

Wellen unter den Wellen

Seltsame Wogen, die unter der Meeresoberfläche hin- und herschwappen, scheinen dafür zu sorgen, dass der Festlandsockel überraschend sanft zur Tiefsee hin abfällt.



Viele von uns verbringen ihren Urlaub am Meer. Stellen Sie sich einmal vor, Sie kämen zum Strand und das Wasser wäre verschwunden. Nach Überwindung des ersten Schocks fänden Sie es wahrscheinlich genauso reizvoll, den zuvor verborgenen Meeresgrund zu erforschen wie in der Brandung zu plantschen. Also würden Sie kurzerhand in Ihr Auto steigen, vorsichtig losfahren und sich fragen, welche Überraschungen wohl auf Sie warten mögen.



Zunächst passiert nicht viel; denn Sie überqueren den Kontinentalschelf. Er besteht aus Sedimenten, die vom Land abgetragen wurden, und bildet eine fast horizontale Ebene. Nur hier und da gibt es Rippfelder oder Dünen, die durch die Bewegung von Wellen und Strömungen in dem verschwundenen Ozean entstanden sind. Links und rechts erspähen Sie vielleicht ehemalige Flussbetten, die sich während früherer Eiszeiten eingegraben haben. Damals hatte sich, weil so viel Wasser in den Gletschern gebunden war, der Meeresspiegel um über hundert Meter abgesenkt, sodass der Festlandsockel frei lag.

Auf der Weiterfahrt gelangen Sie schließlich an den Schelfrand. Wie bald das geschieht, hängt davon ab, an welcher Küste Sie sich befinden: Vor Zentralchile zum Beispiel wäre es schon nach fünf Kilometern so weit, fast überall vor der US-Ostküste dagegen erst nach mehr als hundert. Am Schelfrand stoppen Sie und steigen aus, um den grandiosen Blick auf sich wirken zu lassen. Vor Ihnen liegt der Kontinentalthang, der etwa 3000 Höhenmeter zum Tiefseeboden hinunter abfällt.

Seine Topografie ist etwas abwechslungsreicher als die des Schelfs. An einigen Stellen geht es ziemlich steil und holprig abwärts: meist dort, wo untermeerische Schluchten – teils gewaltiger als der Grand Canyon – den Kontinentalthang zerschneiden. Zwischen diesen Abgründen senkt sich der Meeresboden jedoch überraschend sanft ab: Würden Sie wieder in Ihr Auto einsteigen und einen solchen Hang hinunterfahren, wäre es ein Gefühl wie auf einer Passstraße in den Alpen.

Dabei sollte der Kontinentalthang eigentlich viel steiler sein. Wenn Sedi-

◀ Interne Meereswellen lassen sich in der Straße von Gibraltar beobachten. Auf diesem Foto, das Astronauten 1984 bei strahlendem Sonnenschein von einer Raumfähre aus machten, entsprechen die hellen Ringe glatten, spiegelnden Arealen und die dunklen Bögen gekräuselten, matten Bereichen. Sie pausen die Wellen im Untergrund durch, weil diese die Rauigkeit der Wasseroberfläche beeinflussen. Da der Blick von Süden nach Norden geht, liegt Spanien unten rechts und Marokko oben links.

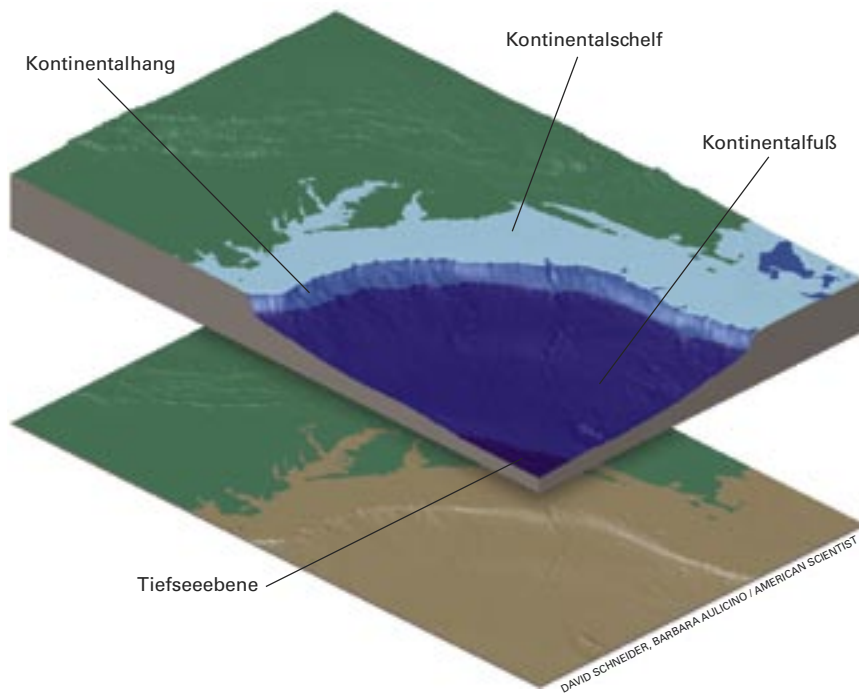
mentpakete unter Wasser nur der Schwerkraft ausgesetzt sind, können sie ohne Weiteres stabile Abhänge mit einer Neigung von 15 Grad und mehr bilden. Doch rund achtzig Prozent der Schelfränder weltweit fallen mit weniger als acht Grad ab und ihr durchschnittlicher Neigungswinkel liegt bei nur etwa drei Grad. Gäbe es allein die ständige Sedimentzufuhr vom Festland, sollte das Gefälle mit der Zeit zunehmen. Also müssen natürliche Kräfte existieren, welche die Kontinentalthänge flach halten. Wir glauben, dass ein wesentlicher – bislang unerkannter – Faktor so genannte interne Gezeiten sind: weit gehend unsichtbare Wogen, die im Rhythmus von Ebbe und Flut tief unter dem Meeresspiegel durch die Ozeane pulsieren.

