

Earth System Knowledge Platform - die Wissensplattform des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft, www.eskp.de

Klimawandel · Küstenschutz

MEERESWELLEN AN KÜSTEN BESSER VERSTEHEN

Michael Streßer¹, Christiane Eschenbach¹

¹ Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung

Zuerst publiziert: 01. Oktober 2020, 7. Jahrgang

Digitaler Objektbezeichner (DOI): <https://doi.org/10.2312/eskp.040>

Teaser

Brechende Wellen setzen viel Energie frei. Daher sorgen Meereswellen, die auf die Küste treffen, dort beispielweise für Erosion und sie können für Deiche und Bauten gefährlich werden. Wir müssen Wellen und damit verbundene Prozesse besser verstehen, um mögliche Folgen des Klimawandels und menschlicher Eingriffe abschätzen zu können.

Keywords

Wellenenergie, Welle, Küstenschutz, Strömung, Brandung, Riesenwellen, Klimawandel, HZG, Küste, Hydrodynamik, Morphodynamik, Deiche, Welle, Energie

Meereswellen, die am Strand brechen, bringen ganz augenfällig das Wasser in Bewegung. Dadurch transportieren sie Energie an Strände und Felsküsten und spielen eine wichtige Rolle für eine ganze Reihe natürlicher Wechselwirkungen an der Küste und im Küstenmeer. Sie verursachen Strömungen, wirbeln Sedimente auf und tragen damit zu den ständigen Veränderungen der Küsten bei (Abb.1). Ein gutes Verständnis der komplizierten Zusammenhänge zwischen Meereswellen, Strömungen, dem Meeresboden und den damit einhergehenden Veränderungen des Küstenmeeres ist die Grundlage für sinnvolle, umweltverträgliche und nachhaltige Küstenschutzmaßnahmen.

Während sich an manchen Stellen Sedimente ansammeln und allmählich „Land“ entsteht, wirken Wellen anderenorts ganz wesentlich an der Erosion von Küsten mit. Durch die Wellenlast können bei Sturm sogar ganze Teile der Küstenlinie zusammenbrechen und ins Meer stürzen. Auch Bauwerke, wie Windkraftanlagen und Deiche, sind durch starken Seegang gefährdet.

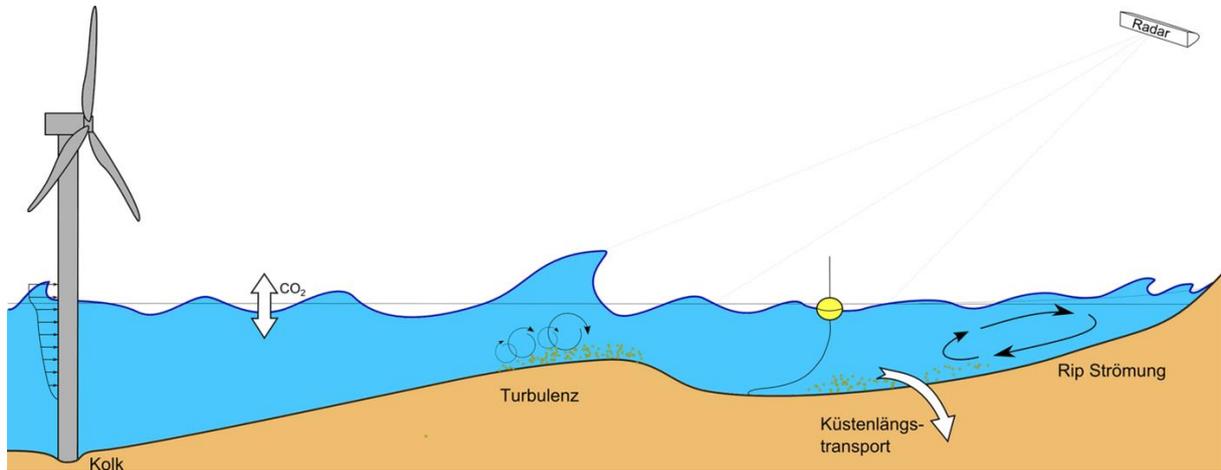


Abb. 1: Meereswellen transportieren Energie zur Küste (Grafik: Michael Streßer/HZG)

