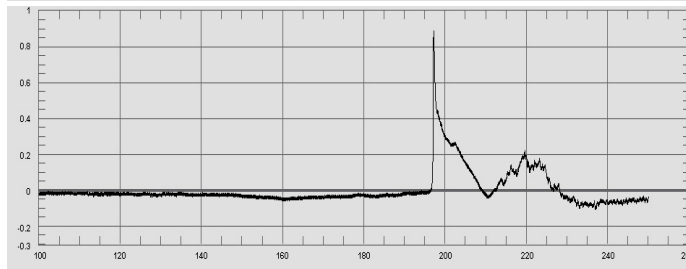
(2) Station 97.3 m



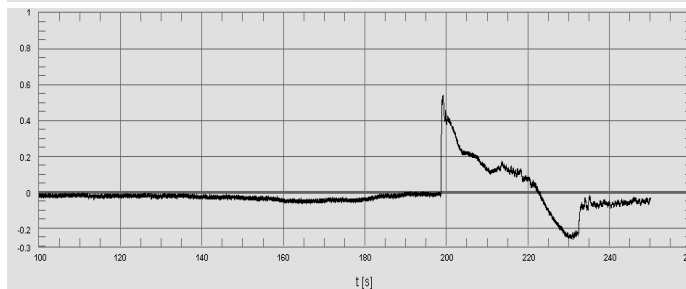
(3) Station 140.0 m



(4) Station 199.1 m



(5) Station 228.0 m



(6) Station 236.0 m

Abb. 12 Zeitliche Verläufe einer Tsunamiwelle an verschiedenen Stationen entlang des GWK