Meereswogen ohne Wind

Wellen unter den Wellen – kann es das geben? Tatsächlich ist das Phänomen gar nicht so seltsam, wie es auf den ersten Blick anmutet. Die vertrauten Oberflächenwellen wandern längs der Grenze zwischen zwei fließfähigen Medien, nämlich Luft und Wasser. Stellen Sie sich jetzt vor, das obere Medium wäre eine Flüssigkeit anstatt eines Gases. Was geschähe? Auch in diesem Fall könnten im Grenzbereich Wellen auftreten – allerdings würden sie sich nicht ganz so verhalten wie gewohnt. Wenn die untere Flüssigkeit nur wenig dichter als die obere wäre, hätten sie zum Beispiel erstaunlich große Amplituden. Außerdem würden sie sich wie in Zeitlupe bewegen. (Dieselben Effekte sind in den kleinen Wellentanks zu beobachten, die es in Kuriositätenläden zu kaufen gibt, gewöhnlich neben den Lavalampen, siehe Bild S. 59.)

Analoge Grenzschichtwellen gibt es innerhalb des Ozeans. Sie bilden sich meist an der Basis der so genannten Durchmischungszone: der obersten Wasserschicht, die fortwährend durch Wind und Wellen umgewälzt wird und in ihren physikalischen Eigenschaften daher ziemlich homogen ist. Darunter verändert sich die Temperatur (und damit die Dichte) des Meerwassers abrupt – wie Gerätetaucher oft überrascht feststellen.

Die Basis der Durchmischungszone befindet sich gewöhnlich in einer Tiefe von weniger als hundert Metern. Den weiter unten gelegenen Kontinentalthang können die hier entstehenden Grenzschichtwellen deshalb nicht formen. Aber sie sind auch nicht die einzigen. Darun- ▶



◀ Vor der Küste eines Festlands – hier im Nordosten der USA – erstreckt sich der Schelf, der über den Kontinentalhang und -fuß in die Tiefseeebene übergeht. Nur bei starker Überhöhung wird das Relief auf einer geschummerten Karte erkennbar (oben). Ohne eine solche Verzerrung erscheint die Topografie des Meeresbodens ziemlich flach (unten). Das Gefälle am Kontinentalhang beträgt in der Regel nur wenige Grad.

▷ ter treten interne Wellen auf, die keine bestimmte Grenzschicht zwischen verschiedenen dichten Körpern benötigen. Vielmehr entstehen sie einfach deshalb, weil das Wasser mit der Tiefe allmählich dichter wird.

Um das zu verstehen, sollten Sie sich für einen Moment vorstellen, Sie würden einen kleinen Bereich im Meer von seiner Umgebung isolieren, indem Sie etwa einen Ballon in einer bestimmten Tiefe mit Wasser füllen. Sich selbst überlassen, bliebe dieser frei schwebend auf demselben Niveau. Was aber geschähe, wenn Sie ihn nach oben zögen, in Bereiche geringerer Dichte? Da das Wasser in seinem Innern dann dichter wäre als seine neue Umgebung, würde der Ballon von der Schwerkraft zurück nach unten gezogen. Doch durch den Schwung, den er beim Absinken erhielte, schösse er über seine ursprüngliche Position hinaus in tiefere Regionen, deren Dichte höher wäre als seine eigene. Folglich würde er wieder aufsteigen und diese vertikale Oszillation so lange fortsetzen, bis die Reibung ihn zum Stillstand brächte.

Mit dem Bild dieses auf und ab tänzelnden Ballons vor Augen können Sie sich leicht vorstellen, wie es zu solchen Pendelbewegungen innerhalb der Meere kommt. Angetrieben werden sie etwa von den Gezeiten. Diese erzeugen nicht nur die als Ebbe und Flut bekannten periodischen Schwankungen des Meeresspiegels, sondern rufen auch eine Strömung hervor, die sich über den Ozeanboden be-

wegt. Dabei trifft sie manchmal auf untermeerische Erhebungen. Von solchen topografischen Hindernissen nach oben abgelenkt, können Gezeitenströme leicht in Schaukelbewegungen verfallen, die sich in großen Wellen von ihrem Ursprungsort fortpflanzen. Wie das Wechselspiel zwischen Ebbe und Flut, das sich zweimal am Tag wiederholt, folgen sie einem Zwölf-Stunden-Rhythmus. Ozeanografen sprechen deshalb von »halbtäglich internen Gezeiten«.

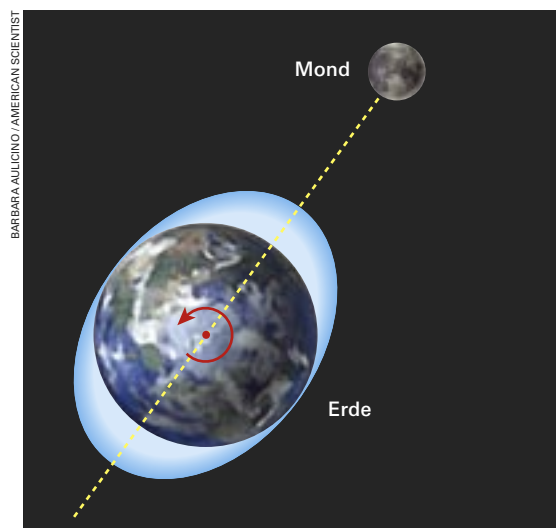
Versuche im Wassertank

Der norwegische Arktisforscher und Friedensnobelpreisträger Fridtjof Nansen entdeckte schon Ende des 19. Jahrhunderts die ersten Beispiele dafür im Nordpolarbecken. Doch erst in den 1960er Jahren erkannten Ozeanografen darin ein allgemeines Phänomen, das weltweit auftritt. Nun wurde auch klar, dass interne Wellen gewaltige Mengen an Energie enthalten und das Meerwasser regelmäßig durchmischen, während sie an den Kontinentalhängen entlangschwappen.

