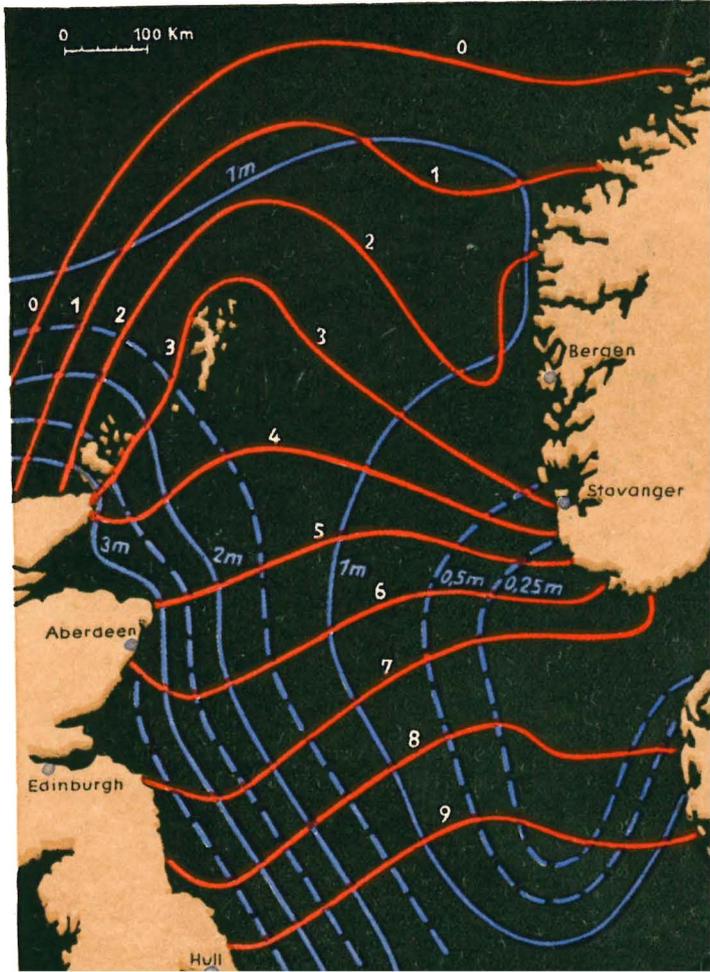


EBBE UND FLUT

DIE GEZEITEN UND IHRE ENTSTEHUNG

Von Norden und Nordwesten her läuft eine Flutwelle in die südliche Nordsee. Die Höhe der Flut nimmt von Westen nach Osten ab. Die roten Linien verbinden Punkte, die gleichzeitig Hochwasser haben. Die weißen Zahlen geben die Verzögerung in Stunden an. Die blauen Kurven sind Linien gleichen Tidenhubs.



Dieser Band wurde von Heinrich Schilling, Leipzig, verfaßt; Textillustrationen und Farbbilder auf Titel- und 4. Umschlagseite fertigte Otto Berger, Leipzig, an.

EBBE UND FLUT

DIE GEZEITEN UND IHRE ENTSTEHUNG

VOLK UND WISSEN SAMMELBÜCHEREI
NATUR UND WISSEN · SERIE J · BAND 2



V O L K U N D W I S S E N
VERLAGS G M B H · B E R L I N / L E I P Z I G

INHALT	Vorwort	3
	Die Erscheinung der Gezeiten	4
	Die Welle unter dem Monde	5
	Schwerkraft und Fliehkraft	7
	Die zwölfstündige Periode	9
	Die Einwirkung der Sonne	13
	Das Zusammenwirken von Sonne und Mond	15
	Die tägliche Ungleichheit	17
	Die Gezeiten in der Nordsee	19
	Die Flutwelle	19
	Ausflug in die Wellenlehre	22
	Die Gezeiten als Wellenerscheinung	25
	Gezeitenkraftwerke	29
	Fach- und Fremdwörter	32

PREIS 60 PFENNIG Gesetzt von Offizin Haag-Drugulin in Leipzig (M 103)
 Druck des Umschlages von Wolfgang Leff, Borsdorf bei
 Leipzig (M 15), und des Innenteils von Volk und Wissen
 Verlag GmbH, Abt. Druckerei, Leipzig (M 242)
Bestell-Nr. 12563 Lizenz-Nr. 334 · 1000/49-1-226 · 1.–50.Tausend 1949
 Alle Rechte vorbehalten

V O R W O R T

Mit der gleichen Regelmäßigkeit, mit der Tag und Nacht, Frühling und Herbst wechseln, folgen an den Meeresküsten Ebbe und Flut aufeinander. Dem Menschen der Wasserkante ist die Erscheinung so geläufig, daß er kaum mehr darüber nachdenkt, wengleich sein tägliches Leben in vielfacher Hinsicht ihrem Rhythmus folgt. Für den Binnenländer aber behält der Wechsel der Gezeiten immer etwas Geheimnisvolles, Unheimliches und bleibt jedenfalls interessant und wert, ihm einige Gedanken zu widmen.

Das vorliegende Heft, das diesen Gegenstand behandelt, soll sich einer Reihe geophysikalischer Schriften einfügen. Für die Bearbeitung des Themas ergibt sich daraus, daß sie die Waage halten muß zwischen rein geographischer und rein physikalischer Behandlung. Aus diesem Grunde wurde die landschaftsbildende Kraft von Ebbe und Flut nur kurz gestreift und mehr Wert darauf gelegt, die Erscheinungen zu erklären, was ein näheres Eingehen auf die physikalischen Grundlagen erforderte. Das Schlußkapitel will einige Hinweise auf die Probleme der technischen Ausnutzung der Energievorräte geben, die die Gezeitenbewegung in sich birgt.

DIE ERSCHEINUNG DER GEZEITEN

Stehen wir an der Mündung eines unserer großen Ströme, so sehen wir zu bestimmten Zeiten zu unserer größten Überraschung, daß das Wasser den Fluß hinauf fließt. Die Strömung geht landeinwärts, und wenn wir noch irgendeinen Zweifel darüber hätten, so belehrt uns ein Blick auf die im Strome verankerten Tonnen, daß wir uns nicht täuschen, denn diese liegen sämtlich schräg stromaufwärts. Es ist die Zeit der Flut: Das Wasser drängt vom Meere herein, und zwar mit solcher Macht, daß es die Strömung des Flusses überwindet und sein Wasser zurückstaut. Bis weit über Hamburg hinaus, bis Geesthacht, strömt die Elbe, etwa bis Bremen die Weser zur Flutzeit in der verkehrten Richtung. Wenn wir aufmerksam beobachten, so bemerken wir noch, daß jetzt fast der gesamte Schiffsverkehr landeinwärts geht, denn der Schiffer nutzt die Zeit aus, um mit dem Flutstrom zu dem tief in der Flußmündung liegenden Hafen zu fahren.

Während wir noch über der Erscheinung sinnen, ändert sich das Bild. Die Wasser scheinen stillzustehen. Die Strömung flußaufwärts hat aufgehört. Das Wasser hat seinen höchsten Stand erreicht. Es ist Hochwasser. Wenig später sehen wir die Tonnen im Strom in der entgegengesetzten Richtung, also nach der See hin, schräg liegen. Die Strömung ist gekentert, und die Welt scheint wieder in Ordnung zu sein: Der Strom fließt bergab. Die Ebbe hat eingesetzt. Sechs Stunden lang strömen nun die von der Flut aufgestauten Wasser zurück. Langsam senkt sich der Spiegel. Nach einiger Zeit tauchen die Sande, die flachen Inseln im Strom, aus dem Wasser auf. Der Schiffsverkehr, der eine Zeitlang fast ganz geruht hatte, lebt wieder auf, aber nun in der umgekehrten Richtung. Mit der Ebbe verlassen die Schiffe den Hafen und streben dem Meere zu. Wenn wir lange genug Geduld haben, dann können wir auch noch das umgekehrte Spiel beobachten. Wieder stehen die Wasser kurze Zeit still. Es ist Niedrigwasser. Der Strom kentert abermals, die Flut setzt wieder ein.

Mit völliger Regelmäßigkeit spielt sich jahrein, jahraus dieser seltsame Wechsel von Ebbe und Flut, von Einströmen und Ausfließen gewaltiger Wassermassen ab. Etwas mehr als sechs Stunden vergehen vom Hochwasser zum Niedrigwasser, und ebensoviel Zeit braucht es, bis abermals Hochwasser erreicht wird.

Wir finden die gleiche Periode von sechs Stunden im Badekalender unserer Nordseebäder wieder; denn auch er richtet sich nach den Gezeiten, nach Ebbe und Flut. Mit solcher Gewalt streben die Fluten zur Ebbezeit meerwärts, daß auch ein kräftiger Schwimmer Gefahr läuft, mit hinausgerissen zu werden. Da außerdem bei Niedrigwasser der Strand weithin mit Resten abgestorbener Meerespflanzen und toten Seetieren übersät ist, die den Aufenthalt am Strande nicht gerade zu einem Genuß machen, legt man die Badezeiten in die Stunden kurz vor Hochwasser.

Und wieder finden wir den gleichen Sechsstundenrhythmus in den Fahrplänen der Bäderdampfer, die den Verkehr von den Küstenplätzen der Nordsee nach den friesischen Inseln bewerkstelligen. Denn bei Ebbe läuft das Watt, der Raum zwischen dem Festland und den Inseln, trocken. Eine grau-schlammige Masse, nur von ein paar kümmerlichen Wassergräben durchzogen, dehnt sich dann weithin aus, die von den Schiffen nicht überquert werden kann, wenn nicht ein künstlich tiefgehaltener Priel doch noch Fahrmöglichkeiten schafft.

Wir nehmen die Flutkalender der Nordseehäfen und zur Ergänzung am besten auch gleich die der Häfen am Kanal und an der Ozeanküste zur Hand und finden überall dieselbe Periode von etwas über sechs Stunden. Aber die Zeiten sind gegeneinander verschoben: Wenn das Watt vor der Rheinmündung trocken liegt, haben die Häfen der Elbe Hochwasser. Es ist also nicht so, daß das Wasser an der ganzen Küste gleichzeitig hereinfließt und nach sechs Stunden wieder zurückebbt. Die Erscheinung ist komplizierter. Wir werden das später noch genauer betrachten. Uns aber bewegt erst einmal die Frage: »Wie entstehen die Gezeiten?«

DIE WELLE UNTER DEM MONDE

Fragen wir den Physiker, so wird er antworten: Die Gravitation ist verantwortlich zu machen.

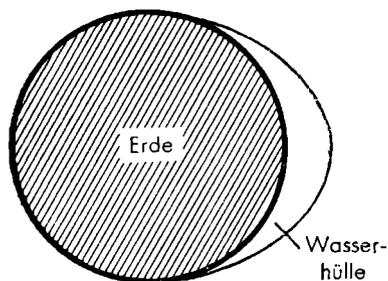
Unter Gravitation oder Schwerkraft verstehen wir eine geheimnisvolle Anziehungskraft, die überall auftritt, wo Materie ist. Massen ziehen einander an. Dabei ist es gleichgültig, ob wir die Verhältnisse auf der Erde betrachten, oder ob wir ins Universum blicken. Der Apfel, der sich vom Baume löst, fällt zur Erde. Der Stein, den wir in die Höhe schleudern, wird von einer verborgenen Macht gehindert, ins Unendliche zu fliegen. Seine Bewegung verzögert sich, kehrt sich um, und der Stein fällt zu Boden. Beide Vorgänge sind ebenso geheimnisvoll wie die Tatsache, daß die Erde jahraus, jahrein auf ihrer vorgezeichneten Bahn um die Sonne kreist und sich nicht von ihr entfernt. Sie überraschen uns nur deshalb nicht mehr, weil wir sie von Kindheit auf gewöhnt sind. Es ist nur ein Wort und keine Erklärung, wenn wir diese Kraft, die den Apfel zu Boden fallen läßt und die Planeten an die Sonne bindet, mit dem Namen Gravitation belegen. Wir müssen schon recht tief in die physikalischen Zusammenhänge hineinblicken, um wirklich zu einer Erklärung dieser Erscheinung zu kommen. Uns genügt es, zu wissen, daß alle Massen einander anziehen.

Auch über die Größe der Gravitation können wir noch einiges feststellen. Wir können sie sogar im Laboratorium messen, etwa mit Hilfe einer Drehwaage. Die Anziehungskraft, die zwei Körper aufeinander ausüben, ist um so

größer, je größer ihre Masse ist, d. h. je größer die Körper sind und je dichter ihre Teilchen gepackt sind, grob und etwas ungenau gesprochen: je schwerer sie sind. Dagegen ist die Kraft um so kleiner, je weiter die Massen voneinander entfernt sind, und zwar verkleinert sie sich sogar im Quadrate ihrer Entfernung. Wenn sich also der Abstand verdoppelt, so sinkt die Gravitationskraft auf ein Viertel. Wird der Abstand auf das Dreifache erhöht, so verringert sie sich auf ein Neuntel des ursprünglichen Wertes. Zur vierfachen Entfernung gehört ein Sechzehntel der Kraft usw. Diese Gravitation nun ist es, die die Gezeiten bewirkt.