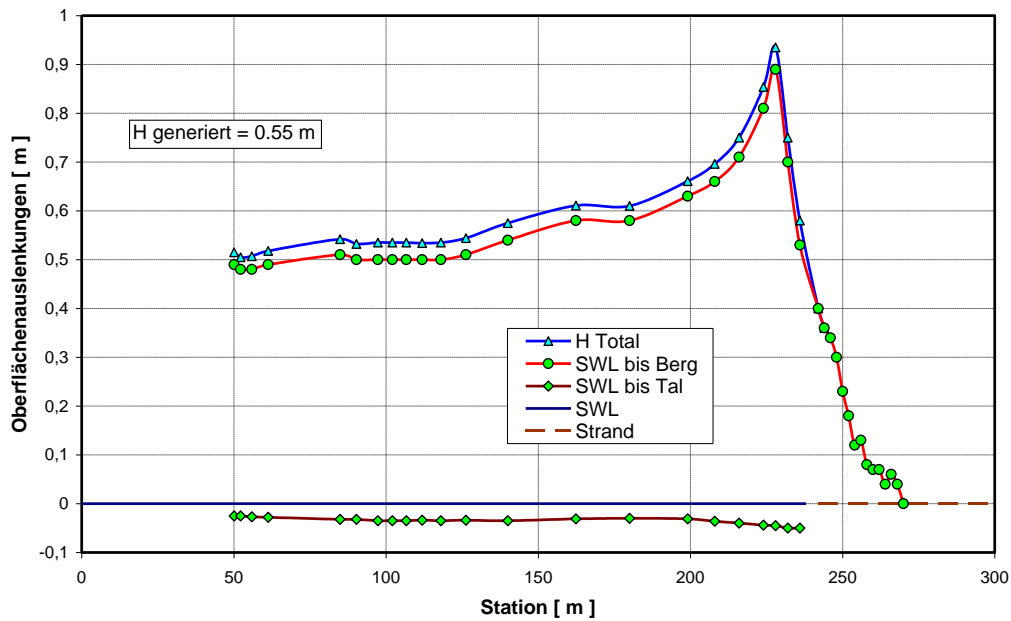


Abb. 13 Räumliche Verteilung der Oberflächenauslenkungen und der Gesamwellenhöhe

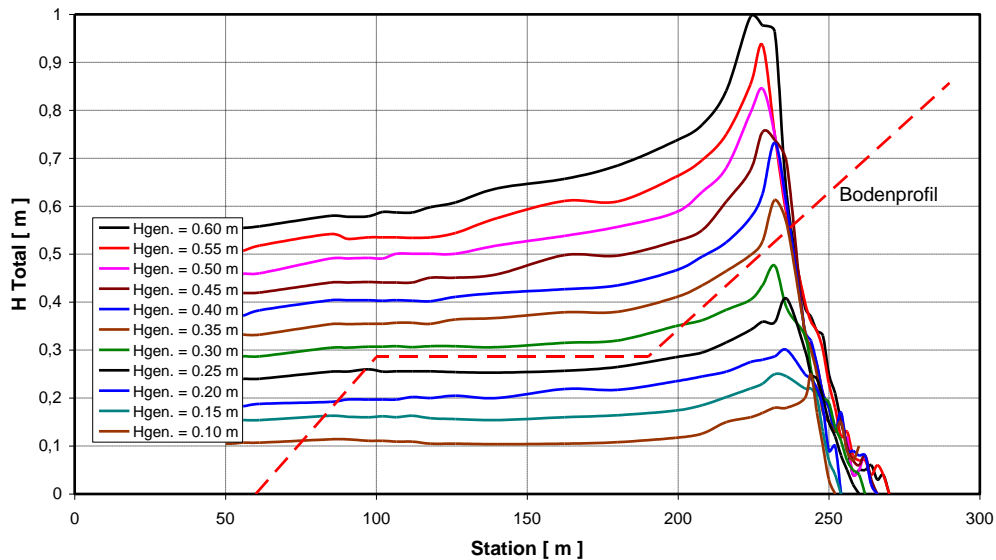


Abb. 14 Räumliche Verteilung der Gesamwellenhöhen der generierten Tsunamiwellen

Ein Vergleich zwischen den beiden Auflaufwerten in Abb. 15 zeigt, dass das Verhältnis R_{tsu} / R_{reg} für nichtbrechende Wellen bis zu Wellenhöhen von ungefähr 0,25 m geringfügig abnimmt, während es für brechende Wellen mit größeren Wellenhöhen als 0,25 m in etwa konstant bleibt. Der mittlere Wert für das Verhältnis R_{tsu} / R_{reg} für Wellenhöhen größer als 0,25 m beträgt 5,8 für die mittlere Strandneigung 1 : 25. Dies zeigt, dass der Wellenauflauf von Tsunamiwellen auf einem gleichförmig geneigten Strand sich von demjenigen regelmäßiger Wellen beträchtlich unterscheidet und einen um den Faktor 5,8 höheren Wellenauflauf als eine regelmäßige Wellen mit gleicher Wellenhöhe und Wellenperiode verursacht.

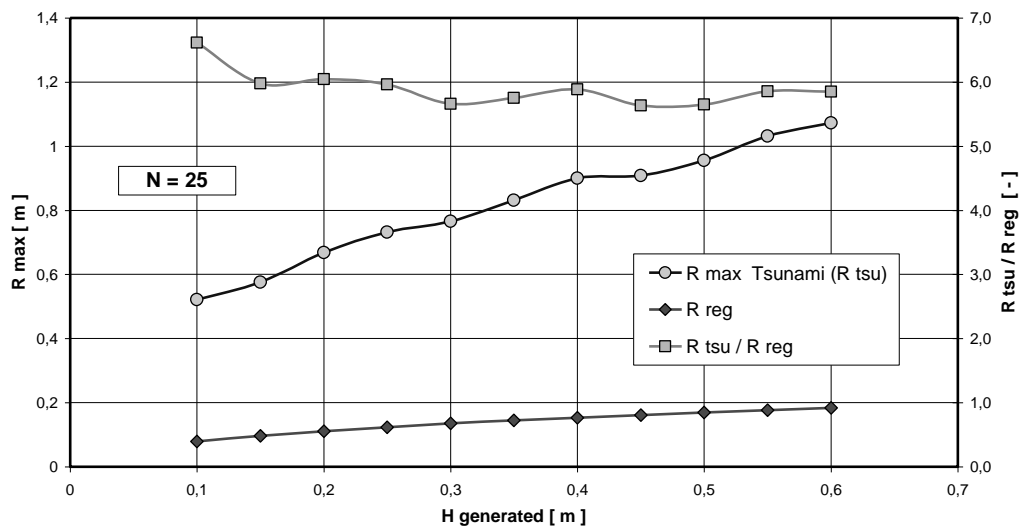


Abb. 15 Maximaler Wellenaufwurf von Tsunamiwellen versus generierte Wellenhöhen und Vergleich mit Ergebnissen für regelmäßige Wellen

In Abb. 16 werden die zeitlichen Verläufe einer zusammengesetzten Tsunamiwelle für eine Station im tieferen Bereich (Offshore) und für eine Station im Nahbereich der Uferlinie (Nearshore) verglichen. Aus der Testserie mit unterschiedlich generierten Δt (Abb. 4) konnten keine Wechselwirkungen auf die positiven und negativen Wellenkomponenten vor Erreichen des Brechpunktes der Tsunamis gefunden werden. Daraus folgt, dass jede Wellenkomponente ihre eigene Wellengeschwindigkeit und infolgedessen auch ihre eigene Formeigenschaft beibehält. Weiterhin wurde dabei ebenso wie für den Wellenaufwurf kein Trend in Abhängigkeit der generierten Werte Δt gefunden.