Die bewegten 1960er Jahre waren für die Geowissenschaften außerordentlich fruchtbar – brachten sie doch unter anderem das fundamentale Konzept der Plattentektonik hervor. Damals äußerte auch einer von uns (Cacchione) gemeinsam mit seinen Doktorvätern Carl Wunsch und John Southard vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge erstmals die Vermutung, dass interne Wellen über geologische Zeiträu-

me hinweg den Meeresboden formen könnten. Grundlage dieser Hypothese waren Berechnungen von Wunsch, der zu den bedeutendsten physikalischen Ozeanografen seiner Zeit zählte. Demnach sollten interne Wellen, die sich an submarinen Hängen entlang aufwärts bewegen, Strömungen am Meeresboden hervorrufen, die stark genug wären, Material abzutragen und zu verlagern. Diese Theorie musste allerdings noch unter kontrollierten Laborbedingungen überprüft werden. Cacchione wollte das im Rahmen seiner Doktorarbeit tun.

Dazu füllten er und Wunsch einen großen rechteckigen Tank, der den Ozean simulierte, mit Wasser, dessen Salzgehalt – und damit Dichte – mit der Tiefe zunahm. An einem Ende war auf halber Höhe an einem horizontalen Stab ein senkrecht stehendes Brett angebracht. Indem die Forscher dieses »Paddel« hin- und herdrehten, erzeugten sie eine Serie interner Wellen. Diese wanderten zum gegenüberliegenden Ende des Tanks, wo eine schräg gestellte Kunststoffplatte den Kontinentalhang verkörperte. Dabei erreichten die horizontalen Wasserge-



▶ Im kleinen Wellentank aus dem Kuriositätenladen, der zwei nicht mischbare Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte (eine durchsichtig, eine blau) enthält, lassen sich interne Wellen beobachten. Ihre Amplituden sind größer als bei Oberflächenwellen ähnlicher Wellenlänge, und sie bewegen sich wie in Zeitlupe. Sie können auch in einer homogenen Flüssigkeit entstehen, wenn ein vertikaler Gradient in der Dichte vorliegt.

schwindigkeiten an der Oberfläche und am Grund des Beckens ihr Maximum, während in der Mitte keinerlei Bewegung stattfand.

Mit eigenen Augen konnten Wunsch und Cacchione beobachten, wie sich die internen Wellen über dem nachgestellten Hang deutlich veränderten. Sobald sie auf die Kunststoffschräge trafen, nahm ihre Amplitude zu und die Wellenlänge ab. Sie wurden also höher und schmaler, während die Wassergeschwindigkeiten stiegen – ganz ähnlich wie bei der Brandung, die an den Strand klatscht. In einigen Fällen entwickelten sich große, turbulente Flutwellen mit steilem Bug, die sich wie eine Wand auftürmten und den Hang hinaufwanderten, bevor sie sich überschlugen und in sich zusammenstürzten. Diese sich brechenden internen Wogen verursachten oft ein erhebliches Klatschen und eine Rückströmung, durch die im echten Ozean der Grund abgespült würde.

Mit ihrem Probetank erforschten Cacchione und Wunsch auch eine spezielle, »kritische« Situation, bei der die Energie der internen Wellen in einer schmalen Zone entlang der geneigten Kunststoffplatte weit gehend aufgezehrt wurde. Damals war dieses Phänomen noch nicht theoretisch beschrieben worden. Die experimentellen Untersuchungen zeigten jedoch, dass in diesem kriti-

◀ **Hauptursache interner Wellen im Meer sind die Gezeiten. Der Wechsel zwischen Ebbe und Flut im ungefähr sechsstündigen Rhythmus beruht darauf, dass unter dem Einfluss des Mondes zwei ausgeprägte Ausbuchtungen im Niveau des Meeresspiegels entstehen (hier der Deutlichkeit halber stark überhöht), unter denen die Erde rotiert.**



AMERICAN SCIENTIST

schon Fall die Wassergeschwindigkeiten drastisch zunahmten und die interne Brandung an dem nachgestellten Hang sich enorm verstärkte – weit über die Werte bei anderen Testläufen hinaus.

Dadurch konnten, wie Cacchione und Southard in weiteren Laborexperimenten zeigten, Sedimente vom Meeresgrund aufgewirbelt und Riefen erzeugt werden. Aus diesen Ergebnissen schlossen Cacchione, Wunsch und Southard, dass interne Wellen auch im wirklichen Ozean im Stande wären, die Sedimentation zu beeinflussen, sofern die kritische Bedingung an Kontinentalthängen erfüllt wäre. Den Beweis dafür an Ort und Stelle zu führen, schien ihnen allerdings zu schwierig.

Erschütterungen am Meeresgrund

Erst Jahre später machte Cacchione seine erste persönliche Erfahrung mit den Auswirkungen echter interner Wellen im Ozean. Es war bei einer Tauchfahrt mit dem Atom-U-Boot NR-1 der US-Marine im Hydrographer Canyon. Dieser erstreckt sich unmittelbar südlich von Kap Cod und ist eine von vielen Schluchten, die den dortigen Kontinentalthang zerschneiden. Während Cacchione und der bekannte Meeresbiologe Bruce Heezen eifrig den Untergrund kartierten und Fotos schossen, erschütterten wiederholt starke Strömungen das Gefährt. Sie erreichten Geschwindigkeiten von bis zu einem halben Meter pro Sekunde in Bo-

dennähe und kehrten etwa alle zwölf Stunden ihre Richtung um.

Im Gegensatz zu anderen Atom-U-Booten besitzt NR-1 kleine Fenster. So konnten die Wissenschaftler mit eigenen Augen beobachten, wie die starken Strömungen immer wieder Schlamm aufwirbelten. Zeitgleich mit dem Auftreten von Ebbe und Flut trübte sich dadurch jeweils für etwa eine Stunde der Blick auf den sonst klar erkennbaren Meeresgrund. Dieses Erlebnis bestärkte Cacchione in der Überzeugung, dass interne Wellen tatsächlich Sediment am Meeresboden verfrachten. So beschloss er, seine Untersuchungen zu dem Phänomen wieder aufzunehmen.

