

Ebbe, Flut und Schifffahrt: in memoriam Dr. rer. nat. habil. Günther Sager (1923-1991), Institut für Meereskunde Warnemünde (1958-1987)

Hagen, Eberhard

Veröffentlichungsversion / Published Version

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Hagen, E. (2017). Ebbe, Flut und Schifffahrt: in memoriam Dr. rer. nat. habil. Günther Sager (1923-1991), Institut für Meereskunde Warnemünde (1958-1987). *Deutsches Schifffahrtsarchiv*, 40, 325-362. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-83135-3>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

POLAR- UND MEERESFORSCHUNG

► GÜNTHER SAGER † UND EBERHARD HAGEN

Ebbe, Flut und Schifffahrt

In memoriam
Dr. rer. nat. habil. Günther Sager (1923–1991),
Institut für Meereskunde Warnemünde (1958–1987)

1. Pulsschlag des Meeres

Wenn alljährlich viele Besucher entlang der Küsten unserer heimatlichen Ostsee erholsamen Urlaub erleben, dann wird nur wenigen bewusst, dass sie ein Meeresgebiet mit spezieller innerer Dynamik vor sich haben. Hier fehlen weitgehend die im Weltmeer allgegenwärtigen Gezeiten, die schon den Seefahrern des Altertums viele Rätsel aufgaben. Der Makedonier Alexander der Große (356–323 v.u.Z.), der römische Imperator Cäsar (100–44 v.u.Z.), der griechische Gelehrte Strabon (63 v.u.Z. – 24 u.Z.) und viele andere Persönlichkeiten berichteten über Gefahren durch sich zeitlich verändernde Untiefen in Häfen und Flüssen. Allen Berichten gemeinsam ist eine überwältigende Schilderung der Großartigkeit dieser Naturerscheinungen, die sie aus den heimatlichen Küstengefilen so nicht einzuschätzen vermochten. Zu jener Zeit erfolgte sowohl die handelnde als auch die erkundende Seefahrt aus Gründen der Navigationssicherheit vornehmlich entlang der Küsten. Daher blieb ihr so manch böse Überraschung nicht erspart.

Die Gezeiten oder auch Tiden sind rhythmische Wasserbewegungen im Weltmeer, sichtbar durch stetig wechselnde Wasserstände entlang der Küsten. Die Zeit zwischen Hoch- und Niedrigwasser wird als Ebbe bezeichnet und die zwischen Niedrig- und Hochwasser als Flut (Abb. 1). Die Ursache für den wiederkehrenden Wechsel von Ebbe und Flut war recht lange unbekannt. Diese Tatsache wird durch das von Johann Georg Walch (1693–1775)

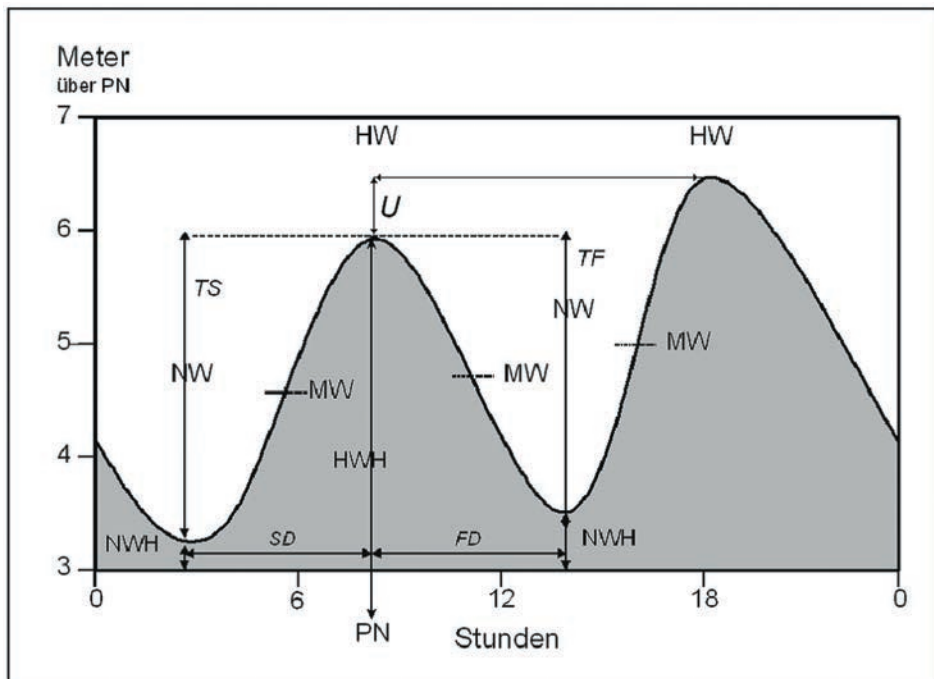


Abb. 1 Grundbegriffe des Gezeiten- oder Tidenganges im Wasserstand (grau): HW: Hochwasser; MW: Mittelwasser; NW: Niedrigwasser; NWH: Niedrigwasserhöhe; HWH: Hochwasserhöhe; PN: Pegelnull; SD: Steigdauer (Flut); FD: Falldauer (Ebbe); TS: Tidenstieg (NW zum HW); TF: Tidenfall (HW zum NW); U: Ungleichheit = $\frac{TS+TF}{2}$ -Tidenhub

herausgegebene »Philosophische Lexicon« (Leipzig 1726) mit folgendem Zitat (Sp. 588) untermauert: *Daß Ebbe und Fluth sey, ist eine ausgemachte Sache, und der Augenschein zeigt es hier und dar, ohnerachtet sich die Natur-Kündiger wegen der Ursach, und wie es zugehe, nicht vergleichen können, wird auch wohl unausgemacht bleiben.*

Doch durch das Studium von Wasserstandsmessungen an vielen Küstenorten kam man nach und nach der Gezeitenursache näher. Dabei wurde die wechselnde Höhe des Meeresspiegels an vertikal errichteten Stäben mit gleichmäßig angeordneten Kerben und später an metrisch unterteilten Messlatten in ufernahen Becken abgelesen. Später wurde diese visuelle Methode durch mechanisch registrierende Schwimmkörper ergänzt. Dabei war das Messbecken durch einen Kanal mit der offenen See verbunden. Durch das Gesetz der kommunizierenden Röhren ist der Wasserstand im Becken identisch mit dem des Meeres, aber seegangsbedingte Schwankungen höherer Frequenz werden weitgehend gedämpft. So entstehen recht gleichmäßige Aufzeichnungen des Meeresspiegels im Zeitbereich von Stunden bis Tagen. Fernab von Küsten versagt diese Methode, und der Wasserstand wird durch

Druckmessungen bestimmt, d.h. durch das Gewicht der Wassersäule über dem Sensor. Der Drucksensor wird am Meeresboden verankert und seine Messergebnisse werden über zuvor eingestellte Zeitspannen von Wochen bis Monaten im Gerät gespeichert. Die begrenzte Arbeitsdauer der Batterien sowie die verfügbare elektronische Speicherkapazität bestimmen hierbei mit dem zuvor eingestellten Messintervall die erreichbare Aufzeichnungslänge. Diese Methode ist technisch recht aufwendig und wird vorrangig in der Meeresforschung eingesetzt, da die Verankerung stets eingeholt und neu gesetzt werden muss und dafür recht teure Schiffskapazität benötigt wird.

Neuerdings wird aber parallel zur Verankerung des Drucksensors eine zweite Verankerung gesetzt. Beide sind am Meeresboden mit einem Kabel verbunden, um über eine Oberflächenantenne der zweiten Verankerung die Messdaten zeitnah an Satelliten übermitteln zu können. Dadurch wird eine aktuelle Auswertung der übermittelten Daten möglich. Dies ist von besondere Bedeutung für moderne Erkennungs- und Vorhersagesysteme hinsichtlich sogenannter Riesenwellen, die im Pazifik auch »große Welle im Hafen« (japanisch: Tsunami) genannt werden. Verantwortlich für ihre Entstehung sind unterseeische Vulkanausbrüche und/oder Seebeben infolge tektonischer Verwerfungen entlang der Kontinentalplatten unserer Erde. Die Wasserberge dieser Wellen bestehen aus sogenanntem Verdrängungswasser. Bei Kenntnis der mittleren Dichte des Wassers über dem Drucksensor kann recht genau auf die Höhe des darüberliegenden Wasserberges geschlossen werden, der jedoch auf hoher See oftmals geringer als ein Meter ist und an Bord von Schiffen kaum wahrgenommen wird. Sind zusätzlich mehrere dieser Messanlagen in einem Seegebiet verankert, kann zwischen den einzelnen Messstationen der Zeitverzug der gemeldeten Maximalhöhen bestimmt werden. Daraus wird dann auf Richtung und Geschwindigkeit der Wellenausbreitung geschlossen. Die mittlere Wassertiefe der betroffenen Ozeanbecken sowie die Entfernung zwischen den Drucksensoren und den bedrohten Küstenstreifen, die in Laufrichtung des Wasserberges liegen, bestimmen prinzipiell die verfügbare Vorwarnzeit. Wegen der rasanten Laufgeschwindigkeit von bis zu 800 km/h ist selbige recht kurz, so dass oft weniger als eine Stunde Vorwarnzeit verbleibt. Dabei können sich die ausgelösten Wellenzüge horizontal über etliche hundert Kilometer erstrecken. Schließlich türmen sie sich in Küstennähe, bei flacher werdenden Wassertiefen, auf Höhen von bis zu 50 m auf und dringen dadurch recht weit in das Inland vor, um nicht nur in den Häfen erhebliche Schäden zu hinterlassen.

Damit alle Messeinrichtungen des Wasserstandes, auch Pegel genannt, überall vergleichbare Werte liefern, wurde international ein festes Bezugsniveau eingeführt. Dieses wird Pegelnull genannt und sollte weltweit mit dem niedrigstmöglichen Niedrigwasser übereinstimmen. Aus historischen Gründen bezieht es sich manchmal auch auf die Höhe des mittleren Springniedrigwassers. Im letzten Falle wird dann eine entsprechende Korrektur

nötig, damit keine negativen Pegelwerte auftreten. Schließlich ist man übereingekommen, dass der Bezugswert fünf Meter unter dem mittleren Wert des Meeresspiegels liegt, dem sogenannten Normalnull (NN). Seit 1993 gilt bei uns einheitlich das Deutsche Haupthöhennetz, das bereits im Jahre 1879 durch die Berliner Sternwarte festgelegt wurde.

Entlang der Küsten der Nordsee vollzieht sich in reichlich sechs Stunden ein immerwährender Wechsel des Wasserstandes um örtlich bis zu sechs Meter. Für die dortigen Küstenbewohner wurde damit eine natürliche Uhr bereitgestellt, deren Gang recht genau ist. So ist es auch nicht verwunderlich, dass die Gezeiten oder Tiden letztendlich einen festen Platz in der niederdeutschen (Tiet) und angelsächsischen Sprache (tide) belegten und endlich auch den hochdeutschen Begriff (Zeit) prägten. In diesem Sinne kann die Zeit allgemein auch als Veränderung räumlicher Strukturen entlang der Küsten begriffen werden. Mit einsetzender Ebbe sinkt der Meeresspiegel und lässt vielerorts einen mehrere Kilometer breiten Küstenstreifen als schlammiges Wattgebiet zurück. Eingebettete trockene Bereiche können als Sandwatt gut begehbar werden, während das feuchtere Schlickwatt für den Strandwanderer eher tückisch ist, speziell durch sich rasch füllende Flutrinnen, auch Priele genannt. Hinzu kommt der oft plötzlich einsetzende Seenebel, der die Orientierung im Watt drastisch erschwert.

Völlig anders stellt sich aber der Gezeitenwechsel entlang felsiger Küstenabschnitte dar. Mit der Ebbe tauchen hier unerwartet Klippen auf, d.h. schroffe Einzelfelsen, die während der Flut nicht an der Meeresoberfläche auszumachen sind. Für die küstennahe Schifffahrt ergeben sich dadurch Gefahrensituationen, in Europa vorrangig vor der französischen Küste der Bretagne. Hier kann der Unterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasser, auch Tidenhub genannt (Abb. 1), streckenweise 13 m erreichen. Im englischen Bristol-Kanal werden diesbezüglich sogar Werte bis zu 14 m beobachtet. Andere Überraschungen halten flache Küstenabschnitte bereit, die landeinwärts reichlich mit Vegetation bedeckt sind. Hier bilden die immergrünen Mangroven mit ihren Stelzwurzelstöcken ein schwer zu durchdringendes Dickicht. Entlang der afrikanischen Westküste, beispielsweise vor Liberia, durchsetzen viele Rinnsale und Bäche diese Areale, die nur mit kleineren Booten bei Flut zu erkunden sind. Die regelmäßig einsetzende Ebbe erlegt diesen Fahrten jedoch ständig Pausen auf.

Schon die erste Bilanz zu den Auswirkungen der Meereszeiten offenbart, dass für eine sichere Küstenschifffahrt ein gewisses Zeitgefühl unabdingbar ist. Dies gilt auch für gewisse Küstenabschnitte anderer Kontinente. So machte schon der spanische Entdecker Magellan (1480–1521) im Jahre 1520 eine unliebsame Erfahrung, als er die später nach ihm benannte Meeresstraße zwischen dem südlichen Ende Südamerikas und Feuerland besegelte. Bis zu 11 m Tidenhub am Osteingang dieser Durchfahrt, felsige Küsten, Nebel, Sturm und eine etwa 600 km lange sowie 20 bis 30 km breite Wasserzone mit



Abb. 2a–b Hafen in der Fundy Bay bei Hoch- und Niedrigwasser. (Foto: Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

etlichen irritierenden Seitenarmen bewältigte er erstmalig durch seemännisches Können. Aus Sicht der heutigen Seefahrt, ausgerüstet mit Echolot, Satellitennavigation und ständiger Wetterberatung, ist diese Leistung nicht hoch genug zu würdigen. Andere Entdeckungsreisende, wie der Engländer James Cook (1728–1779), machten vergleichbare Erfahrungen. Bei Flut besegelte Cook 1778 eine Bucht Alaskas. Bei Ebbe bekam sein Schiff Grundberührung und kam erst während der darauffolgenden Flut wieder frei. Infolge dieses Vorkommnisses trägt diese Bucht heutzutage seinen Namen.