Die gemessenen Wellenaufwürfe R_{max} aus einer Testserie mit zusammengesetzten Tsunamiwellen (Typ B) sind in Abb. 17 enthalten, darin sind die Aufwürfe sowohl auf die positiven Wellenhöhenanteile H_+ als auch auf die Gesamtwellenhöhen H_{Total} bezogen. Weiterhin sind auch die Ergebnisse der Tsunamis mit nur einer positiven Wellenkomponente (Typ A) enthalten. Ein Vergleich der Ergebnisse ergibt, dass der Einfluss der positiven Wellenkomponente auf den Wellenaufwurf dominiert, sogar deutlicher mit zunehmendem relativen Anteil der negativen Wellenhöhenkomponente an der Gesamtwellenhöhe. Dies kann durch einen Überlagerungseffekt während des Wellenbrechens erklärt werden. Nach den visuellen Beobachtungen überlappt die positive Wellenkomponente während des Brechprozesses die negative Komponente mehr oder weniger vollständig.

Der dominierende Einfluss der positiven Wellenkomponente wird noch deutlicher in Abb. 18, in der die auf die Wellenhöhen bezogenen Aufwürfe R_{max} / H in Abhängigkeit der generierten Wellenhöhen dargestellt sind. Eine vergleichsweise gute Übereinstimmung ergibt sich, wenn Wellenaufwürfe für die Tsunamis vom Typ A und B auf die positiven Wellenhöhenkomponenten H_+ bezogen werden.

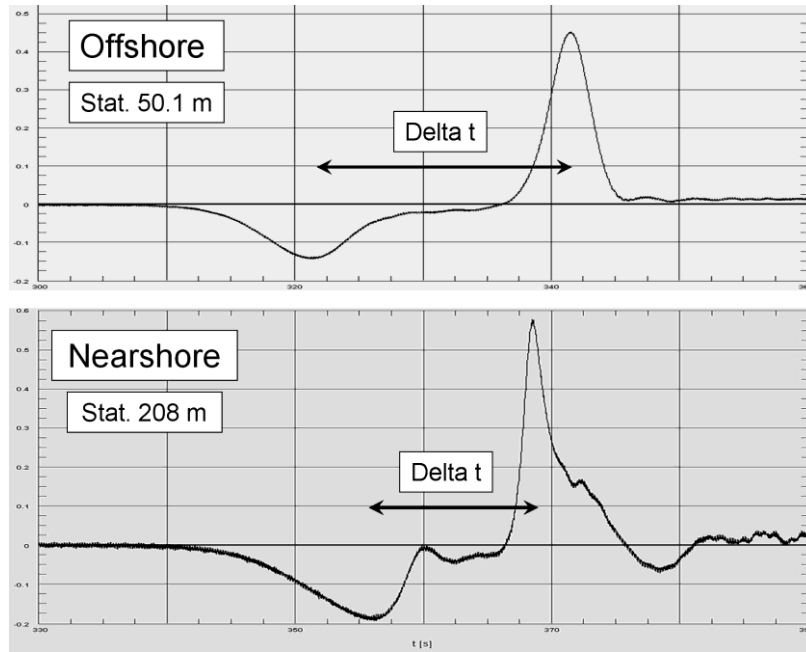


Abb. 16 Zeitlicher Verlauf der Oberflächenauslenkungen von Tsunamis mit zusammenetzten Wellenelementen an Stationen im tieferen Bereich (Offshore) und im küstennahen Bereich (Nearshore)