Mit Tauchgängen an vielen Orten sowie zahlreichen Messwerten von Instrumenten, die am Grund verankert waren, ließen sich Vorkommen und Kraft der internen Gezeiten seither umfassend dokumentieren – sowohl in submarinen Schluchten als auch an sanfter abfallenden Stellen des Meeresbodens. Beispielsweise verfolgten Forscher der Universität von Washington in Seattle zwischen 1995 und 1999 mit Sonden in etwa 450 Meter Wassertiefe die Vorgänge am oberen Kontinentalthang vor Nordkalifornien. Wie sich zeigte, waren während der fünf Untersuchungsjahre durchweg interne Gezeiten für die stärksten Strömungen in Bodennähe verantwortlich. Mit Geschwindigkeiten bis zu 40 Zentimeter pro Sekunde wälzte sich dabei flutwellenartig kälteres Wasser hangaufwärts und misch-

▷ te die Schichten am Meeresgrund kräftig durch. Ähnliches registrierten Ozeanografen an vielen anderen Orten – so vor der Hawaii-Insel Oahu in etwa 460, vor Virginia in rund 1100 und am Fuß des Kontinentalhangs südwestlich von Irland in ungefähr 3000 Meter Tiefe.

Im Lauf der Zeit häuften sich so die Belege dafür, dass interne Gezeiten bodennahe Strömungen verursachen, die stark genug sind, um die Sedimentation zu verhindern und manchmal sogar bereits abgelagertes Material wieder wegzuschwemmen. Das bewog uns dazu, unsere bisher nur im Labor geprüfte Hypothese, wonach submarine Wellen die Entwicklung von Kontinentalhängen entscheidend mitbestimmen, endlich

auch in der Natur zu testen. Selbstverständlich wussten wir, dass viele andere Prozesse diesen Bereich des Meeresbodens beeinflussen – angefangen von den langsamen Bewegungen der tektonischen Platten bis hin zum gelegentlichen Großreinemachen durch Trübeströme. Solche submarinen Erdbeben treten auf, wenn der Meeresboden an einer steilen Stelle plötzlich nachgibt und ein schlammiges Gemisch aus Sediment und Wasser den untermeerischen Hang hinabschießt.

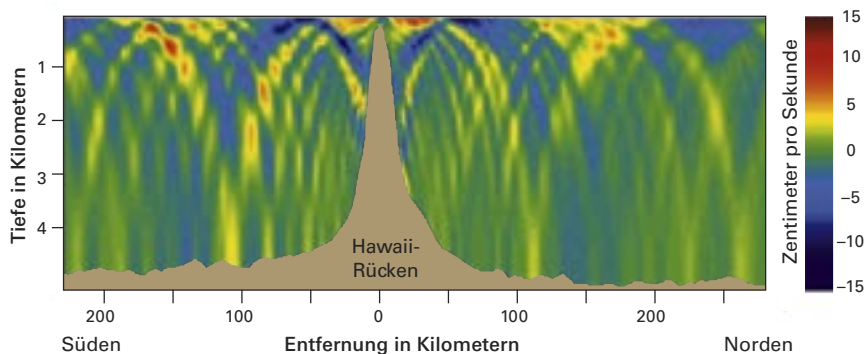
Geschwindigkeit, Häufigkeit und Ausmaß dieser Vorgänge variieren von einer Region zur anderen, was es ziemlich schwierig macht, ihren allgemeinen Einfluss auf die Formung der Kontinentalhänge abzuschätzen. Dagegen bilden

die internen Gezeiten eine absolut konstante Größe: Tag für Tag streichen sie über die Kontinentalhänge rund um die Welt – in einigen Gebieten schon seit mehr als 100 Millionen Jahren. Damit sind sie fast so allgegenwärtig wie die Schwerkraft. Liegt es nicht nahe, dass sie auch für das allgemein zu geringe Gefälle des Kontinentalhangs sorgen?

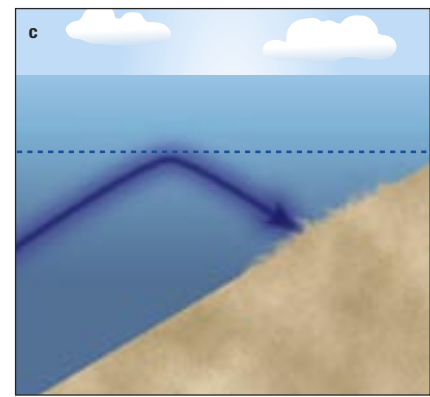
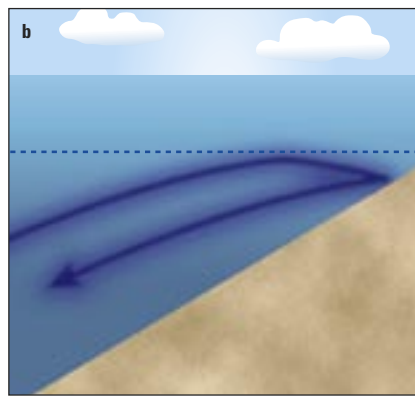
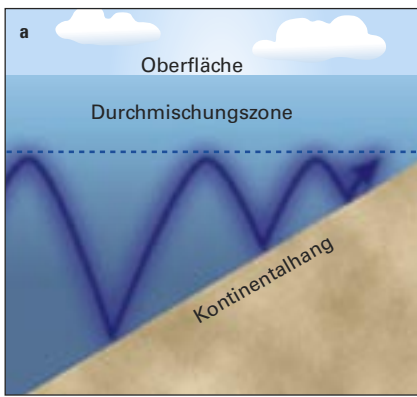
Eine Frage des Winkels