Sehr eindrucksvolle Wasserstandsunterschiede zwischen Ebbe und Flut werden in der etwa 220 km langen amerikanisch-kanadischen Fundy Bay beobachtet. Sie ist etwa 60 km breit und erstreckt sich zwischen den kanadischen Provinzen Nova Scotia und New Brunswick am Golf von Maine. Beträgt der Tidenhub an ihrer Mündung annähernd vier Meter, so wächst dieser landeinwärts auf neun Meter, um in den sich verzweigenden Enden 12 bis 21 m zu erreichen (Abb. 2a–b). Derartig drastische Wasserstandsunterschiede verändern ständig die anliegenden Küstenkonturen. Dies hat einen nachhaltigen Einfluss nicht nur auf die Seefahrt durch erzwungene Liegezeiten, sondern auch auf die ökonomischen Infrastrukturen der Häfen. Noch heutzutage ist das Befahren dieser Gewässer für Revierunkundige ein echtes Wagnis. Um daran gebundene Risiken für die Flussschifffahrt zu verringern, muss der Erzeugungsmechanismus der Gezeiten verstanden sein. Ausgerüstet mit diesem Grundwissen ist man dann auch in der Lage, technisch aufwendige Schutzeinrichtungen zu bauen, wie beispielsweise jene im Londoner Hafen (Abb. 3).

2. Gezeitenmotor

Die allseits bekannten Meereswellen werden vom Wind angeregt und sind damit irdischen Ursprungs. Anders dagegen steht es mit dem Antrieb von



Abb. 3 1982 erbaute Flutbarriere in der Themse, nahe des Stadtteils Woolwich im östlichen London, mit einer Breite von 520 m. Zwischen neun riesigen, auf Betonfundamenten ruhenden, holzschuhförmigen Wellenbrechern sind gewaltige Drehtore aus Stahl montiert, die sich bei extremer Flut aufrichten und das Inland von der Meereseite des Flusses abriegeln, um landeinwärts dringenden Wassermassen ihre Hochwasserspitzen zu nehmen. (Foto: Paul Pichota/Wikipedia, CC BY-SA 2.0)

Ebbe und Flut und den durch sie ausgelösten Wellenmustern und Strömungen. Seit dem Altertum ist bekannt, dass der Mond unserer Erde bei jeder Vollmondphase die gleiche Seite zuwendet, aber auch den wechselnden Wasserstand der Gezeiten kontrolliert. Später erkannte man für den Rhythmus der Gezeiten zwei Ursachen. Einmal wirken die Anziehungskräfte des Mondes und der Sonne auf alle Teilchen der gasförmigen, flüssigen und festen Erdhülle. Ihre Erforschung war auf der Erde äußerst schwierig, da die Größenordnung der zu messenden Kräfte für lange Zeiten im Fehlerbereich der verfügbaren Instrumente lag, und so verblieb dafür nur das natürliche Laboratorium unseres Sonnensystems. Seine Planeten waren mit ausreichender Masse versehen und sollten den gewünschten Nachweis erbringen. Am Ausgang des 16. Jahrhunderts folgerte Johannes Kepler (1571–1630), ein Schüler des Astronomen und Mathematikers Tycho Brahe (1546–1601), aus sorgfältigen Messungen der Planetenpositionen die drei noch heute gültigen Gravitationsgesetze:

1. Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, und diese befindet sich jeweils in einem der beiden Brennpunkte der Bahnellipse.
2. Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und den Planeten überstreicht in gleicher Zeit die gleiche Fläche (Flächensatz).
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen der Bahnellipsen.

Alle drei Aussagen wurden einige Jahre später von Isaac Newton (1643–1727) theoretisch bestätigt. Er führte mit seiner 1686 veröffentlichten Arbeit auch den Begriff der Gravitationskraft ein und bewies, dass die zwischen zwei Massenpunkten wirkende Gravitationskraft, zum Beispiel zwischen den Schwerpunkten von Mond und Erde, umgekehrt proportional dem Qua-

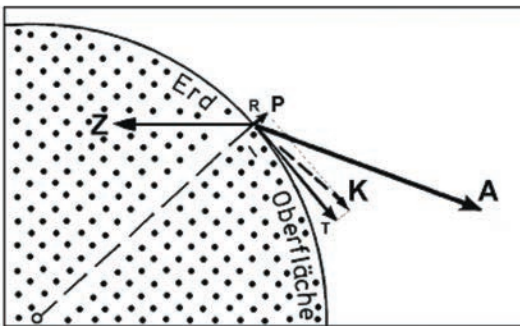
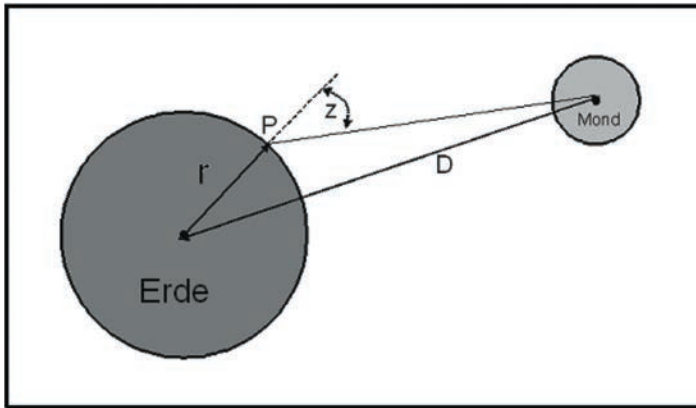


Abb. 4a–b Zweikörpergravitationssystem Erde – Mond mit der Distanz D zueinander, dem Erdradius r , dem Zenitwinkel des Mondes z am Ort P auf der Erdoberfläche (oben) und den hier wirkenden Kraftvektoren (unten):

A: Anziehung des Mondes; Z: scheinbare Flieh- oder Zentrifugalkraft im System Erde – Mond; K: resultierende Kraft aus A und Z; R: Radialanteil von K; T: Tangentialanteil von K, verantwortlich für die Gezeiten.

drat ihrer Entfernung ist. Zudem ist diese Kraft direkt proportional den Massen beider Himmelskörper und wirkt in Richtung ihres Verbindungsvektors. Die für praktische Berechnungen notwendige Gravitationskonstante wurde nahezu einhundert Jahre später, im Jahre 1778, durch Henry Cavendish (1731–1810) mittels Laborexperimenten gefunden. Erst die Kenntnis dieses Zahlenwertes ermöglichte einen quantitativen Vergleich der möglichen Gravitationskräfte und damit die Schlussfolgerung, dass vornehmlich die Gravitationskräfte von Mond und Sonne auf unsere Erde wirken und die der anderen Planeten hinsichtlich der ausgelösten Gezeiten kaum eine Rolle spielen, da entweder ihre Masse zu gering oder aber ihre Distanz zur Erde zu groß ist.

Die zweite Kräftegruppe besteht aus Flieh- und Zentrifugalkräften, die bei der Bewegung der Bewegungssysteme Erde – Mond und Erde – Sonne um einen gemeinsamen Schwerpunkt entstehen. Ihre Wirkung wird durch das Zweikörpersystem der Astronomie beschrieben (Abb. 4a). Dabei umkreist eine kleinere die größere Masse konzentrisch. Beispielsweise ist für das System Erde – Mond das Verhältnis der Massen annähernd 81 : 1 und sein Schwerpunkt liegt innerhalb des Erdkörpers, etwa 1700 km unterhalb der Erdoberfläche. Dieser Drehpunkt wandert während des Umlaufs

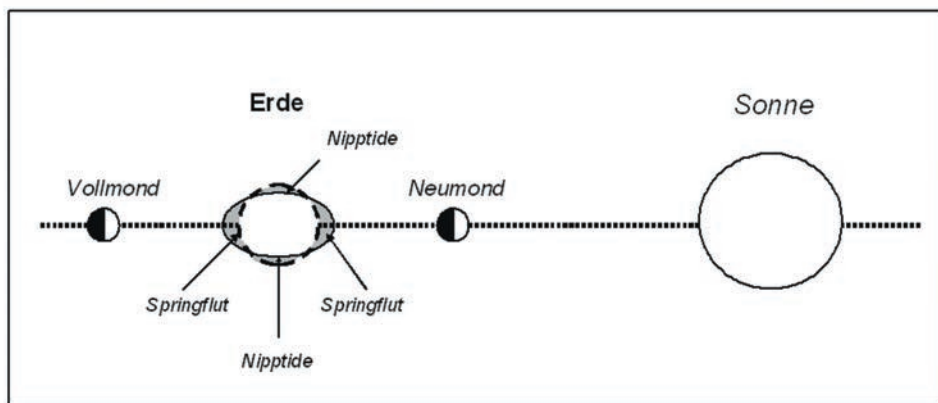


Abb. 5 Ebbe und Flut auf einer völlig mit Wasser bedeckten Erde ergeben eine Ellipsegestalt (grau) in Abweichung von der angenommenen Kreisform der Erde (gestrichelt); bei Voll- und Neumond überlagert sich die Gravitation von Mond und Sonne mit dem Ergebnis der Nipptiden und Springfluten.

des Mondes um die Erde auf der gemeinsamen Verbindungslinie im Verlauf eines Monats hin und her. Die generierte Zentrifugal- oder Fliehkraft wirkt dabei als sogenannte Scheinkraft immer nach außen, d.h. von der Erde weg in Richtung des Mondes, und ihre Stärke wird ausschließlich durch die Rotationsgeschwindigkeit der Erde bestimmt. Durch die Überlagerung von raumzeitlich veränderlichen Gravitations- und Fliehkraften entstehen auf der Erdoberfläche zeitlich variable Schubkräfte, deren horizontale Komponenten die weltweiten Gezeiten auslösen (Abb. 4b). Stärke und Richtung der Gravitationskraft wird dabei durch die Stellung beteiligter Himmelskörper geregelt. Für die Entstehung der Gezeiten ist somit die monatliche Rotation um den gemeinsamen Schwerpunkt verantwortlich. Zur Zeit des Voll- und des Neumondes, wenn Erde, Mond und Sonne geradlinig angeordnet sind, überlagert sich die Gravitation von Sonne und Mond. Dies erzeugt die sogenannte Springtide (Abb. 5). Reichlich eine Woche nach der Vollmondphase, zur Zeit des Viertelmondes, stehen die beteiligten Kräfte annähernd rechtwinklig zueinander, d.h. ihre Resultierende schwächt sich deutlich ab und es entsteht die Nipptide.

Da bekanntlich zu jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft gehört, existieren auf einer mit Wasser bedeckten Erde stets zwei Wasserberge und dazu, im rechten Winkel, zwei Täler. Mit dieser Vorstellung haben schon große Forscher wie Kepler und Newton, aber auch Daniel Bernoulli (1700–1782), Pierre-Simon Laplace (1749–1827) und Henri Poincaré (1854–1912) ihre Gezeitenstudien begonnen. Ihren Schlussfolgerungen standen aber die Erfahrungen der Seefahrer und Küstenbewohner gegenüber. Diese berichteten, dass die Gezeitenströme durch Hindernisse in Form von Küstenlinien mit vielgestaltigen Flussmündungen, Inseln und unterseeischen Landschaften

hoch variabel sind. Auch wurde erkannt, dass die Wirkung unserer Sonne auf die weltweiten Wasserstandsänderungen der Gezeiten nur etwa 45 Prozent derjenigen des Mondes ausmacht, obgleich die Anziehungskraft der Sonne auf die Erde etwa 175-mal größer ist als die des Mondes. Dies begründet sich durch die Entfernung zwischen Sonne und Erde, die circa 400-mal größer ist als die zwischen Mond und Erde. Der überwiegende Einfluss des Mondes auf die Gezeiten resultiert folglich aus seiner recht geringen Distanz zur Erde, denn die resultierende Gezeitenkraft verringert sich mit der dritten Potenz des Abstandes der beteiligten Massen.

Hinsichtlich der an die Gezeiten gekoppelten Strömung spielt nun wieder die Beschaffenheit der betroffenen Meeresbecken eine ausschlaggebende Rolle. In den meisten Meeresgebieten dominiert die sogenannte Halbtags-tide (M_2) mit einer Periode von einem halben Mondtag, d.h. von 12 Stunden und 25 Minuten. In anderen Gebieten herrscht jedoch die solare Eintagstide (S_1) mit der Periode eines Sternentages von 23 Stunden und 56 Minuten vor. Dazwischen sind noch allerlei Mischformen zu erwarten, die das theoretische Gezeitenproblem erheblich komplizieren. Verantwortlich für die Mischformen der Gezeiten ist die Stellung des Mondes bezüglich der Äquatorebene der Erde. Die Bahnen des Mondes und der Erde sind zueinander um fünf Grad geneigt, und damit steht der Mond während seines Umlaufs um die Erde einmal unter- und einmal oberhalb der Ebene des Erdäquators, weshalb sich an einem Ort auf der Erde der Betrag der Gezeitenkraft ständig verändert.

Die Mondtiden mit zwei Hoch- und zwei Niedrigwassern herrschen im Atlantik und in der Nordsee vor, aber nicht im Golf von Mexiko. Entlang der Westküste der Vereinigten Staaten von Amerika, des Japanischen und des Roten Meeres treten überwiegend gemischte Gezeitenformen auf. Die eintägige Gezeitenform ist hingegen in den Golfen von Mexiko, Persien, Thailand und der Philippinen anzutreffen und sie dominiert auch im Golf von Tongking, in der Javasee und im Ochotskischen Meer. Letztgenanntes Meer formt den Penschinabusen, wo sich ein Tidenhub von reichlich acht Metern beobachten lässt. Zusätzliche Komplikationen erfahren Gezeiten durch die zeitlich wechselnde Entfernung von Mond und Erde sowie die variable Deklination von Mond und Sonne. Letztere ist die Höhe der Himmelskörper über oder aber unter dem Himmelsäquator. Dabei wechselt die Neigung der Mondbahn um die Erde gegenüber dieser Äquatorebene mit einer Periode von 18,6 Jahren. Vergleichbare Rhythmen werden beispielsweise in Langzeitmessungen arktischer Pegelstationen, in der Oberflächenwassertemperatur und in Wetteraufzeichnungen festgestellt. Damit wird die Gezeitenforschung zu einem gemeinsamen Problem von Astronomen, Klimaforschern und Ozeanographen, u.a. um die klimatische Auswirkung dieser annähernd 19-jährigen Periodizität zu verstehen.