Eine Frage von großem öffentlichem Interesse sind auch die ständigen Veränderungen und der massive Sandverlust an Stränden und Dünen, so zum Beispiel auf den Nordseeinseln. Um Landverluste zu vermeiden und Strände zu erhalten, werden jedes Jahr aufwendige und kostenintensive Sandersatzmaßnahmen, wie zum Beispiel Sandaufspülungen, durchgeführt - und in Anbetracht des Klimawandels ist mit zunehmenden hydrodynamischen Belastungen zu rechnen. Die Wucht der Wellen nimmt an einigen Küsten der Ozeane vermutlich zu. Die erhöhte Wellenenergie wird durch mehr und stärkere Winde erklärt, die wiederum von der Erderwärmung verursacht werden (Reguero et al., 2019). Momentan sind die Forschungsergebnisse zur möglichen Anzahl der Stürme über dem Nordatlantik in den verschiedenen Zukunftsszenarien der Klimamodelle allerdings noch sehr uneinheitlich. Viele Studien zeigen jedoch eine Intensivierung der Stürme.

Wellen transportieren Energie

Die meisten Wellen entstehen durch Wind, der über die Meeresoberfläche weht. Ausnahmen bilden zum Beispiel die durch die Tide ausgelösten Gezeitenwellen und durch Seebeben entstehende Tsunamis.

Wenn der Wind extrem stark wird, können die Wellen nicht unendlich weiterwachsen. Ist eine bestimmte Wellensteilheit erreicht, dann bricht die Welle. Sie gibt Energie ab und wird kleiner. Weder die Zusammenhänge beim Anwachsen der Wellen noch die Abgabe der Wellenenergie beim Wellenbrechen sind bisher wissenschaftlich gut verstanden.

Um diese Prozesse zu entschlüsseln, werden die Meeresoberfläche und der oberflächennahe Teil der Wassersäule mit Messungen vor Ort, sogenannten „In-Situ-Messverfahren“, sowie mit Methoden der Fernerkundung beobachtet. In der Abteilung Radarhydrographie am Helmholtz-Zentrum Geesthacht werden innovative Messtechniken auf der Basis von Radar (Abb. 2) entwickelt und angewendet, um ozeanografische Größen wie Wellen, Strömungen und Winde sowie die Morphologie des Meeresbodens und die Wassertiefe (Bathymetrie) im küstennahen Bereich zu untersuchen.



Abb. 2: Spezielle Radargeräte und moderne Videotechnik werden entwickelt und eingesetzt, um die Dynamik der Wellen zu erforschen (Bunker Hill auf Sylt). (Foto: Jochen Horstmann/HZG)

Um die Wechselwirkungen zwischen Strömungen, der Wassertiefe und den Meereswellen genau zu erfassen, werden spezielle Radargeräte und moderne Videotechniken entwickelt. Die neuen Radarmethoden bringen einen entscheidenden Vorteil: Sie bieten ein räumliches Bild der Wellen und ihrer Fortbewegung. Abbildung 2 zeigt den Einsatz dieser Methode auf der Nordseeinsel Sylt.

Radargeräte sind in vielerlei Hinsicht günstig. Während bei den traditionellen In-Situ-Messverfahren, wie Seegangsmessbojen oder Wellenpegeln, einzelne Wellen schnell an der jeweiligen Position vorbeilaufen, können die Wellen nun in Raum und Zeit verfolgt werden. Radargeräte bieten darüber hinaus einen entscheidenden Vorteil: Sie liefern bei Tag und Nacht durchgängig Daten, während Videokameras immer nur bei Tageslicht eingesetzt werden können.

An der französischen Atlantikküste, westlich von Brest, wird am Leuchtturm „La Jument“ beispielsweise ein Radargerät des Helmholtz-Zentrum Geesthacht eingesetzt, um die Wechselwirkung zwischen den dort auftretenden, extrem starken Strömungen und den Wellen zu untersuchen. Die Erkenntnisse sollen helfen, die Vorhersagen von Wellen und Strömung in komplexen Gebieten zu verbessern und die auftretenden Kräfte an Bauwerken besser abzuschätzen.