Vor zwei Jahren begannen wir, dieser Frage ernsthaft nachzugehen. Um unsere Strategie zu verstehen, muss man eine Besonderheit interner Gezeiten kennen: Die von ihnen transportierte kinetische Energie kann sich – anders als bei Oberflächenwellen – nicht nur horizontal, sondern auch vertikal und in jeder Richtung dazwischen ausbreiten. Der Winkel (gegenüber der Horizontalen), in dem das geschieht, heißt charakteristischer Winkel. Er hängt von drei Faktoren ab: der Frequenz (in unserem Fall zwei Zyklen pro Tag), der geografischen Breite und dem Dichtegradienten des Wassers. Ist er größer als das Gefälle des Meeresbodens, pflanzt sich die Energie der internen Gezeiten bis ins Flachwasser hinein fort, indem sie zickzackförmig zwischen der Basis der Durchmischungszone und dem Meeresboden hin und her läuft (Bild rechts oben). Übersteigt die Neigung des Untergrunds dagegen den charakteristischen Winkel, wird die Energie – nach einmaligem Abprallen an der Basis der Durchmischungszone – vom Boden ins offene Meer zurückgeworfen.

Zwischen diesen beiden Extremen liegt die kritische Situation, die Cacchione und Wunsch im Labor untersucht hatten. Hier entspricht der charakteristische Winkel genau dem Gefälle des Kon-



◀ Interne Meereswellen entstehen, wo horizontale Gezeitenströme auf submarine Erhebungen treffen – etwa auf den Hawaii-Rücken. Anhand von Spuren an der Oberfläche ließ sich der durch interne Gezeiten verursachte Energietransport von dieser Schwelle weg dokumentieren (oben). Computersimulationen für ein Nord-Süd-Profil (roter Strich) zeigen, dass sich die kinetische Energie der internen Wellen – ausgedrückt durch ihre Geschwindigkeit – in Form von Strahlen fortpflanzt, die sich auf arkadenartigen Bahnen bewegen (unten).



BARBARA ALLUCINO / AMERICAN SCIENTIST

▲ Die Wirkung eines Strahls aus interner Gezeitenenergie am Kontinentalrand hängt von seinem »charakteristischen Winkel« ab. Ist dieser größer als die Hangneigung (a), oszilliert der Strahl zwischen Meeresboden und Basis der Durchmischungszone und dringt bis zur Küste vor. Unterschreitet der charakteristische Winkel das Gefälle (b), wird der Strahl am Untergrund zurück in die Tiefsee reflektiert. Sind beide Winkel jedoch gleich (c), bleibt die Energie am Meeresboden gefangen und kann Sedimente aufwirbeln.

hangs an zwei Stellen, wo der Ozeanboden bis ins Detail kartiert ist: vor der Küste Nordkaliforniens und vor dem südlichen New Jersey. Die beiden Lokalitäten eignen sich ideal für den Test, weil sie sich in mehreren wichtigen Punkten unterscheiden.

So ist der Hang vor Nordkalifornien Teil eines schmalen Kontinentalrands an der Grenze zwischen zwei kollidierenden tektonischen Platten. Durch diesen Zusammenstoß, bei dem sich die eine Platte unter die andere schiebt, wird der Meeresboden unablässig verformt. Dabei kommt es oft zu Erdbeben, die manchmal submarine Erdbeben auslösen. Im Gegensatz dazu markiert der Hang vor New Jersey den Rand eines breiten Festlandsockels, der sich im relativ ruhigen Inneren einer tektonischen Platte befindet. Erdbeben sind hier weitaus seltener und schwächer, und tektonische Verformungen gibt es seit mehr als 100 Millionen Jahren praktisch nicht mehr.

Ein weiterer bedeutsamer Unterschied zwischen den beiden Regionen betrifft die Herkunft der Ablagerungen an ihrem Untergrund. Die nordkalifornischen Flüsse Mad und Eel gehören zu

den sedimentreichsten in den Vereinigten Staaten, und ein bedeutender Teil ihrer Fracht gelangt bis zum nahe gelegenen Kontinentalhang. Vor der Küste von New Jersey lagert sich dagegen nur wenig Material ab. Hier ist der Kontinentalhang von sehr feinen Sedimenten bedeckt, die vom Schelf abgetragen und über seinen Rand hinausgespült wurden.

Die beiden Gebiete unterscheiden sich auch in den ozeanografischen Bedingungen. Historische Messreihen zeigen, dass der Dichtegradient am Konti-

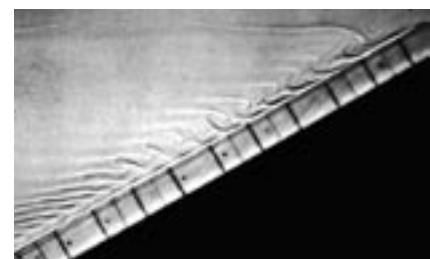
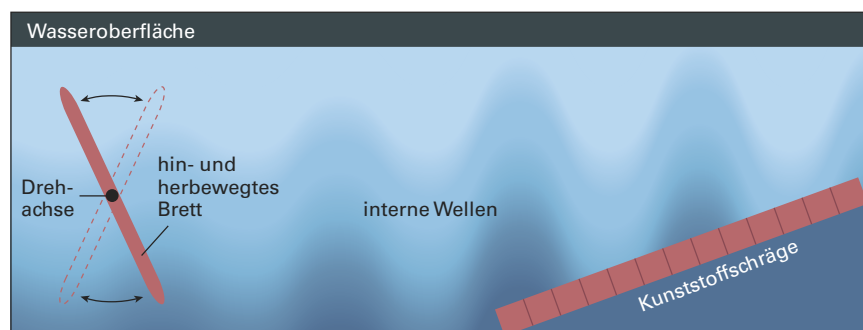


ntinentalhangs. Unter diesen Umständen wird die Energie der internen Gezeitenwelle am Boden aufgefangen. Die Strömung erreicht ihre Maximalgeschwindigkeit und vermag folglich Teilchen im Wasser besonders gut in der Schwebe zu halten. Demnach könnten interne Gezeiten die Sedimentation an einem Hang verhindern, wenn ihre Energie sich exakt parallel zur Oberfläche fortpflanzt.