3. Gezeitenströme

Die Gezeiten werden immer von wechselnden Strömungen begleitet, den Gezeiten- oder Tidenströmen. Ihre Geschwindigkeit wird üblicherweise in Seemeilen (1 sm = 1,852 km) pro Stunde (h), d.h. in Knoten (1 Knoten = 1 sm/h; entsprechend ca. 0,5 m/s) angegeben. Entlang der Küsten fällt der Wechsel oder das Kentern des Tidenstromes mit der Zeit des Hoch- oder Niedrigwassers zusammen und es herrscht dann das sogenannte Stillwasser. Auf hoher See kann der Gezeitenstrom aber auch erst einige Stunden nach dem Hoch- oder Niedrigwasser kentern. Recht übersichtlich ist der Verlauf der Tidenströmung in den Flüssen, in die sie unterschiedlich weit landeinwärts vordringt. In den meisten Flüssen folgt diese Strömung für einige Stunden der Richtung der Flussachse, kommt vorübergehend zum Stillstand und kentert dann in die Gegenrichtung. Dabei ist die Andauer von Flut- und Ebbstrom in der Nähe der Flussmündung annähernd vergleichbar. Weiter flussaufwärts kann sowohl die Zeit der einen als auch der anderen Richtung dominieren. Der Einfluss dieser Kenterströmung erlischt an der Tidengrenze des jeweiligen Flusses. Diese natürliche Barriere liegt beispielsweise bei 70 km in der Weser, bei 90 km in der Schelde, bei 110 km in der Themse, bei 135 km in der Elbe, bei 144 km in der Seine, bei 250 km im Hudson River und erreicht im Amazonas eine Küstenentfernung von über 850 km.

In manchen Flüssen ist diese Strömungsgrenze durch Sperrwerke künstlich flussaufwärts verlagert worden, um eine möglichst lange Flussstrecke für die Schifffahrt zu erreichen. Ohne Gezeitenströmung würden viele Flüsse durch mitgeführtes Sediment und gröberes Geröll allmählich verflachen und für die kommerzielle Schifffahrt unbefahrbar werden. Bei Flut bremst der Tidenstrom grundsätzlich die Flusswasserabfuhr, auch Oberwasser genannt, während die Abfuhr bei Ebbe eine Verstärkung erfährt und damit reinigend auf das Flussbett wirkt. Ein vergleichbarer Effekt wird im Flachwasser entlang vieler Küsten beobachtet. Hier setzt der Tidenstrom häufig parallel zur Küste, was sich jedoch in Richtung des offenen Meeres mehr und mehr ändert.

Auf der Grundlage von Langzeitbeobachtungen der sich ständig verändernden Position verankerter Schiffe machte man eine gravierende Feststellung. Offensichtlich nimmt das Schiff an der Ankerkette wechselnde Positionen in der Form eines Kreissegments ein, dessen Länge von der gesteckten Kettenlänge abhängt. Auch entfernt oder nähert es sich abwechselnd der Ankerposition. Dadurch erhält die zeitliche Positionskurve annähernd die Form einer Ellipse, die etwa nach 12,5 Stunden geschlossen wird. Mit anderen Worten, das Schiff folgt dem sich ständig drehenden Gezeitenstrom, während unter dem Kiel die Wassertiefen rasant wechseln können. Aus diesem Grunde werden seit 1848 die Beobachtungen von Tidenströmungen aus vielen Seegebieten durch nationale Schifffahrtsbehörden zusammengestellt und der Schiffsführung verfügbar gemacht.

Als erste deutsche Seekartensammlung wird der »Nouvel Atlas de Marine« anerkannt, 1749 von der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin publiziert. Nach 1815 übernahm das Preußische Handelsministerium die Belange der Hydrographie. Aber schon 1861 wurde das Marineministerium für die Herausgabe von Seekarten zuständig, mit einem eigens dafür eingerichteten hydrographischen Büro. Es versorgte die Schifffahrt auch mit den »Nachrichten für Seefahrer« u.a. über verbesserte Hilfsmittel der astronomischen Navigation wie Sextanten zur Bestimmung der geographischen Breite und Borduhren, auch Chronometer genannt, zur Bestimmung der geographischen Länge. Ab 1874 gab das Marineobservatorium in Wilhelmshaven auch notwendige Zusatzinformationen über Schiffs- und Erdmagnetismus, Chronometergenauigkeit und Gezeitenwechsel heraus. Zuvor nahm 1868 die Norddeutsche Seewarte in Hamburg ihre Tätigkeit auf. Daraus wurde 1875 die maritim-meteorologisch orientierte Deutsche Seewarte, die der kaiserlichen Admiralität unterstand. Nach dem Zweiten Weltkrieg verfügte der Kontrollrat der alliierten Siegermächte 1945 für alle maritimen Belange die Gründung des Deutschen Hydrographischen Institutes (DHI) in Hamburg. Es hatte Zugriff auf die Unterlagen der ehemaligen Seewarte und sollte für alle Besatzungszonen gleichermaßen zuständig sein. Im DHI wurden ab 1950 die erforderlichen Kartenwerke und Seehandbücher jährlich aktualisiert. Zuständige Behörden der damaligen Sowjetischen Besatzungszone, und danach die der DDR, fühlten sich durch den inzwischen waltenden Kalten Krieg zwischen den politischen Blöcken in Ost- und Westeuropa veranlasst, im Jahre 1950 einen eigenen Seehydrographischen Dienst (SHD) zu gründen. Mit Sitz in Berlin wurde dieser der Hauptverwaltung der Seepolizei unterstellt und unterstützte seit 1956 vornehmlich die Belange der ostdeutschen Marine. Ab 1952 erfüllte der SHD eigenverantwortlich alle hydrographischen Aufgaben, vornehmlich in der Ostsee. Nach der friedlichen Wiedervereinigung Deutschlands im Jahre 1990 wurde der SHD mit dem DHI und dem Bundesamt für Schiffsvermessung (BAS) zu einer Institution mit Hauptsitzen in Hamburg und Rostock zusammengefasst. Das neu gegründete Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) gab lediglich die Aufgaben für Seezeichen an das Wasser- und Schifffahrtsamt in Stralsund ab. Es erfüllte nun in bewährter Tradition des ehemaligen DHI mit modernen Hilfsmitteln die Wünsche der Seeleute entlang aller deutschen Küsten und in ausländischen Gewässern. So gab beispielsweise das »Handbuch für die Süd- und Ostküste Afrikas« des DHI von 1966 (Nr. 2045) für die Ansteuerung des Hafens von Beira/Mosambik folgende Mitteilung:

Im Mündungsgebiet und Unterlauf von Rio Pungue sind die Ströme sehr stark, besonders wenn der Fluss hohes Oberwasser führt. Bei Beira erreicht der auslaufende Strom dann eine Geschwindigkeit von 5 sm/h zur Springzeit und von 2 bis 3 sm/h zur Nippzeit. Bei niedrigem Flusswasserstand, also zur trockenen Jahreszeit, wird der auslaufende Strom zur Springzeit 4

sm/h, zur Nippzeit 1,5 bis 2 sm/h. Die Geschwindigkeiten, die der einlaufende Strom erreicht, schwanken zwischen 1 und 3 sm/h. Der auslaufende Strom soll zur Springzeit 7 bis 8 Stunden lang dauern, der einlaufende 5 bis 4 Stunden. Die Stillwasser sind sehr kurz. Die Ströme setzen stellenweise schräg zum Fahrwasser und können Schiffe gefährlich versetzen. Da der Grund jedoch weich ist, werden festgekommene Schiffe bei steigendem Wasser meist ohne Beschädigung wieder frei.

Dieses Beispiel belegt, dass die Tidenströmung für die Schifffahrt essentiell ist. Sie kann, je nach Seegebiet, sowohl entgegen oder mit dem Uhrzeigersinn drehen. Auf dem offenen Meer treten alternierende Gezeitenströme aber nur entlang der Übergangszonen zwischen entgegengesetzten Gezeiten auf. Zusammenfassend kann diesbezüglich festgestellt werden, dass die Gezeitenströmung des Weltmeeres und die dadurch bedingte Versetzung der Schiffe außerordentlich wechselhaft sein können und eine sichere Schifffahrt nur mit ausreichender Gezeiteninformation möglich ist.

Gezeitenbedingte Schiffsversetzungen extremer Art werden beispielsweise aus dem Pentland Firth berichtet, einer Wasserstraße zwischen Schottland und den Orkneyinseln. Hier sind Tidenhübe und Stromstärken keineswegs immer proportional. Offensichtlich spielt dabei die Geometrie der Wasserstraße eine ausschlaggebende Rolle. Alle Aussagen über laterale Wasserstandsgefälle, die sich auf das sogenannte Seekartennullniveau beziehen, d.h. auf die Nullebene gezeitenfreier Gewässer, beinhalten naturgemäß eine Entfernungsangabe. Dabei kommt es scheinbar zu einem Paradoxon: Im Bristolkanal und in der Fundy Bay lösen Tidenhübe von mehr als zwölf Metern lediglich Stromgeschwindigkeiten von vier bis fünf Knoten aus. In einigen vergleichbar engen Durchfahrten durch die pazifische Inselgruppe der Aleuten treten aber reißende Ebbströme von bis zu zehn Knoten auf, obwohl die dazugehörigen Tidenhübe nur etwa einen Meter erreichen. Offenbar ist nicht nur die Gezeitenperiode eines halben Mondtages, sondern auch die eines ganzen Sonnentages dafür verantwortlich, d.h. hier überlagern sich beide Tidenhübe mit einem variierenden Zeitverzug. Fällt beispielsweise das Hochwasser der Mondgezeit mit dem Hochwasser der Sonnengezeit zusammen, dann entstehen auch Spitzengeschwindigkeiten im Gezeitenstrom. Fällt aber das Hochwasser der Sonnengezeit mit dem Mondniedrigwasser zusammen, dann ist der Gezeitenstrom wesentlich schwächer. Obgleich die Wirkung anderer Gezeitenquellen für diese Region eher unbedeutend ist, macht die zeitlich variierende Überlagerung dieser beiden Tidenhübe das Problem gezeitenbedingter Schiffsversetzungen verwirrend genug.

Bereits der in spanischen Diensten stehende Luis Váez de Torres (ca. 1565–1610) machte Bekanntschaft mit derartigen Gefahren. Er durchsegelte 1606 die Wasserstraße zwischen der Südküste von Papua-Neuguinea und der Nordspitze Australiens, dem Kap York. Später bekam diese Seestraße seinen Namen, obwohl der Niederländer Willem Janszoon (ca. 1570 – ca. 1630)

dieses Bravourstück bereits sechs Monate zuvor vollbracht hatte. Die Ursache liegt wohl darin, dass zur damaligen Zeit neu entdeckte Wasserstraßen peinlichst geheim gehalten wurden und die Nachricht von der seemännischen Meisterleistung Torres' am spanischen Königshofe rascher verbreitet wurde. Unberechenbare Gezeitenströme bis zu acht Knoten, ein Gewirr von Korallen, mangelhafte Seekarten und Ortsunkenntnis drohten dennoch beide Unternehmungen scheitern zu lassen. Davon abgeschreckt wagte James Cook erst 1770 eine Wiederholung dieser Passage. Unabhängig von derartigen Widrigkeiten warten andere Seegebiete mit noch völlig andersartigen Gefahrenquellen auf.

4. Im Banne des »Malstroms«

Die berühmte Seekarte von Gerhard Mercator (1512–1594) wurde erst nach seinem Tode im Jahre 1595 veröffentlicht. In ihr ist vor Nordnorwegen, bei der Inselgruppe der Lofoten, im Küstenbereich um 67° (49–45)' N, der Malstrom verzeichnet. Nach der kleinen Insel Mosken benannt, ist er den dortigen Küstenbewohnern auch als Moskenstrom bekannt. In diesen Gewässern wurde schon vor tausend Jahren ergiebig gefischt, d.h. seine Gefahren für die Seefahrt wurden von Generation zu Generation überliefert. Besagter Strom ist, bis auf eine Untiefe, frei von Flachwasserstellen. Diese liegt mit einer Wassertiefe von etwa 13 m nahezu in der Mitte des Fahrwassers Moskenstraumen und ist für den Fahrensmann auch bei völlig ruhigem Wetter sichtbar. Durch das permanent angeströmte Hindernis entstehen ständig neue Turbulenzen, die sich durch eine weiß schäumende Wasserzone an der Oberfläche der Durchfahrt abbilden. Diese ist bei 67° 48,5' N nur vier Kilometer breit und etwa 50 m tief. Hier überlagern sich Gezeitenströme und Winddrift in vielfältiger Weise. Im Ergebnis entstehen heftige, kleinere Strudel und etwas größere Wirbelgebilde, die durchaus in der Lage sind, Küstenboote unbeabsichtigt kreisen zu lassen. Die Logbücher erfahrener Kapitäne weisen aus, dass ein Schiff mit einer Fahrt von etwa zehn Knoten oftmals nicht in der Lage ist, diese Wirbel zu überwinden. Daher wird generell angeraten, dieses Seegebiet zu meiden, besonders aber während des sturmreichen Winterhalbjahres. Somit ist es auch nicht verwunderlich, dass die Legenden über die dortigen Gefahren nicht abreißen. Hinter den überlieferten Erzählungen stehen vergleichbare Berichte aus der Antike in keiner Weise zurück. So berichtete der Grieche Homer (wohl 7./8. Jahrhundert v.u.Z.) über die beiden Ungeheuer Scylla und Charybdis. Diese treiben jeweils auf den gegenüberliegenden Seiten der Seestraße von Messina ihr Unwesen, indem sie durch gewaltige Strudel die Schiffe erbarmungslos in die Tiefe ziehen. Davon inspiriert griff Friedrich Schiller (1759–1805) im Jahre 1797 dieses Thema in seiner Ballade »Der Taucher« auf. Einer der Verse lautet:



Abb. 6 Schiffe verschlingender Malstrom, gezeichnet von Harry Clarke als Illustration für Edgar Allan Poes Geschichte »Descent into the Maelstrom« aus dem Jahr 1919. (Foto: Wikipedia)

*Und wie er tritt an des Felsen Hang,
Und blickt in den Schlund hinab,
Die Wasser, die sie hinunter schlang,
Die Charybde jetzt brüllend wiedergab,
Und wie mit des fernen Donners Getöse
Entstürzen sie schäumend dem finstern Schoße.*

Ein paar Jahre später, im Jahre 1834, erschien ein englischer Artikel, der detailliert den Wasserwirbel des Malstroms vor Nordnorwegen beschreibt. Der amerikanische Novellist Edgar Allan Poe (1809–1849) verfasste dazu im Jahre 1841 seine düstere Geschichte »Ein Sturz in den Malstrom« (Abb. 6).

Malströme verschiedenster Sorte gibt es auch in anderen Teilen des Weltmeeres, wie beispielsweise die sogenannten Swilkies im Pentland Firth, die der Akunstraße im Aleutenbogen, die im Japanischen Meer, die vor British Columbia sowie die in den nach Magellan und Torres benannten Wasserstraßen. Eine gefährliche Durchfahrt vor der Westküste Grönlands wartet zusätzlich noch mit treibenden Eisschollen auf. Dennoch haben die dort lebenden Inuit auf ihren Jagdfahrten mit Kajaks und kleineren Booten ge-

lernt, die kurze Zeitspanne des Kenterns des Gezeitenstromes für eine rasche Stromüberquerung zu nutzen. Eindrucksvolle Berichte über andersartige Gezeitenströmungen verdanken wir dem Literaten Robert Louis Stevenson (1850–1894). Von der fikionalisierten Insel Aros, eigentlich der zu den Inneren Hebriden zählenden, der Isle of Mull vorgelagerten Gezeiteninsel Erraid, schilderte er die schäumende Brandung entlang vieler Klippen, die bei Flut einen breiten Gürtel verwirbelten Wassers erzeugt. Während des Wechsels von Ebbe und Flut herrscht dort Totenstille, dann setzt aber plötzlich das etwa sechs Meilen weit zu hörende Getöse des gefährlichen Flutstromes ein.