Wellen werden durch Wellenhöhe, -länge und -periode charakterisiert

Wellen können im Wesentlichen über drei Größen beschrieben werden. Die augenscheinlichste Kenngröße ist die Wellenhöhe. Sie beschreibt den senkrechten Abstand zwischen dem höchsten Punkt der Welle am Wellenberg und dem niedrigsten Punkt im Wellental.

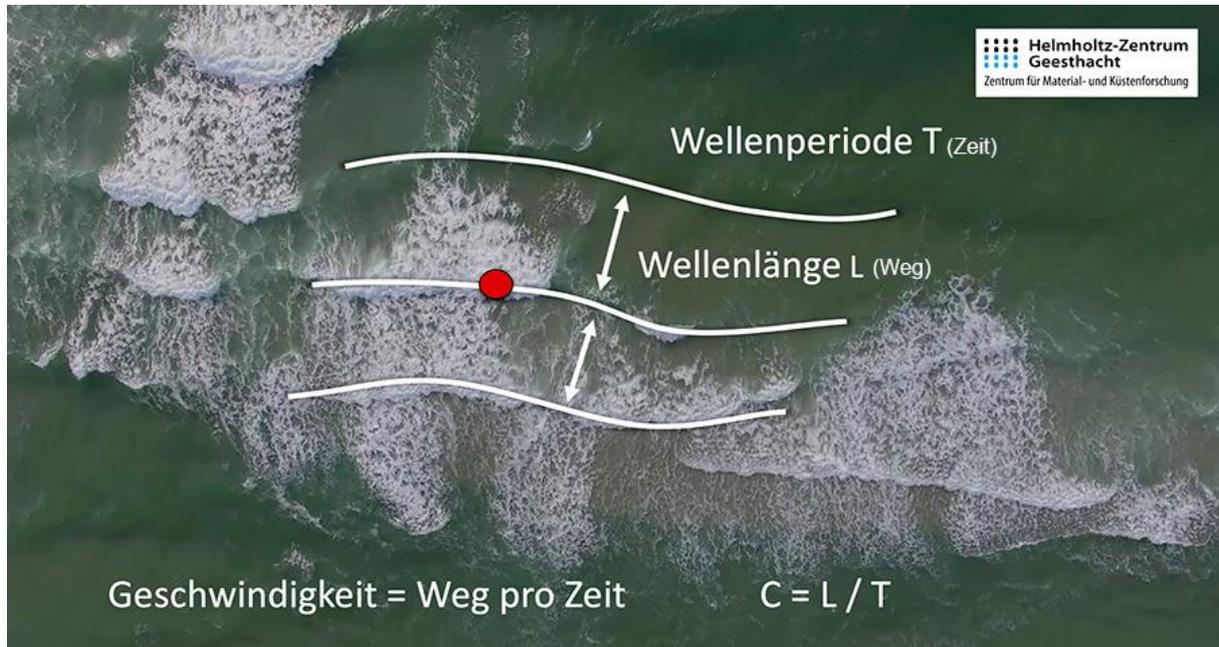


Abb. 3: Die Wellengeschwindigkeit wird durch das Verhältnis von Wellenlänge und Wellenperiode bestimmt. (Foto: Michael Streßer/HZG)

Die zweite Kenngröße ist der räumliche Abstand zwischen zwei Wellenbergen. Dieser wird Wellenlänge genannt.

Ein Wellenberg bleibt jedoch nicht an der gleichen Stelle, sondern er bewegt sich in Richtung der Wellenaufrichtung. Die Zeit, die vergeht, bis der nächste Wellenberg an einem bestimmten Ort vorbeikommt, wird Periode genannt. Die Welle legt innerhalb einer Periode also genau die Strecke zwischen zwei Wellenbergen - also eine Wellenlänge - zurück. Das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Wellenperiode bestimmt daher die Geschwindigkeit, mit der sich die Welle fortbewegt (Abb.3).

Viele Dinge, wie beispielsweise der Zusammenhang zwischen Wassertiefe, Wellenlänge und Wellenperiode, sind gut verstanden. Dieser Zusammenhang kann daher genutzt werden, um beispielsweise Bathymetrie oder Strömung zu bestimmen. Die Daten können jedoch auch von Nutzen sein, um mehr über Wellen zu lernen, so z.B.: Wie viel Energie geht beim Brechen verloren? Oder auch: Wie viele Wellen brechen?

Von welchen Parametern hängt die Bewegung der Wellen ab?