Die Beobachtung, daß Ebbe und Flut nicht jeden Tag zur gleichen Zeit eintreten, sondern daß sich die Hochwasserzeiten von einem Tag zum andern um 50 Minuten verzögern, hat schon frühzeitig die Vermutung aufkommen lassen, daß die Gezeiten mit dem Mond in Zusammenhang gebracht werden könnten. Denn auch Mondaufgang und -untergang verschieben sich täglich um 50 Minuten. Die Schwerkraft des Mondes wirkt auf die Erdmasse und auf alle Massen, die sich auf der Erde befinden. Denken wir den Mond einmal durch eine starre Stange mit der Erde verbunden — und tatsächlich hält er ja so ziemlich die gleiche Entfernung von 385 000 km ein —, so kann sich die Schwerkraft auf die feste Erde nicht auswirken. Erde und Mond nähern sich einander nicht. Aber die Wassermassen werden doch zu ihm hingezogen, und sie müßten durch den freien Raum zum Monde fliegen und sich dort als Wolkenbruch niederschlagen, wenn die Schwerkraft der Erde sie nicht hinderte, sich von ihr zu lösen. Da die Erde eine viel größere Masse hat als der Mond und überdies den Wassermassen viel näher ist als dieser, ist die von ihr bewirkte Gravitation erheblich größer und hält die Wasser fest. Immerhin bewirkt die Masse des Mondes, daß das Wasser auf der Erde sich nach der Seite zieht, auf der der Mond gerade steht. Es bildet sich ein Wasserberg unter dem Mond. Ein Zustand müßte sich ergeben, wie er — stark übertrieben — in Abb. 1 dargestellt ist.

Nun dreht sich die Erde in 24 Stunden einmal um ihre Achse. Nur zögernd folgt ihrer Bewegung der Mond. Ein Erdenbewohner, der sich mit der Erde von West nach Ost dreht, bewegt sich zunächst auf ihn zu, überholt ihn dann und



1 Die Welle unter dem Mond

läßt ihn schließlich im Rücken. Da er aber seine eigene Bewegung nicht gewahrt wird, hat er den Eindruck, als ob der Mond von Ost nach West über ihn wegstreicht.

Dem Mond ist also nicht immer die gleiche Stelle der Erde zugekehrt. Die Aufwölbung des Wassers, die er erzeugt und die stets zu ihm hingerichtet ist, kann also auch nicht an derselben Stelle verharren. Genau wie unter dem Monde dreht sich die Erde unter dem Wasserberg weg. Längenkreis für Längenkreis taucht in ihn ein, durchquert und verläßt ihn. Im Laufe eines Tages wandert er als Flutwelle einmal, von Ost nach West fortschreitend, um den gesamten Erdball.

Aber der Mond steht nicht fest am Himmel. In 29 Tagen umläuft er die Erde. Hat sich diese einmal um sich selbst gedreht, so findet sie den Mond nicht mehr an derselben Stelle, denn in den 24 Stunden hat er $\frac{1}{29}$ seiner Bahn zurückgelegt, und die Erde braucht noch weitere 50 Minuten, um wieder in dieselbe Stellung zu ihm zu kommen. Deshalb kulminiert der Mond nicht aller 24 Stunden, sondern aller 24 Stunden 50 Minuten. Das ist aber auch genau die Zeit, die von einem Hochwasser zum übernächsten verstreicht.

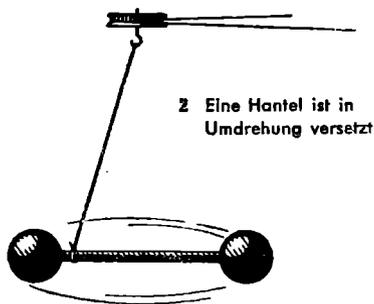
Teilweise haben wir also die Gezeiten zu erklären vermocht. Es dürfte danach aber jeden Tag nur ein Hochwasser und nur ein Niedrigwasser geben. Woher kommt nun der zweite Gezeitenwechsel?

SCHWERKRAFT UND FLIEHKRAFT

Etwas an unserer Annahme ist noch falsch. Tatsächlich sind ja Erde und Mond nicht durch eine starre Stange miteinander verbunden. Es muß also außer der Gravitation noch eine Kraft im Spiele sein, die sie in ihrem festen Abstand hält.

Um das zu verstehen, erinnern wir uns, daß wir auf dem Jahrmarkt einmal auf dem Taifunrad gefahren sind. Das ist eine Scheibe, die sich mit großer Geschwindigkeit dreht. Wir spürten dann einen heftigen Druck im Körper, der uns nach außen, vom Mittelpunkt der Scheibe hinwegtrieb. Bei allen Drehbewegungen tritt diese Kraft auf. Der Physiker nennt sie Zentrifugal- oder Fliehkraft. Stets ist sie bestrebt, die Massen von der Drehachse weg nach außen zu treiben und das mit um so größerer Gewalt, je größer die Masse und je weiter sie von der Achse entfernt ist und je rascher die Umdrehung erfolgt.

Die Zentrifugalkraft tritt uns oft im täglichen Leben entgegen. Wir beobachten sie als Druck nach außen, wenn die Straßenbahn einen Bogen fährt. Wir bauen die Kurven in Autostraßen und Radrennbahnen überhöht, um zu verhindern, daß Wagen oder Räder »aus der Kurve getragen werden«. Wir benutzen sie beim Zentrifugalregulator der Dampfmaschine, wo bei zu schneller

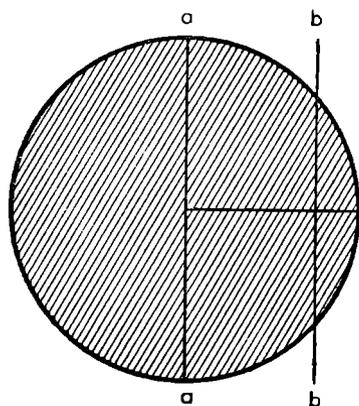


Drehung zwei nach außen strebende Gewichte ein Sicherheitsventil öffnen, oder bei der Milchzentrifuge, wo bei der Umdrehung die schwere Milch sich von der leichten Sahne sondert und weiter nach außen getrieben wird als diese.

Selbstverständlich tritt die Fliehkraft auch bei der täglichen Umdrehung der Erde um ihre eigene Achse auf. Und wenn sie auch die starre, feste Masse der Erde nicht merklich beeinflusst, so wird sie doch

dafür sorgen, daß das Wasser so weit nach außen geschleudert wird, wie die Schwerkraft der Erde es zuläßt. Aber für die Gezeiten kann das keine Rolle spielen, denn die Fliehkraft, die bei der täglichen Umdrehung der Erde um sich selbst auftritt, wirkt sich nach allen Seiten gleichmäßig aus und kann also nicht zu einem regelmäßigen Auf- und Abschwellen des Wassers führen.

Anders wird das Bild aber, wenn wir Erde und Mond gemeinsam als ein zusammenhängendes System betrachten. Der Körper, der sich dann ergibt, hat eine entfernte Ähnlichkeit mit der Hantel, die der Athlet zum Gewichtheben benutzt. Solch eine Hantel, also zwei schwere Kugeln, die durch eine Stange verbunden sind, aufgehängt und in genügend schnelle Drehung versetzt. Dann stellt sich ganz von selber eine Drehungsachse ein, derart, daß die Zentrifugalkräfte, die auf die beiden Kugeln wirken, gleich sind (Abb. 2). Sind die Kugeln also gleich schwer, so legt sich die Achse in die Mitte zwischen beide.



3 Erde und Mond drehen sich um eine gemeinsame Achse

60 Erdradien

a — a Achse der täglichen Umdrehung

b — b Achse der gemeinsamen Drehung von Erde und Mond

Bei dem System Erde—Mond sind die beiden Kugeln ungleich schwer; die Masse der Erde ist mehr als 80mal so groß wie die des Mondes. Damit auf beide, Erde und Mond, die gleiche Zentrifugalkraft wirkt, muß der Mittelpunkt des Mondes 80mal so weit von der Achse der gemeinsamen Umdrehung entfernt sein wie der Mittelpunkt der Erde. Diese Achse muß also der Erdachse sehr nahe liegen. Ja, da die Entfernung der beiden Mittelpunkte von Erde und Mond nur 60 Erdradien beträgt, geht sie noch durch die Erde selber. Sie ist etwa $\frac{3}{4}$ Erdradius vom Erdmittelpunkt entfernt (Abb. 3).

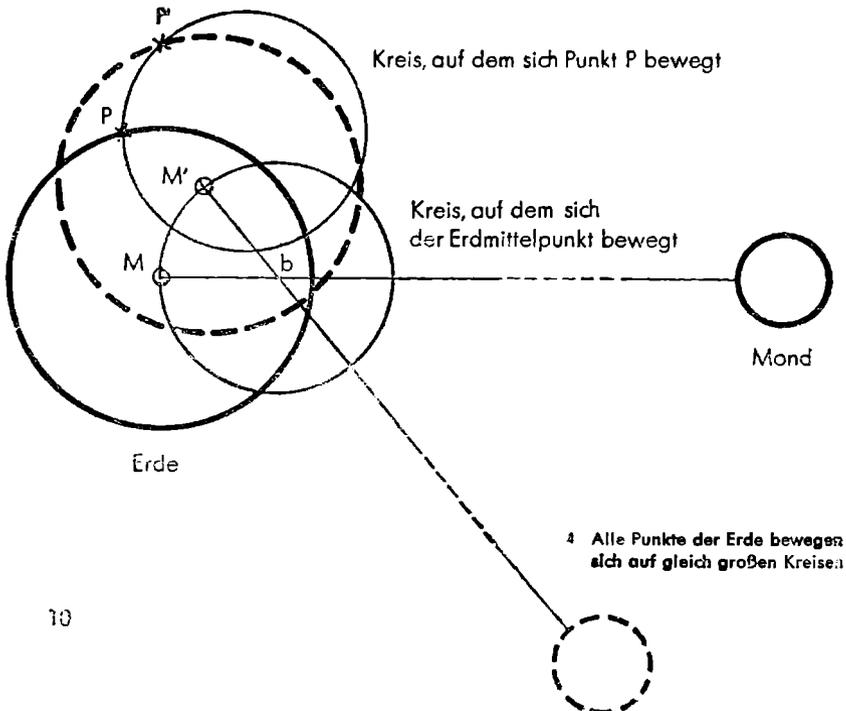
Die Vorstellung, daß in unserem Modell die beiden Kugeln, die Erde und Mond vertreten, durch eine starre Stange verbunden sind, können wir nun fallen lassen. Wir haben ganz dieselben Verhältnisse, wenn der Zusammenhalt durch die Gravitation gewährleistet ist. Zwei Kräfte wirken also gegeneinander: die Gravitation und die Zentrifugalkraft. Diese drückt Erde und Mond nach außen, von der Achse ihres gemeinsamen Umlaufs weg; jene strebt danach, die beiden Körper einander zu nähern. Würde die Gravitation allein wirken oder auch nur die Zentrifugalkraft übertreffen, so würde der Mond in die Erde hineingezogen. Wirkte dagegen die Zentrifugalkraft allein ohne die Gegenwirkung der Gravitation, so müßten Erde und Mond voneinander weg ins Unendliche des Weltalls geschleudert werden. Beides tritt nun glücklicherweise nicht ein, sondern Gravitation und Zentrifugalkraft halten sich stets genau das Gleichgewicht. Das kann nicht ohne weitere, genauere Kenntnisse der Mechanik begriffen werden. Aber es ist tatsächlich so, daß sich die gemeinsame Drehachse von Mond und Erde, die Umlaufgeschwindigkeit der beiden Körper um diese Achse und die Entfernung des Mondes von der Erde von allein so einstellen, daß keine Gleichgewichtsstörungen eintreten können.

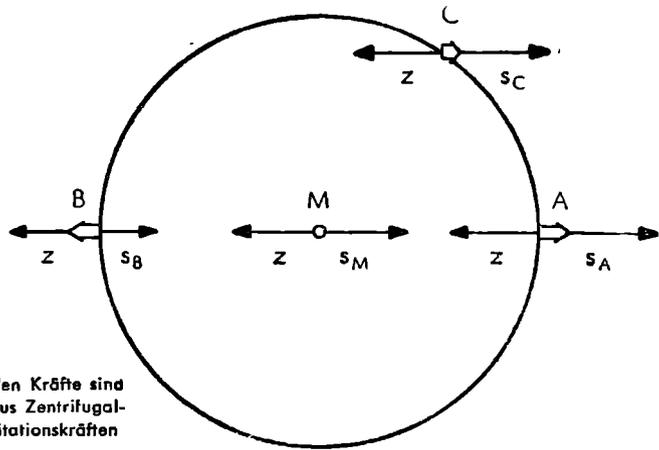
Beiläufig sei darauf hingewiesen, daß auch das größere Weltkörpersystem, in dessen Mittelpunkt unsere Sonne steht, denselben Gesetzen gehorcht. Nur sind es hier nicht nur zwei Körper, die um eine Achse kreisen, sondern mindestens die Sonne und neun Planeten, wenn wir die kleinen, die Planetoiden, unberücksichtigt lassen. Dementsprechend werden die Verhältnisse unübersichtlicher. Aber das Wesentliche ist auch hier, daß die Planeten stets Umlaufgeschwindigkeit und Abstand von der Sonne so einrichten, daß die Zentrifugalkraft der Gravitation die Waage hält.

DIE ZWÖLFSTUNDIGE PERIODE

Kehren wir zur Erde zurück! Außer der täglichen Umdrehung, die zunächst ganz außer Betracht bleibt, führt sie also noch eine Umdrehung um eine Achse aus, die $\frac{3}{4}$ Erdradien vom Mittelpunkt entfernt ist. Aber diese Bewegung hat noch eine Besonderheit, die wir am besten wieder an dem vorhin gebrauchten

Hantelmodell erörtern, das wir noch ein wenig abändern müssen. Es ist nämlich gar nicht einzusehen, warum bei der gemeinsamen Bewegung die Erdkugel eine Umdrehung um ihre Achse ausführen soll, wie es die festsitzende Kugel tut und wie sie der Mond auch aus Gründen, die wir hier nicht erörtern wollen, tatsächlich ausführt. Da er außerdem keine tägliche Umdrehung hat, kehrt er uns immer dieselbe Seite zu. Noch nie hat ein Mensch gesehen, wie seine Rückseite beschaffen ist. Aber die Erde führt keine solche Umdrehung in 29 Tagen um ihre Achse aus. Um dem Mond bei der Rotation um die »Zweikörperachse« das Gleichgewicht zu halten, ist das auch nicht nötig. Es genügt, wenn der Erdmittelpunkt (M bzw. M' in Abb. 4) stets die gleiche Entfernung von der gemeinsamen Achse (b) behält und wenn seine Verbindungsgerade mit dem Mond durch diese Achse geht. Der Erdmittelpunkt kreist also um die »Zweikörperachse«. Die übrigen Punkte der Erde (z. B. der Punkt P der Erdoberfläche) beschreiben zwar auch Kreise, aber deren Mittelpunkte liegen nicht auf der »Zweikörperachse«. Die Bewegung ist von der gleichen Art, wie sie eine Gondel des Riesenrades ausführt. Da bewegt sich der Aufhängepunkt auch auf einem Kreise, und die Gondel macht diese Bewegung mit, aber der oberste Punkt bleibt oben, der unterste unten. Die Gondel bleibt stets parallel zu sich selbst. Dasselbe tut die Erde bei der gemeinsamen Drehung: jeder Punkt behält nach Richtung und Entfernung stets die gleiche Lage zum Erdmittelpunkt bei. Alle Stellen der Erde durchlaufen also in der gleichen Zeit



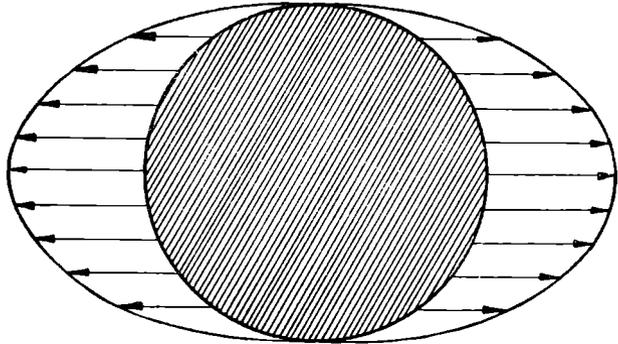


5 Die fluterzeugenden Kräfte sind die Differenzen aus Zentrifugalkräften und Gravitationskräften

von etwa 29 Tagen gleiche Kreise mit einem Halbmesser, der gleich $\frac{3}{4}$ des Erdradius ist. Jeder Punkt der Erde zeigt also auch die gleiche Zentrifugalkraft, gleich sowohl der Größe wie auch der Richtung nach.

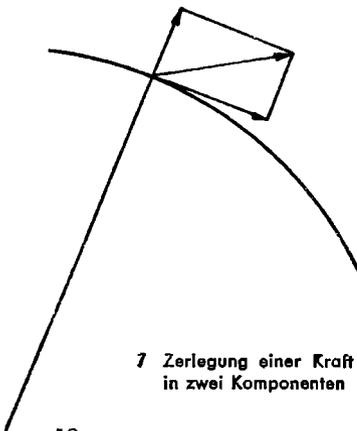
Nur im Erdmittelpunkt ist ihr die Gravitationskraft des Mondes gleich. In den Peripheriepunkten besteht eine Differenz (Abb. 5). Betrachten wir zunächst den Punkt A, der dem Monde am nächsten liegt! Er ist dem Monde um den Erdradius näher als der Erdmittelpunkt. Das ist nicht viel, nur $\frac{1}{60}$ der gesamten Entfernung, aber die Gravitationskraft ist doch ein wenig größer als im Erdmittelpunkt, und Gleichgewicht mit der Zentrifugalkraft besteht nicht mehr. Es ist üblich, die Kräfte durch Pfeile darzustellen. Ihre Länge bedeutet die Größe der Kraft. Im Punkte A setzt dann wie in allen anderen Punkten der Pfeil z an, der die Zentrifugalkraft darstellt. Er ist vom Monde weggerichtet. Zum Monde hin zeigt ein zweiter Pfeil s_A . Er ist um ein Winziges größer als z . Als fluterzeugende Kraft ergibt sich die Differenz beider Kräfte. Sie steht in A senkrecht auf der Erdoberfläche. Gerade umgekehrt sind die Verhältnisse in dem Punkte B, der dem Monde abgekehrt ist. Die Kraft z weist auch hier vom Monde weg, zeigt also vom Erdinnern nach außen. Die Anziehung des Mondes s_B dagegen zeigt nach innen. Sie ist hier, weil der Mond um einen Erdradius weiter entfernt ist als vom Erdmittelpunkt, ein wenig geringer als in M , also auch etwas kleiner als z . Die fluterzeugende Kraft, nämlich die Differenz von z und s_B , zeigt also auch hier nach außen und steht senkrecht zur Erdoberfläche. Die fluterzeugenden Kräfte bei A und B sind winzig klein, nur nach Bruchteilen von Gramm zu messen. Sie würden allein keinesfalls ausreichen, die Flut zu erklären.

Aber ganz entsprechende Kräfte treten ja an allen anderen Punkten der Erdoberfläche auf. In jedem beliebigen Punkt C greift die gleiche Kraft z an.



6 Die fluterzeugenden Kräfte weisen stets von der Erde weg. Sie sind hier in größerem Maßstab dargestellt als in Abb.5

Ihr entgegengesetzt gerichtet ist die Gravitationskraft s_C des Mondes. Genaugenommen, machen wir hier einen kleinen Fehler. s_C zeigt zum Mond, dagegen geht parallel der Verbindungslinie von Mond und Erdmittelpunkt. Die beiden Kräfte bilden also einen Winkel miteinander. Aber da der Mond sehr weit entfernt ist, ist dieser Winkel sehr klein und man kann ihn ohne Schaden für das Ergebnis vernachlässigen und damit rechnen, daß z und s_C entgegengesetzte Richtung haben. Nur in den Punkten, die von A und B gleich weit entfernt sind, haben z und s_C gleiche Größe und heben einander auf. Sonst überwiegen an allen Punkten der Erdhälfte, die dem Monde zugekehrt ist, die Gravitationskräfte, auf der anderen Hälfte die Zentrifugalkräfte. Immer aber zeigen die fluterzeugenden Differenzkräfte nach außen, vom Erdkörper weg (Abb. 6).



7 Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten

In der bekannten Weise zerlegen wir nun solch eine Differenzkraft nach dem Parallelogramm der Kräfte in zwei Teilkraften (Komponenten). Die eine soll senkrecht auf der Erdoberfläche stehen (Abb.7). Sie kommt nicht zur Auswirkung, erniedrigt nur das Gewicht des Wassers um einen winzigen Betrag. Der anderen aber, die parallel zur Erdoberfläche verläuft, vermag das Wasser zu folgen. Es strömt den Punkten zu, die dem Monde am nächsten oder am fernsten liegen. In diesen Kräften, die parallel zur Erdoberfläche wirken, ist die eigentliche Ursache der Flutbildung zu suchen. Damit ist aber das

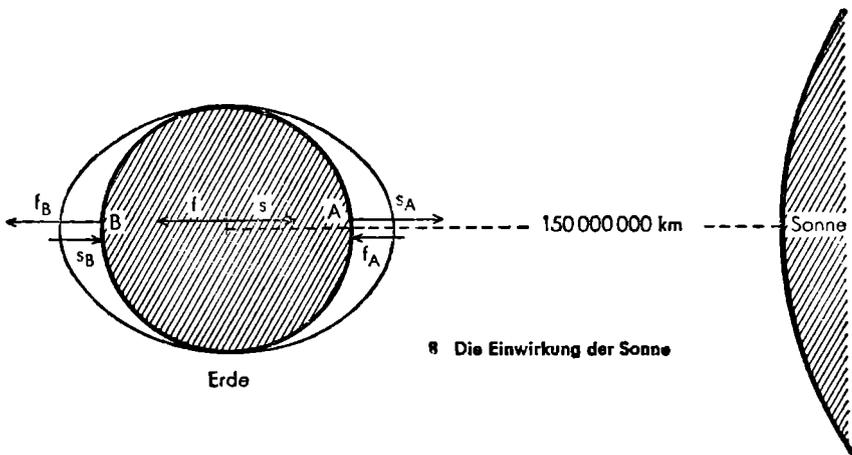
Geheimnis der zwölfstündigen Flutperiode entschleiert. 24 Stunden braucht die Erde zu einer Umdrehung um ihre eigene Achse, weitere 50 Minuten, um den Mond, der sich inzwischen in der gleichen Richtung ein Stück weiterbewegt hat, einzuholen. In diesen 24 Stunden 50 Minuten dreht sie sich unter zwei Wasserbergen hinweg, die einander gegenüberliegen, einer auf der dem Mond zugekehrten, der andere auf der ihm abgekehrten Seite der Erde. Wir erhalten also genau die Periode von 12 Stunden und 25 Minuten, die wir als Flutperiode beobachtet haben.

DIE EINWIRKUNG DER SONNE

Daß der Mond der Hauptverantwortliche für die Gezeiten ist, kann kaum bezweifelt werden. Allein die Tatsache, daß die Flutperiode dem Monde folgt und nicht der Sonne, weist zu nachdrücklich darauf hin, als daß sich Zweifel erheben könnten. Damit ist aber keineswegs gesagt, daß die Sonne gar keinen Einfluß auf das Auf- und Abwogen der Wasserhülle unserer Erde haben sollte. Auch zwischen Sonne und Erde gibt es ja Gravitation und, da sich die Erde um die Sonne dreht, auch Fliehkraft. Es müssen sich also wohl Verhältnisse ergeben, die der Mondeinwirkung wenigstens ähnlich sind.

Genau genommen müßten wir den Umlauf der Erde um die Sonne als ein Zweikörperproblem auffassen und analog behandeln, wie wir es beim Umlauf des Mondes um die Erde taten. Es ergäbe sich sogar ein Vielkörpermodell, da außer der Erde noch acht große und eine große Menge kleiner Planeten um die Sonne kreisen. Das haben wir oben schon erörtert. Wir können aber von der komplizierten Behandlung des Problems absehen. Die Masse der Sonne ist 333 000 mal so groß wie die der Erde. Das Übergewicht der Sonne ist also so unermesslich groß, daß die Achse des gemeinsamen Umlaufs von Erde und Sonne dem Sonnenmittelpunkt sehr nahe liegt. Der Fehler, den wir machen, wenn wir die Sonne als ruhend annehmen und nur die kreisende Bewegung der Erde betrachten, ist also sicher nur klein. Überdies interessieren uns hier die Wirkungen nicht, die die Erde auf der Sonne auslöst. Dafür wäre eine Betrachtung ähnlicher Art notwendig, wie wir sie bei der Beeinflussung der Erde durch den Mond angestellt haben. Die Einwirkung der Sonne auf die Erde ist wegen der so viel größeren Masse der Sonne leichter zu studieren.

Trotz der großen Entfernung der beiden Himmelskörper ist die Gravitationskraft, die die Sonne auf die Erde ausübt, recht beträchtlich, fast 180 mal so groß wie die Wirkung des Mondes. Die Masse der Sonne ist ja auch viel größer als die des Mondes, nämlich das 27-Millionenfache. Aber trotz der viel größeren Gravitation der Sonne ist ihre Gezeitenwirkung erheblich geringer als die des Mondes. Die Flut, die die Sonne allein verursachen würde, stiege



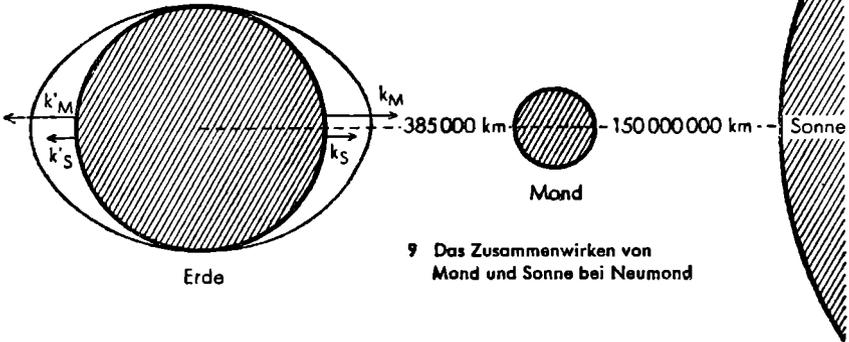
8 Die Einwirkung der Sonne

nur zu $\frac{2}{5}$ derjenigen auf, die vom Monde allein, ohne Einwirkung der Sonne, hervorgerufen würde. Denn auf die absolute Größe der Gravitation kommt es, wie wir gleich sehen werden, gar nicht an, nur auf ihre Differenz an den einander entgegengesetzt liegenden Punkten der Erdoberfläche. Genau so wie bei Mond und Erde hält auch hier die Fliehkraft f (Abb. 8) im Mittelpunkt der Erde der Gravitationskraft s die Waage. Im Punkte A, der auf der Erdoberfläche der Sonne zugekehrt liegt, ist die Zentrifugalkraft f_A ein wenig kleiner als f , weil wir hier der Achse des Umlaufs der Erde um die Sonne um einen Erdradius näher sind, und die Fliehkraft wird ja kleiner mit abnehmender Entfernung von der Achse. Dagegen ist die Gravitation hier größer als im Erdmittelpunkt, denn sie wächst mit abnehmendem Abstand von der Achse, und zwar sogar in quadratischem Verhältnis. Setzen wir jetzt beide Kräfte zusammen, so ergibt sich ein Überschuß der Gravitation über die Fliehkraft, mithin eine Kraft, die vom Erdmittelpunkt weg zur Sonne zeigt. Sie treibt also das Wasser, das ihr folgen kann, nach außen, und wir bekommen auf der der Sonne zugewandten Seite der Erde einen Wasserberg.

An der Stelle B, die auf der Erdoberfläche der Sonne abgekehrt liegt, sind die Verhältnisse umgekehrt. Die Fliehkraft f_B ist größer als im Erdmittelpunkt, weil die Entfernung von der Achse des Erdumlaufs größer ist. Dagegen ist die Gravitation kleiner, denn die Entfernung der sie bewirkenden Masse der Sonne ist größer. Bilden wir hier die Differenz, so bleibt ein Überschuß der Fliehkraft. Da diese nach außen, d. h. vom Erdmittelpunkt weg weist, wird auch bei B das Wasser nach außen gedrückt; es erscheint auch hier ein Wasserberg.

Wenn wir uns also den Mond ganz wegdenken, so müssen wir gleichwohl Gezeiten erwarten, bewirkt allein durch die Sonne. Nur wäre dann — entsprechend dem Sonnentag von 24 Stunden — die Flutperiode genau 12 Stunden statt der jetzt zu beobachtenden von 12 Stunden 25 Minuten.

DAS ZUSAMMENWIRKEN VON SONNE UND MOND



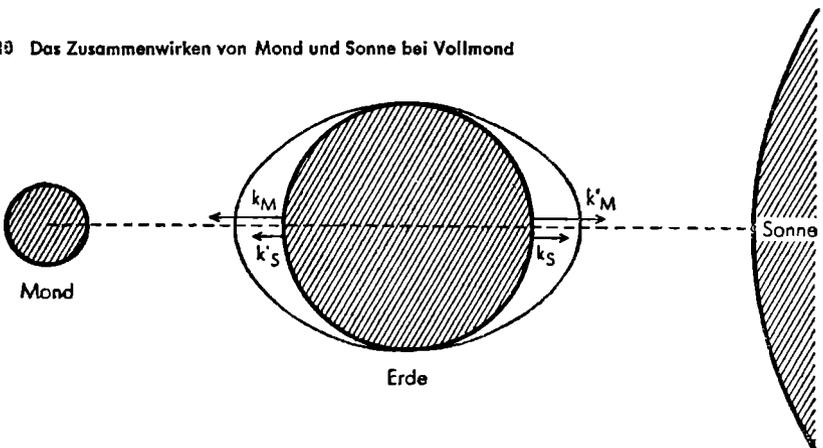
9 Das Zusammenwirken von Mond und Sonne bei Neumond

In Wirklichkeit beeinflussen beide Himmelskörper gleichzeitig die Erde. Ihre Kräfte setzen sich zusammen, und ihre Perioden überlagern sich.

Stehen Mond und Sonne auf der gleichen Seite der Erde, ist also Neumond (Abb. 9), dann sind die Kräfte, die beide Massen auf die Erde ausüben, gleichgerichtet, und zwar sowohl auf der Seite, die Sonne und Mond zugewandt ist, wie auf der entgegengesetzten. Die Wirkungen beider verstärken sich also: die Flut wird besonders hoch aufwallen. Der *Tidenhub*, d. h. der Unterschied des Wasserstandes bei Hochwasser und Niedrigwasser, hat bei Neumond ein Maximum.

Das gleiche tritt bei Vollmond ein. Denn dann stehen Mond, Erde und Sonne wie bei Neumond etwa in einer geraden Linie (Abb. 10), nur befinden sich

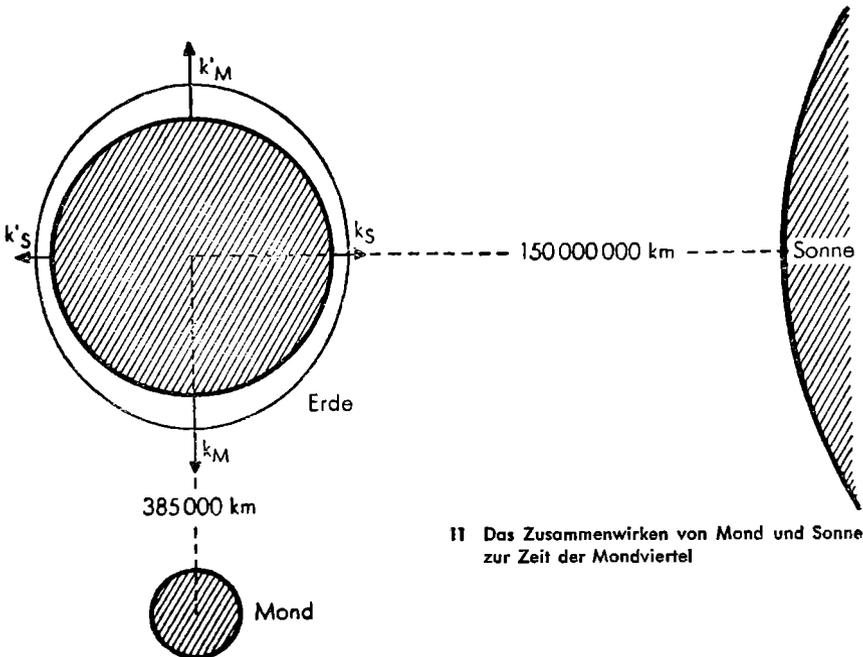
10 Das Zusammenwirken von Mond und Sonne bei Vollmond



Mond und Sonne auf entgegengesetzten Seiten der Erde. Die Kräfte sind dann vertauscht. Die zur Sonne gerichtete und von ihr bewirkte Kraft k'_S und die vom Monde abgewandte, vom Monde veranlaßte Kraft k_M haben gleiche Richtung. Sie verstärken sich also und können zusammengezählt werden. Ebenso ist die von der Sonne verursachte aber von ihr fortgerichtete Kraft k'_S gleichgerichtet der Kraft k_M , die der Mond erzeugt und die zu ihm hinweist. Auch diese beiden ergeben zusammen eine vergrößerte Kraft. Und da k_M und k'_M wenigstens ungefähr gleich sind und k_S ebenso groß ist wie die Kraft k'_S , so bekommen wir auch quantitativ bei Vollmond beinahe die gleichen Verhältnisse wie bei Neumond.

Die besonders hoch aufschwellende Flut bei Neumond und Vollmond nennt man Springflut. Gesellt sich anhaltender starker Wind, der das Wasser landein treibt, zu solchen Springfluten, so kann es zu schweren Gefährdungen der Küsten kommen. Das Wasser, das sonst den Deich kaum erreicht oder höchstens seinen Fuß bespült, läuft dann, vom Sturme aufgepeitscht, schäumend und brüllend seine Lehne hinan und überflutet wohl gar seine Krone. Nicht selten reißt es Stücke des Dammes heraus und überschwemmt das Hinterland.

Unendlich viel Leid ist durch solche Sturmfluten schon über die Bewohner unserer Nordseeküste gekommen. So durch die große Flut vom Jahre 1218, bei der der Jadebusen entstand, und durch die beiden Fluten von 1277 und 1287, in denen das Meer dem festen Lande den Dollart abgewann. Dreißig



11 Das Zusammenwirken von Mond und Sonne zur Zeit der Mondviertel

Kirchspiele auf der Insel Nordstrand versanken im November 1362 während einer Sturmflut in den Wogen, und im Jahre 1717 kamen 11000 Menschen innerhalb weniger Stunden im hereinbrechenden Wasser um.

Anders als bei Neu- und Vollmond gestalten sich die Verhältnisse zur Zeit der Mondviertel (Abb. 11). Dann stehen Mond und Sonne nicht mehr in einer geraden Linie mit der Erde, sondern auf zwei zueinander senkrechten Geraden, die sich im Erdmittelpunkte schneiden. Demzufolge wirkt die Kraft der Sonne nicht gleichlaufend mit der des Mondes, sondern senkrecht zu ihr. Die Kräfte k_M und k_S bzw. k'_M und k'_S dürfen also nicht addiert werden. Im Gegenteil: die Sonne zieht das Wasser, das der Mond aufzuwölben bestrebt ist, an, aber an den Stellen, die gerade zwischen den beiden vom Mond verursachten Wasserbergen liegen. Ihre Wirkung ist zwar nicht so groß wie die des Mondes, es kommt also nicht etwa zu vier Fluten am Tage, aber es wird Wasser von den Aufwölbungen, die durch den Mond veranlaßt werden, abgezogen. Die Flut steigt nicht so hoch an wie bei Springflut. Nippflut wird dieses Minimum des Hochwassers genannt. Ihr entspricht ein weniger ausgeprägtes Niedrigwasser, so daß wir bei Nippflut, also beim ersten und letzten Viertel des Mondes, auch ein Minimum des Tidenhubs haben.

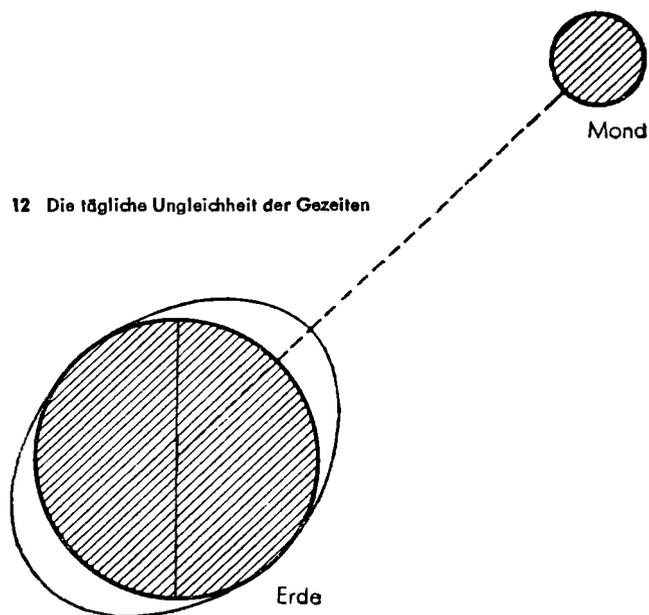
DIE TÄGLICHE UNGLEICHHEIT

Einen Fehler müssen wir noch korrigieren, den wir zur Vereinfachung zunächst stillschweigend gemacht haben. Auf allen unseren Darstellungen haben wir die Stellung des Mondes zur Erde so gewählt, daß die Erdoberfläche senkrecht zur Verbindungslinie von Mond und Erde steht. Das würde bedeuten, daß der Mond in einer Ebene die Erde umläuft, die mit der Äquatorebene identisch ist. Das ist aber keineswegs der Fall. Als notwendige Folge ergab sich, daß die Flutberge stets über dem Äquator lagen. Dann müßte das Ergebnis sein, daß in niederen geographischen Breiten der Tidenhub am größten wäre und mit wachsender Breite die Fluthöhe immer mehr abnähme. Die Pole hätten überhaupt keine Gezeiten. So eine regelmäßige Verteilung können wir aber nicht beobachten. Und schließlich müßten die beiden Fluten an jedem Tag gleiche Höhe aufweisen. Aber auch das ist in Wirklichkeit nicht der Fall.

In den europäischen Gewässern ist freilich der Unterschied zwischen den beiden Fluten so unerheblich, daß er kaum bemerkbar ist. An vielen Stellen der Erde unterscheiden sich aber das erste und das zweite Hochwasser beträchtlich. Ja, es gibt Orte, an denen die eine Flut fast völlig fehlt, so daß dort nur ein Hochwasserstand am Tage eintritt. Solche »Eintagstiden« kommen z. B. an indonesischen Küsten und im Golf von Mexiko vor.

Die Erklärung dieser täglichen Ungleichheit ist recht einfach. Im allgemeinen steht der Mond nicht in der Äquatorebene der Erde. Nur zweimal bei jedem Umlauf schneidet er sie. An allen übrigen Tagen ergibt sich ein Bild, wie es Abb. 12 darstellt. Die beiden Wasserberge stehen also nicht über dem Äquator, sondern je nach dem Stande des Mondes in höheren Breiten. Bei der täglichen Umdrehung der Erde beschreibt nun jeder Punkt der Erdoberfläche einen Parallelkreis zum Äquator. Trifft er also das eine Mal einen hohen Flutberg an, so wird er nach einer halben Umdrehung unter einem niedrigeren hinweggleiten, und die zweite Flut am Tage steigt nicht so hoch an wie die erste.

Natürlich bewirkt auch die Sonne entsprechende Ungleichheiten der Hochwasserstände. Sie überlagern sich mit den Änderungen, die die Stellung des Mondes verursacht. Das gibt ziemlich verwickelte Verhältnisse, die sich darin widerspiegeln, daß manche Orte einen Teil des Jahres eine einzige Flut am Tage haben, zu anderen Zeiten aber den normalen Gezeitenlauf mit mehr oder weniger unterschiedlichem Tidenhub zeigen.



DIE GEZEITEN IN DER NORDSEE

Die Flutwelle

Unsere Erklärung der Gezeiten wäre einigermaßen vollständig, wenn das Wasser gleichmäßig über die ganze Erde verteilt wäre und wenn die Wassertiefe groß genug wäre, um Störungen durch den Meeresgrund auszuschließen. Wir brauchten höchstens noch hinzuzufügen, daß die Flutwelle den Erdball von Ost nach West umlaufen müßte, wie der Mond ja auch die Erde von Ost nach West umkreist. Die Geschwindigkeit müßte für jede geographische Breite verschieden sein. Das wird einleuchten, wenn man bedenkt, daß der Umlauf der Flutwelle für alle Breiten in der gleichen Zeit vor sich geht, daß aber die Länge der Breitenkreise vom Äquator zu den Polen hin ständig abnimmt. Für die Breite von Rotterdam z. B. ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flutwelle 1000 km/Std.

Die Mondanziehung ist nur eine flüchtige, ganz kurz andauernde Einwirkung. In vier Stunden hat sie den Atlantik überquert. Aber durch endlose Zeiten wiederholt sie sich. Erinnern wir uns der Tatsache, daß auch ein Kind ein schweres Gewicht, das an einem Faden hängt, in Schwingungen versetzen kann, wenn es nur in gewissem regelmäßigem Rhythmus dagegenschlägt! Und als wir Kinder waren, versetzten wir zum ständigen Verdruß der Ortspolizei einen Kettensteg dadurch in mächtige Schwingungen, daß wir im Takte darüberliefen. Genau so verhält es sich mit der Wirkung der Massen von Mond und Sonne auf das Wasser der Meere. So geringfügig und flüchtig die Einwirkung ist, durch die jahrhundertlange, regelmäßige Wiederholung in immer gleichem Zeitmaß wird die Wasserfläche der Ozeane in ein mächtiges Schwanken versetzt und jahraus, jahrein in einem gigantischen Atmen gehalten. Kaum merklich zwar, in einer noch nicht einen Meter hohen, aber länderweiten Wellenbewegung tritt auf dem freien Meere die Kraft von Mond und Sonne zutage.

Betrachten wird jedoch die Gezeitenkalender der Häfen an irgendeiner Küste, sei es am Ozean selbst oder gar an einem seiner Randmeere, dann sehen wir, daß alle unsere Mühe, eine Erklärung für das geheimnisvolle Phänomen des Wechsels von Ebbe und Flut zu gewinnen, vergeblich gewesen zu sein scheint. Denn hier liegen die Verhältnisse ganz anders.

Wir sollten erwarten, daß das Hochwasser an jedem Orte dann eintritt, wenn der Mond am höchsten steht — denn in diesen Augenblicken ist er offensichtlich dem Orte am nächsten — und einen halben Tag danach, wenn er für unsere Antipoden seinen Höchststand erreicht hat, also zur Zeit seiner beiden Durchgänge durch den Ortsmeridian. Aber wir sehen uns getäuscht. Der Augenblick des Monddurchgangs durch den Ortsmeridian und die Hochwasserzeit fallen keineswegs zusammen. Man hat diese Verzögerung des Hochwassers mit einem Fachausdruck belegt und nennt sie *Hafenzeit*. Die Hafen-

zeit ist für manche Plätze ganz erheblich, ja es kommt vor, daß das Hochwasser gerade dann eintritt, wenn wir nach dem Mondkalender Niedrigwasser erwarten sollten. Offenbar geben unsere Betrachtungen bisher noch keinen Schlüssel zur Erklärung dieser Verzögerung. Wenn für alle Stellen des Meeres die gleiche Verzögerung einträte, dann hätte man noch Hoffnung, mit der Annahme der Trägheit der Wassermassen oder ihrer Bremsung auf dem Meeresgrunde einen Erklärungsversuch unternehmen zu können. Aber die Hafenzeiten sind ganz unterschiedlich.

Daß der Tidenhub zeitlich verschieden ist, mußten wir erwarten. Eine periodische Änderung der Fluthöhe ist tatsächlich zu beobachten. Sie entspricht den Mondvierteln und tritt als Spring- und Nippflut mit einiger Regelmäßigkeit auf. Daß freilich diese Gesetzmäßigkeit häufig durch Wettererscheinungen überdeckt wird, müssen wir in Kauf nehmen. Daß z. B. die Flutmarke in Hamburg besonders hoch liegt, wenn anhaltender Nordwestwind das Wasser an der Elbmündung staut, wird niemand überraschen, auch nicht, daß in solchen Fällen gelegentlich die Nippflut höher ansteigt als die Springflut bei Südostwind. Immerhin sollten wir annehmen, daß die Flut an allen Stellen des Meeres wenigstens im Durchschnitt einigermaßen gleiche Höhe erreicht. Denn auf Grund unserer Erklärung ist ein Unterschied nicht einzusehen. Wir können noch einräumen, daß in tiefen Buchten oder an weit landein gelegenen Stellen von Flußmündungen Abweichungen von einem durchschnittlichen Wert eintreten können, die örtlich bedingt sind. Denn tatsächlich ist es einleuchtend, daß in einer flachen Meeresbucht die einlaufende Flutwelle am Meeresgrunde gebremst wird. Sie wird vorzeitig ermatten und nicht mehr die Kraft aufbringen, hoch anzusteigen. Das Umgekehrte mag in den Trichtermündungen unserer großen Ströme eintreten. Das Wasser, das in den weit offenen Mund des Flusses hineinströmt, sieht sich bald auf eine viel geringere Breite beschränkt. Da die nachdrängenden Fluten ein Zurückweichen unmöglich machen und die Stauung immer größer wird, bleibt nur ein Ausweichen nach oben übrig. So mögen die großen Pegelhöhen zu erklären sein, die die Flut in weit im Lande gelegenen Häfen noch hervorruft. Aber keine Deutung solcher Art ist möglich, wenn wir etwa feststellen, daß der Kanal unweit Cherbourg einen durchschnittlichen Tidenhub von 2 m aufweist, während 150 km davon entfernt, bei Dieppe, die Fluthöhe 8 m beträgt und in nur 70 km Entfernung, an der Westküste der Normandie, gar auf 10 m anschwillt.

So bleibt nur die überall eingehaltene Periode von 12 Stunden 25 Minuten. Sie weist so handgreiflich auf die Verantwortlichkeit des Mondes, daß unsere Erklärung offenbar nur der Ergänzung bedarf.

Regelmäßigkeit finden wir allerdings beim Vergleich der Hafenzeiten an der Kanal- und Nordseeküste. Die Hochwasserzeiten schreiten mit einiger Stetigkeit vom Kanaleingang bis in die tiefsten Winkel der Deutschen Bucht fort (vgl. Abb. auf der Rückseite des Umschlages). Haben wir jetzt Hochwasser am Festlandssockel draußen vor dem westlichen Kanaleingang, so tritt es in

1 Stunde an der Westküste der Bretagne ein. Nach 3 Stunden kentert die Flut an der Westküste der Normandie, nach 4 Stunden querab Le Havre, nach 5 Stunden vor Dieppe, nach 6 Stunden in der Enge von Calais. Zur gleichen Zeit hat der westliche Kanaleingang schon wieder Niedrigwasser. Nach 7 Stunden hat das Hochwasser die Scheldemündung erreicht, nach 8 Stunden die Höhe von Haarlem, nach 9 Stunden die Insel Texel. Vor Nordholland müßte nach 10 Stunden Hochwasser sein. Allerdings ist hier ein Gebiet seltsamer Ruhe. Wir können kaum eine Gezeitenbewegung feststellen. Sie lebt aber weiter ostwärts wieder auf. Nach 11 Stunden ist bei Borkum Hochwasser und nach 12 Stunden bei Helgoland. Dann hat der Kanaleingang schon zum zweiten Male Hochwasser, Bretagne und Normandie haben Flut, in der Straße von Calais hat das Wasser seinen Tiefstand erreicht, und an der niederländischen und friesischen Küste steigt das Watt aus den Fluten.

So etwas wie eine Flutwelle schiebt sich durch den Kanal herein. Aber diese hat offenbar mit der Welle unter dem Monde nichts zu tun, die wir im freien Ozean vorfinden. Denn merkwürdigerweise läuft sie in der verkehrten Richtung von West nach Ost, während der Mond von Ost nach West über die Erde hinwegzieht. Und statt mit einer Geschwindigkeit von 1000 km/Std über das Meer zu jagen, schleicht sie mit nur 80 km/Std an der Küste entlang. Das Problem ist verwickelt und wird nicht einfacher dadurch, daß wir eine ganz gleichartige Flutwelle erkennen können, die von Nordschottland ausgehend an der Ostküste Englands nach Süden und quer über die Nordsee zur Küste von Südnorwegen und zum Skagerrak läuft (vgl. Titelbild).

Werfen wir noch einmal einen Blick auf die Fluthöhen, die die von West nach Ost durch den Kanal hereinwogende Flutwelle erreicht, so scheint die Sache zunächst hoffnungslos undurchsichtig zu werden. Draußen am Festlandssockel beträgt der Tidenhub 2 m. Er steigt nach der französischen Küste zu stetig an, erreicht vor der Bretagne 5 m und läuft an den Steilufeln der Normandie zu 10 m auf. In der Enge nördlich von Cherbourg sinkt die Fluthöhe auf 2 m, schwillt aber im östlichen Kanalbecken wieder auf 8 m an, die nördlich Dieppe erreicht werden. Durch die Straße von Calais hindurch fällt sie wieder ziemlich regelmäßig, hat zwischen Themse- und Scheldemündung nur noch 4 m, und vor Nordholland findet sich dann das schon erwähnte nahezu gezeitenlose Gebiet. Weiter ostwärts lebt die Flut wieder auf und erreicht in der Helgoländer Bucht eine Höhe von 3 m.

Auf diese Verhältnisse paßt keinesfalls das Bild eines vom Ozean hereinkommenden Flutstromes, an den man einen Augenblick wohl denken könnte. Eher erinnert das Auf- und Abschwellen des Tidenhubs an eine ungeheure Wellenbewegung. Und hier liegt tatsächlich der Schlüssel zur Deutung der Erscheinungen.

Wie entstehen Wellen, und was haben sie für Eigenschaften?

Ausflug in die Wellenlehre

Wir erinnern uns hier wieder eines Kinderspiels. Ein möglichst langes Seil legten wir lang ausgezogen flach auf den Boden und bewegten das eine Ende in gleichmäßigem Rhythmus mit der Hand kräftig auf und ab. Dann lief diese Bewegung, allmählich an Höhe verlierend, das ganze Seil entlang. Es sah aus, als wenn es zu einer Schlange geworden wäre, die sich fortbewegte. Aber das Seil bewegt sich nicht fort, sondern bleibt an seinem Platz liegen. Nur jedes Stück der Leine führt eine Auf- und Abwärtsbewegung aus und kehrt dann an seinen Ausgangsort zurück. Die Bewegung wird vom Nachbarteilchen übernommen, das sie mit einer kleinen Verzögerung ganz gleichartig durchführt und an das nächste Teilchen weitergibt. So geht das Auf- und Abwärtsschwingen durch das ganze Seil fort. Die Welle läuft das Seil entlang, ohne daß dieses sich von der Stelle bewegt.

Ganz analog ist der Vorgang, wenn wir in einen Teich einen Stein werfen. An der Stelle, wo er eintaucht, drängt er das Wasser ein kleines Stück nach unten, ehe er den Spiegel durchschlägt. Da sich Wasser, wie alle Flüssigkeiten, nur schwer zusammendrücken läßt, müssen die benachbarten Teilchen Raum geben. Das kann nur dadurch geschehen, daß sie sich nach oben bewegen. Um die Delle, die der Stein hervorgerufen hat, bildet sich also ein ringförmiger Wulst heraus. Im nächsten Augenblick bewegen sich aber die Wasserteilchen zurück. Die, die in der Delle nach unten gedrängt waren, schwingen nach oben, die aus dem Wulst kehren ihre Bewegung in eine nach unten gerichtete um. Beide schießen etwas über ihre Ausgangslage hinaus, kehren abermals um usw. Sie führen mehrmals eine auf- und abschwingende Bewegung aus, die ihre Schwingungsweite vermindert und schließlich zur Ruhe kommt. Inzwischen haben aber die schwingenden Wasserteilchen ihre Nachbarn mit in die Bewegung gerissen. Mit einem geringen Nachhinken zwar und einem kleinen Verlust an Schwingungsweite, sonst aber in ganz gleicher Art, führen auch diese eine Bewegung auf und ab aus. Sie reißen ihrerseits die ihnen benachbarten Teilchen mit und regen sie zur Bewegung an. So pflanzt sich der Zwang des Auf- und Abschwingens über die ganze Oberfläche des Teiches fort. Die einzelnen Teile, und das ist das Wesentliche, führen nur eine ganz beschränkte Schwingung um ihre Anfangslage aus und kehren alsbald zu ihrem Ruheort zurück. Die Bewegung aber, die Welle, läuft über die Teichfläche hinweg. Dieser ganze Vorgang spielt sich mit bewundernswerter Regelmäßigkeit ab. Die Zeit, die verstreicht, während ein Wassertropfen einmal auf- und abschwingt, die Schwingungszeit, ist bei allen Teilchen genau gleich groß. Die Strecke von einem Wellenberg zum nächsten, die Wellenlänge, ist überall die gleiche. Darum auch das Bild schöner Regelmäßigkeit, das die nach außen sich weitenden Kreise bieten, wenn ein Stein ins Wasser geworfen wird.

Wenn die Welle am Rande des Teiches ankommt, so wird sie reflektiert. Die am Ufer befindlichen Wasserteilchen haben ja keinen flüssigen Nachbar

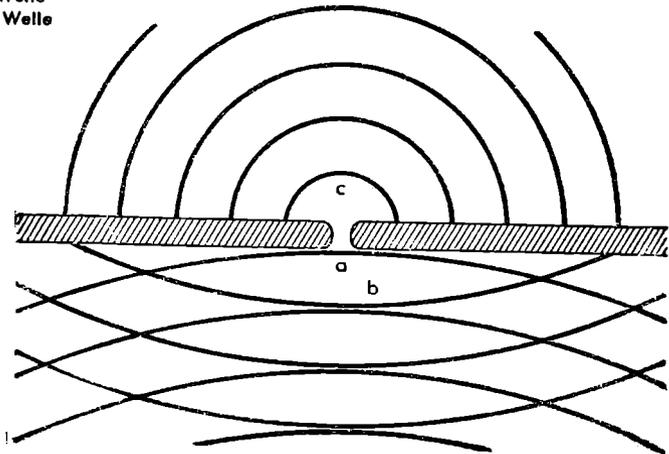
mehr, sondern grenzen an festliegenden Sand, der das Auf- und Abspringen nicht mitmachen kann. So geben sie die Bewegung an die Tropfen zurück, von denen sie eben selbst aus ihrer Ruhe aufgestört worden sind. Die Wellenbewegung geht nun rückläufig. Experimente dazu kann man gut in der Badewanne oder in der Teetasse anstellen.

Eine interessante Erscheinung ergibt sich, wenn Wellen auf ein Hindernis treffen, in dem sich mehrere enge Durchlässe befinden. An jedem solchen Spalt geraten die Wassertropfen in Schwingung. Da aber rechts und links keine schwingenden Teile vorhanden sind und die weitere Anregung hinter der Barriere nur von dem Spalt ausgehen kann, so ist es, als ob von dieser Stelle eine ganz neue Welle ausginge (Abb. 13).

Sind in dem Hindernis zwei Durchlässe, so wirken beide wie neue Erregungsstellen. Von beiden gehen neue Wellen aus, die ganz gleichartig sind. Sie haben gleiche Wellenlänge und gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Was geschieht nun, wenn die beiden Wellen zusammentreffen? Dann wird offenbar ein Wasserteilchen, das am Treffpunkt der beiden Wellen liegt, von zwei Seiten angeregt. Nehmen wir an, zwei Nachbarpartikel, eins von der einen Welle, das andere von der anderen Welle, versuchen, die Partikel, die wir betrachten, in ihre Schwingung hineinzuziehen! Nehmen wir fernerhin an, daß beide gerade den gleichen Schwingungszustand haben, daß also z. B. beide in der Aufwärtsbewegung begriffen sind! Dann wird unser Wassertropfen von beiden mit vereinten Kräften emporgehoben, und seine Bewegung wird be-

13 Durchgang einer Welle durch einen Spalt

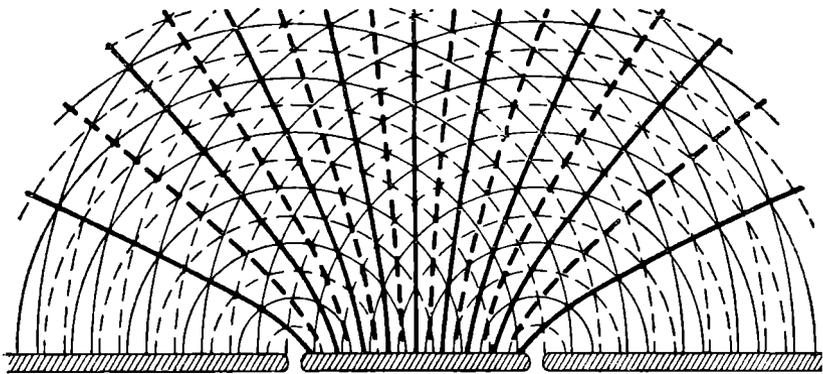
- a ankommende Welle
- b reflektierte Welle
- c neu erregte Welle



sonders kräftig sein. An dieser Stelle verstärken sich also die beiden Wellenbewegungen gegenseitig. Offenbar sind das die Stellen, die gleiche Entfernung von den beiden Spalten haben, oder Stellen, deren Abstände von den Durchlässen sich um eine Wellenlänge oder zwei, drei, vier usw. Wellenlängen unterscheiden.

Betrachten wir eine andere Stelle, die so gelegen ist, daß die beiden Nachbartheilchen entgegengesetzten Schwingungszustand haben! Während das Tröpfchen, das zur ersten Welle gehört, nach oben schwingt, bewegt sich die Wasserpartikel, die von der zweiten Welle angeregt ist, nach unten. Beide versuchen, unseren Tropfen in ihrem Sinne zu beeinflussen. Und wie beim Tauziehen zwei gleichstarke Mannschaften trotz größter Kraftanstrengung das Tau nicht von der Stelle bewegen, so ziehen die beiden Nachbarn an dem Tropfen in entgegengesetzten Richtungen mit dem Erfolg, daß er sich überhaupt nicht bewegt. Es gibt also Stellen, die in völliger Ruhe bleiben. Offenbar sind es die Orte, deren Abstände von den beiden Spalten sich genau um eine halbe Wellenlänge unterscheiden, denn dort ist bei der einen Welle Aufwärtsbewegung, während die andere Abwärtsbewegung zeigt und umgekehrt. Der Physiker nennt diese Erscheinung Interferenz von Wellen. In Abb. 14 ist schematisch das Interferenzbild dargestellt, das sich ergibt, wenn zwei Wellen von zwei benachbarten Erregungspunkten ausgehen. Die dünnen Linien stellen die Wellen dar, ihr Abstand ist die Wellenlänge; die gestrichelten dünnen Kreise bezeichnen halbe Wellenlängen. Die stark ausgezogenen Linien stellen dann die Orte stärkster Schwingung dar, während an den starken unterbrochenen Linien Ruhe herrscht.

Bei allen Beispielen, die wir bisher behandelt haben, geschah die Schwingung der einzelnen Teile senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle. Solche



14 Interferenz von zwei Wellenzügen

Wellen heißen transversal. Es ist aber auch denkbar, daß die Teilchen in der gleichen Richtung hin- und herpendeln, in der die Welle fortschreitet. Dann rücken zeitweilig die Teilchen enger zusammen und entfernen sich im nächsten Augenblick voneinander. Der Stoff, in dem solche longitudinalen Wellen entstehen können, muß sich also zusammendrücken lassen und sich ausdehnen können. Diese Fähigkeit ist in hohem Maße den Gasen und in gewissen Grenzen den festen Stoffen eigen, für die denn auch Längswellen kennzeichnend sind. Auf diese Art pflanzt sich z. B. der Schall durch die Luft fort.

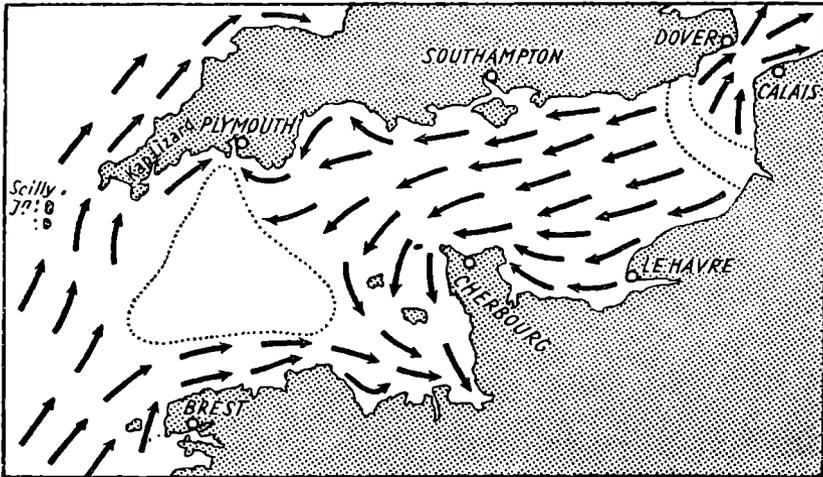
Schließlich gibt es noch eine Zwischenform, bei der die Teilchen nicht einfach hin- und herschwingen, sondern kreisförmige oder elliptische Bahnen beschreiben. Die vom Winde aufgewühlten Wasserwogen sind z. B. von dieser Art.

Die Gezeiten als Wellenerscheinung

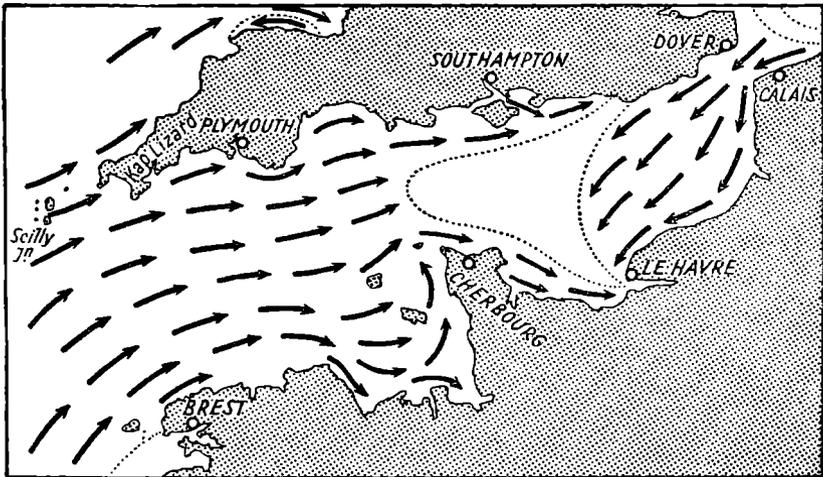
Mit diesen Kenntnissen von der elementaren Wellenlehre gehen wir nun noch einmal an die Erscheinung der Gezeiten im Kanal und in der Nordsee heran. Tatsächlich finden wir beträchtliche Ähnlichkeiten mit den betrachteten Wasserwellen, wenn auch natürlich nicht zu erwarten ist, daß alles in so einfacher Weise verläuft. Da schafft denn doch die Übereinanderlagerung der verschiedensten Einflüsse zu verwickelte Verhältnisse.

Wie wir schon sahen, wird durch die über unermeßliche Zeiten wirkende Kraft des Mondes und der Sonne im Ozean eine wellenartige Bewegung in Gang gehalten, die wie eine riesenhafte Dünung im 12-Stunden-Takt über die Wasserfläche wogt. Sie trifft auf den Festlandssockel, der vor den Shetlandinseln, den Hebriden, Irland, dem Kanal und Frankreich seine Grenze hat. Hier, im Durchschnitt 50 bis 100 km westlich der Küsten, ist das Meer flacher als draußen im Ozean. Die Gezeitenwellen werden zu einer Brandung ganz ähnlich der gebremst, die wir am Meeresstrande beobachten können, wo sie freilich durch die kurzen Wellen erzeugt wird, die der Wind im Wasser aufwühlt. An der Küste werden die Gezeitenwellen reflektiert. An zwei Stellen aber hat das Hindernis, das das Festland für die Wellen darstellt, Lücken. Der Kanaleingang und der nördliche Zugang zur Nordsee zwischen Schottland und den Shetlandinseln wirken genau so, wie wir es an den beiden Spalten bei unserem Ausflug in die Wellentheorie gesehen haben. Die ozeanische Gezeitendünung mit ihrem regelmäßigen Auf- und Abschwingen läßt hier Erregungszentren für zwei neue Wellensysteme entstehen. Das eine kann sich von Nordschottland aus ziemlich ungehindert und regelmäßig über die Nordsee ausbreiten, das andere aber, eingepfercht in die Enge des Kanals, muß sich manchen Zwang durch die geographischen Gegebenheiten gefallen lassen.

Die etwa 2 m hohe Gezeitenbrandung, die aller 12 Stunden am Festlandssockel vor dem Kanaleingang steht, übt im rhythmischen Wechsel einen Über-

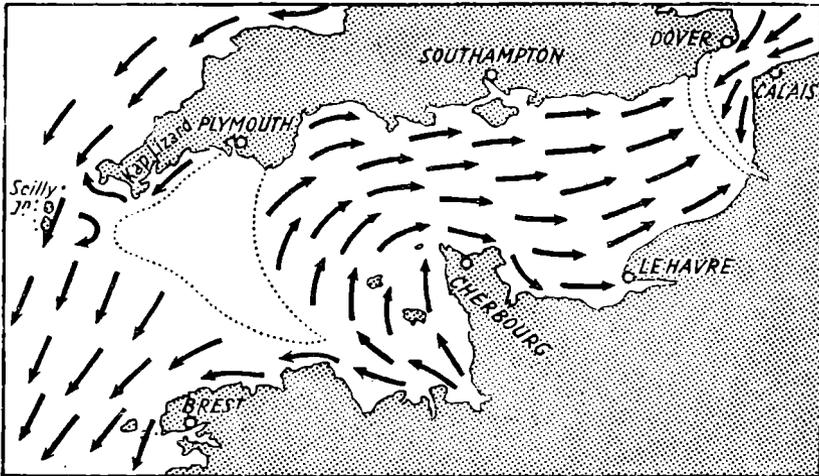


15 Die Gezeitenströme im Kanal a) Hochwasser am westlichen Kanaleingang
 (nach Schott) Niedrigwasser bei Dover

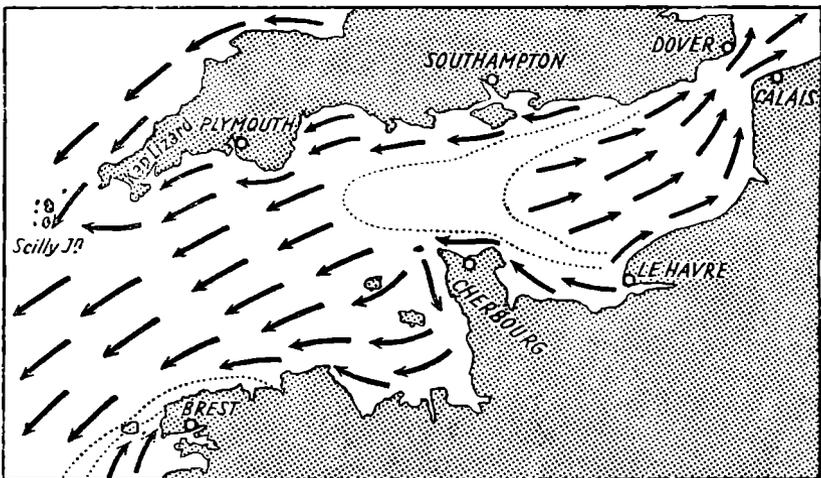


b) 3 Stunden später: Hochwasser bei Cherbourg

druck auf die östlich sich ausdehnenden Wassermassen aus. Ein breiter, wenn auch nicht eben tiefer Strom von ozeanischem Wasser ergießt sich von Westen in den Kanal. Von beiden Seiten eingezwängt und überdies durch den Damm der normannischen Steilküste gestaut, muß er hier zu größerer Höhe anschwellen



c) 6 Stunden später: Hochwasser bei Dover — Niedrigwasser am westlichen Kanaleingang



d) 9 Stunden später: Niedrigwasser bei Cherbourg

als im freien Meer, genau wie wir es beim Flutstrom in den Trichtermündungen gesehen haben. So erklärt sich der riesenhafte Tidenhub von 10 m an der Westküste der Normandie.

Wenn der von West nach Ost ansteigende Flutstrom Cherbourg erreicht hat,

sind die Wasser am Festlandssockel längst wieder im Zurückfließen begriffen und schon so weit gesunken, daß von dort aus kein Druck mehr ausgeübt wird. Es strömt kein Wasser mehr nach. Im Gegenteil, die hoch aufgelaufene Flut im Osten steht jetzt höher als die am Kanaleingang und übt ihrerseits einen Druck aus. Der Strom fließt umgekehrt, die Ebbe setzt ein.

Es scheint so, als ob kein reiner Flutstrom sich vom Kanaleingang zum westlichen Kanalbecken bewegt, als ob aber auch keine reine Transversalwelle erregt wird. Die Annahme eines Mitteldinges zwischen beiden trifft die Wirklichkeit wohl am besten. Das Wasser macht hin- und herschiebende Bewegungen geringer Spannweite und schwillt dabei an und ab. So wird zwar das Bild eines großen Flutstromes erzeugt. Der Weg aber, den die Wasser tafeln, die sich hin- und herschieben, zurücklegen, mag trotzdem kaum mehr als 10 bis 20 km betragen.

Das Bild von Ebbe und Flut, wie wir es eben im westlichen Kanalbecken betrachtet haben, wiederholt sich im östlichen. Die mächtige Gezeitenbewegung am Ostrande des westlichen Beckens verebbt zu einem großen Teil an der Westküste der Normandie. An der Enge aber zwischen Cherbourg und Portland bildet sich ein neues, großartiges Erregungszentrum heraus. Die hochaufschwellenden Wasser strömen zur Flutzeit durch die Enge nach Osten. Allerdings verlieren sie hier schnell an Höhe, denn gleich hinter dem Eingang erweitert sich das Becken fast auf die doppelte Breite. Das Wasser hat Platz, nach Osten und Südosten zu verfließen. So kommt es zu der geringen Fluthöhe von 2 m, die sich unweit Cherbourg findet. Bald hinter der Seinemündung verengt sich dann das Becken wieder. Das Wasser steigt an. Die Küste zwischen der Sommemündung und dem Kap Gris Nez aber spielt die gleiche Rolle wie die normannische Küste für das westliche Kanalbecken. An ihr stauen sich die Fluten und rufen bereits bei Dieppe einen Tidenhub von 8 m hervor. Wenn die Flutwelle die Straße von Calais erreicht hat, ist bei Cherbourg längst Ebbe eingetreten, fließen bei Le Havre die Wasser zurück, kentert bei Dieppe der Gezeitenstrom. Das Wasser steht im Osten höher als im Westen und strömt zurück. Auch hier zeigt sich der Vorgang des Hin- und Herströmens einer riesigen Wassertafel.

Und zum dritten Male wiederholt sich das gleiche. Die Enge von Dover ist jetzt das Erregungszentrum der großen Wellenbewegung, die sich nun ungehindert in die Nordsee hinein ausbreiten kann. Dort aber, wo sie in die freie See hinausgelangt, vor Nordholland, trifft sie mit der Flutwelle zusammen, die von Norden her, von den Orkneyinseln, in die Nordsee einströmt. Die beiden Wellenzüge kommen zur Interferenz ganz so, wie wir es bei den Wellen auf dem Teich gesehen haben. Vor den Westfriesischen Inseln findet sich eine Stelle, wo sich die Bewegungen gerade auslöschen. Während also die Welle, die durch den Kanal hereinkommt, im Aufschwollen begriffen ist, fließt die von Schottland kommende ab, und umgekehrt. Und wenn gemäß der Kanalflut Hochwasser sein müßte, ist nach der Tide, die die Orkneywelle erzeugt,

Niedrigwasser. Die beiden Bewegungen heben sich auf, und es findet sich hier ein Gebiet, das fast keine Gezeitenbewegung aufweist. Weiter ostwärts lebt die Bewegung wieder auf, ohne allerdings zu so großen Fluthöhen anzuheben wie im Kanal.

Ein zweites Gebiet, in dem die beiden in die Nordsee einfließenden Gezeitenströme sich auslöschen, befindet sich am Eingang des Skagerraks. Auch dort ist fast keine Gezeitenbewegung vorhanden. Das ist der Grund dafür, daß sich im Skagerrak und Kattegatt keine Flutwelle ausbildet, wie sie den Kanal durchläuft. Deshalb gibt es auch fast keine Gezeitenbewegung in der Ostsee, weil ein Erregungszentrum fehlt, wie es die Nordsee im Kanal und bei Nordschottland hat. Das Wattenmeer und die Marschlandschaft, Landschaftstypen, die Kinder der Gezeiten sind und unseren Nordseeküsten das Gepräge geben, konnten sich also an der Ostsee nicht ausbilden. Der Unterschied im Gesicht der Küsten von Nord- und Ostsee ist also letzten Endes in dem Umstand begründet, daß gerade am Ostsee-Eingang der Gangunterschied der beiden Flutwellen der Nordsee eine halbe Wellenlänge beträgt.

Faßt man also die Gezeitenerscheinungen in der Nordsee — die hier als ein Beispiel für alle Randmeere betrachtet worden ist — als Wellenbewegung auf, so kommt man der Wirklichkeit beträchtlich nahe. Das Bild der Wellenbewegung, das in der Physik so unendlich fruchtbar gewesen ist, das sich auf Schall- und Lichterscheinungen, auf die Ausbreitung elektromagnetischer Energien im Äther, auf die Phänomene elastischer Bewegungen ebenso wie auf die Vorgänge im Innern der Atome anwenden läßt, hat also auch hier seine Brauchbarkeit erwiesen.

Noch ist damit nicht alles erklärt. Die Gezeiten haben auch für den Fachwissenschaftler noch ihre Geheimnisse. Das ist bei der Vielfalt der Faktoren, die Einfluß auf sie haben, sich gegenseitig überdecken, verstärken oder schwächen, auch nicht anders zu erwarten. In großen Zügen kann man so aber die Erscheinungen von Ebbe und Flut verstehen.

GEZEITENKRAFTWERKE

Es sind ganz beträchtliche Energien, die tagtäglich in der Gezeitenbewegung verbraucht werden. Verschiebt sich eine Wassertafel von nur 1 qkm Fläche und nur 1 m Dicke, so bewegt sich dabei ein Gewicht von 1 Million Tonnen. Hebt sie sich nur um 1 m, so wird dabei die Arbeit von 1 Million Metertonnen geleistet. Man könnte damit etwa 2500 Kilowattstunden elektrischen Strom herstellen.

In Wirklichkeit handelt es sich aber um riesenhafte Wasserflächen. 250 Millionen qkm Meer gibt es auf der Erde, fast überall gibt es Ebbe und Flut, und

die Bewegung erstreckt sich nicht nur auf 1 m Wassertiefe. Dazu kommt, daß der Tidenhub im Durchschnitt 1 m weit überschreiten dürfte. Diese ungeheuren Energien, die bei jeder Tide umgesetzt werden, können zur Zeit vom Menschen noch kaum ausgenutzt werden. Das mutet seltsam an, wenn man hört, wie die Menschheit überall nach Energien schreit. Wieviel Kohle, die jetzt zum Heizen von Öfen, Dampfmaschinen und Lokomotiven verwendet wird, könnte gespart werden, wenn durch Ausnutzung der Gezeiten genügend elektrischer Strom zur Verfügung gestellt würde! Die Energievorräte würden ausreichen, um Kohle als Brennmaterial überhaupt überflüssig zu machen. Sie könnte dann lediglich als Rohstoff dienen.

Dabei wird uns die Energie des Meeres recht bequem, sozusagen bis vor die Tür geliefert. Tief in unsere großen Ströme dringt die Flut ein, und in jedem Sieltief hebt und senkt sich das Wasser im Rhythmus der Gezeiten. Es sind auch schon oft Vorschläge zur Ausnutzung der Gezeitenenergie für die Wirtschaft gemacht worden. Die meisten Pläne sind aber an den Schwierigkeiten gescheitert, die Bauten im Meere bieten. Die Baukosten werden zu hoch.

Wie könnte ein solches Gezeitenkraftwerk beschaffen sein? Der Hauptteil bei allen Plänen ist ein großer Damm, der eine Flußmündung, eine Bucht oder sonst ein geeignetes Stück Meer von der offenen See abtrennt. Im Nordosten der Vereinigten Staaten von Amerika, nicht weit von der kanadischen Grenze, hat man unlängst den Bau eines großen Gezeitenkraftwerkes begonnen. Dort will man in der Bucht von Passamaquoddy eine Reihe von vorgelagerten Inseln durch sieben große Dämme verbinden und so ein Becken von 120 qkm Fläche schaffen.

Selbstverständlich müssen Einrichtungen erstellt werden, die den Schiffsverkehr ermöglichen. Schleusenanlagen von angemessener Leistungsfähigkeit dürfen also nicht fehlen.

In den Damm sind Tore eingebaut, durch die bei Flut das Wasser in das Sammelbecken einströmen kann. Sie lassen sich bei Ebbe verschließen. Das geschieht meist durch Platten, die bei Flut hochgezogen und bei Ebbe herabgelassen werden können.

Tritt Ebbe ein, so werden diese Tore geschlossen, und sobald draußen der Wasserstand geringer geworden ist als im Staubecken, läßt man das Wasser durch Anlagen abströmen, die mit Turbinen besetzt sind. Diese Turbinen sind ihrerseits mit Dynamomaschinen verbunden, die elektrischen Strom erzeugen.

Während der ganzen Ebbezeit kann man also elektrische Energie liefern. Aber auch bei schon wieder ansteigender Flut müssen die Turbinen noch nicht abgestellt werden, solange der äußere Wasserstand noch nicht den Spiegel hinter dem Damm erreicht hat. Immerhin bleiben einige Stunden, in denen die Flut von außen in das Staubecken strömt, also kein Wasser über die Turbinen laufen kann. Während dieser Zeit könnte das Kraftwerk keinen Strom liefern. Da das Sammeln größerer Elektrizitätsmengen erhebliche technische Schwierigkeiten macht, andererseits der Ausfall eines Elektrizitätswerkes

für einige Stunden am Tage — noch dazu bei täglich wechselnder Tageszeit — für die Wirtschaft nicht tragbar ist, hat man nach Mitteln Ausschau gehalten, auch noch diese restlichen Stunden zu überbrücken.

Der am einfachsten scheinende Weg, auch das hereinströmende Wasser durch Röhren über die Turbinen zu schicken und so zur Arbeitsleistung zu zwingen, ist in Wirklichkeit kaum gangbar. Man müßte dann vor dem Damm einen erheblich höheren Wasserspiegel auflaufen lassen als im Staubecken. Das würde aber einen beträchtlichen Überdruck von außen auf die Sperrmauer bewirken, dem diese nur bei geeignetem Bau Widerstand leisten könnte. Den ungeheuren Druckkräften, wie sie solch große aufgestaute Wassermassen ausüben, kann man nur dadurch begegnen, daß man den Damm nicht gerade, sondern im Bogen baut, so daß die erhabene, die konvexe Seite nach der Seite des Überdrucks zeigt. Auch bei Talsperren ist man diesen Weg gegangen. Es ist dasselbe Prinzip, das man bei Gewölbekonstruktionen ausnutzt, nur sind bei Wasserbauten die Gewölbe in die Horizontale umgelegt, weil der Druck nicht von oben, sondern von der Seite kommt. Der Damm des Gezeitenkraftwerkes hat in erster Linie dem Druck des im Staubecken gesammelten Wassers standzuhalten. Er kehrt also diesem seine konvexe Seite zu. Ihn auch gegen beträchtlichen Druck von der anderen Seite her stabil zu machen, würde nur mit ganz erheblich höheren Kosten möglich sein.

Da ist es schon wirtschaftlicher, einen Teil der Energie, die während der Ebbezeit im Überfluß vorhanden ist, dazu zu verwenden, Wasser in ein zweites, höher gelegenes Becken zu pumpen und während der lästigen Betriebspausen zum Antrieb der Turbinen zu verwenden.

Es ist verlockend, sich auszumalen, welch ungeheure Energie das Meer sozusagen kostenlos zur Verfügung stellen und wie man sie technisch bändigen könnte. Ob freilich solche Träume einmal ihre Erfüllung finden? Vielleicht ist das Zeitalter der Atomenergie schon angebrochen und Großkraftanlagen in der Art der Gezeitenkraftwerke sind überflüssig geworden, ehe eine Ausnutzung der Kraftquellen des Meeres in größerem Umfang überhaupt begonnen hat.

F A C H - U N D F R E M D W Ö R T E R

(gr) = griechisch · (lat) = lateinisch

Antipoden	ἀντί (anti, gr) = gegen, πούς (pus, gr) = Fuß, wörtlich: Gegenfüßler - Bewohner des entgegengesetzten Teiles der Erdkugel.
Geophysik	γῆ (ge, gr) = Erde, φύσις (physis, gr) = Natur - die Wissenschaft, die physikalische Erkenntnisse zur Klärung geographischer Erscheinungen anwendet.
Gravitation	gravis (lat) = schwer - Schwerkraft, die Kraft, die zwei Körper aufeinander ausüben.
Hafenzzeit	Die Zeit, die am Tage des Voll- und Neumondes vom Durchgang des Mondes durch den Längengreis des Hafens bis zum Eintritt des Hochwassers verstreicht.
Interferenz	Inter (lat) = zwischen, ferre (lat) = tun - die Vorgänge bei der Überlagerung von Wellen.
Klei	Eine graue oder blaugraue, sandig-schlammige Masse, die den Boden des Wattenmeeres bildet und bei Niedrigwasser zutage tritt.
Kulmination	culmen (lat) = Gipfel - der höchste Stand, den ein Stern bei seinem Umlauf am Himmel erreicht. Kulmination findet statt, wenn der Stern den Ortsmeridian durchläuft.
Meridian	meridies (lat) = Mittag - Mittagskreis, der durch die beiden Pole der Erde gedachte Kreis, der den Äquator senkrecht durchschneidet.
Metertonne	Die Arbeit, die man aufwenden muß, um einen Körper vom Gewicht 1 t 1 m hoch zu heben.
Nippflut	Die zur Zeit des ersten und letzten Mondviertels eintretende Flut geringer Höhe.
Pegel	Eine mit einem Maßstab versehene Latte, die zum Messen des Wasserstandes dient.
Planet	πλάνης (planes, gr) = umherirrend - Wandelstern - Stern, der um die Sonne kreist.
Priel	Ein meist weit verzweigter Graben im Watt, der auch bei Ebbe nicht trockenläuft.
Reflektieren	reflectare (lat) = zurückwerfen - das Zurückwerfen von Wellen durch Gegenstände, die die Wellenbewegung nicht mitmachen.
Siel	Das Tor, das den Durchbruch eines Sieltiefs durch den Deich verschließt. Siele sind wie Ventile eingerichtet. Sie schließen sich bei Flut und öffnen sich bei Ebbe.
Sieltief	Graben, der die Marsch durchzieht und zur Wasserregulierung dient.
Springflut	Die bei Voll- und Neumond eintretende besonders hohe Flut.
Schlick	siehe Klei.
Tidenhub	Der Unterschied zwischen den Pegelständen bei Hoch- und Niedrigwasser.
Watt	Der Streifen zwischen dem Festland und dem offenen Meer, der bei Ebbe trockenläuft und bei Flut von Wasser bedeckt wird.
Zentrifugalkraft	centrum (lat) = Mitte, fugare (lat) = entfernen, vertreiben - Fliehkraft, eine bei Umdrehungen auftretende Kraft, die stets vom Mittelpunkt der Umdrehung weggerichtet ist.

BISHER SIND ERSCHIENEN

A <i>Mathematik</i>	12502	Rechne rasch und richtig
	12521	Naturgesetz und funktionale Abhängigkeit
B <i>Physik</i>	12511	Vom Wesen der Wärme
D <i>Allgemeine Biologie</i>	12513	Lebensbündnisse in Tier- und Pflanzenwelt
F <i>Zoologie</i>	12522	Tierleben im Tümpel
	12526	Verborgenes Leben
	12530	Gefiederte Freunde in Haus, Hof und Garten
	12560	Die Welt unter Wasser
G <i>Der Mensch</i>	12529	Herz und Gefäße
	12540	Hormone
H <i>Astronomie</i>	12505	Wie Botschaften aus dem Weltall entziffert wurden
J <i>Geophysik</i>	12542	Wie alt ist die Erde?
K <i>Meteorologie</i>	12501	Das Wetter im Sprichwort
L <i>Geologie</i>	12534	Das Eiszeitalter
	12535	Eine Sandgrube
N <i>Allgemeine Geographie</i>	12524	Das Gradnetz der Erde
O <i>Länder und Völker</i>	12508	Natur und Mensch der Polargebiete
	12509	Steinzeitvölker der Gegenwart
	12518	Die lebende Landkarte
P <i>Reisen und Forschungen</i>	12548	Neun Monate auf treibender Eisscholle
Q <i>Der junge Naturforscher</i>	12519	Der junge Steinsammler

IN VORBEREITUNG BEFINDEN SICH

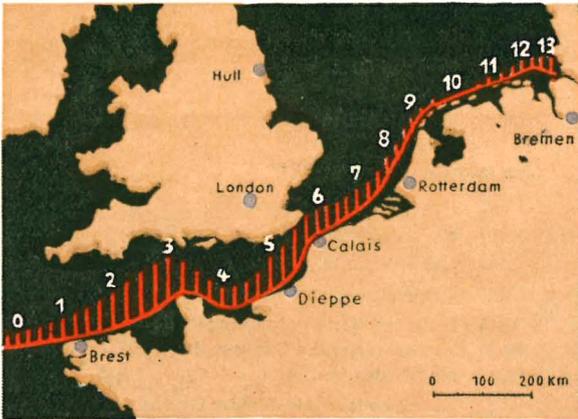
A <i>Mathematik</i>	12575	Der Zeichenstift rechnet
B <i>Physik</i>	12554	Die strahlenden Elemente
C <i>Chemie</i>	12568	Das Periodische System
G <i>Der Mensch</i>	12562	Gesundes Blut – Krankes Blut
L <i>Geologie</i>	12564	Die Formationstabelle
	12586	Vom Eiszeitalter zur Gegenwart
N <i>Allgemeine Geographie</i>	12517	Die Wegeaufnahme
O <i>Länder und Völker</i>	12549	Die Inselbewohner Melanesiens

Die Zahlen zwischen Serie und Titel sind die Bestellnummern. Weitere noch in Vorbereitung befindliche Bände werden fortlaufend an dieser Stelle angezeigt

DIE GRUPPE II UMFASST FOLGENDE SERIEN:

- A MATHEMATIK
- B PHYSIK
- C CHEMIE
- D ALLGEMEINE BIOLOGIE
- E BOTANIK
- F ZOOLOGIE
- G DER MENSCH
- H ASTRONOMIE
- I GEOPHYSIK**
- K MÈTEOROLOGIE
- L GEOLOGIE
- M MINERALOGIE
- N ALLGEMEINE GEOGRAPHIE
- O LÄNDER UND VÖLKER
- P REISEN UND FORSCHUNGEN
- Q DER JUNGE NATURFORSCHER
- R SCHÖNHEIT UND SELTSAMKEIT
- S NOCH NICHT VERFUGT
- T NOCH NICHT VERFUGT
- U GESCHICHTE DER NATURWISSENSCHAFT

Durch den Kanal läuft eine Flutwelle zur südlichen Nordsee. Die roten Stäbchen stellen die maximalen Fluthöhen dar, die weißen Zahlen geben an, mit welcher Verzögerung – in Stunden vom westlichen Kanaleingang aus gerechnet – Hochwasser eintrifft.



Das Flußgeschwelle dringt in die Flußmündungen ein. Die rote Farbe gibt an, bis zu welchen Stellen die Gezeiten bemerkbar sind.