Auf Grund der Dichtestruktur der Ozeane bewegt sich der charakteristische Winkel für submarine Wellen typischerweise zwischen zwei und vier Grad. Nun weisen Kontinentalhänge weltweit im allgemeinen ein Gefälle von etwa drei Grad auf – was ziemlich genau dem Wert entspricht, bei dem die bodennahen Strömungen durch interne Gezeiten am stärksten sind. Ist das bloßer Zufall? Wohl kaum. Unserer Ansicht nach verhindern die Bodenströmungen durch interne Gezeiten, dass über den Rand des Schelfs gespülte Sedimente sich am Kontinentalhang ablageren und dessen Gefälle über den charakteristischen Winkel hinaus ansteigt.

Um diesen Gedanken zu überprüfen, machten wir zusammen mit Andrea S. Ogston, einer Kollegin an der Universität von Washington in Seattle, die Probe aufs Exempel. Wir verglichen den charakteristischen Winkel der internen Gezeiten und die Neigung des Kontinental-

▼ Experimente im Wassertank (oben) demonstrieren die Bedeutung der Geometrie für die Übertragung der internen Gezeitenenergie auf dem Kontinentalhang. Ist die Neigung der Kunststoffschräge etwas geringer als der charakteristische Winkel der internen Wellen, entsteht eine sich aufsteilende Flutwelle, die den Hang hinaufläuft und sich dann bricht (unten links). Stimmen beide Winkel überein, verteilt sich die Energie großenteils in Form wirbelartiger Turbulenzen am Boden entlang (unten rechts).



FOTOS UNTEN: DAVID A. CACCHIONE; GRAFIK: BARBARA ALLUCINO / AMERICAN SCIENTIST

▷ nentalhang im Atlantik vor New Jersey im Jahresverlauf stärker variiert als im Pazifik vor Nordkalifornien. Entsprechend größer sind die jahreszeitlichen Änderungen in der Geometrie der internen Gezeiten.

Die Kernfrage war nun, ob die charakteristischen Winkel an diesen beiden Orten mit dem Gefälle des Kontinentalhangs übereinstimmen. Aus Messreihen der Wassertemperatur und des Salzgehalts, zusammengestellt von der National Oceanic and Atmospheric Administration, berechneten wir in den zwei Untersuchungsgebieten die durchschnittliche Dichtestruktur des Ozeans. Daraus ließen sich die charakteristischen Winkel für die internen Gezeiten ableiten und über die Jahreszeiten mitteln. Diese Durchschnittswerte stimmten an beiden

Orten fast oder sogar exakt mit dem mittleren Gefälle des jeweiligen Kontinentalhangs überein: rund zwei Grad in Nordkalifornien und etwa vier Grad im südlichen New Jersey.

Mit diesem ersten Erfolg aber gaben wir uns noch nicht zufrieden. Wir wollten die Übereinstimmung zwischen dem charakteristischen Winkel der internen Gezeiten und dem Gefälle des Kontinentalhangs auch im Detail prüfen. Dabei kam uns zu Hilfe, dass für unsere beiden Untersuchungsgebiete hoch aufgelöste Karten des Meeresbodens zur Verfügung stehen. Im Rahmen eines Programms des US-Amtes für Marineforschung namens Strataform (für *strata formation on continental margins*, also Schichtbildung an Kontinentalrändern) haben Wissenschaftler vom Geologischen Dienst der USA und von mehreren Universitäten mit einem Flächensonar das Gelände genauestens vermessen. Bei dieser Methode fährt ein Forschungsschiff, unter dessen Rumpf eine Reihe von akustischen Wandlern montiert ist, über das zu kartierende Gebiet. Die Sonargeräte senden gerichtete Schallwellen fächerförmig zum Meeresboden hinab. Auf diese Weise können die Techniker an Bord die Wassertiefe über einen breiten Streifen unter dem Schiff kartieren.

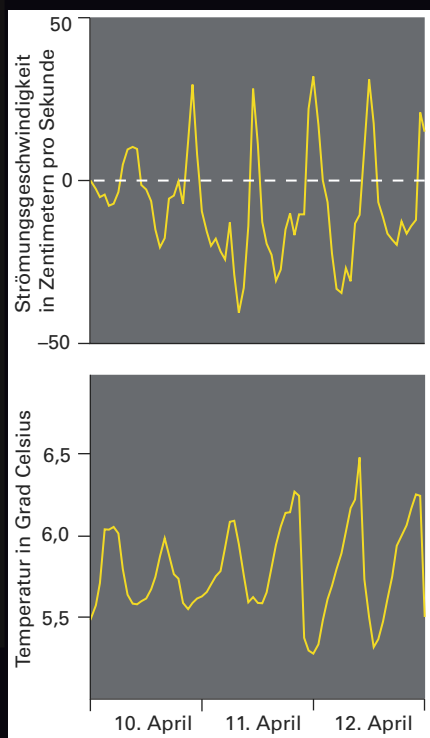
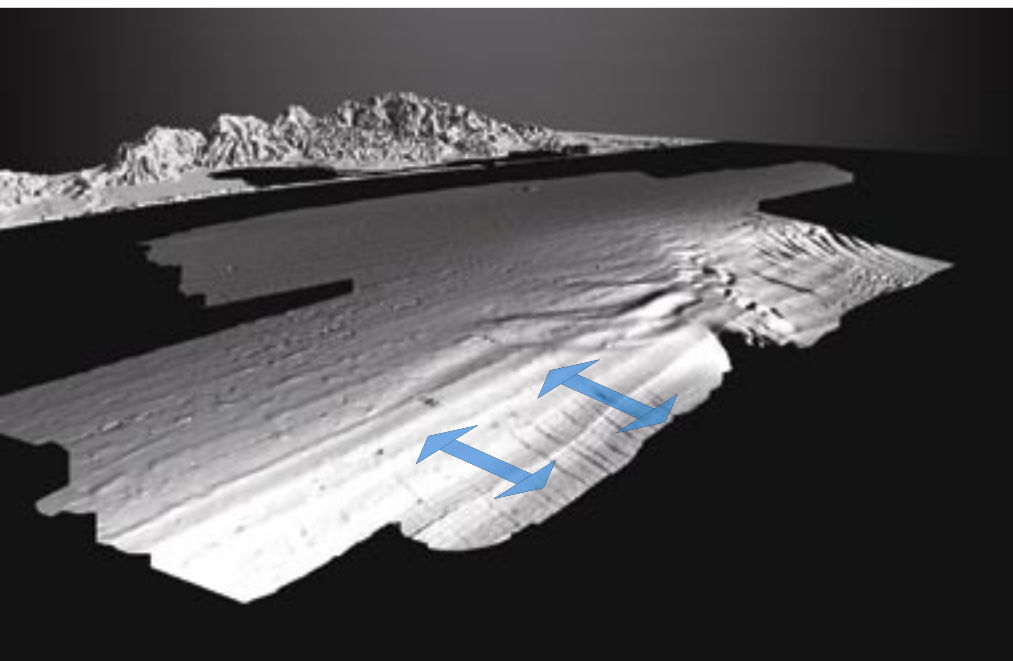
Auch die charakteristischen Winkel der internen Gezeiten waren leicht zu ermitteln. Wir konnten sie für die Punkte auf einem engmaschigen geografischen Gitternetz berechnen, indem wir histori-

▶ Am Kontinentalhang gibt es jeweils Bereiche, wo das Gefälle kleiner als der charakteristische Winkel der internen Gezeiten ist (blau), mit ihm übereinstimmt (grün) oder ihn übersteigt (rot). Da dieser Winkel im Jahresverlauf variiert, muss man zwischen der Situation im Winter (oben) und im Sommer (unten) unterscheiden. Am Kontinentalhang vor Nordkalifornien (links) erfüllen zu beiden Jahreszeiten nur wenige Abschnitte die »kritische« Bedingung, bei der die Neigung des Meeresbodens dem charakteristischen Winkel der internen Gezeiten entspricht. Vor New Jersey (rechts) dagegen erreichen fast alle Hangbereiche irgendwann im Jahr die kritische Situation: die relativ steilen Wände untermeerischer Schluchten im Winter und die flacheren Zwischenregionen im Sommer.

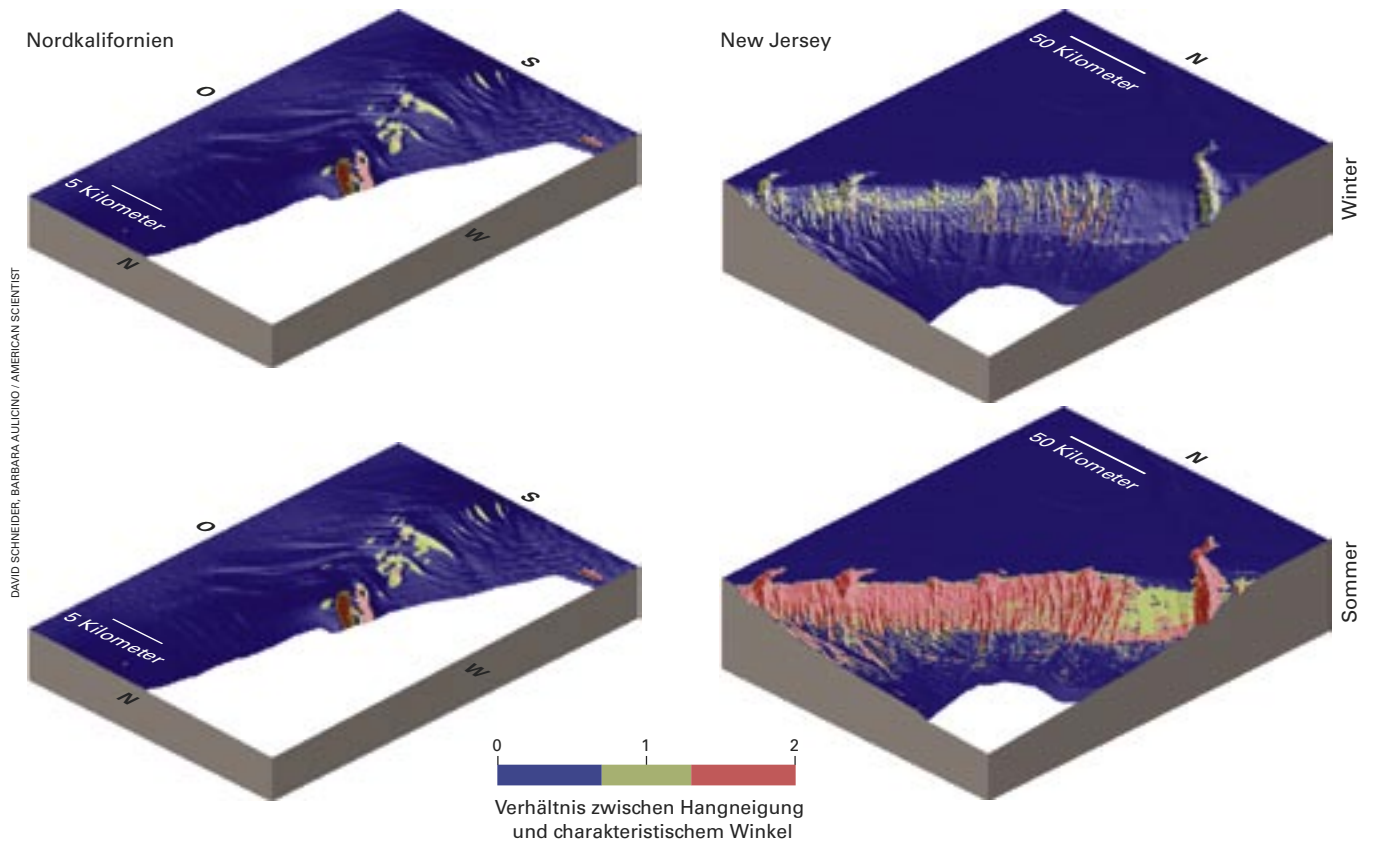
▼ Ein Abschnitt des Meeresbodens vor der Küste Nordkaliforniens wurde sehr genau kartiert (links). Am Grund verankerte Sonden registrierten hier periodische Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit und Wassertemperatur (rechts). Demnach flutet alle zwölf Stunden ein Schwall kälteren Wassers hangaufwärts und schwappt wieder zurück (blaue Pfeile). Wie die genaue Analyse des Temperatur- und Geschwindigkeitsverlaufs ergab, erzeugen interne Gezeiten die Flutwellen, die mit hohem Tempo den Hang hinaufrauschen und sich brechen.

sche sowie aktuelle Messungen von Temperatur und Salzgehalt des Wassers heranzogen. Die erhaltenen Werte mit der Hangneigung des Meeresbodens an eben diesen Stellen zu vergleichen, war dann kein Kunststück mehr.

Die Ergebnisse erwiesen sich als nicht ganz so eindeutig wie bei der allgemeinen Analyse. Trotzdem untermauerten sie unsere Vermutung, dass interne Gezeiten die Neigung des Kontinentalhangs entscheidend mitbestimmen. So entspricht das Gefälle des Meeresgrunds vor New Jersey in Tiefen zwischen 200 und 2000



MEERESBODEN: MIT FROL. GEN. VON PETER DARTNELL, USGS; GRAFIKEN: BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST



Metern über weite Bereiche genau oder annähernd dem charakteristischen Winkel der internen Gezeiten zu der einen oder anderen Jahreszeit. Im Winter gilt das für viele submarine Schluchten – zum Beispiel für den zentralen Teil des Hudson Canyon, wo bekannt ist, dass interne Gezeiten starke Strömungen verursachen. Bei den flacheren Abschnitten dazwischen nähert sich der charakteristische Winkel zu anderen Jahreszeiten dem Gefälle an. So entspricht er im Sommer der Neigung von großen Teilen des Hudson-Schuttfächers, einer Fläche unmittelbar südlich des Hudson Canyon, wo kaum Erosion stattfindet und die Sedimentation vorherrscht. An solchen Schauplätzen sollten sich interne Gezeiten am stärksten auswirken. Die Befunde am Hudson-Schuttfächer bestätigen das.

Mit Einschränkungen passt auch der Kontinentalhang vor Nordkalifornien zu unserer Theorie. Allerdings sind die Verhältnisse dort diffiziler. Wegen der tektonischen Verformungen entlang der US-Westküste haben Teile des Hangs in den zentralen und südlichen Bereichen unseres Untersuchungsgebiets ein sehr variables Relief, das die noch andauernde tektonische Hebung und Faltung sowie häufige untermeerische Rutschungen widerspiegelt. Trotzdem neigen sich Ab-

schnitte des Hangs in Tiefen zwischen 200 und 450 Metern genau oder annähernd im charakteristischen Winkel. Die Stärke der hier gemessenen Bodenwasserströmungen legt nahe, dass interne Gezeiten zumindest in einem Teil des Kontinentalhangs die Sedimentation und damit das Gefälle bestimmen.

Sicherlich sind hier (und nicht nur hier) auch andere Prozesse am Werk. Dazu zählen vor allem Trübeströme, die von Zeit zu Zeit von Erdbeben ausgelöst werden und große Mengen Sediment in tiefere Ozeanregionen verfrachten können. Dennoch glauben wir, dass es primär die internen Gezeiten sind, die im Großen und Ganzen die Kontinentalhänge formen. Dafür spricht ihre Allgegenwart und Beständigkeit über geologische Zeiträume hinweg.

Wir wollen unsere Analysen demnächst auf Kontinentalränder in anderen Teilen der Welt ausdehnen. So hoffen wir unsere Theorie weiter erhärten zu können. Aber auf Überraschungen muss man immer gefasst sein. Vielleicht stellt sich das bisherige Bild, das mit den Befunden am Schelf vor Nordkalifornien und New Jersey so erfreulich harmoniert, doch als zu simpel heraus. Oder es erweist sich tatsächlich als universal gültig. Die Zeit und die Gezeiten werden es zeigen. ◁



David A. Cacchione (oben) hat 1970 in Ozeanografie promoviert. Als Marineoffizier arbeitete er damals beim US-Amt für Marineforschung, dessen Abteilung in Boston er später leitete. 1975 verließ er das Militär und wechselte zum Geologischen Dienst der USA in Menlo Park (Kalifornien). Seit 1998 ist er im Ruhestand. **Lincoln F. Pratson** hat 1993 an der Columbia-Universität in New York in Geologie promoviert. Heute ist er Professor für Sedimentäre Geologie an der Duke-Universität in Durham (North Carolina).



© American Scientist Magazine
(www.americanscientist.org)

On the spring-neap variability and age of the internal tide at the Hawaiian Ridge. Von O. E. Holloway und M. A. Merrifield in: *Journal of Geophysical Research*, Bd. 108, S. 1, 2003

Internal wave breaking at concave and convex continental slopes. Von S. Legg und A. J. Adcroft in: *Journal of Physical Oceanography*, Bd. 33, S. 2224, 2003

The shaping of continental slopes by internal tides. Von D. A. Cacchione, L. F. Pratson und A. S. Ogston in: *Science*, Bd. 296, S. 724, 26. 4. 2002

Estimates of internal tide energy fluxes from Topex/Poseidon altimetry: Central North Pacific. Von R. D. Ray und D. E. Cartwright in: *Geophysical Research Letters*, Bd. 28, S. 1259, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.