Wellen setzen Wasserteilchen und Energie in Bewegung. Dabei wird die Bewegung der Wellen selbst durch verschiedene Einflussfaktoren beeinflusst. Ihre Fortbewegungsgeschwindigkeit hängt von der Strömung, der Wassertiefe und der Wellenlänge ab. Die Abhängigkeiten lassen sich mathematisch herleiten und beschreiben - und sind zum Teil sehr kompliziert. Anschaulich gelten die folgenden Zusammenhänge:

Wenn eine Welle in die gleiche Richtung einer Strömung läuft, so erhöht sich ihre Geschwindigkeit um die Fließgeschwindigkeit der Strömung. Umgekehrt verlangsamt sich die Wellengeschwindigkeit bei entgegengesetzter Strömung. Man kann sich das so vorstellen, wie wenn man auf einer Rolltreppe mit oder gegen die Bewegung der Rolltreppe läuft.

Der zweite Einflussfaktor ist die Wassertiefe an dem Ort, an dem sich die Welle gerade befindet. Je flacher das Wasser wird, desto langsamer läuft eine Welle. Ist die Wassertiefe jedoch größer als die Hälfte der Wellenlänge hat sie keinen Einfluss mehr.

Im tiefen Wasser gilt: Lange Wellen bewegen sich schneller als kurze Wellen.

Während sich die Wellen von A nach B bewegen, ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Wasserteilchen in diese Richtung viel geringer als die Geschwindigkeit der Welle. Durch die Wellenbewegung wird überwiegend Energie transportiert. Ein einzelnes Wasserteilchen bewegt sich beim Passieren einer Welle innerhalb des Wasserkörpers auf einer Kreisbahn (Orbitalbahn, Abb. 4). Energie wird also viel schneller und effizienter transportiert als das eigentliche Wasserteilchen. Für viele Prozesse ist der Transport der Wellenenergie relevant, für manche Prozesse wiederum ist die eigentliche Bewegung der Wasserteilchen maßgeblich.

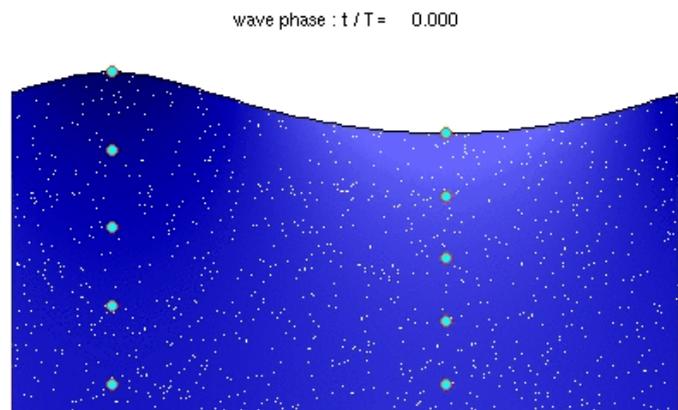


Abb. 4a: Wasserwelle im tiefen Wasser. (GIF-Animation: [Kraaiennest, Deep water wave](#), CC BY-SA 4.0)

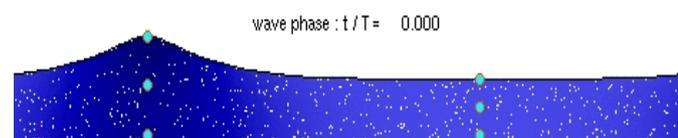


Abb. 4b: Wasserwelle im flachen Wasser. (GIF-Animation: [Kraaiennest, Shallow water wave](#), CC BY-SA 4.0)

Nähern sich die Wellen der Küste, können die Wasserteilchen ihre Kreisbewegung nicht ungestört fortsetzen. Wenn sich die Wassertiefe verringert, kommt ihnen der Meeresboden in die Quere und das Wasser kann sich nicht mehr so weit nach unten bewegen. Dies hat

zur Folge, dass die Wellen immer steiler werden, bis sie schließlich brechen. Beim Wellenbrechen überholt der Wellenberg das Wellental und die Wasserteilchen werden nach vorne beschleunigt.