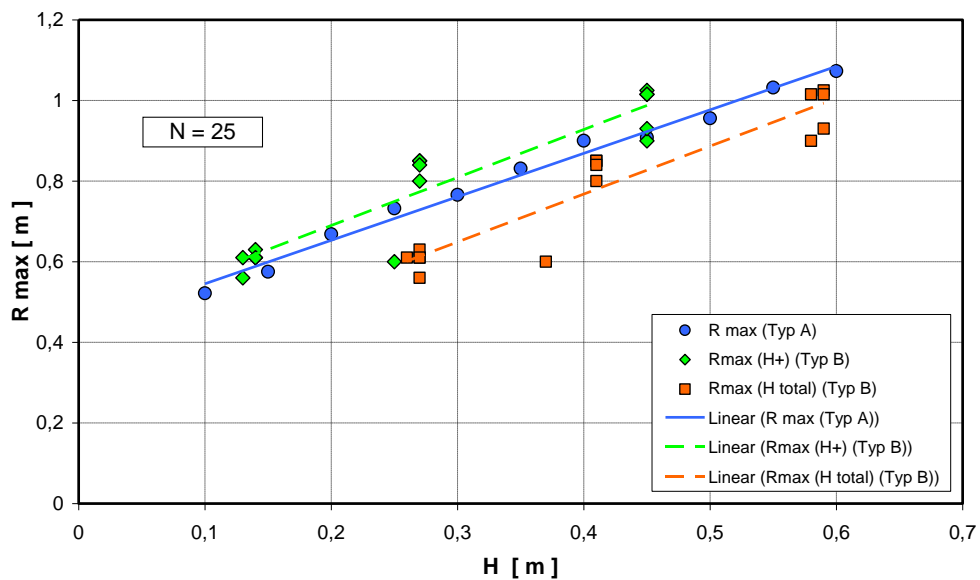


Abb.17 Vergleich der Wellenaufläufe von Tsunamis vom Typ A und Typ B

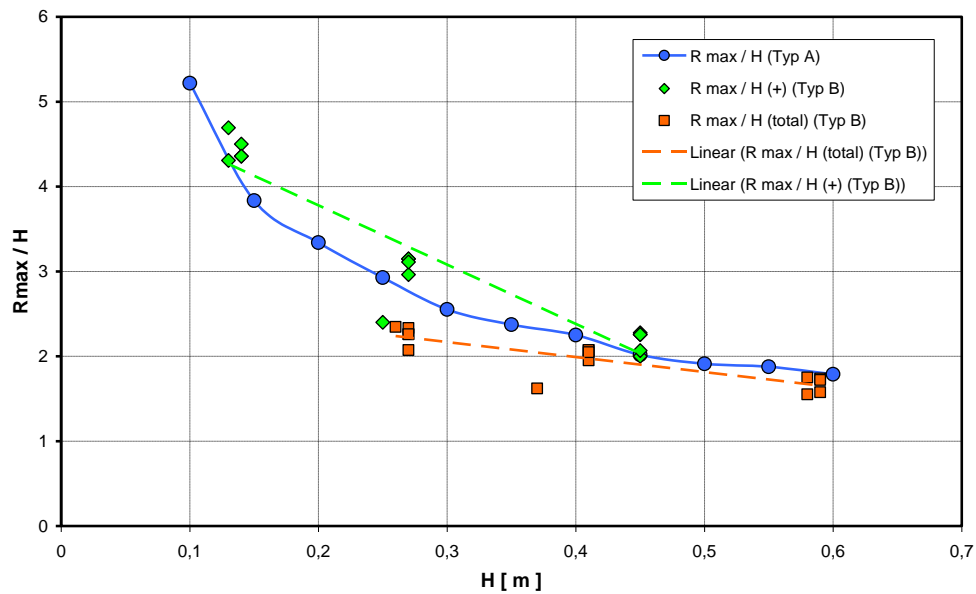


Abb.18 Vergleich der auf die Wellenhöhen bezogenen Wellenaufläufe von Tsunamis vom Typ A und Typ B

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die physikalische Simulation von Tsunamis und ihre Ausbreitung im Küstenvorfeld und auf flachen Stränden wurde im GROSSEN WELLENKANAL (GWK) des FORSCHUNGSZENTRUMS KÜSTE (FZK) untersucht.

Für die Generierung von Tsunamiwellen war die Verwendung der Theorie für Solitärwellen am besten geeignet. Welche Abweichungen gegenüber in der Natur beobachteter Tsunamiwellen auftreten, muss noch näher überprüft werden.

Die Entwicklung von Tsunamiwellen im Bereich des Küstenvorfeldes und des Strandes wurde im GWK in einem großen Maßstab und mit einer langen Wasserlinie simuliert. Mit der Wellentheorie für Solitärwellen wurden Wellen mit positiven Oberflächenauslenkungen sowie Wellen mit zusammengesetzten positiven und negativen Wellenkomponenten generiert.

Es wurde gezeigt, dass der Wellenaufwurf von Tsunamis auf einem gleichförmig geneigten Strandprofil sich deutlich von dem regelmäßiger Wellen unterscheidet.

Für Tsunamis mit zusammengesetzten negativen und positiven Wellenkomponenten ergab sich, dass die positive Wellenkomponente den Wellenaufwurfprozess dominiert.

Die physikalischen Simulationen solcher Prozesse können die Kenntnisse über das hydrodynamische Verhalten von Tsunamiwellen und ihre Einwirkung auf natürliche und künstliche Verteidigungsstrukturen an den Küsten deutlich verbessern.



5. SCHRIFTTUM

GRÜNE, J., SCHMIDT-KOPPENHAGEN, R., OUMERACI, H.: Large-scale tsunami wave generation, Proc. of the 1st International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Porto, Portugal, 2006.

MUNK, W.H.: The Solitary Wave Theory and its Application to Surf Problems, Annals of the New York Academy of Science, Vol. 51, New York, 1951