Kehren wir nochmals in die Küstengewässer vor Nordnorwegen zurück, in unmittelbarer Nachbarschaft des Polarkreises. Hier befindet sich eine andere, recht gefährliche Wasserstraße. Südlich von Bodø schneidet der etwa 30 m tiefe und drei Kilometer breite Saltfjord annähernd 20 km in das östlich liegende Festland. Dieser Fjord steht durch den Sund Saltstraumen mit dem Skjerstadvjord in Verbindung. Zusammen mit kleineren Nebenfjorden formen alle drei ein ausgedehntes Wasserbecken mit einer Fläche von etwa 250 km². An der engsten Sundstelle ist die Durchfahrt bei einer Wassertiefe von 30 m nur 125 m breit. Hier kommt es zu einer der großartigsten Naturerscheinungen, die alljährlich einen großen Besucherstrom anlockt. In der Enge dieser Wasserstraße, die auch durch eine gefährliche Klippe geteilt wird, läuft der Tidenstrom bei Flut nach Süden, aber bei Ebbe nach Norden. Obwohl der maximale Tidenhub am Küstenpegel Bodø mit zwei bis drei Metern nur als mäßig eingeschätzt werden kann, bewirkt der enge Durchlass, dass beim Kentern des Gezeitenstromes das Stillwasser nur wenige Minuten anhält. Schon eine Stunde vor oder aber nach der Zeit des Stillwassers erreicht die Strömung eine Stärke von bis zu sechs Knoten. Maximal hat der Nordstrom beim benachbarten Örtchen Storholm acht bis neun und der Südstrom sieben bis acht Knoten, in anderen Bereichen dieses Sunds aber mindestens drei Knoten. Hinzu kommt, dass dieser Gezeitenstrom bei vorherrschendem Westwind sehr unregelmäßig wird und sich die Eintrittszeit des Stillwassers dadurch um bis zu eine Stunde verzögern kann. Dies ist insofern von Bedeutung, da diese Seestraße nur während des kurzfristigen Stillwassers befahrbar ist. Andernfalls sorgt die unruhige Strömung für das Entstehen von kräftigen, mehrere Meter breiten, brodelnden Wirbeln mit tiefen Trichtern. Schließlich durchschießt der Strom die engste Stelle dieser Durchfahrt als tosender Strahl, einer der stärksten des Weltmeeres. Grandiose Ausmaße erreicht dieses Phänomen zur Zeit der Schneeschmelze. Dann rast dieser weithin hörbare Strom mit einer Geschwindigkeit von bis zu 18 Knoten durch sein Nadelöhr. Trotz dieser enormen Stromstärke reicht jedoch die verfrachtete Wassermasse nicht aus, um einen beständigen Ausgleich des Wasserspiegels zwischen den beiden durch den Sund verbundenen Fjorden zu bewirken. Zwischen ihnen verbleibt bei Hoch- und Niedrigwasser ein Wasserstandsgefälle von annähernd 1,3 m und mehr. Dadurch bietet der

Sund das Schauspiel eines regelrechten Kataraktes. Grobe Abschätzungen zur möglichen Energiegewinnung der Leistung dieses Naturschauspieles zeigen, dass in den sechs Stunden des Tidenhubs immerhin zwischen 70 000 und 310 000 Kilowatt umgesetzt werden. Aus Flussmündungen sind solche gewaltigen Naturschauspiele nicht überliefert. Dafür halten sie aber völlig andere Gefahren für den Fahrensmann bereit.

5. Gefahr für die Flussschifffahrt

Zu den eindrucksvollsten Darbietungen der Gezeiten zählen die Flussbrandungen. Sie entstehen dort, wo hohe Tidenhübe an trichterförmigen Flussmündungen auftreten, in denen die Flut auf einen Zeitraum von weniger als eine Stunde beschränkt ist. Dies bedeutet gleichfalls, dass nicht jede Mündung dieser Art eine solche Erscheinung hervorbringen kann. Die Flussbrandung kann recht unterschiedlich ablaufen, nämlich von einigen großen Wellenkämmen, die eine zuvor ruhige Wasseroberfläche überrollen, bis zu den wenigen, wallartig flussaufwärts stürmenden, schäumenden Wasserwänden voller Gischt. Letztere können größere Schiffe aus den Verankerungen reißen und kleinere zertrümmern oder kentern lassen. In unseren Regionen kennt man die Flussbrandungen unter der (indischen) Bezeichnung Bore. Im Englischen werden sie *severn* oder *trent* genannt. In den französischen Flüssen, wie Seine, Charante, Dordogne und Vilaine, sind sie als *Mascaret* bekannt. Vor der Regulierung der Seine im Jahre 1780 trat dieses Phänomen dort recht heftig auf. Gegenwärtig kommt es aber nur noch vor, wenn der Tidenhub an der Mündung, bei der Ortschaft Le Havre, den Wert von etwa acht Metern überschreitet. Dies geschieht im jährlichen Schnitt nur an 20 bis 25 Tagen, d.h. nur an fünf bis sieben Prozent aller Tage. Dabei verändert sich der Wasserstand während einer halben bis einer Stunde um etwa zwei Meter und der Gezeitenstrom erreicht Geschwindigkeiten zwischen minimal vier bis maximal zehn Knoten.

Wegen der kräftigen Gezeiten erscheint eine ausgewachsene Bore erwartungsgemäß auch am Ausgang der bereits genannten Fundy Bay, im *Petitcodiac River* und abgeschwächt im *Colorado River*. In Asien kommen derartige Flussbrandungen u.a. in den Mündungsarmen des Ganges und Indus vor. Eine grandiose Bore wird regelmäßig im chinesischen Fluss Tsien-Tang Kiang (*Qiantang*) beobachtet, der in die Bucht von Hangzhou mündet (Abb. 7). Hier treten Tidenhübe von bis zu elf Metern auf. Mit der sich verengenden Bucht, die bei Ebbe zu beachtlichen Teilen trockenfällt, beginnen sich die heranflutenden Wassermassen aufzustauen, um danach als wallartige Wasserwand von zwei bis drei Metern Höhe flussaufwärts zu donnern. Dabei werden bei Haining Spitzengeschwindigkeiten von 10 bis 15 Knoten erreicht. Ihr folgt die etwa zwei Meter hohe Nachbrandung. Im Endeffekt übertreffen die hier verfrachteten Wassermassen diejenigen der größten Wasserfälle der



Abb. 7 Flussbrandung (Bore) im Tsien-Tang Kiang bei Haining in China. (Aus: Defant 1953)

Erde um ein Mehrfaches, und das damit verbundene Getöse ist mit dem der Niagarafälle vergleichbar. Doch im Gegensatz zum ständigen Wassersturz der Niagarafälle ist dieses chinesische Schauspiel nach reichlichen fünf Minuten beendet. Anschließend hat sich der Wasserstand um drei bis fünf Meter erhöht, nimmt aber in den folgenden zweieinhalb Stunden noch geringfügig zu. Erst danach setzen die kräftigen Ebbströmungen ein. Wegen der beeindruckenden Wirkung haben die Chinesen über Jahrhunderte hinweg diesem Naturschauspiel eine tief religiöse Verehrung entgegengebracht.

Der spanische Eroberer Francisco de Orellana (1505/11–1546), der aus Quito in Ecuador kommend die Berggruppe der Kordilleren überquert hatte und auf den Rio Napo sowie nachfolgend auf den Amazonas gestoßen war, machte schon im Jahre 1542 eine beklemmende Erfahrung mit der Flussbrandung. Im Quellgebiet des Amazonas ließ er eine Brigantine bauen. Damit fuhr er 8000 km flussabwärts und wollte nicht wahrhaben, wovor die Eingeborenen gewarnt hatten. Alle Hinweise ignorierend begegnete ihm des Nachts das berühmte Krachwasser (indianisch: Pororoca). Ausgelöst durch die bis zu acht Meter hohen Tidenhübe im Mündungstrichter des Amazonas war es schon aus einer Entfernung von 20 km zu hören. Die tosende Wasserwand wird dort bis zu fünf Meter hoch und stürmt mit etwa zwölf Knoten stromaufwärts, um kleine Flussinseln, Sträucher und Bäume der ehemaligen Uferzone zu überfluten und die Flusslandschaft in wenigen Minuten dramatisch zu verbreitern. Hinter der Flutwelle wird das gewohnte Fahrwasser

unauffindbar. Für einen vergleichbaren Effekt würde eine gewöhnliche Flut mehrere Stunden benötigen. Nach dieser Überraschung mussten besagte Spanier noch zwei weitere dieser kräftigen Flussbrandungen über sich ergehen lassen, ehe die Einheimischen ihnen bedeuteten, dass diese Gefahr nun endgültig überstanden war. Ähnliche Gefahren erwarten den Fahrersmann auf einem Nebenfluss des Amazonas, dem Rio Pará, der stromauf Rio Tocantins genannt wird und im südlichen Delta des Amazonas mündet. Hier herrscht noch ein etwa fünf Meter starker Tidenhub. Eine etwas schwächere Flussbrandung mit einer Wasserwand von eineinhalb bis vier Metern beherrscht den benachbarten Nebenfluss Guamá. Doch vergleichbare Wasserwände, die dem Fahrersmann andernorts auch völlig überraschend gegenübertreten, können völlig andere Ursachen haben.

6. Hafengefahr Springsturmflut

Der vielen Küstenbewohnern wohlvertraute Gezeitenablauf kann durch plötzlich einsetzenden, aufländig gerichteten Starkwind erheblich gestört werden. Ein solcher Wind schiebt die Wassermassen vor sich her und erzeugt entlang der Küsten, die in Windrichtung liegen, den sogenannten Windstau. Dadurch erhöht sich deutlich der Wasserstand des üblichen Hochwassers bei Flut, und die nachfolgende Ebbe tritt als solche kaum mehr in Erscheinung. Stattdessen steigt bei anhaltendem Starkwind der Wasserstand stetig weiter und erreicht während der nächsten Flut Höhen von mehreren Metern über dem erwarteten Hochwasser.

Ältere Mitbürger erinnern sich sicherlich noch an die Sturmflut von 1962, die der Großstadt Hamburg einen argen Notstand bescherte. Gegenwärtig ist die Gefahr der Sturmflut durch moderne Maßnahmen des Küstenschutzes zwar verringert, aber die globale Wasserstandszunahme, bedingt durch das mehr und mehr in Erscheinung tretende Abschmelzen der eisigen Polkappen infolge der globalen Erwärmung, verlangt zumindest ein weiteres Überdenken dieses Problems. Modellrechnungen sagen voraus, dass sich die Wasserstandslinien von wenigen Dezimetern bis zu einigen Metern in das Inland verschieben könnten. Weiterhin wird erwartet, dass sich in unseren Breiten zwar nicht die Anzahl orkanartiger Wetterlagen erhöhen wird, wohl aber deren Stärke. Seit den 1970er-Jahren verfolgen Wettersatelliten die Zugbahnen solcher Starkwindgebiete und ermöglichen recht präzise Warnungen, nicht nur für das seefahrende Volk, sondern auch für die Küstenbevölkerung.

Sturmfluten und deren Auswirkungen sind uns schon aus längst vergangenen Zeiten überliefert. Die frühesten Berichte darüber gehen auf Cäsar und Plinius den Älteren (23/24–79 u.Z.) zurück. Cäsar geriet bei seiner Überfahrt nach Britannien in eine Springsturmflut, wobei seine Flotte etliche Schiffe verlor. Nach einer vergleichbar schweren Sturmflut besuchte Pli-

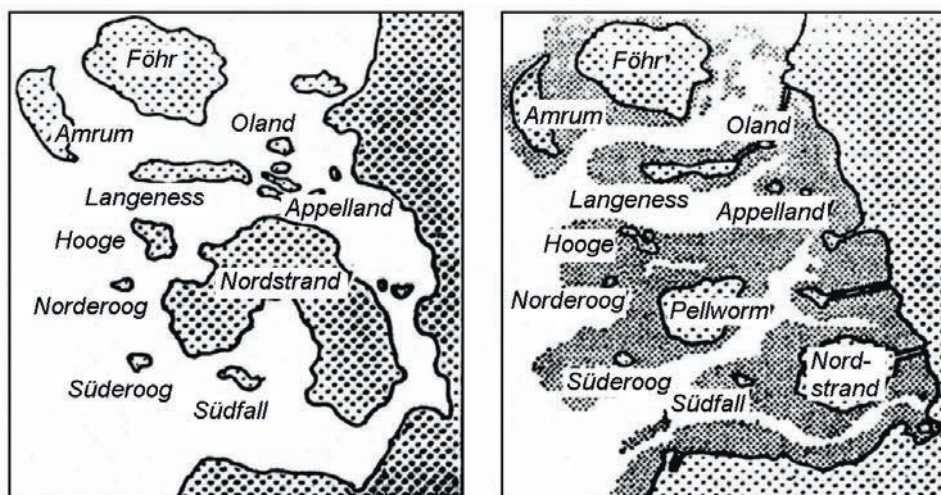


Abb. 8a–b Vereinfachte Darstellung des Zerfalls der Insel Nordstrand vor (links) und nach der Flutkatastrophe von 1634 (Schlick = Feinschraffur; rechts).

nus die Nordseeküste. Er schilderte die künstlichen Wohnhügel der Küstenbevölkerung, errichtet zum Schutze vor dem Hochwasser. Aus späterer Zeit, um 1219, liegen entsprechende Berichte über die Nöte der Bewohner entlang der holländischen Küste vor. Eine verheerende Sturmflut, die sogenannte Mandrenke vom Januar 1362, zog einen riesigen Landverlust zwischen dem Jadebusen und der Insel Sylt nach sich. Mehrere Dörfer, darunter der reiche Ort Rungholt am Süzipfel der Insel Nordstrand, verschwanden im Meer (Abb. 8a–b). Der sagenumwobene Wohlstand dieser Ansiedlung beruhte einerseits auf einem regen Warenumschat mit weit entfernten Ländern und andererseits auf dem Abbau von Salztorf in unmittelbarer Nachbarschaft. Immerhin ergab eine Tonne dieses Torfes etwa 25 Kilogramm des damals sehr kostbaren Speisesalzes. Dieser begehrte Rohstoff und auch der Ort waren jedoch über einem tiefen Urstromtal der letzten Eiszeit gelegen, d.h. der Torfabbau trug wohl dazu bei, dass sich die Wassermassen dieser Sturmflut auch in die tiefer gelegenen Torfstiche ergossen und dadurch ein Aufweichen und Absenken der Umgebung dieser Ansiedlung auslösten. So ist es wohl zu erklären, dass andere, weiter entfernt gelegene Siedlungen dieses Hochwasser überstanden. Fragmente der versunkenen Siedlung Rungholt wurden in den 1920er-Jahren vorübergehend wieder freigespült und durch den Heimatforscher Andreas Busch (1883–1972) als solche erkannt.

Eine weitere Sturmflut suchte 1421 die holländische Küste heim. Sie schuf südlich von Dordrecht das sogenannte Hollandsch Diep als neue Maasmündung, in deren Umgebung zwanzig Dörfer verloren gingen. Die Anzahl der ertrunkenen Menschen wurde mit 10 000 angegeben. Wegen der mangelhaften Erfassung der damaligen Bevölkerungsdichte muss eine solch hohe Zahl

aus heutiger Sicht jedoch mit einiger Skepsis betrachtet werden. Eine weitere schwere Sturmflut wütete 1570 entlang der Ostküste der Nordsee, besonders zwischen dem Skagerrak im Norden und dem Englischen Kanal im Süden. Auch sie forderte Tausende Menschenleben, verursachte aber einen wesentlich geringeren Landverlust. Schiffe mit acht Fuß (2,4 m) Tiefgang segelten über das ehemals fruchtbare Marschland. Ein vergleichbares Ereignis suchte auch die Bewohner der Insel Alt-Nordstrand im Jahre 1634 heim (Abb. 8a–b). Extremes Hochwasser zerteilte das Eiland in vier Teile. Nach wenigen Stunden brachen die Deiche, es ertranken über 6000 Menschen und annähernd 50 000 Stück Vieh, mehr als 20 000 Hektar fruchtbares Land wurden wieder Watt. Die später einsetzende Errichtung neuer Deichanlagen verwertete vornehmlich die Erfahrungen benachbarter, holländischer Wasserbaumeister.

Für die Bundesrepublik Deutschland wurde erst 1963 ein Generalplan für den Küstenschutz aufgestellt, veranschlagt mit Milliardenbeträgen. Vor der Realisierung aller Vorhaben brachen im Januar 1976 die Sturmflutwellen mit voller Wucht in die Deutsche Bucht ein und erzeugten extrem hohe Wasserstände, die diejenigen der Hamburger Katastrophe von 1962 etwa um sieben Meter übertrafen. Doch Dank der unterdessen verstärkten Deichanlagen hielten sich die Folgeschäden in überschaubaren Grenzen.

Die Tabelle 1 vermittelt eine Übersicht der schwersten Sturmfluten in der Nordsee, geordnet nach Jahr, Region und Auswirkung. Vergleicht man dort die Zeitspannen zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen, dann wird rasch deutlich, dass eine deutliche Verkürzung der Zeit zwischen sehr drastischen Sturmfluten zu verzeichnen ist. Betrug der Abstand zwischen 1219 und 1825 im Mittel 101 Jahre, so verringerte sich dieser auf zwölf Jahre zwischen 1916 und 2013. Nun mag man einwenden, dass die Beurkundung solch einschneidender Ereignisse in der Vorzeit nicht der heutigen Dokumentationsdichte entspricht und somit die festgestellte Verkürzung um etwa zwölf Prozent nicht real sein kann. Dies mag wohl hinsichtlich der Prozentzahl gelten, aber es ist kaum abzustreiten, dass eine drastische Verkürzung in der Zeitfolge aufeinanderfolgender, schwerer Sturmfluten festzustellen ist. Diese Erkenntnis macht überaus deutlich, dass der Küstenschutz immer wichtiger wird. Leider wird wegen der nun geringer gewordenen Anzahl von Deichbrüchen und infolge verbesserter Baumaßnahmen auch weniger Aufmerksamkeit auf notwendige Überschwemmungsflächen gelegt, so dass sich der Staudruck auf der Meeresseite der Deiche mehr und mehr erhöht und immer intensivere Baumaßnahmen zur sicheren Bewahrung der Küstenlinien erfordert.

Jahr	Region	Auswirkung
1219	Holländische Küste	Verlust an Menschenleben
1362	Jadebusen, Insel Sylt	Landverlust, Menschenleben

1421	Holländische Küste	Neue Maasmündung
1570	Skagerrak, Englischer Kanal	Verlust an Menschenleben
1634	Insel Alt-Nordstrand	Teilung in vier Teile
1717	Nord-, Ostfriesland	Verlust von 5000 Häusern
1825	Bremerhaven, Büsum	Verlust an Menschenleben
1916	Niederländische Küste	Landverlust
1928	Themsemündung	Verlust an Menschenleben
1936	Deutsche Bucht	Landverlust
1953	Holland, Belgien	160 000 ha überflutet
1962	Deutsche Bucht, Hamburg	300 Menschenleben
1976	Deutsche Bucht	Kaum Schäden, Deichbau
1994	Veegesack/Nordsee	5,33 m über NN
2007	Deutsche Bucht, Hamburg	Überschwemmung/Fischmarkt
2013	Nord-, Ostsee	Verkehrs- und Sachschäden

Tab. 1 Schwere Sturmflutjahre entlang der südöstlichen Küste der Nordsee.

7. Kleinhafen Warft/Wurt

Zu Beginn unserer Zeitrechnung war die südöstliche Nordsee von vielen Haffseen und Nehrungen durchsetzt, hatte aber deutlich weniger Inseln als gegenwärtig. Mit den verfrachteten Sedimenten der Gezeitenströme setzte sich in den ruhigeren Buchten und entlang der Küstenzone nach und nach eine Schicht sehr fruchtbaren Schlicks ab. Diese Gebiete lockten mehr und mehr Siedler an, die aber dem ständig wiederkehrenden Hochwasser erfolgreich trotzen mussten. Im Watt zwischen Flandern im Süden und Jütland im Norden schufen sie daher Wohnhügel. Diese waren von unterschiedlicher Größe und Höhe und wurden Warft oder Wurt genannt (Abb. 9). Unter-



Abb. 9 Katharinenheerd mit Martje Flohr's Wurt. (Zeichnung: Fritz Stoltenberg, 1895/ Wikipedia)

einander waren solche Ansiedlungen bei Ebbe nur zu Fuß oder mit einem sogenannten Schlickrutscher erreichbar. Archäologische Rekonstruktionen dieser punktförmigen Siedlungsanhöhen legen nahe, dass etwa 2000 Anlagen existierten, die eine Höhe zwischen drei und zehn Metern erreichten. Im Einzelfall nahmen sie eine Oberfläche von bis zu 20 Hektar ein. Die größten von ihnen boten Platz für kleinere Dörfer und hatten neben dem üblichen Regenwasserspeicher für das Trinkwasser in Hausnähe auch kleinere, aus Gras- oder Torfsoden erbaute Zisternen, die wegen ihrer runden Form fälschlicherweise auch Brunnen genannt wurden. Sie dienten vornehmlich der längerfristigeren Viehversorgung.

Im Verlaufe nachfolgender Jahrhunderte änderten sich ständig die Anzahl dieser Wohnhügel sowie deren Gestalt, doch aus unterschiedlichsten Gründen verschwanden sie mehr und mehr. Die linienförmigen Deiche gewannen mit voranschreitender Landgewinnung immer mehr Bedeutung. Derartige Deichanlagen waren schon im Altertum bekannt. Sie bestanden aus geneigten Erdwällen mit eingebauten hölzernen Toren sowohl zum Entwässern der Landseite als auch zum Stoppen des vordringenden Seewassers. So wurden schon im 12. Jahrhundert an Weser und Elbe vergleichbare Anlagen errichtet, um fruchtbares Land zurückzugewinnen, das durch Sturmfluten verloren gegangen war.

8. Gigantismus der Dämme

Technische Aspekte von Hafeneinfahrten, Küstenschutz und Landgewinnung waren schon immer von besonderem Interesse. Sie bekamen im 16. Jahrhundert jedoch einen steilen Aufschwung, als der italienische Universalgelehrte Leonardo da Vinci (1452–1519) die drehbare Kappe für Windmühlen erfand. Unabhängig von den ständig wechselnden Windrichtungen konnten damit Pumpen betrieben werden, mit denen die neuerlich erschlossenen Küstenstreifen nun deutlich effektiver trockengelegt wurden. Mit der späteren Einführung der Dampfkraft erfolgte eine weitere Intensivierung dieser Vorgehensweise; so wurde beispielsweise von 1840 bis 1853 das 18 000 Hektar große holländische Haarlemmermeer ausgetrocknet.

In Deutschland war die erste technische Großtat, die im Wattenmeer vollbracht wurde, die Errichtung des Hindenburgdammes (Abb. 10). Er verbindet die Insel Sylt mit dem Festland durch eine fast zwölf Kilometer lange Aufschüttung. Diese wurde 1927 durch einen Fahrdamm mit einer Eisenbahnlinie gekrönt. Die nahezu 50 Jahre andauernde Planung wurde in nur vier Jahren realisiert. Das Ergebnis war u.a. eine zehn Minuten dauernde, gefahrlose Überfahrt. Von den benachbarten Holländern wurde dieses Vorhaben sorgfältig beobachtet, hatten sie doch schon lange den Plan einer umfangreichen Landgewinnung mit vergleichbarer Strategie. Die seichte Zuiderzee sollte



Abb. 10 1927 aufgeschütteter Hindenburgdamm zwischen der Insel Sylt und dem Festland. (Grafik: Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

von der Nordsee abgeriegelt werden, um im verbleibenden IJsselmeer eine Landgewinnung im größeren Stile zu ermöglichen. Nachdem die Vorarbeiten zu den möglichen Tidenüben erfolgreich abgeschlossen waren, begann man den westlichen Zipfel der Insel Wieringen mit einem Damm zu verbinden. Schon im Jahre 1927 wurde der Bau des Hauptdammes mit einer konzipierten Breite von 130 m begonnen. Die Arbeiten waren 1932 abgeschlossen und lieferten eine 32 km lange Barriere gegen das Nordseewasser, deren Kuppe etwa 90 m breit war (Abb. 11). Hier wurden annähernd 27 Millionen Kubikmeter Sand, 15 Millionen Kubikmeter schweren Bodens sowie große Mengen Steine verschüttet. Mehrere Schleusen vervollständigten dieses Superbauwerk, das eine ganze Küstenlandschaft veränderte. Anschließend begannen dahinter die Arbeiten zur Gewinnung von etwa 2300 km² Neuland (Polder), abgesichert durch charakteristische Ringdeiche. Im Ergebnis liegt das Niveau des gewonnenen Landes einige Meter unter dem Normalnull



Abb. 11 Damm zwischen der salzreichen Nordsee (links) und dem mit Süßwasser gefüllten IJsselmeer (rechts). (Foto: C. Messier/Wikipedia, CC BY-SA 4.0)

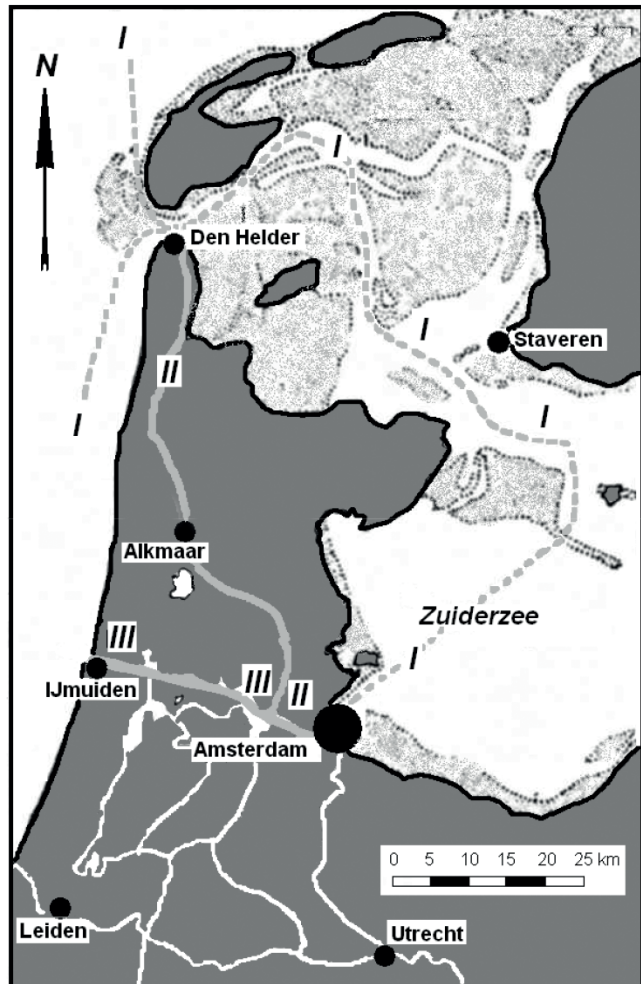
des Meeresspiegels. Seine Nutzung wurde ein Aushängeschild für die holländische Landwirtschaft. Die hier erzielten Hektarerträge übertreffen noch heute diejenigen anderer westeuropäischer Länder im jährlichen Schnitt fast um die Hälfte.

Ermutigt durch diese Erfolge wurde nach der großen Flutkatastrophe von 1953 damit begonnen, den sogenannten Deltaplan zu verwirklichen. Er beinhaltet u.a. die Abdämmung der großen Zuflüsse (Zeegaten) von Rhein und Maas. Die Küstenlinie der Inselprovinz Zeeland sollte dabei auf etwa 350 km reduziert werden, indem riesige Dämme aus Beton sowie ein großes Sperrwerk das Wasser der Nordsee landwärts abriegelten. Gleichzeitig wurde so ein effektiv nutzbarer Süßwasserspeicher für die küstennahe Infrastruktur bereitgestellt. Eher negative Aspekte ergaben sich aus den verlängerten An- und Abreisewegen der lokalen Fischerei sowie den veränderten Fanggründen und der dort angetroffenen Fischartenzusammensetzung. Infolge des Ausschlusses der Gezeitenströme aus den Küstengewässern wurde während der Winter außerdem eine stärkere und länger anhaltende Vereisung beobachtet. Zusätzlich stellte man eine deutlich geringere Ausdünnung der von Landseite eingetragenen Schadstoffe fest sowie deren Abfuhr in die offene Nordsee. Diese Erkenntnisse waren so gravierend, dass andere Dämmungen im Rahmen dieses Vorhabens immer wieder neu überdacht werden.

9. Veränderte Hafeneinfahrten

Bei der Anlage von Landeplätzen und Häfen erwiesen sich die Gezeiten im Verlaufe der Jahrhunderte als Gegner und Verbündete der Seeleute. Auf die Dauer ließen sich die Hafenbecken der Gezeitenhäfen nicht mehr mit Schaufel und Schubkarre von der Versandung freihalten. Auch heutzutage bringen moderne Bagger und sogenannte Saugschiffe kaum eine nachhal-

Abb. 12 Historische See-
wege nach Amsterdam
mit Wattgebieten (grau
punktiert): I: vor 1825
(gestrichelt hellgrau); II:
1825–1867 (hellgrau); III:
ab 1867 (hellgrau).



tige Abhilfe. Betroffene Hafenzufahrten werden auch künftig aufwendige Pflege verlangen, zumal ein stetiger Anstieg in der Tonnage festzustellen ist, der einhergeht mit wachsendem Tiefgang der Schiffe. Als Konsequenz der allgemein erwarteten Wasserstandszunahme werden sich aber auch die Strömungsbedingungen in den althergebrachten Fahrrinnen verändern und für deren Freihaltung zusätzliche Baumaßnahmen erfordern. Beispielsweise stellte der Weltklimabericht des Jahres 2013 u.a. fest, dass von 1901 bis 2010 ein Pegelanstieg von etwa 0,2 m beobachtet worden ist. Bis zum Ende unseres Jahrhunderts könnte sich diese Tendenz drastisch beschleunigen und Werte zwischen 0,3 und 0,8 m erreichen.

Wie sich diese Problematik im Detail darstellt, ist beispielhaft bekannt. Die Häfen von Amsterdam und Rotterdam haben während vergangener Jahrhunderte einen zähen Kampf um ihre Zufahrten führen müssen. Schon

im 14. Jahrhundert lag vor Amsterdam eine sogenannte Barre (Sand- oder Kiesbank), und es kam nicht selten vor, dass die Frachtsegler bei ungünstigen Winden bis zu vier Wochen in der seichten Zuiderzee auf erzwungener Reede lagen, da kein ausreichender Platz für notwendige Anlegemanöver vorhanden war. Diese komplizierten Hafeneinfahrten wirkten sich negativ auf den hoch entwickelten Schiffbau Hollands aus. Seine europäische Führungsposition musste erst an Frankreich und danach an England abgegeben werden, wo die Hafenzufahrten den Frachtkostenfaktor wesentlich günstiger auswiesen. Da im 18. Jahrhundert der Hafen von Amsterdam noch nicht durch einen Kanal mit der Nordsee verbunden war, musste man häufig die Schiffe über eine Schlickschicht durch die tückische Zuiderzee ziehen (vgl. Route I in Abb. 12). Für eine generelle Abhilfe in holländischen, belgischen und deutschen Küstengebieten wurden zwischen 1819 und 1887 neun bedeutende Stichkanäle zur Nordsee angelegt. Dies vollzog sich unter großen Anstrengungen an Mensch und Material und begann 1825 in Holland mit dem nordholländischen Kanal, der Amsterdam mit Den Helder verbindet (vgl. Route II in Abb. 12). Zu jener Zeit wurde im Kanalbau größtenteils althergebracht gearbeitet, erst während der letzten Baujahre waren Dampfbagger verfügbar. Der wichtigste aller gestochenen Kanäle aber war der Nordseekanal. Er verbindet IJmuiden an der Nordseeküste mit der östlich liegenden holländischen Hafenstadt Amsterdam (vgl. Route III in Abb. 12).

Beachtliche Schwierigkeiten ergaben und ergeben sich bei allen Flusshäfen durch das Verflachen der Fahrrinne durch die jährlich neu geschaffene, mehrere Meter dicke Schlickschicht infolge der sedimentären Flussfracht. So bleiben die Maas, Themse und Seine noch unter einer Million Tonnen Abraumschlick beim Freihalten der Hafenzufahrt, doch Elbe und Rhein übertreffen diese Menge um ein Vielfaches. Spitzenreiter dabei ist der Amazonas mit etwa 900 Millionen Tonnen.

In der Vergangenheit war das schottische Zentrum des Schiffbaus in Glasgow am Clyde besonders gefährdet. Bereits zwischen 1770 und 1806 begannen hier intensive Arbeiten zur Korrektur des Flussbettes, die aber erst 1885 zu einem nutzbaren Ergebnis geführt haben. Etwas zeitiger, im Jahre 1780, begann man in Frankreich mit der Regulierung der Seine, um die heftige Flussbrandung zu dämpfen. Etwa 1890 war aber erst ein Gleichgewichtszustand zwischen Ablagerung und Ausräumung der Fahrrinne erreicht. Wie beim Clyde musste auch hier etliches Lehrgeld entrichtet werden, da das ständige Wechselspiel zwischen Gezeitenströmung und Flussbeschaffenheit nur schwer zu übersehen war. Im vergangenen Jahrhundert wurden die Arbeiten fortgeführt, um die Tidenwassermenge zu verdoppeln. Da nun das häufige Ankern bei Niedrigwasser entfiel, konnte in annähernd hundert Jahren die Fahrzeit zwischen Le Havre bis Rouen von etwa vier Tagen auf sieben bis acht Stunden verkürzt werden.

In der noch nicht lange zurückliegenden Vergangenheit verlangte die Zufahrt nach Rotterdam ebenfalls etliche Korrekturen. Hier benötigten die

Schiffe vier bis fünf Tage, um die offene Nordsee zu erreichen. Daher wurde 1866 ein sieben Kilometer langer Kanal zum Hoek van Holland gestochen, der völlig frei von Schleusen ist. Auf diese Weise sollte eine möglichst große Menge Tidenwasser in das Fahrwasser eingelassen werden. Leider entstand wieder eine Barre, die bei Hochwasser nur drei Meter Wassertiefe innerhalb der Fahrrinne freigab. Folglich konnte diese neue Zufahrt nicht für größere Schiffe genutzt werden. Erst eine um 1881 begonnene Verlängerung der Wasserstraße nach See zu, der später Leitdämme unterhalb des Meeresspiegels folgten, vergrößerten die Wassertiefe bei genannter Barre auf etwa sechs Meter im Jahre 1886. Damit erhöhte sich der Schiffsverkehr nach Rotterdam in den folgenden Jahren merklich.

Besonders schlechte Fahrwasserverhältnisse traf man zu dieser Zeit in der Weser an. Hier musste man bereits 1618 den Vorhafen Vegesack anlegen. Danach übernahm Bremerhaven diese Umschlagrolle, und demzufolge sank der Seeverkehr in Bremen im Jahre 1875 auf 35 000 Nettoregistertonnen (NRT). Durch die damit verbundenen Baumaßnahmen verringerte sich nun der Tidenhub auf gefährliche 30 Zentimeter. Der deutsche Wasserbauingenieur Otto Franzius (1877–1936) stellte sich diesem Problem. Er legte 1878 einen Plan zur Korrektur des Profils der Fahrrinne vor. Seiner Idee folgend wurde ein für das Eindringen der Gezeitenwelle optimales Flussbett bis Bremen geschaffen. Schon nach acht Jahren erreichte der Tidenhub acht Meter, und so wurden deutlich verbesserte Zufahrtsbedingungen geschaffen. Folglich erreichte die alte Hansestadt Bremen schon 1903 einen Güterumschlag von nahezu einer Million NRT, und damit wurden die Gezeiten nun auch in Norddeutschland zum treuen Verbündeten der Schifffahrt.

10. Dockhäfen

Das 19. Jahrhundert brachte in rascher Folge eine enorme Umwälzung für die ganze Seefahrt. Dies betraf nicht nur die verfügbaren technischen Hilfsmittel in Form verbesserter Schiffsausrüstung, sondern auch die Infrastruktur der Hafenanlagen und die Genauigkeit der Seekarten. Die erste akkurate Vermessung der Nordseeküste erfolgte von 1867 bis 1869. Im Ergebnis lag 1892 eine recht genaue Seekarte vor. Sie zeigte Küstenkonturen und Wassertiefen der Nord- und Ostsee, einschließlich des Englischen Kanals. Zuvor, zwischen 1800 und 1816, entstanden beispielsweise in London ausgedehnte Docksysteme, die insgesamt über 20 gezeitenfreie Becken für See- und Flussschiffe formten. In Liverpool, Bristol und Antwerpen geschah Ähnliches für einen gezeitenfreien Warenumschlag. Drei Erfindungen dieser Zeit waren für den Erfolg ausschlaggebend. Seit dem Jahre 1824 gab es den Portland-Zement, ein Jahr später fuhr die erste Eisenbahn zwischen Liverpool und Manchester und 1829 revolutionierte die Schiffsschraube den Schiffsantrieb.

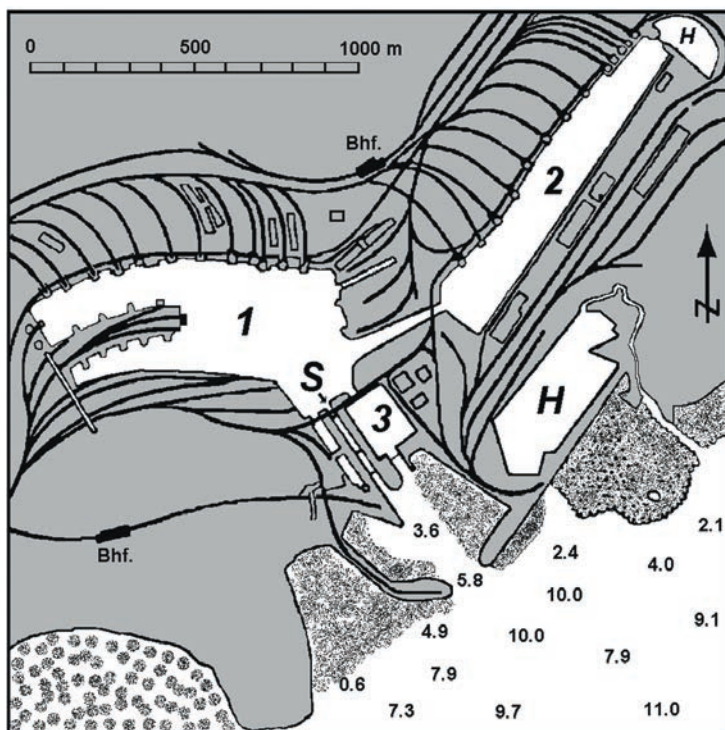


Abb. 13 Der Plan des Hafens Barry am Bristol-Kanal mit den Docks (1, 2, 3) und der Schleuse (S) sowie den Holzhäfen (H), zwei Zwischenbahnhöfen (Bhf.) und den dazugehörigen Gleisanlagen sowie küstennahen Watt-Schlickgebieten (unterschiedlich punktiert). Die Tiefenangaben in Metern beziehen sich auf das mittlere Springniedrigwasser.

Die bei den Dockarbeiten gemachten Erfahrungen der Engländer kamen auch den deutschen Häfen entlang der Nordseeküste zugute. Nachdem die Weser nach 1800 fast völlig versandet war, wurde in Bremerhaven der Bau einer Schleuse notwendig, die zwischen 1827 und 1829 fertig wurde. Die daran geknüpften Erwartungen waren riesig, und selbst Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832) attestierte 1829 im Briefwechsel sein Interesse:

[Es] ... muss uns höchst wichtig seyn, eine Unternehmung, die der Weser erst ihre Würde gibt, vorschreiten zu sehen [...] In Erwartung des Weiteren bitte mir die Orte zu nennen, durch welche der Weg von der neuen Anlage bis Bremen geführt wird; ich habe drey Special-Charten vor mir, und es würde mir angenehm seyn mich näher zu orientiren. Müssen wir doch so viel von den englischen Docks, Schleusen, Canälen und Eisenbahnen uns vorerzählen und Vorbildern lassen, daß es höchst tröstlich ist, an unserer westlichen Küste dergleichen auch unternommen zu sehen.

Als Bremerhaven endlich an das Eisenbahnnetz angeschlossen war, vollendete man von 1847 bis 1852 den Ausbau des Hafens mit einer 20,5 m breiten Schleuse. Auch Emden bekam 1846 von der Ems eine derart geschützte Zufahrt, die aber mit 14,5 m Breite von vornherein zu schmal bemessen war. Abgesehen von dem späteren Marinehafen in Wilhelmshaven gibt es an der deutschen Nordseeküste keine Dockhäfen. Dies begründet sich hier durch einen Tidenhub von nur drei bis vier Metern. Die Schleusenhäupter ande-

rer Dockhäfen wurden nach 1880 ausschließlich in Beton ausgeführt. Damit erfolgte auch der plötzliche Übergang von hölzernen zu eisernen Schleusentoren. Die Schiffsabmessungen wuchsen zwischen 1825 und 1925 von etwa 61 m Länge und 5 m Breite bei einem Tiefgang von einigen Metern auf nahezu 300 bzw. 30 und 12 m an. Mit erheblichem Kostenaufwand entstanden nun gigantische Bauwerke. In Liverpool, Dünkirchen, Emden und Wilhelmshaven betrug die Einfahrtsbreite 40 m, aber 50 m in St. Nazaire und sogar 400 m in IJmuiden. Wegen des stetigen Anwachsens der Schiffstonnage wurde eine neue Schleuse von 57 m Breite und 500 m Länge in Antwerpen gebaut, und dieser Trend wird voraussichtlich anhalten.

In neuerer Zeit verfügt England wenigstens über 40 Dockhäfen in der Art von Barry (Abb. 13). So weist Liverpool mit dem benachbarten Birkenhead und Garston ein gezeitengeschütztes Hafenbecken mit einer Gesamtfläche von etwa 250 Hektar aus. Mit nahezu 300 Hektar besaß London über längere Zeit den größten Dockhafen der Erde, doch der anwachsende Hafen von Antwerpen hat diese Fläche mittlerweile bereits um 100 Hektar übertroffen. Dabei ist festzustellen, dass derartige Dockhäfen außerhalb Europas eher selten sind. Ihre bekanntesten sind Mumbai, Kalkutta, Buenos Aires und Quebec, wobei die zwei letztgenannten Häfen kaum noch genutzt werden, da moderne, leistungsfähige Bagger die Anlage offener Hafenbecken mit erforderlichen Wassertiefen ermöglichten. Verkürzte Zeiten für das Be- und Entladen der Schiffe sowie stetig modernisierte Umschlagtechniken erfordern auch in Europa einen anhaltenden Ausbau der Dockhäfen, speziell bei Tidenhuben von mehr als sieben bis acht Metern. Dabei kommt der ständig anwachsenden Tonnage, besonders jener der Tankschiffe, eine besondere Bedeutung zu. Dieses Problem berührt wiederum nicht viele der Erdöl exportierenden Länder in südlicheren geographischen Breiten, weil deren Häfen kaum einen nennenswerten Tidenhub besitzen. Falls es aber doch vergleichbare Schwierigkeiten gibt, konzentriert man sich hier aus Kostengründen auf sogenannte Öl-Terminals auf offener See. Eine Reihe der nördlich gelegenen Empfängerländer folgt gegenwärtig dieser kostengünstigeren Lösung.

11. Gezeitevorschau

Bereits seit dem Beginn unserer Zeitrechnung wusste man entlang der Nordseeküste, dass die Gezeiten vorrangig der Mondbahn folgen und sich Spring- und Nipptiden im Wechsel der Mondphasen ablösen. Bekannt waren auch schon der Begriff der täglichen Ungleichheit in der Höhe von Hoch- und Niedrigwasser sowie deren Abhängigkeit von der sogenannten Deklination des Mondes (vgl. Abb. 1). Man scheint auch gewusst zu haben, dass die Gezeiten zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche sehr große, aber während der Sonnenwende recht kleine Unterschiede im Wasserstand aufweisen.

Der englische Geistliche Beda (672/673–735) belebte um das Jahr 730 diese Kenntnisse, indem er lokales Wissen über den Tidenhub entlang der englischen Küste zusammentrug. Er gab die tägliche Verspätung des Hochwassers schon recht präzise mit 48 Minuten an. Im Vergleich zum heutigen Wissensstand ist dieser Betrag nur um zwei Minuten zu gering, und bei der Würdigung dieser Leistung muss der damalige Stand der Zeitbestimmung herausgestellt werden. Erst viele Jahre später gibt der vornehmlich geistlich orientierte »Codex Cottonianus«, neben astronomischen und geographischen Angaben, eine Tabelle der Wasserstände an der London-Brücke heraus. Dieses Werk von Sir Robert Cotton (1571–1631) basiert größtenteils auf überlieferten Kenntnissen des Abtes Richard von Wallingford (1292–1336), der getrost als Pionier der heutigen Gezeitenvorhersage gelten kann. Er wartete auch mit einer brauchbaren mechanischen Rechenmaschine auf, die Äquatorium genannt wurde. In der Folgezeit versuchten Vertreter unterschiedlicher Interessengruppen, wie Klerus, Kapitäne und Naturwissenschaftler, gemeinsam die Physik der Gezeitendynamik zu begreifen. In der damaligen Literatur tauchen wieder die berühmten Namen von Kepler, Newton, Bernoulli und Laplace auf, ergänzt durch den des Mathematikers Leonhard Euler (1707–1783). Zusammen mit nachfolgenden Forschungsgenerationen sammelten sie eine Fülle von Kenntnissen, und dennoch gelang es ihnen nicht, eine umfassende, alles erklärende Theorie der Meeresgezeiten zu formulieren. Unter dem Hinweis auf die Bedeutung für die Schifffahrt auf der Themse veröffentlichte der englische Hofastronom der Sternwarte Greenwich John Flamsteed (1646–1719) für den Winter 1683/84 erstmalig eine Gezeitentabelle für die Pegelstation an der London-Brücke. Sie enthielt die Eintrittszeiten der Hochwasser auf Minuten genau und wurde im folgenden Jahr durch eine Tabelle mit Unterschieden in den Eintrittszeiten der Hochwasser für 45 Häfen der Nordsee, des Englischen Kanals und der Irischen See ergänzt. Ihre Kenntnis vereinfachte die Planung des Ein- und Auslaufens der Schiffe wesentlich und ermöglichte es auch, die dazwischenliegenden Hafenliegezeiten kostengünstig zu verkürzen.

Dennoch wurde mit zunehmender Schifffahrt der Ruf nach exakten Vorhersagen lokaler Gezeiten immer dringlicher. Diese Situation spitzte sich zu mit der Einführung von Standardrouten zwischen den Kontinenten und der Erstellung verbindlicher Fahrpläne. Die ersten wissenschaftlich fundierten Gezeitentafeln des Engländers John William Lubbock (1803–1865) erfüllten weitgehend solche Ansprüche, da sie auf einer Fülle von Beobachtungsdaten basierten. Er ließ über 19 Jahre den Wasserstand an den Londoner Docks messen und erarbeitete daraus eine mathematisch begründete Synthese. Die gleichzeitig einsetzende Gründung größerer Reedereien garantierte den planmäßigen Warenaustausch zwischen den Kolonien und dem Mutterland und schuf auch die finanzielle Basis für immer umfangreichere Untersuchungen, die durch die englische Admiralität kräftig unterstützt wurden. So ordne-

te der Admiral Frederick William Beechey (1796–1856) an, dass der Tidenhub an etlichen Küstenstationen der britischen Insel und in der Irischen See von verankerten Schiffen zeitgleich vermessen wurde. Im Ergebnis konnte er 1848 seiner Admiralität eine Karte mit Linien gleichen Springtidenhubs vorlegen, die in den folgenden sieben Jahrzehnten in ihrer Aussagefähigkeit nicht übertroffen wurde. Da zu jener Zeit viele Havarien durch Unkenntnis der Tidenströme eingetreten waren, hatte er gemeinsam mit dem Admiral Francis Beaufort (1774–1857) Gezeitenstrommessungen im größeren Umfang veranlasst. Letzterer war weltweit bekannt geworden durch seine 1806 aufgestellte und noch heutzutage verwendete zwölfteilige Skala zur Schätzung der Windstärke auf See. Infolge der überaus fruchtbaren Zusammenarbeit aller Interessengruppen erschien im gleichen Jahr eine Karte der maximalen Gezeitenströmung für die Irische See und drei Jahre später auch eine für den Englischen Kanal.

Für die Vorhersage der Gezeiten war die Erfindung einer mechanischen Gezeitenrechenmaschine im Jahre 1872 durch den Engländer William Thomson (1824–1907), dem späteren Lord Kelvin, sehr wesentlich. Nach seinen Überlegungen fixieren die astronomischen Einflüsse die beobachteten Gezeiten durch die Summe vieler überlagerter, harmonischer Schwingungen. Der königlichen Wissenschaftsgesellschaft zu London wurde aber erst im Jahre 1898 ein zusammenfassendes Konzept der Gezeitenanalyse vorgelegt. Endlich entsprachen die Rechenergebnisse hinreichend den Beobachtungen. Die nach dem Autor benannte Hough-Funktion machte später die Gezeitenvorhersage recht praktikabel. Sie fasst charakteristische Funktionen der von Laplace aufgestellten Gezeitengleichung zusammen. Dabei ist jede einzelne Funktion breitenabhängig und kann für die ganze Erde als Summe etlicher orthogonaler Polynome im Sinne des französischen Mathematikers Adrien-Marie Legendre (1752–1833) separiert werden. Die anschließende Rechnung bedarf erheblichen Aufwands, ergibt dann aber für einen zuvor ausgewählten Hafen den qualitativen Gezeitenablauf. Dabei liefern die Umlaufbahnen von Erde, Mond und Sonne die zu überlagernden Schwingungsanteile und deren Relation untereinander. Die dazugehörigen Amplituden müssen jedoch weiterhin aus lokalen Beobachtungen bestimmt werden, d.h. der quantitative Gezeitenablauf wird immer noch mit empirisch bestimmten Koeffizienten an die örtlichen Gegebenheiten angepasst.

Vor dem Zweiten Weltkrieg wurden etwa zwei Dutzend solcher Maschinen gebaut, nach 1945 immerhin noch acht (Abb. 14). In der damaligen DDR kam in Rostock im Jahre 1955 eine Eigenentwicklung mit einem Gewicht von nahezu zwei Tonnen zum Einsatz. Diese schwergewichtige Maschine ähnelte dem Hamburger Modell und war bis zur Wiedervereinigung beider deutscher Staaten im Jahre 1990 betriebsfähig. Ihre Konstruktion ermöglichte, im Gegensatz zur graphischen Ausgabe der Rechenergebnisse in Hamburg, die elektromagnetische Speicherung der Ausgabewerte und ver-

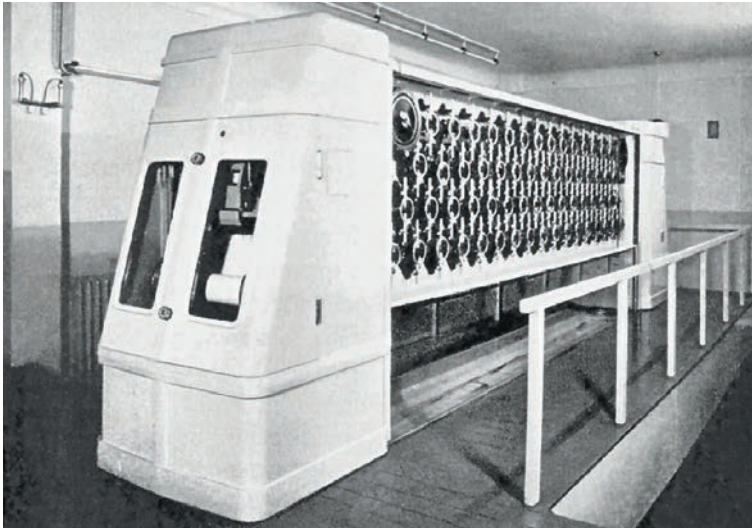
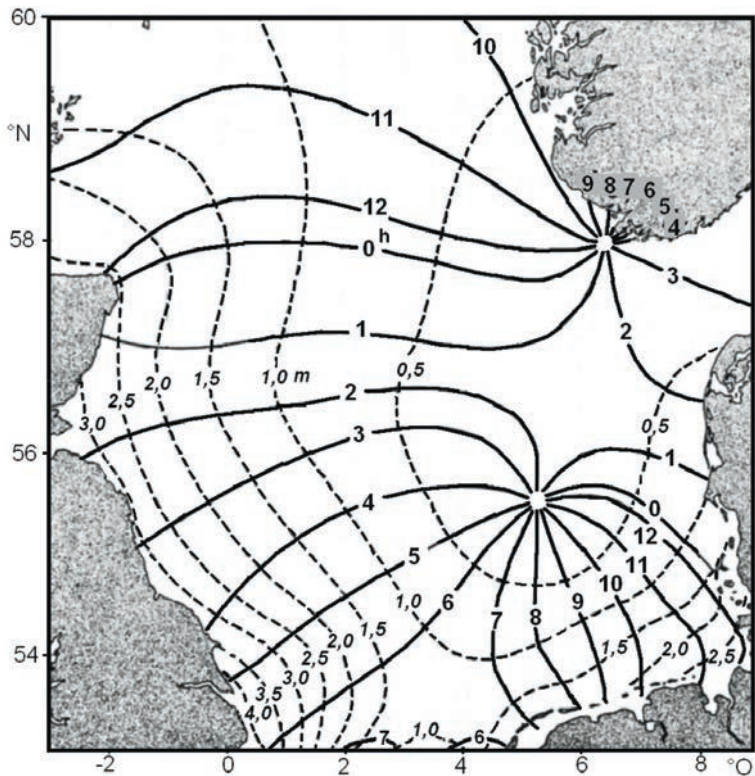


Abb. 14 Gezeitenrechenmaschine des ehemaligen Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) in Hamburg. (Foto: DHI)

einfachte so die weitere Verarbeitung der Ergebnisse drastisch. Für ausgewählte Orte ließ sich nun die Jahresvorhersage des Tidenhubes in etwa zwei Tagen vorausberechnen. Zuvor hatte ein versierter Rechentechniker dafür etliche Monate gebraucht. Mit der beschleunigten Entwicklung elektronischer Rechner am Ausgang des vergangenen Jahrhunderts sind derart monströse Gezeitenrechenmaschinen jedoch komplett überflüssig geworden. Die Letzten ihrer Art fanden Platz in maritimen Museen. Geblieben sind aber die Gezeitentafeln, die erstmals 1833 erschienen. Ab 1836 enthielten sie neben den Tidenhubzeiten auch die Höhen der Hochwasser, und dies ist bis auf die heutige Zeit so geblieben (Tabelle 2). Für ausgewählte Seegebiete stehen auf dieser Grundlage Karten mit den Linien gleicher mittlerer Springtidenhübe und deren Eintrittszeiten zur Verfügung (Abb. 15).

Für die graphische Darstellung der Gezeiten wurde schon in den 1920er-Jahren die Grundlage geschaffen. Dabei ging man davon aus, dass alle quantitativ erfassten Größen des Gezeitenphänomens nicht konstant sein können und sich die täglichen Veränderungen des Wasserstandes prinzipiell über ein sogenanntes Gezeitenpotential vorausberechnen lassen. Wie schon dargelegt, wurde der Gezeitenablauf als periodische Funktion von Winkeln dargestellt, d.h. die beobachtete Wasserstandskurve wird in viele Teil- oder Partialwellen mit jeweils konstanter Amplitude und Periode zerlegt. Damals schuf man die Grundlagen für 396 Wellenanteile. Für die Praxis der Schifffahrt wurde aber recht rasch deutlich, dass lediglich vier davon relevant sind. Mit ihrer Hilfe war das lokale Potential der Gezeiten schon recht genau zu bestimmen, doch die Geometrie der Küstenlinien und die vielgestaltige Topographie des Meeresbodens machen die Berechnung der dazugehörigen Gezeitenströmung mithilfe der theoretischen Hydrodynamik weiterhin unsicher. Hinsichtlich exakter Zuordnungswerte zwischen Tidenhub und Gezeitenstrom

Abb. 15 Ausschnitt aus einer Gezeitenkarte der Nordsee für die Hauptmond tide (M_2) mit Flutstundenlinien (ausgezogen; Stundenangabe nach dem Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian von Greenwich) und Linien gleichen Tidenhubs (gestrichelt; in Metern). (Nach Defant 1953)



Februar 1984

März 1984

d	h	min	m	d	h	min	m	d	h	min	m	d	h	min	m
1	01	40	2,9	16	01	03	2,1	1	01	25	2,9	16	00	48	1,9
	07	06	11,1		06	36	11,8		06	51	10,9		06	20	11,9
	14	01	2,5		13	32	1,5		13	45	2,5		13	15	1,2
	19	25	10,9		19	01	11,8		19	09	10,7		18	45	12,0
2	02	22	2,6	17	01	59	1,4	2	02	03	2,4	17	01	41	1,0
	07	42	11,4		07	25	12,5		07	25	11,3		07	08	12,7
	14	40	2,2		14	24	0,8		14	21	2,0		14	05	0,4
	19	58	11,1		19	47	12,4		19	41	11,1		19	30	12,6
3	02	58	2,4	18	02	49	0,8	3	02	37	2,1	18	02	28	0,4
	08	15	11,5		08	10	12,9		07	55	11,6		07	50	13,1
	15	15	2,1		15	12	0,4		14	53	1,8		14	51	0,0
	20	30	11,2		20	31	12,6		20	09	11,4		20	11	12,9

Tab. 2 Ausschnitt aus der französischen Gezeitentafel für den Hafen Saint-Malo mit den Eintrittszeiten (Tag = d, Stunde = h, Minute = min) und dem dazugehörigen Hoch- und Niedrigwasser (Meter = m) benachbarter 15-tägiger Zyklen für Februar und März des Jahres 1984.

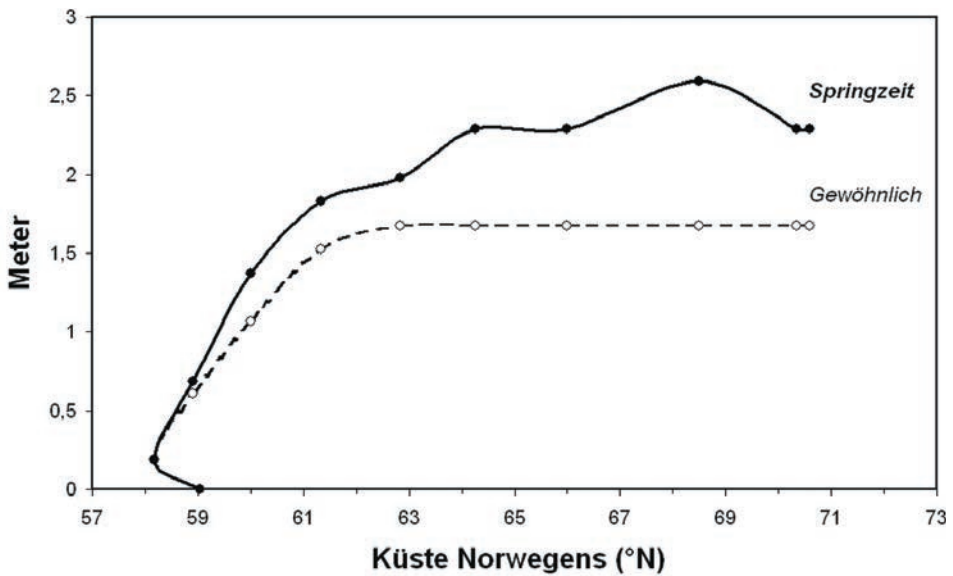


Abb. 16 Gewöhnliche und Springtidenhübe (in Metern) entlang der norwegischen Westküste, publiziert im Jahre 1860 durch den Norweger Vibe.

kommt man auch gegenwärtig noch nicht ohne Strömungsmessungen an sogenannten Bezugsorten aus. Letztere liegen üblicherweise in bedeutungsvollen Häfen oder deren Einfahrten (vgl. Tabelle 2).

Die hier gewonnenen Messwerte beziehen dann, durch geeignete Interpolationsverfahren, viele in der Nachbarschaft liegende Küstenorte ein. So liegen brauchbare Schätzungen vor, um wie viele Stunden und Minuten die Strömung früher oder aber später hinsichtlich des Bezugsortes kentert. Notwendige Korrekturen sind dann den Gezeitentafeln zu entnehmen. Vor dem Erscheinen der ersten Gezeitentafel war man auf die Zugänglichkeit örtlicher Messungen des Tidenhubs entlang der Küsten angewiesen. So publizierte beispielsweise der Norweger Andreas Vibe schon im Jahre 1860 in seinem Buch »Küsten und Meer Norwegens« eine Tabelle mit Werten der gewöhnlichen und der Springtidenhübe entlang der Westküste Norwegens. Die damals üblichen Angaben in Fuß (1 Fuß = 30,48 Zentimeter) wurden hier in Meter umgerechnet (Abb. 16).

Alle erworbenen Kenntnisse über die Gezeiten und die daraus abgeleitete Gewissheit über notwendige Sicherungen der Häfen durch umfangreiche Baumaßnahmen machten aber auch klar, dass die gezeitenbedingte Wechselströmung entlang der Küsten ein beachtliches Potential zur Energiegewinnung bereitstellt. Die alles erfassende Frage war auf kostengünstige, d.h. rentable Lösungsvarianten gerichtet, die möglichst eine ausreichende Umweltverträglichkeit garantieren. Der letztgenannte Aspekt spielte aber im vergangenen Jahrhundert kaum eine Rolle.

12. Gezeitennutzung

Den ständig wechselnden Wasserstand der Gezeiten haben schon die Gallier und Kelten in vielfältiger Art und Weise zu nutzen gewusst. Archäologische Funde von Mühlsteinen und Schaufeln aus der Zeit der Besetzung Englands durch die Römer belegen, dass dieses Wissen um 790 unserer Zeit keineswegs in Vergessenheit geraten war. Zu dieser Zeit entstanden Anlagen mit Schaufelrädern zum Zerkleinern von Korn und Holz sowie zur Verformung von Baumaterial wie Gips. Ihre simplen Konstruktionen waren äußerst effektiv. Durch einfaches Drehen der Schaufeln im Wasserstrahl wurde eine Welle angetrieben, deren Rotation vielfältige Nutzungen ermöglichte. Später begann man auch schwimmende Mühlen in Flussmündungen zu bauen. Sie waren so verankert, dass die Strömung sowohl bei Ebbe als auch bei Flut die Schaufelräder antrieb. Dieses Prinzip der Gezeitenmühle wird bis zur Gegenwart beibehalten, in der französischen Bretagne sind auch heutzutage noch einige davon in Betrieb. In einer anderen Variante wurde das anschwellende Wasser zur Zeit der Flut hinter einen eigens dafür aufgeschütteten Damm geleitet. Der Boden des eingeschlossenen Beckens lag etwas höher als der Meeresspiegel bei Niedrigwasser. Bei gefülltem Becken wurde der Zufluss verriegelt und auf die Ebbe gewartet, ehe das aufgestaute Wasser über die Schaufelräder in Richtung des Meeres abgeleitet wurde. Eine überlieferte italienische Skizze, einschließlich der Funktionsbeschreibung, ist auf das Jahr 1438 datiert. Sie zeigt, dass die Flut immer wieder ein großes Wasserbecken mit einer höheren Position füllte, welches bei Ebbe den regulierbaren Abfluss mit eingebautem Mühlrad antrieb.

Auch gegenwärtig wird bei einem Tidenhub von wenigstens drei Metern und möglichst geringer Schlickablagerung dieses Konstruktionsmuster bei-

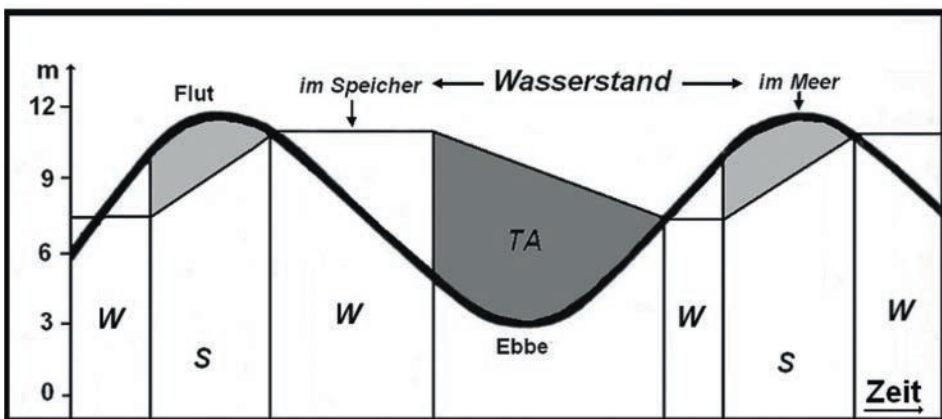


Abb. 17 Prinzipielle Arbeitsweise eines einfachen Gezeitenkraftwerkes mit Warte- (W) und Speicherfüllzeiten (S) während der Flut (hellgrau) sowie der vergleichbar geringen Zeitspanne der Turbinenarbeit (TA, dunkelgrau) im Zeitbereich der Nipptide.

behalten (Abb. 17). Beispielsweise zieht eine zehn Zentimeter dicke Schlickschicht in einem 40 km² großen Becken alljährlich einen Aushub von etwa vier Millionen Kubikmetern mit entsprechenden Kosten nach sich. Auch kompliziert die tägliche Ungleichheit der Hoch- und Niedrigwasser mit Eintrittsverschiebungen von bis zu 50 Minuten die technische Nutzung des Energieangebotes der Gezeiten. Hinzu kommt der immerwährende Wechsel von Spring- und den weniger ergiebigen Nipptidenhüben innerhalb von sieben Tagen. Alles in allem liegt hierin wohl die Ursache, dass für lange Zeit kein Plan für den Bau eines wirtschaftlichen Gezeitenkraftwerkes verwirklicht werden konnte. Erst der stetig steigende Energiebedarf unserer Industrienationen hat die Konstrukteure weltweit herausgefordert. Um einen ständigen Antrieb der Turbinen zu gewährleisten, kamen sie endlich zu der Schlussfolgerung, dass die gezeitenbedingten Unregelmäßigkeiten im Energieangebot durch mehrere Speicherbecken im Hinterland ausgeglichen werden müssten. Auch schien die Kombination mehrerer Kraftwerke mit unterschiedlichen Eintrittszeiten der Gezeitenströme in einem Verbundsystem Erfolg zu versprechen. So könnten die Zeiten maximalen und minimalen Energiegewinns ausgeglichen werden. Entsprechende Pläne wurden in England, Frankreich, den Vereinigten Staaten von Amerika, Kanada und Argentinien bereits im letzten Jahrhundert erstellt.

Die ehemalige Sowjetunion hatte 1968 auf der Halbinsel Kola, in der kleinen Kislaja-Bucht mit einer Fläche von etwa einem Quadratkilometer, ein Versuchskraftwerk mit einer Leistung von annähernd 800 Kilowatt in Betrieb genommen. Diese Bucht ist durch einen natürlichen Kanal mit der Barentssee verbunden, in der die halbtägliche Gezeit dominiert. Parallel dazu wurden auch noch kleinere Vorhaben in China realisiert, vornehmlich um deren Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Dabei schauten alle Akteure jener Zeit sehr genau auf den kurz zuvor errichteten Bau des ersten rentabel arbeitenden Gezeitenkraftwerkes in Frankreich (Abb. 18). Dessen Bau begann 1960 und wurde sieben Jahre später fertiggestellt. Das Kraftwerk staut das Wasser des kleinen Flusses Rance auf, unweit von Saint-Malo. Die maximale Durchflussmenge dieses Flusses versprach mit etwa 18 000 Kubikmetern pro Sekunde Erfolg, ein Wert vergleichbar mit dem Wassertransport des Mississippi. Die Trasse des errichteten Dammes ist 800 m lang und staut das Wasser in einem Becken mit einer Fläche von 20 km². Der eingebaute Turbinenschacht formt einen 332 m langen Tunnel. Er ist bestückt mit 24 richtungsvariablen Rohrturbinen, jede mit einem Durchmesser von 5,3 m, einem Gewicht von 470 Tonnen und einer Leistung von zehn Megawatt. Diese drehen in beide Richtungen, sind also sowohl bei Ebbe als auch bei Flut aktiv und liefern jährlich 550 Gigawattstunden. Die Turbinen können auch als Pumpen betrieben werden, um die Füllung oder aber Entleerung des Beckens zu beschleunigen. Bei einer Höhe von 25 m ist die Basis dieses Dammes 53 m und seine Krone 32 m breit. Solche Abmessungen gaben hinrei-



Abb. 18 Gezeitenkraftwerk La Rance in der Bretagne/Frankreich mit einer jährlichen Leistung von etwa 550 Millionen Kilowattstunden. (Foto: Wikipedia)

chend Platz für eine zweispurige Fahrbahn, die aber beim größten Tidenhub von 13,5 m lediglich 1,5 m oberhalb des Meeresspiegels liegt.

Schließlich wird durch dieses Beispiel recht deutlich, dass der Bau von Gezeitenkraftwerken jeglichen Schiffsbetrieb entlang des aufgestauten Flusses für künftige Zeiten ausschließt, und es soll auch nicht verschwiegen werden, dass durch derartige Dammbauten alle natürlichen Fischwanderungen und der Wasseraustausch zwischen Küstengewässern und der offenen See weitgehend unterbunden sind.

Ergänzende Literatur:

Arx, William Stelling von: *An Introduction to Physical Oceanography*. Amsterdam 1962.

Benque, Jean-Pierre, Cunge, Jean A., Feuillet, Jacques, Hauguel, Alain, und Holly, Forrest M.: New Method for Tidal Current Computation. In: *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division* 108, 1982, S. 396–417.

Davis, A.M., und Furnes, G.K.: Observed and Computed M_2 Tidal Currents in the North Sea. In: *Journal of Physical Oceanography* 10(2), 1980, S. 237–257.

Defant, Albert: *Ebbe und Flut des Meeres, der Atmosphäre und der Erd feste*. Berlin 1953.

Defant, Albert: *Physical Oceanography*. Oxford u.a. 1961.

Garrett, Christopher, und Cummins, Patrick: The Power Potential of Tidal Currents in Channels. In: *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, 461, 2005, S. 2563–2572.

Gill, Adrian E.: *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York 1982.

Guohong, Fang: Tide and Tidal Current Charts for the Marginal Seas Adjacent to China. In: *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* 4, 1986, S. 1–16.

- Hough, S.S.: On the Application of Harmonic Analysis to the Dynamical Theory of Tides. Part II. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. A*, 191, 1898, S. 139–185.
- Kurze, Gottfried: *Zukunft Weltmeer*. Leipzig 1973.
- Loder, John W., und Garrett, Christopher: The 18.6-Year Cycle of Sea Surface Temperature in Shallow Seas due to Variations in Tidal Mixing. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 83(C4), 1978, S. 1967–1970.
- Off, Theodore: Rhythmic Linear Sand Bodies Caused by Tidal Currents. In: *AAPG Bulletin* 47(2), 1963, S. 324–341.
- Quaas, Manfred: *Projekt Atlantis. Die Zukunft des Meeres*. Leipzig, Jena, Berlin 1982.
- Sager, Günther: *Gezeiten und Schifffahrt*. Leipzig 1959.
- Sager, Günther: Jubiläum im Gezeitenrechenmaschinenbau. In: *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 39, 1959, S. 110–117.
- Sager, Günther: *Naturgewalt Meer. Vom Kampf zwischen Meer und Land*. Leipzig, Jena, Berlin 1972.

Anschrift des Verfassers:

Dr. rer. nat. habil. Eberhard Hagen
 Forsthof 1
 17192 Peenehagen
 Deutschland
 E-Mail: eberhard-hagen@t-online.de

The Tides and Shipping

Summary

Taking into account the ongoing efforts to gain a better physical understanding of the oceanic tides, this article examines the impact of high and low tide on shipping, harbor construction, nearshore settlement aspirations and energy production.