Interessant dabei ist, dass die Wellen beim Auflaufen auf einen gleichmäßig geneigten Strand immer dann brechen, wenn die Wassertiefe etwa dem 1,3fachen der Wellenhöhe entspricht. Es ist also möglich anhand des Ortes an dem eine Welle bricht, herauszufinden, wie tief das Wasser dort ist - vorausgesetzt man kennt die Höhe der Welle.

Beim Wellenbrechen wird die Energie, die in einer Welle steckt, freigesetzt und es werden starke Strömungen und Turbulenzen erzeugt. Dadurch werden Sedimente aufgewirbelt und umgelagert. Außerdem findet ein schnellerer Austausch von Stoffen, wie etwa Kohlendioxid, zwischen dem Ozean und der Atmosphäre statt (s.a. Abb.1)

Von den Wellen lernen

Die Beobachtung und Analyse der Wellen werden genutzt, um Informationen abzuleiten, die dem ersten Blick auf die Wasseroberfläche verborgen bleiben, so zum Beispiel die Strömungsdynamik und die Wassertiefe.

Dazu werden einzelne Wellen vermessen und ihre Bewegungsgeschwindigkeit erfasst. Der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Wellengeschwindigkeit, die sogenannte „Dispersionsrelation“, wird dann verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeit und die Wassertiefe zu bestimmen. Diese beiden Kenngrößen sind insbesondere für das Verständnis der Küstendynamik sehr wichtig, sie sind aber, vor allem in strukturell komplizierten Gebieten wie dem Wattenmeer, schwer zu bestimmen.

Je nach Größe des Analysegebietes und Dauer der Untersuchungen werden diese entweder von festen Radar- und Videomesstationen an der Küste durchgeführt, oder von ferngesteuerten unbemannten Fluggeräten (Drohnen) oder aber auch von Satelliten aus dem All. Diese Untersuchungen sind zum Beispiel für Fragen der Sicherheit in Häfen und bei Offshore-Arbeiten relevant. Aktuelle Beispiele zeigt die Bildergalerie. So wird die Wassertiefe mittels Radar bestimmt, es werden Strömungsfeldern analysiert und brechende Wellen (Schaumkronen) untersucht. Auch Einzelwellen sind Gegenstand der Untersuchungen, denn deren bessere Kenntnis erhöht unter anderem die Sicherheit bei Offshore-Arbeiten.

Wellenphänomene an der Küste

Das Zusammenspiel der geschilderten Eigenschaften von Wellen, Strömungen und Meeresboden erklärt auch spannende Phänomene, die man an der Küste beobachten kann.

Warum laufen Wellen immer frontal auf den Strand zu?

Die Windrichtungen an ein und demselben Strand können von Tag und zu Tag völlig unterschiedlich sein. Wind lässt Wellen entstehen. Nichtsdestotrotz werden Wellen an fast jedem Strand der Welt in aller Regel immer von vorne auflaufen. Warum ist das so? Dieses Wissen ist auch für den Küstenschutz nicht unerheblich. Nähert sich eine Wellenfront dem Strand im schrägen Winkel, werden die Wellen im flachen Bereich stärker abgebremst. Der Teil einer Welle, der sich in noch in tieferem Wasser befindet, bewegt sich also schneller als der Teil, der bereits näher am Strand, also schon im flacheren Wasser, ist. Laufen Wellen schräg auf die Küste zu, so drehen sie sich dadurch immer in Richtung der Küste, bis sie schließlich gerade auf die Küste zulaufen. Es ist also das Abbremsen der Wellen im flachen Wasser, welches dazu führt, dass weltweit an den meisten Stränden die Wellen immer genau aus der gleichen Richtung - und zwar von vorne - auf den Strand zulaufen.

Wie entstehen Riesenwellen an der Küste?

Die Morphologie des Meeresbodens führt an einigen Küsten zu einer Bündelung der Wellenenergie und damit zum Auftreten von besonders hohen Wellen. Stellen, an denen Riesenwellen vorkommen, sind auch Hotspots für Extremsurfer. Zu den beliebtesten Orten für Big-Wave-Surfer zählen zum Beispiel „Mavericks“ an der kalifornischen Pazifikküste und Nazaré an der Küste Portugals.

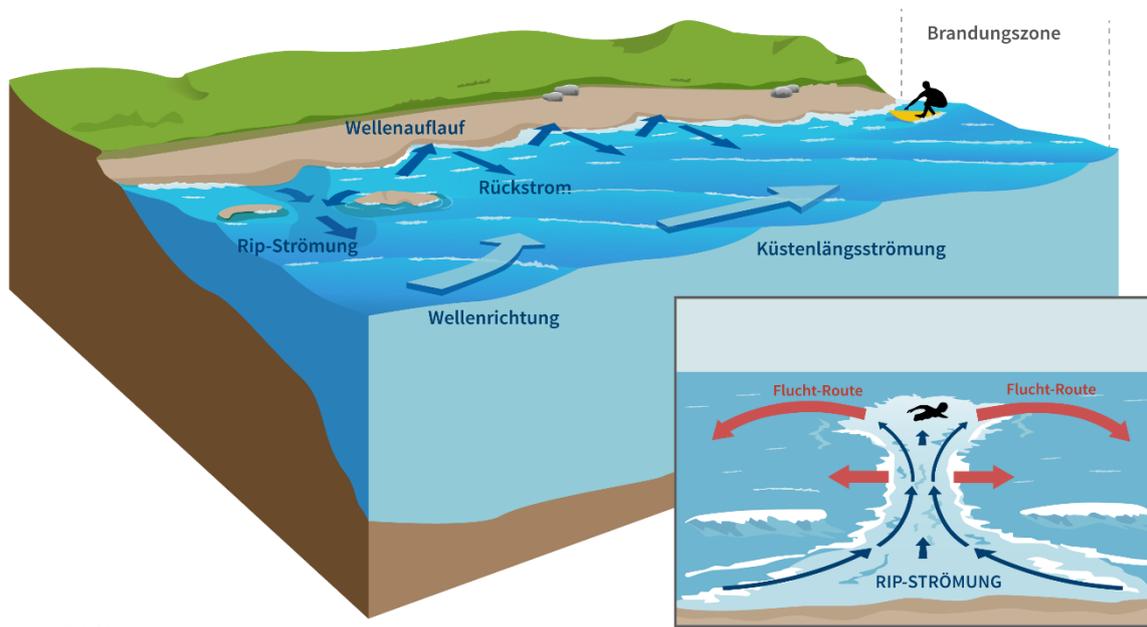
Vor der Küste Portugals, in Nazaré, entstehen die höchsten Wellen der Welt. Ein mehrere hundert Meter tiefer Unterwassergraben zieht sich hier bis dicht vor die Küste und die Wellen erreichen die Küste quasi ungestört mit derselben Geschwindigkeit wie sie im Ozean laufen. Sie werden nicht durch eine geringer werdende Wassertiefe abgebremst oder verlieren durch frühzeitiges Brechen an Höhe.

Hinzu kommt ein zweites Wellensystem, welches sich - bedingt durch den flacheren Meeresboden am Rand des Grabens - bereits in Richtung der Küste ausgerichtet hat. Wenn sich zwei Wellen dieser beiden Systeme vereinen, entstehen riesige Wellen. Die enorme Energie, die beim Brechen dieser Wellen freigesetzt wird, ist sehr gefährlich, nicht umsonst werden diese Monsterwellen von den einheimischen Fischern auch „Witwenmacher“ genannt. Extremsurfer bereiten sich auf diese Wellen mit jahrelangem Training vor und treffen umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen.

Wie entstehen Brandungsrückströme (Rip-Strömungen)?

Auch auf den ersten Blick ungefährliche Wellen können starke Strömungen verursachen, die in bestimmten Fällen gefährlich werden können. An Sandstränden bilden sich zum Beispiel zwischen Sandbänken lokal begrenzt Brandungsrückströme, auch „Rip-Strömungen“ genannt. Das Wasser der brechenden Wellen kann hier wegen der Barrierewirkung von Sandbänken oder Felsen nicht auf der ganzen Fläche zurückströmen

und die Rückströmung wird in den Lücken zwischen den Hindernissen gebündelt. Dadurch erreicht die Rückströmung dort hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Diese sind für Badende gefährlich, da sie von der Küste weg gerichtet sind.



eskp.de/CC BY 4.0

Abb. 5: Schematische Darstellung von geophysikalischen Prozessen in Küstengewässern. In der Brandungszone erzeugen brechende Wellen eine zum Strand parallel verlaufende Strömung. Außerdem können für Schwimmer gefährliche Ripströmungen durch rücklaufendes Wasser entstehen. (Grafik: Wissensplattform Erde und Umwelt, eskp.de, Lizenz: CC BY 4.0)

Wer trotz aller Vorsicht dennoch einmal in eine Rip-Strömung gerät, sollte vor allem Ruhe bewahren und auf keinen Fall gegen die Strömung anschwimmen. Meistens ist diese stärker als man selber schwimmen kann. Die Ursache der tödlichen Unfälle ist fast immer das Ertrinken durch Erschöpfung, weil man ganz intuitiv versucht, in Richtung Strand, also entgegen der Strömung, zu schwimmen. Deshalb: Wer von einer Rip-Strömung erfasst wird, sollte immer parallel zum Strand schwimmen und vor allem Kräfte sparen.

Resümee und Ausblick

Meereswellen spielen eine wichtige Rolle für eine ganze Reihe natürlicher Wechselwirkungen und für kurz- und langfristige Veränderungen an der Küste. Küstennah werden einerseits die Form und die Ausbreitungsdynamik der Wellen stark von der lokalen Topographie des Meeresbodens und der Wassertiefe (der Bathymetrie) beeinflusst. Andererseits wird die ankommende Wellenenergie beim Brechen der Welle auf Strömung, Turbulenzen und Wärme übertragen. Diese Faktoren spielen die Hauptrolle für die Mobilisierung und den Transport lokaler Sedimente und damit für die Erosion der Küsten.

Die küstennahen Wasserbewegungen und die dabei auftretenden Kräfte (die Hydrodynamik) und die Veränderungen der Strukturen am Meeresboden als Ergebnis des Wechselspiels

dieser Kräfte (die Morphodynamik) zu untersuchen, ist daher von großer Bedeutung für das Verständnis langfristiger Veränderungen unserer Küsten.

Eine Reihe von direkt vor Ort eingesetzten Messgeräten wie auch Fernerkundungsmethoden liefern permanent Daten. Sie werden ständig weiterentwickelt, um das Wechselspiel zwischen der küstennahen Beschaffenheit des Meeresbodens (Bathymetrie), dem Wellenfeld (Seegang), den Vorgängen des Wellenbrechens, den Strömungen und den damit verbundenen Sandumlagerungen zu erforschen. Denn trotz ihrer hohen Relevanz sind viele Prozesse in der küstennahen Hydro- und Morphodynamik noch wenig verstanden. Wenn wir den Einfluss verschiedener Umweltbedingungen, zum Beispiel von Stürmen, auf die küstennahe Hydrodynamik besser verstehen, können dann auch Schlüsse gezogen werden, wie die Küstenbereiche auf eine Veränderung der Klimabedingungen reagieren.

Referenzen

Filipot, J.-F., Guimaraes, P., Leckler, F., Hortsman, J., Carrasco, R., Leroy, E., ... Le Dantec, N. (2019). La Jument lighthouse: a real-scale laboratory for the study of giant waves and their loading on marine structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2155):20190008. doi:10.1098/rsta.2019.0008

Reguero, B. G., Losada, I J. & Méndez, F. J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10:205 (2019). doi:10.1038/s41467-018-08066-0

Streßer, M. (2020). *Occurrence and Energy Dissipation of Breaking Surface Waves in the Nearshore Studied with Coherent Marine Radar* (Dissertation, Geowissenschaften). Verfügbar unter macau.uni-kiel.de

Verbundvorhaben: FINO 3 - Forschung auf FINO 3 für die Offshore-Windtechnologie (2018-2022); Teilvorhaben: EMK - Einzelwellenmessung und Kurzzeitvorhersage. (o.D). [Projektbeschreibung, www.enargus.de]. Projektträger Jülich - Forschungszentrum Jülich. Aufgerufen am 17.09.2020.

Zitiervorschlag

Streßer, M. & Eschenbach, C. (2020, 1. Oktober). Meereswellen an Küsten besser verstehen. *Earth System Knowledge Platform* [www.eskp.de], 7. doi:10.2312/eskp.040



Text, Fotos und Grafiken soweit nicht andere Lizenzen betroffen: eskp.de | [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

eskp.de | Earth System Knowledge Platform - die Wissensplattform des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft