

DEUTSCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN  
INSTITUT FÜR MEERESKUNDE

# BEITRÄGE ZUR MEERESKUNDE

HERAUSGEGEBEN

VON

ERICH BRUNS

HEFT 11



---

AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

1964

Das Regime der Gezeiten und der Gezeitenströme in der Nordsee,  
dem Kanal und der Irischen See<sup>1)</sup>

VON GÜNTHER SAGER

Warnemünde

1964. 1000

Erschienen im Akademie-Verlag GmbH, Berlin W 8, Leipziger Straße 3—4

Copyright 1964 by Akademie-Verlag GmbH

Lizenznummer: 202 · 100/523/64

Kartengenehmigung: Mdl der DDR Nr. 622/63

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“ Bad Langensalza

Bestellnummer: 2105/11 · ES 18 E 4 · Preis: DM 28,50

<sup>1)</sup> Eingereicht zur Erlangung des Grades eines habilitierten Doktors der Naturwissenschaften an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Karl-Marx-Universität Leipzig.

## Zusammenfassung

Erste Kunde über die Gezeiten der nordwesteuropäischen Gewässer verdanken wir den Römern, die zunächst den Spuren der Phönizier in kühnen Einzelunternehmungen folgten und später als Eroberer ihre Legionen an die Kanal- und Nordseeküste schickten und den Übergang nach Britannien erzwangen. Vier Jahrhunderte nach ihrem Abzug hat der angelsächsische Priester BEDA das beträchtliche Wissen der Antike zu neuem Leben erweckt und mit eigenen Beobachtungen durchsetzt wiedergegeben. Erst in ebensolchem Abstand begegnen wir dem zweiten frühmittelalterlichen Dokument über Gezeitenbeobachtungen, dem „Codex Cottonianus, Julius DVII“, das dem Abt WALLINGFORD zugeschrieben wird und einige Jahrhunderte hindurch von Einfluß gewesen ist.

Eine Systematik in den Beobachtungen der Eintrittszeiten der Hochwasser und den Richtungen der Gezeitenströme verdanken wir erst den niederdeutschen Seebüchern und den italienischen Portolanis des 14. bis 16. Jahrhunderts, die namentlich unter dem Einfluß der Hanse schnelle Verbreitung gefunden haben. Aus den Beziehungen zwischen der Hochwassereintrittszeit und dem Stand des Mondes hat man anfänglich mit Hilfe des Äquinoktialkompasses die Zeit bestimmt und nach Einführung der Uhren schon eine ungefähre Vorhersage der Gezeiten zu geben vermocht. In diese Zeit fallen auch schon die ersten Überlegungen zu den astronomischen Ursachen der Tiden, wobei im Verein mit intensiven Gezeitenbeobachtungen bereits über ein Jahrhundert vor der NEWTONSchen Ära teilweise brauchbare theoretische Ansätze zu verzeichnen sind, während gemessene Daten über den Ablauf der Gezeit dem großen Naturforscher sogar als Basis verschiedener Meditationen gedient haben.

Der große Durchbruch in der wissenschaftlichen Betrachtung der Gezeiten gelang NEWTON mit seinem Gravitationsgesetz, aus dem die gezeitenerzeugenden Differenzkräfte zwischen Gravitations- und Zentrifugalkräften folgen, die der dritten Potenz des Abstands des gezeitenerzeugenden Gestirns von der Erde umgekehrt proportional sind. Auf seinen Grundlagen haben BERNOULLI, MACLAURIN und EULER Ergänzungen zu geben vermocht, womit die meisten Grundeigenschaften der Gezeiten qualitativ erklärt werden konnten, jedoch noch große Unterschiede gegenüber dem Verhalten der irdischen Wassermassen verblieben. Die wichtigsten Formeln der Gleichgewichtstheorie sind in einem Abschnitt zusammengefaßt, da sie auch heute noch bei den langperiodischen Schwankungen der Gezeiten eine Rolle spielt.

Hundert Jahre nach NEWTON begann LAPLACE seine Gezeitenarbeiten unter dem Gesichtspunkt der Wellenerscheinung, auf die er die von ihm aufgestellten hydrodynamischen Gleichungen anwandte. Trotz großen mathematischen Aufwands gelang die Erfassung namentlich der terrestrischen Einflüsse nicht, so daß sich LAPLACE Erklärungen der wirklichen Gezeitenerscheinung aus gründlichen Beobachtungen in Brest zuwandte, womit er praktische Erfolge erzielen konnte.

Um 1800 wird in der Gezeitenforschung der Wunsch nach einer Erfassung des Gezeitenverlaufs über größere Meeresgebiete laut, dem YOUNG erstmals für die Nordsee, den Kanal und die Irische See durch den Entwurf von Flutstundenlinien nähergekommen ist, während sich LUBBOCK auf die Küste beschränkte. Systematische Arbeiten in dieser Richtung verdanken wir WHEWELL, dessen Entwurf 1836 bereits die Existenz von Drehtiden zeigte und in dieser Hinsicht demjenigen seines Landsmanns AIRY überlegen blieb. AIRYS Anregungen zur Beobachtung der Gezeiten der Irischen See gaben den Anstoß zu den Karten mit Hubhöhenlinien und solchen mit Linien und Beträgen der maximalen Springtideströme von BEECHEY, der auch Strombeobachtungen im Ärmelkanal ausgewertet hat, denen in den folgenden Jahrzehnten zahlreiche Beiträge über die Gezeitenströme gefolgt sind, bis die Beobachtungen in zunehmend organisierter Form durchgeführt wurden, aus denen 1899 der erste offizielle Gezeitenstromatlas von englischer und 1905 von deutscher Seite hervorgegangen ist, wobei die Entwicklung der Haupttypen von Strömungsmeßgeräten kurz nach der Jahrhundertwende baldige Verbesserungen erlaubte.

Um diese Zeit lebte auch die Tätigkeit im Entwurf von Flutstundenlinien wieder auf, wobei man sich auf erweiterte Wasserstandsbeobachtungen und erste theoretische Ansätze stützen konnte. In zwei Jahrzehnten haben sich KRÜMMEL, HARRIS, DEFANT, v. STERNECK und MERZ mit der Verbesserung der vorhandenen Karten und dem Entwurf von Linien gleichen Tidenhubs befaßt und damit das Interesse der Theoretiker geweckt, die in wenigen Jahren größere Fortschritte erzielen konnten als Generationen zuvor.

Eine rein theoretische Lösung für die Gezeiten in einem mit dem Ozean verbundenen rechteckigen Becken ebensolchen Querschnitts hat TAYLOR 1920 gefunden, die uns prinzipielle Anhaltspunkte gegeben hat. Von praktischem Nutzen war DEFANTS Methode der Bestimmung der Amplitude und Phase des in seinem Ablauf harmonisch angenommenen Wasserstandes aus den in der Nordsee gemessenen Gezeitenströmen unter Benutzung der Kontinuitätsgleichung, wobei natürlich einschränkende Bedingungen hingenommen werden mußten. Unmittelbar darauf entwarfen PROUDMAN und DOODSON aus Strombeobachtungen unter Anwendung der hydrodynamischen Bewegungsgleichungen und Berücksichtigung der Reibung entsprechende Karten, wobei die Rechnungen das Wasserstandsgefälle und die Phase entlang ausgewählter Schnitte durch die Nordsee ergaben. Das Verfahren wurde 1931 von DOODSON und CORKAN auf den Kanal und die Irische See ausgedehnt.

Einen bedeutenden Schritt namentlich für die Ozeane stellt das Randwertverfahren von HANSEN dar, das von den Bewegungs- und der Kontinuitätsgleichung

ausgeht, die Reibung und variable Tiefen berücksichtigt und aus den Werten des Tidenhubs bzw. der Normalkomponenten des Gezeitenstroms die Ermittlung der Gezeiten jeweils einer Partialtide in dem betreffenden Seegebiet gestattet, wenn für die Beurteilung der Reibung die Tiefenverteilung und hinreichende Annahmen über die maximale Tidestromverteilung vorliegen.

Für die übrigen Elemente des Tidenhubs und der Gezeitenströme haben sich ab 1923 vereinzelt und ab 1950 systematisch Darstellungen präsentiert, die eine umfassendere Vorstellung vom Wechselspiel der vertikalen und horizontalen Komponente der Gezeitenerscheinung ermöglicht haben, wobei die Arbeiten von HANSEN besonders hervorgehoben zu werden verdienen. Die noch verbliebenen lokalen Lücken namentlich in der Irischen See sowie das Fehlen einiger weiterer Elemente auch in der Nordsee und dem Ärmelkanal haben den Verfasser ab 1958 zu weiteren Untersuchungen veranlaßt, als deren Ergebnis im Teil II der „Atlas der Elemente des Tidenhubs und der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal und die Irische See“ vorgelegt wird, dem eine gesonderte Einleitung vorangestellt ist.

Für die Ermöglichung der Durchführung und die Unterstützung dieser umfangreichen Arbeiten ist der Verfasser dem Direktor des Instituts für Meereskunde Warnemünde, Herrn Prof. Dr. habil. BRUNS, zu Dank verpflichtet, der zugleich das Hauptreferat übernommen hat, sowie Herrn Prof. Dr. habil. BUCHHEIM vom Institut für theoretische Physik an der Bergakademie Freiberg für die freundliche Übernahme des Korreferats auf diesem Spezialgebiet.

Anerkennung gebührt ferner Herrn Dr. SCHEMAINDA vom Institut für Meereskunde Warnemünde für fachliche Diskussionen und die Förderung von Übersetzungen historischer Texte und der Institutsbibliothekarin Frl. WEIHAUG für die zahlreichen Hinweise und die Beschaffung der teilweise schwer zugängigen Literatur.

In engstem Zusammenhang mit der Entstehung der Arbeit seien die Herrn Diplomphysiker MATTHÄUS und Hauptrechentechniker SAMMLER genannt, denen ein Teil der Vorarbeiten für die Kartenentwürfe oblag, die sie gewissenhaft ausgeführt haben, wobei sie auch an der manchmal schwierigen Entscheidung des Verlaufs der Isolinien bzw. der Existenz von Amphidromien Anteil gehabt haben.

## INHALT DES ERSTEN TEILS

1. Die Periode vereinzelter Gezeitenbeobachtungen von der Antike bis zum 14. Jahrhundert . . . . .	11
2. Die Gezeitenangaben der alten Seebücher im 14. bis 16. Jahrhundert . . . . .	15
3. Ansätze zur Theorie und Vorhersage der Gezeiten . . . . .	20
4. NEWTON und die Anhänger der Gleichgewichtstheorie (1685—1775) . . . . .	23
5. Die Grundformeln der statischen Theorie der Gezeiten . . . . .	28
6. Die dynamische Gezeitentheorie von LAPLACE und ihre Ergänzungen . . . . .	34
7. Erste Versuche zum Entwurf von Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers (1800—1845) . . . . .	36
8. Die Anfänge der Gezeitenstromkarten (1845—1900) . . . . .	43
9. Die Entwicklung der Gezeitenstromatlanten von der Jahrhundertwende bis zur Gegenwart . . . . .	48
10. Die Entwürfe von Gezeitenkarten aus erweiterten Wasserstandsbeobachtungen und theoretischen Ansätzen (1900—1923) . . . . .	52
11. Die theoretische Untersuchung von TAYLOR (1920) . . . . .	60
12. Die Methode von DEFANT (1923) . . . . .	67
13. Die Methode von PROUDMAN und DOODSON (1924) . . . . .	72
14. Das Randwertverfahren von HANSEN (1943) . . . . .	77
15. Karten mit verschiedenen Elementen des Tidenhubs und der Gezeitenströme . . . . .	83
Literaturverzeichnis . . . . .	89

## INHALT DES ZWEITEN TEILS

Einleitung . . . . .	5
Übersichtskarte . . . . .	3
Erläuterungen zu den Karten . . . . .	5
A. Karten zu den Hoch- und Niedrigwassern . . . . .	5
Karte 1: Linien gleichen mittleren Springtidenhubs. . . . .	5
Karte 2: Anteil des mittleren Nipp- am mittleren Springtidenhub für geographische 1°-Felder in Prozent . . . . .	8
Karte 3: Spring- bzw. Nippverspätung für geographische 1°-Felder . . . . .	10
Karte 4 und 5: Anteil des Tidenhubs in Prozent am mittleren Springtidenhub während einer halben Tideperiode um die Zeit der Syzygien bzw. Quadraturen . . . . .	10
Karte 6: Linien gleichen mittleren Hochwasserzeitunterschiedes gegen den Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich . . . . .	14
Karte 7 und 8: Abweichungen der Hochwassereintrittszeiten in Minuten gegenüber den mittleren Zeiten während einer halben Tideperiode um die Zeit der Syzygien bzw. Quadraturen . . . . .	18
B. Karten zu den Gezeitenströmen . . . . .	23
Karte 9: Maximalgeschwindigkeit des Gezeitenstroms zur mittleren Springzeit . . . . .	23
Karte 10: Das Verhältnis der maximalen Gezeitenströme bei mittlerer Nipp- und Springzeit. . . . .	24
Karte 11: Linien gleichen Verhältnisses des kleinsten zum größten Gezeitenstrom zur mittleren Springzeit in Prozent . . . . .	28
Karte 12 und 13: Linien gleicher Richtung und Richtungssektoren des maximalen Gezeitenstroms zur mittleren Springzeit. . . . .	30
Karte 14: Eintrittszeiten des maximalen Gezeitenstroms zur mittleren Springzeit . . . . .	32
Karte 15: Durchschnittliche maximale Abweichung der Eintrittszeit des stärksten Gezeitenstroms vom Mittelwert während einer Tideperiode . . . . .	34
C. Karten zur Wechselwirkung von Tidenhub und Gezeitenströmen . . . . .	36
Karte 16 und 17: Differenz der Eintrittszeiten zwischen mittlerem Springhochwasser und maximalem Gezeitenstrom bzw. Eintritt des maximalen Gezeitenstroms in bezug auf das Hochwasser zur mittleren Springzeit . . . . .	36
Charakteristische Daten verkehrsreicher Flüsse . . . . .	40
Die Grundelemente des Tidenhubs für ausgewählte Küstenorte . . . . .	42
Literaturnachweis zu den Kartenentwürfen . . . . .	45

## TEIL I

## Die Entwicklung der Methoden zur Bestimmung der Elemente von Tidenhub und Gezeitenströmen

## 1. Die Periode vereinzelter Gezeitenbeobachtungen von der Antike bis zum 14. Jahrhundert

Die ältesten Berichte über die Gezeiten in den nordwesteuropäischen Gewässern gehen bis in die Antike zurück. So hat bereits PYTHEAS VON MARSILIA um etwa 325 vor unserer Zeitrechnung den Ozean von der Straße von Gibraltar bis England durchfahren, ist in die Nordsee vorgedrungen und hat vielleicht sogar Island erreicht. Er hat bereits die Relation zwischen der halbmonatlichen Ungleichheit und den Mondphasen gekannt und erstmalig die Höhen der Gezeiten gemessen. Eine von ihm verfaßte Abhandlung „Vom Ozean“ ist leider bis auf wenige Fragmente verloren gegangen. PLINIUS DER ÄLTERE berichtet in seiner „Historia naturalis“ vom Jahre 77 (Buch II, Kap. 97), daß die Flut über Britannien nach PYTHEAS über achtzig Ellbogen austrete.

Daß eine dem Mittelmeerbewohner kaum bekannte Naturerscheinung wie die Gezeiten in ihrer Großartigkeit zu Übertreibungen Anlaß geben konnte, ist nicht überraschend, nur hat man auch den übrigen Aussagen des PYTHEAS dadurch wenig Glauben geschenkt. So berichtet STRABO um den Beginn der Zeitrechnung in seiner „Geographica“ (Buch II, Kap. 4), der übrigens schon den Begriff der täglichen Ungleichheit der Gezeiten kannte, daß sich „viele von PYTHEAS hintergehen ließen, der behauptet hätte, ganz Britannien so weit als möglich bereist zu haben, wobei sein Umfang auf mehr als vierzigtausend Stadien (1 Stadion = 200 Schritt, ungefähr 160 Meter) angegeben sei. Angefügt seien Nachrichten über Thule und die dortige Gegend, wo weder Land, noch Wasser noch Luft sein soll, sondern ein Gemisch davon, was dem Atmen des Meeres ähnlich sei, worin das Land und das Meer und Alles emporgehoben werde; und dies sei das Band um das Ganze, das man weder auf dem Trockenen noch zu Schiffe bereisen könne. Das Atemähnliche des Meeres habe er selbst gesehen, das Übrige vom Hörensagen“.

PYTHEAS' Schilderung kann entweder Erfindung sein, um Nachfolger vom Befahren der Route aus Gründen einer Handelskonkurrenz abzuhalten — ein Beispiel dafür gibt STRABO (Buch III, Kap. 5) zwischen Phöniziern und Römern für die Route von Gades nach den Zinninseln —, oder aber auf Tatsachen beruhen. Auch in den Buchten Schottlands sowie der Hebriden, Orkneys und Shetland-Inseln — in diesen Gegenden darf man Thule wohl am ehesten vermuten — kommen Wattgebiete vor, die kaum befahrbar sind. Unter Berücksichtigung des Klimas mit häufigen Nebeln ist das Verschwinden von Land, Luft und Meer gar nicht so sonderbar, wie das auf den ersten Blick erscheinen könnte.



1. bzw. 15. Mond koinzidiert, die „laedones“ setzen mit dem 5. und 20. Mond ein. Aus dieser einfachen Zuordnung ist leider keine Entnahme der Springverspätung möglich. Schließlich erwähnt er noch die Existenz einer 8- bis 10jährigen Mondperiode, die sich schon bei PLINIUS (Buch II, Kap. 97) findet, der bereits die Unterschiede der Äquinoktial- und Solstitialtiden, eine 8jährige Mondperiode (100 Mondumläufe) und die Tatsache der örtlich verschiedenen Eintrittszeit der Flut — auf den Umlauf der Gestirne zurückgeführt — kannte und Vorstellungen über den Einfluß von Deklination und Parallaxe des Mondes besaß.

Die Parallelen zwischen BEDA und PLINIUS sind so deutlich, daß man stellenweise an eine Kopie erinnert wird. Trotzdem verbleibt BEDA das Verdienst, die über sieben Jahrhunderte in Vergessenheit geratenen Kenntnisse der Gezeiten wiederbelebt und durch eigene Beobachtungen ergänzt zu haben, wozu auch diejenige zählt, daß das Hochwasser im Norden der englischen Ostküste früher eintritt als in den südlicheren Teilen.

Die Bedeutung des BEDAschen Schaffens gewinnt noch durch die Tatsache, daß es fast ein halbes Jahrtausend währte, ehe uns erneut Kunde über Gezeitenbeobachtungen erhalten ist. Es handelt sich um den heute im Britischen Museum befindlichen berühmten „Codex Cottonianus, Julius DVII“, der im 13. Jahrhundert entstanden ist und dem Kloster St. Albans (nordwestlich London) zugehören dürfte. In diesem Werk sind Kalenderwerte sowie andere astronomische und geographische Daten enthalten, von denen ein Teil auf JOHN WALLINGFORD zurückgeht, der 1213 als Abt starb. Für die Gezeitenforschung von besonderer Bedeutung ist die Seite 45 b mit einer Tabelle der „flod at london brigge“, die HARRIS (1898) publiziert hat. Sie lautet

Ætas Lunę	h.	m.
1	3	48
2	4	36
3	5	24
4	6	12
·	·	·
·	·	·
·	·	·
28	1	24
29	2	12
30	3	0

In der ersten Zeile steht das Mondalter in Tagen, in den beiden nächsten erstmalig die zugeordnete Eintrittszeit des Hochwassers in Stunden und Minuten. Für ein Mondalter von 0<sup>d</sup> bzw. 30<sup>d</sup> (angenäherte Länge des synodischen Monats) ergibt diese alte Tafel einen mittleren Hochwasserzeitunterschied gegenüber der Mondkulmination von 3<sup>h</sup>, während die heutigen Werte im Londoner Stadtgebiet zwischen knapp 1/2 (Tilbury Docks) und reichlich 2<sup>h</sup> (Tidegrenze bei Richmond Lock) liegen. HARRIS (1898) hat daraus den Schluß gezogen, daß sich die Hochwasser-eintrittszeiten seit dem 13. Jahrhundert um etwa eine Stunde verfrüht haben, was sowohl natürliche wie künstliche Ursachen haben dürfte, die sich in einer Wandlung des Mündungstrichters und eigentlichen Verlaufes der Themse aus-gewirkt haben.

Die konstante Verspätung von 48<sup>m</sup> bzw. richtiger 50,5<sup>m</sup> wurde mit wenig Ausnahmen bis zum Erscheinen der ersten eigentlichen Gezeitentafel von FLAMSTEED (1683) beibehalten. In Wirklichkeit ist die tägliche Verschiebung der Mondkulmination von mehreren Faktoren abhängig (Deklination, Parallaxe, Mondphase) und kann zwischen etwa 41<sup>m</sup> und 1<sup>h</sup> 05<sup>m</sup> schwanken.

## 2. Die Gezeitenangaben der alten Seebücher im 14. bis 16. Jahrhundert

Die Gezeitenbeobachtungen des frühen Mittelalters waren durchweg auf Einzelinteresse begründet, dem der Hintergrund einer organisierten Schifffahrt größeren Umfangs fehlte. Das änderte sich mit der Entwicklung der Hanse grundlegend, die im 12. und 13. Jahrhundert einsetzte und bereits 1252 große Privilegien in Flandern mit dem Handelskontor in Brügge erreicht hatte. Gegen Ende des 13. Jahrhunderts hatte Lübeck die Führung übernommen, mit der in der zweiten Hälfte des 14. Jahrhunderts die Blütezeit begann. Die Zahl der Hansestädte betrug etliche Dutzende, schwankte aber in den einzelnen Epochen beträchtlich. Obwohl von einer hydrographischen Tätigkeit in den Zentren der Hanse direkt nichts überkommen ist, hat sie ihren nautischen Niederschlag in dem Erscheinen der sog. „Seebücher“ gefunden, die eine Sammlung vieler Einzelnachrichten aus der Seefahrt darstellen und bis in das 14. Jahrhundert oder noch weiter zurückgehen.

Neben diesem nordischen Schifffahrtszentrum steht jenes des Mittelmeers mit den Seemächten Venedig und Genua an der Spitze, wobei letztere bereits vor dem Beginn der Kreuzzüge einsetzt. Auch hier hatte man Standardwerke der Nautik geschaffen, die neben dem mediterranen Raum die Küsten Portugals, Spaniens und Frankreichs bis zur Schelde behandelten, wo sich in Sluis — dem derzeitigen Vorhafen von Brügge an der Meeresbucht des Zwyn — die beiden großen Handelszentren des Nordens und Südens trafen und in rege Beziehungen traten, wie SAGER (1960) näher behandelt hat. Die italienischen nautischen Beschreibungen sind später unter dem Namen Portolani bekannt geworden. Sie weisen viele Ähnlichkeiten mit den Seebüchern auf, sind aber meistens mehr kartographisch orientiert.

Aus dem Mittelalter sind nach KRETSCHMER (1909) bis zum Jahr 1500 15 Portolane erhalten.

Mit der Geschichte der Seebücher und Portolani haben sich namhafte Gelehrte wie NORDENSKIÖLD (1897) und WAGNER (1895) befaßt, denen KOPPMANN und BREUSING (1876) sowie FISCHER (1886) vorangegangen waren. Um die Priorität beider Gruppen alter nautischer Bücher entstand namentlich zwischen den letztgenannten ein Literaturstreit, in den BEHRMANN (1906) klärend eingreifen konnte. Nach seinen gründlichen Vergleichen der teilweise schwer zugängigen Originale ist er zu der Ansicht gelangt, daß viele Stellen in den nautischen Werken über die atlantische und Kanalküste im 15. und 16. Jahrhundert bei den Niederdeutschen, Franzosen und Italienern auf einer gemeinsamen Quelle beruhen, der das Seebuch

der Hamburger Commerz-Bibliothek am nächsten steht, das jetzt näher behandelt werden soll.

Das „Alte See-Buch“ ist eine um die Zeit kurz vor 1500 datierende Segelanweisung, die sich als Papierhandschrift in Quarto erhalten hat. Das Seebuch besteht aus zwei Exemplaren, die sich in der Papierart wie in der Handschrift unterscheiden und als Blatt 1 bis 38 und 39 bis 70 fortlaufend foliiert sind. Eine Neuausgabe, in der beide Fassungen jeweils auf Halbspalten konfrontiert sind, hat KOPPMANN 1876 veranstaltet, Einzelheiten für Ostfriesland hat LANG (1953) ausgewertet, der auch eine Probe des Originaltextes beigelegt hat (Abb. 2).

Als älteste Bestandteile zeichnen sich die ersten fünf und das siebente Kapitel ab, in denen die Hafenschreibungen mit den Wasserstands- und Stromverhältnissen enthalten sind. Kapitel I gibt die Eintrittszeiten des Niedrigwassers (lege water) von Cadix über Lissabon entlang der spanischen und französischen Küste bis zum Zwyn, der um 1200 als Zufahrt von Brügge diente, das bis zu jener Zeit noch Verbindung mit der offenen See hatte. Kapitel III beginnt beim Bristol-Kanal und behandelt die Südküste Englands von den Scilly-Inseln bis nach dem damals auf der Insel Thanet — etwa gegenüber Brügge — gelegenen North-Foreland, wobei der Eintritt des Hochwassers (vul see) in bezug auf die Mondstellung angegeben ist. Eine Vorstellung des alten Manuskripts gibt die Abbildung 2.

Item buten der oster emse un der wester  
emse un der lauwers dar maket vul  
see en sutosten mane

Abb. 2. Beispiel von Originalzeilen aus dem Alten See-Buch

Originaltext: Item buten der oster emse un der wester  
emse un der lauwers dar maket vul  
see en sutosten mane

Verdeutscht: Auch außerhalb der Osterems und der Westerems und der  
Lauwers bringt (macht) Hochwasser ein südöstlicher Mond

Wie die Kapitel I und III den Tiden, so sind die Kapitel II und IV den Gezeitenströmen vorbehalten, wobei die Richtung des Flut- und Ebbestroms verzeichnet ist. Kapitel II umfaßt die spanischen und französischen Angaben bis zum Zwyn, Kapitel IV die englische Südküste von Cap Landsend bis Thanet. Die noch zum älteren Teil gehörigen Kapitel V und VII geben die Beschreibungen von Häfen und Reeden in Südengland bzw. von der Loire bis Calais.

Beide Fassungen des alten Seebuchs gehen primär auf flämische und vielleicht zu einem Teil auf französische Unterlagen zurück, wobei sich die Schlüsselstellung von Brügge in dem Aufbau der einzelnen Kapitel widerspiegelt, woraus KOPPMANN angenommen hat, daß dort auch der Ursprung des Kodex liegt, was indessen nicht belegt werden konnte. Ohne Zweifel ist das Seebuch unter hansischem Einfluß mehrfach überarbeitet und erweitert, wofür vor allem das Kapitel XII ein Beleg ist.

Das Seebuch kam bald in den Hansestädten in Gebrauch, wurde ins Niederdeutsche übertragen und serienmäßig vervielfältigt. Daneben kam es im Laufe der Zeit zu regelrechten Prachtausgaben, die durch reiche Kupferstiche belebt waren, sich aber für die Schiffe als zu kostspielig und unhandlich erwiesen und wieder durch einfachere Ausgaben verdrängt wurden. Dem Ursprung aller dieser Abkömmlinge, die BEHRMANN (1906) aufgezählt hat, bleibt in Ermangelung anderer Überlieferungen das Seebuch am nächsten, das in seinen ältesten Teilen wohl auf die zweite Hälfte des 14. Jahrhunderts angesetzt werden darf.

Ein für die Kenntnis der Gezeitenbeobachtungen besonders bedauerlicher Verlust ist das 1494 von HUGO JANSZ gedruckte „Getydenboeck“, das in kurzer Folge mehrfach aufgelegt wurde (1495, 1497, 1505 und 1506). Wie MOES (1900) mitgeteilt hat, wurden die beiden jüngeren Ausgaben noch 1856 der typographischen Ausstellung in Haarlem von dem bekannten Buchdrucker JOHANNES ENSCHEDÉ vorgelegt, sind dann aber wie alle anderen Exemplare verloren gegangen.

Von den italienischen Portolani befaßten sich nach KRETSCHMER (1909) nur drei mit Gezeitenangaben, da der Mittelmeerraum im allgemeinen tidearm ist. Dazu gehört der Portolan des Venezianers PIETRO DE VERSI aus dem Jahr 1445, der die Hochwasserzeiten für Flandern, die französische und englische Kanalküste und Wales anführt, der fast ebenso alte Portolan MAGLIABECCHI XIII, 72, 1 und seine angenäherte Kopie im Portolan MARUCCELLI, die beide eine Zusammenstellung der Hochwasserzeiten im Kanal enthalten, und schließlich das 1490 in Venedig von BERNARDINO RIZO gedruckte Hafenbuch mit den Hochwasserzeiten an den atlantischen Küsten von Cadix bis Sluis, dem Vorhafen von Brügge.

Einen sehr aufschlußreichen Beitrag über die Ermittlung der Hochwassereintrittszeiten in früherer Zeit hat BREUSING (1876) im Anhang der Neuausgabe des alten Seebuchs gegeben, die hier wenigstens auszugsweise Platz finden soll, weil sie von grundlegender Bedeutung für die Zeit vor dem Aufkommen eigentlicher Gezeitentafeln ist. Es heißt dort:

„Der Gebrauch, den wir heute vom Kompaß machen, beschränkt sich darauf, Richtungslinien in der Horizontalebene festzustellen. In den ersten Jahrhunderten nach seiner Einführung mußte er den Seeleuten aber noch einen anderen Dienst leisten, er mußte ihnen die Uhr ersetzen. Um den Kompaß als Uhr zu gebrauchen und an ihm den Eintritt der Gezeit beobachten zu können, hatte man ihm folgende Einrichtung gegeben: Eine Kompaßscheibe mit der Strichrose, aber ohne Nadel, wurde mit Hilfe zweier am Ost- und Westpunkte angebrachter Zapfen an einem Gestelle befestigt und rechtwinklig gegen die Erdachse gelegt, so daß sie mit der Ebene des Äquators zusammenfiel, den Südpunkt aufwärts, den Nordpunkt abwärts. Die richtige Lage gab man ihr, indem man einen durch ihre Mitte gehenden Stift, der die Erdachse vorstellte und zugleich als Schattenzeiger diente, an einem dazu angebrachten Bogen auf die Polhöhe einstellte. Der Nord- und Südpunkt versicherte man sich durch eine im Boden des Gestells angebrachte Magnetnadel. Eine solche Vorrichtung hatte den Namen Äquinoctial-Kompaß.

An diesem Kompaße nun beobachtete man zur Zeit entweder des Hoch- oder des Niedrigwassers, auf welchen Strich der Schatten des Mondes fiel; der entgegengesetzte, dem Monde zugewendete Strich war derjenige, in dem der Mond stand, oder die Richtung nach dem Punkte, wo der Stundenkreis des Mondes den Äquator schneidet. Und weil an den Gegenpunkten der Erdkugel immer zwei Hochwasser oder zwei Niedrigwasser gleichzeitig eintreten, so nannte man auch die entgegengesetzten Kompaßstriche zusammen. Es war dabei

gleichgültig, ob man den Zeitpunkt des Hoch- oder den des Niedrigwassers beobachtete. Denn weil in See zwischen beiden eine Zeit von 6 Mondstunden verfließt, so bilden die Kompaßstriche für das Niedrigwasser einen rechten Winkel mit dem für das Hochwasser. War z. B. Hochwasser, wenn der Mond N oder S stand, also im Augenblicke seiner Kulmination, so machte er Niedrigwasser, wenn er O oder W stand. So lesen wir im Seebuche:

- I, 27. Item in Bonen (Boulogne) unde to Kalis (Calais) unde to Grevelingen (Gravelines) unde to Duenkerken (Dunkerque) unde tor Nyeporten (Nieuport) unde in alle de kost van Vlanderen maket lege water de mane west unde oest.  
 XI, 35 Item alle Vlanderenssyden strecket westsutwest unde ostnortost, unde dar maket dat hogeste water an dat land en suden mane unde en norden, unde buten banckes (außerhalb der Bänke) sudwest unde nortost.

Beide Angaben besagen bezüglich der flandrischen Küste ganz dasselbe, und mit der einen war auch die andere gegeben.

Eine Rechnung für einen anderen Tag, als an dem man die Beobachtung gemacht hatte, war nicht weiter nötig. Nimmt man an, daß die Bewegung des Mondes eine ganz gleich-

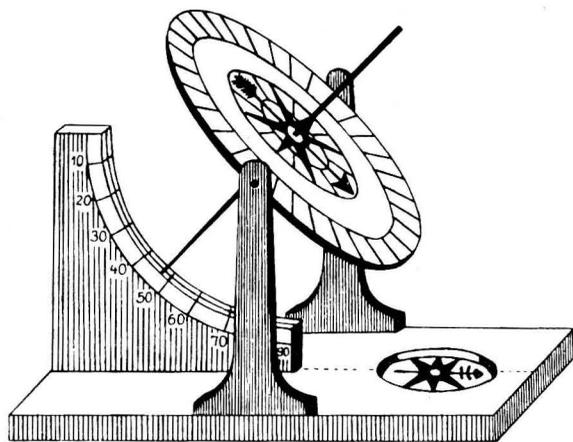


Abb. 3. Der Äquinoctialkompaß

förmige ist, und betrachtet man die Gezeit als lediglich vom Mondlaufe abhängig — und beides tat man damals —, dann ist es ganz gleichgültig, an welchem Tage die Beobachtung gemacht wird, und für welchen Tag eine Bestimmung der Hochwasserzeit gewünscht wird. Soviel der Mond seine Kulminationszeit verzögert, ebensoviel verzögert er auch seinen Eintritt in einen und denselben Stundenkreis und ebensoviel verspätet sich auch das Hochwasser. Der Kompaßstrich des einen Tages galt für alle Tage. Es war eine sinnreiche, wenn auch keine strenge Methode, aber was man an Genauigkeit einbüßte, gewann man an Bequemlichkeit. Und auf diesem Standpunkte steht das Seebuch.“ (Über die auf diese Weise erhaltenen Ungenauigkeiten unterrichten die Karten 7 und 8 des Teils II dieser Arbeit.)

„Nur wenn der Mond nicht zu sehen war — bei trübem Wetter oder in den Tagen des Neumonds — wurde man von der Beobachtung in Stich gelassen, und es mußte die Rechnung an ihre Stelle treten. Und diese wurde dann, als sich die Uhren erst Eingang verschafft hatten, mehr und mehr ausgebildet.

Da der Neumond zugleich mit der Sonne oder um 0 Uhr Mittags kulminiert, so gibt der Stand des Mondes beim Eintritt des Hochwassers an diesen Tagen, wenn man Strichmaß des Kompaß in Zeitmaß verwandelt, sehr nahe die Tageszeit nach der Sonnenuhr und umgekehrt die Tageszeit des Hochwassers, wenn man Zeitmaß in Strichmaß verwandelt, auch

den Stand des Mondes am Äquinoctialkompaß. Stand nun am Tage des Neumondes, wo man freilich den Mond nicht sehen konnte, beim Eintritt des Hochwassers die Sonne am Äquinoctialkompaß in SW, so stand auch der Mond SW und das hieß zugleich, es war 3 Stunden nach Mittag oder 3 Uhr Nachmittags. Und was für Neumond und Mittag, das galt auch für Vollmond und Mitternacht. Denn da hier der Mond der Sonne gegenüber stand, so trat das Hochwasser, welches bei Neumond auf 3 Uhr Nachmittags fiel, bei Vollmond um 3 Uhr nach Mitternacht ein, nur daß der Kompaßstrich den entgegengesetzten Namen NO erhielt. Diese Hochwasserzeit an den Tagen des Neu- und Vollmondes bezeichnete man mit dem Namen Hafenzeit; sie wurde aber nach wie vor in Kompaßstrichen ausgedrückt, und eine eigene Tafel diente dazu, um Strichmaß in Zeitmaß und umgekehrt zu verwandeln.

Die tägliche Verspätung des Hochwassers, die man der Verzögerung der Mondkulmination gleichsetzte, berechnete man dadurch, daß man einen Monat zu 30 vollen Tagen annahm; das ergab auf den Tag 48 Minuten Verspätung. Man zählte natürlich nur 15 Tage, da sich vom Vollmonde an dieselben Erscheinungen boten wie vom Neumonde an.“

Tafel der Hochwasserzeiten bei Neu- und Vollmond oder Hafenzeiten nach dem Stundenwinkel des Mondes in Kompaßstrichen

Kompaßstriche	Hafenzeit
S und N	0 Uhr 0 Min.
SzW und NzO	0 Uhr 45 Min.
SSW und NNO	1 Uhr 30 Min.
SWzS und NOzN	2 Uhr 15 Min.
SW und NO	3 Uhr 0 Min.
SWzW und NOzO	3 Uhr 45 Min.
WSW und ONO	4 Uhr 30 Min.
WzS und OzN	5 Uhr 15 Min.
W und O	6 Uhr 0 Min.
WzN und OzS	6 Uhr 45 Min.
WNW und OSO	7 Uhr 30 Min.
NWzW und SOzO	8 Uhr 15 Min.
NW und SO	9 Uhr 0 Min.
NWzN und SOzS	9 Uhr 45 Min.
NNW und SSO	10 Uhr 30 Min.
NzW und SzO	11 Uhr 15 Min.

Verspätung des Hochwassers nach dem Mondesalter

Tag	Verspätung
1.	0 St. 48 Min.
2.	1 St. 36 Min.
3.	2 St. 24 Min.
4.	3 St. 12 Min.
5.	4 St. 0 Min.
6.	4 St. 48 Min.
7.	5 St. 36 Min.
8.	6 St. 24 Min.
9.	7 St. 12 Min.
10.	8 St. 0 Min.
11.	8 St. 48 Min.
12.	9 St. 36 Min.
13.	10 St. 24 Min.
14.	11 St. 12 Min.
15.	0 St. 0 Min.

„Um nun für einen Tag die Zeit des Hochwassers zu finden, suchte man zunächst das Mondesalter, d. h. die Anzahl Tage, die seit dem Neu- oder Vollmonde verfloßen waren. Wie man den Tag des Neu- oder Vollmondes in Ermangelung eines Kalenders mit Hilfe der Goldenen Zahl und Epakten fand, gehört nicht hierher. Dann nahm man die dem Kompaßstriche entsprechende Hafenzeit aus der Tafel links und addierte dazu die Verspätung des Hochwassers nach dem Mondesalter aus der Tafel rechts. Die Summe ergab die Zeit des Hochwassers am fraglichen Tage.“

Mit der Ausdehnung der Schiffsrouten im Zeitalter der Entdeckungen mehrten sich die Mitteilungen über die Gezeiten beträchtlich, darunter auch nicht wenige Übertreibungen. Einen Überblick der frühen Reisen und Entdeckungen der englischen Nation gibt die „Hakluyt Collection“ (1599), in der bekannte Forschernamen auftauchen. Ohne hier Beispiele anzuführen — dies hat HARRIS (1898)

getan —, sei jedoch eine Empfehlung für Entdeckungsreisende zitiert, die um 1580 von WILLIAM BURRUGH gegeben wurde und charakteristisch für die Beobachtung von Tiden und Gezeitenströmen in jener Zeit ist, wobei die Gründlichkeit des Vorgehens auffällt, die sogar der unterschiedlichen Dauer des Flut- und Ebbestroms Rechnung trägt. Es heißt diesbezüglich:

„And when you come vpon any coast where you find floods and ebs, doe you diligently note the time of the highest and lowest water in euery place, and the slake or still water of full sea, and lowe water, and also which way the flood doeth runne, how the tides doe set, how much water it hieth, and what force the tide hath to driue a ship in one houre, or in the whole tide, as neere as you can judge it, and what difference in time you finde betwene the running of the flood, and the ebb. And if you finde vpon any coast the current to runne alwayes on way, doe you also note the same duely, how it setteth in euery place, and obserue what force it hath to driue a ship in one houre &c.“

### 3. Ansätze zur Theorie und Vorhersage der Gezeiten

Die durch die Aktivierung der Schifffahrt vervielfältigten Beobachtungen ließen mit der Zeit immer weniger Spielraum für mystische Deutungen der Gezeiten übrig, wenn auch die Frage nach den Ursachen letztlich unbeantwortet blieb, bis der Begriff der Gravitation durch NEWTON erschöpfend erfaßt war. Aber bereits über ein Jahrhundert vor seiner Zeit bahnten sich richtige Gedankengänge an, und gleichzeitig verstärkten sich die Bemühungen um eine verbesserte Gezeitenvorhersage, die noch eine Zeitlang nach NEWTON relativ unbeeinflußt ihre eigenen Wege ging.

Zu den Vorläufern NEWTONS im weitesten Sinne gehört bereits SCALIGER (1484 bis 1558), der aus den Regelmäßigkeiten im Auftreten der Gezeiten auf definitive Ursachen schloß. Er greift bezüglich der Fernwirkung der kosmischen Anziehungskraft den Vergleich mit dem Magnetismus auf und weist darauf hin, daß schon einige der Peripatetiker mit beiden Problemen Schwierigkeiten hatten. Ihm gebührt das Verdienst, den Einfluß der Deklination des Mondes auf die Gezeitenhöhe, der schon bei PLINIUS anklingt, betont zu haben. Den Wechsel von Flut und Ebbe vergleicht er mit der Funktion des Herzens, wobei er für die Erklärung der Ebbe zu mystischen Vorstellungen Zuflucht nimmt.

In ähnlichen Vorstellungen bewegt sich GILBERT (1540—1603). Er spricht von einer gegenseitigen Anziehung zwischen Mond und Erde, hat aber Mühe zu verstehen, warum beide Himmelskörper nicht zusammenfallen, da ihm der erst 1680 durch HUYGENS definierte Begriff der Zentrifugalkraft fehlt. Während er die Flut mit der Mondanziehung zu erklären vermag, nimmt er an, daß im Erdinneren Flüssigkeiten vorhanden sind, die sich mit dem Aufhören der Gezeitenkräfte zurückziehen, wodurch auch der Meeresspiegel fällt.

Einen weiteren Schritt auf die theoretische Erklärung des Gezeitenphänomens hin unternahm KEPLER (1571—1630), der sich seit 1598 mit diesem Problem beschäftigte. Er hatte bereits die Notwendigkeit längerer Beobachtungsreihen der

Gezeiten erkannt und wußte um die 19jährige Tideperiode. In seiner Einführung zur Bewegung des Planeten Mars, die auf den sorgfältigen Beobachtungen von TYCHO DE BRAHE (1546—1601) fußt, hat KEPLER 1609 als grundlegendes Axiom zur Gravitation und damit der Ursache der Gezeiten ausgesprochen, daß die Anziehungskräfte zwischen Erde und Mond aufeinander proportional ihren Massen sind. Dem Stand der Naturwissenschaften entsprechend mußte sich KEPLER bezüglich der Gezeiten auf qualitative Aussagen beschränken, wozu u. a. seine Ausführungen über die Reflexion der Gezeitenwellen an den Kontinenten gehören, die erstmals von einem global denkenden Geist zeugen. Dennoch fehlt auf der anderen Seite nicht die Tendenz zu Vergleichen des Gezeitenrhythmus mit dem Atmen von Tieren, wofür er in der „Weltharmonik“ (Buch IV) 1619 Beispiele gibt. 1616 weist KEPLER seinen großen Zeitgenossen GALILEI (1564—1642) auf Fehler in dessen bezüglich der Entstehung der Gezeiten verworrenen Vorstellungen hin.

Einen weiteren Beitrag zur Kenntnis der Gezeitenbewegung hat RICCIOLI (1598 bis 1671) gegeben, der 1651 in seinem „Almagestum Novum“ (Buch II, IV und IX) eine ausführliche Darstellung der zeitgenössischen und der älteren Theorien gibt. Er kennt bereits den Begriff der Eintagstiden, wie sie zum Beispiel bei den Molukken und Philippinen vorkommen, gibt weitere Daten der Gezeiten in europäischen und amerikanischen Gewässern und weiß um die geringen Tidenhübe des Karibischen Meeres. In einer Tabelle teilt er die Hafenzeiten sowie die täglichen Hochwasserzeiten für eine Anzahl von Orten mit, wobei immer noch die tägliche Verspätung mit 48<sup>m</sup> und das Gezeitenintervall zu 15<sup>d</sup> dominieren.

Astronomisch gut fundiert waren die Darlegungen von WALLIS (1616—1703), der in der Zeit von 1666—70 die Gezeiten Jahre hindurch beobachtet und die Messung der Hoch- und Niedrigwasser in Stationen an der offenen See vorgeschlagen hat. Ihm sind qualitativ bereits Begriffe wie Fliehkraft, Gravitationszentrum als gemeinsamer Schwerpunkt von Erde und Mond, der synodische Monat sowie die tägliche, monatliche und jährliche Tideperiode bekannt. Allerdings hat er nicht die richtigen Verknüpfungen zwischen den Erscheinungen und ihren Ursachen gegeben, obwohl er ungleich tiefer als seine Vorgänger in die Materie eingedrungen ist. Teile seiner 1666—70 publizierten Auffassungen haben sich noch zwei Jahrhunderte hindurch in der Literatur zu behaupten vermocht.

Praktischer orientiert war sein Landsmann Sir ROBERT MORAY (gest. 1673). Von ihm stammte der Vorschlag zu einem Schachtpegel und von Tabellen (1666) zur Beobachtung des Wasserstands und der Stromstärken in viertelstündlichem Abstand, in denen auch Windstärke und Richtung sowie Barometerstände über die Dauer von Monaten oder besser Jahren eingetragen werden sollten. In den Gewässern der schottischen Westküste und bei den Hebriden stellte er eingehende Gezeitenbeobachtungen an (1665, 1673), die ihm den Schluß nahelegten, daß die Zunahme des Tidenhubs von der Nipp- zur Springzeit nicht einem Sinus-Gesetz gehorche, sondern ganz unregelmäßig erfolge, was bei dem verwickelten Charakter der Gezeiten gerade jenes Gebiets nicht verwundert.

Gute Einsicht in den Ablauf der Gezeiten besaß COLEPRESSED, der 1667 gründliche Beobachtungen in Plymouth anstellte. Er gibt eine Tabelle für den Tidenstieg

bzw. -fall mit den stündlichen Unterschieden des Wasserstandes zur Springzeit wie folgt:

Time of flowing: Height.			Time of ebbing: Height.		
1 hr.	1 feet	6 inch.	1 hr.	1 feet	6 inch.
2	2	6	2	2	6
3	4	0	3	4	0
4	4	0	4	4	0
5	2	6	5	2	6
6	1	6	6	1	6

Der gesamte Gezeitenunterschied ergibt sich als Summe der stündlichen Differenzen zu 16 Fuß = 4,8 m, was noch heute zutrifft. Die Tidekurve wird als symmetrisch zum Hochwasserzeitpunkt angenommen, was weitgehend erfüllt ist. Ferner benennt er die Springverspätung zu 3 Tiden nach dem Voll- oder Neumond, also rund  $1\frac{1}{2}$  Tagen (heute  $1^d 18^h$ ). Besonders ausführlich hat COLEPRESSE die tägliche Ungleichheit hervorgehoben, derzufolge jeweils ein halbes Jahr das Hoch- bzw. Niedrigwasser der ersten bzw. zweiten Tageshälfte den extremeren Wert annimmt.

Zu ganz ähnlichen Ergebnissen war auch Kapitän STURMY (1668) gekommen, der die Gezeiten bei Hong Road in der Nähe von Bristol verfolgt hatte. Er gab eine ähnliche Tabelle wie COLEPRESSE und stellte wie dieser fest, daß die tägliche Ungleichheit vom Ablauf der Spring- und Nipptiden unabhängig sei. Auch er gab die dritte Tide nach den Syzygien als höchste an, sofern nicht Windeinflüsse eine Abweichung bedingen. STURMY verdanken wir eine genaue Beschreibung der Flutbrandung oder Bore des Severn, für die er zur Springzeit eine Höhe von 9 Fuß nennt, also den doppelten gegenwärtigen Betrag. Offenbar ist die Höhe übertrieben angegeben worden, jedoch sind Änderungen der Flutbrandungen durch Erosion und künstliche Eingriffe zu erwarten, wie SAGER (1959) beschrieben hat.

Kombiniert theoretisch-praktische Überlegungen stellte CHILDREY (1670) an, wobei es ihm gelang, einige Hypothesen von WALLIS zu widerlegen, wozu er u. a. eine Liste extrem hoher Tidenhübe aus den Jahren 1250 bis 1669 aufführt. Er rückt den Einfluß der Mondparallaxe und dessen Wechselwirkung mit den Mondphasen in den Vordergrund, wobei ihm jedoch trotz guter astronomischer Vorstellungen ebenfalls Irrtümer unterlaufen sind. Richtig war seine Ansicht, daß auf eine kräftige Springzeit eine relativ schwächere folgt, sowie die Andeutung der zugehörigen Periode von etwa 407 Tagen.

Von besonderer Bedeutung ist das Schaffen des Astronomen FLAMSTEED (1646–1719) geworden, der sich um die Vorhersage der Gezeiten verdient gemacht hat. Er kam darauf durch die Aufstellung einer Kulminationstabelle für den Mond und wurde infolge seiner astronomischen Verdienste 1675 zum ersten „Astronomer Royal“ der soeben gegründeten Sternwarte Greenwich ernannt. Im Jahre 1683 gab er für die Station London Bridge unter Hinweis auf die Bedeutung der Themse-Schiffahrt eine „correct Tide Table“ heraus, die für alle Tage des Jahres beide Hochwasser aufführte und nicht nur das der oberen Kulmi-

TABELLE I.

Ausschnitt der Gezeitentafel von FLAMSTEED vom Jahre 1684

A Correct TIDE TABLE, Shewing the true times of the High-Waters at London Bridge to every day in the Year, 1684. By J. F. M. R. & R. S. S.

D	July		August		September	
	Morning	Afternoon	Morning	Afternoon	Morning	Afternoon
	H. M.	H. M.	H. M.	H. M.	H. M.	H. M.
1	1 01	1 29	2 26	2 47	3 30	3 48
2	1 56	2 20	3 07	3 25	4 05	4 23
3	2 42	3 03	3 ⊙ 43	4 00	4 42	5 03
4	3 22	3 40	4 17	4 35	5 26	5 51
5	3 58	4 15	4 53	5 13	6 19	6 49
6	4 ⊙ 33	4 51	5 35	5 59	7 21	7 56
7	5 12	5 34	6 25	6 55	8 ⊙ 33	9 11
8	5 56	6 20	7 26	8 00	9 48	10 23
9	6 47	7 15	8 36	9 14	11 00	11 33
10	7 45	8 18	9 ⊙ 51	10 30		0 05
11	8 52	9 27	11 07	11 43	0 34	1 01
12	10 04	10 42		0 18	1 25	1 46
13	11 ⊙ 19		0 49	1 18	2 07	2 26
14	0 06	0 31	1 43	2 07	2 ⊙ 43	2 58
15	1 04	1 34	2 27	2 46	3 12	3 26
16	2 01	2 24	3 03	3 18	3 40	3 54
17	2 45	3 04	3 ⊙ 33	3 47	4 08	4 23
18	2 22	3 39	4 00	4 14	4 39	4 54
19	3 54	4 10	4 28	4 42	5 13	5 34
20	4 ⊙ 25	4 39	4 58	5 15	5 55	6 20
21	4 54	5 11	5 34	5 53	6 ⊙ 47	7 16
22	5 29	5 46	6 16	6 40	7 48	8 23
23	6 07	6 28	7 08	7 35	8 59	9 35
24	6 50	7 14	8 ⊙ 07	8 40	10 11	10 47
25	7 40	8 09	9 16	9 53	11 23	11 57
26	8 39	9 11	10 30	11 06		0 30
27	9 ⊙ 43	10 17	11 42		1 00	1 27
28	10 50	11 27	0 17	0 49	1 ⊙ 53	2 16
29		0 01	1 18	1 45	2 39	2 59
30	0 34	1 06	2 10	2 33	3 19	3 37
31	1 35	2 02	2 ⊙ 54	3 12		

⊙ Stands for Sunday.

October.

nation nächstfolgende wie seine Vorgänger. Er glaubte, wie COLEPRESSE, mit einem einzigen Bezugsort auskommen zu können und gab im folgenden Jahr eine Tabelle der Zeitunterschiede für 45 Hafenplätze der Nordsee, des Kanals und der Irischen

See gegen die Hochwasserzeiten in London, worin man wohl die ersten Differenztafeln erblicken darf. Die Erfassung der charakteristischen Unterschiede der Tidekurven mancher Orte namentlich in Seichtwassergebieten blieb der verfeinerten Beobachtung späterer Zeiten vorbehalten. FLAMSTEED wies in der Anleitung zum Gebrauch der Tafeln ausdrücklich auf den Einfluß von Wind und Oberwasser hin, wodurch die Hochwassereintrittszeiten eine Verschiebung erfahren, die aber selten eine halbe Stunde überschreitet und meistens erheblich darunter bleibt. Einen Ausschnitt seiner Gezeitentafel für London Bridge vom Jahre 1684, die gegenüber dem Vorjahr eine übersichtlichere Anordnung zeigt, gibt die Tabelle 1. Von historischem Interesse ist seine über ein halbes Jahrhundert währende, aber oft getrübe Bekanntschaft mit NEWTON, über die WAWILOW (1945) berichtet hat.

#### 4. NEWTON und die Anhänger der Gleichgewichtstheorie (1685—1775)

Allen bisher behandelten Anschauungen über die Entstehung der Gezeiten fehlte das physikalisch-mathematische Rückgrat, das erst NEWTON (1643—1727) in seiner „Philosophiae naturalis principia mathematica“ (1687) gegeben hat, die aber schon einige Jahre vorher entstanden ist. Um diese Zeit war bereits empirisch die Abhängigkeit der Gravitation von dem reziproken Entfernungswert der betreffenden Himmelskörper erkannt und ausgesprochen worden. Der erste war HOOKE (1635—1703), der nach der Beschäftigung mit kosmischen Problemen während zweier Jahrzehnte NEWTON seine Ansicht mitteilte, welcher 1684 diejenige des Astronomen HALLEY (1657—1742) folgte, der ein Jahr zuvor aus dem 3. KEPLERSchen Gesetz auf dem Weg über die Zentripetalkraft zu demselben Ergebnis gelangt war.

Beide Mitteilungen haben NEWTON offenbar zur Forcierung seiner Arbeiten bewegt, wobei er seinem Freund HALLEY anvertraute, den Beweis bereits seit etwa 1666 besitzen zu haben. Die darauf folgende Verärgerung HOOKES hat WAWILOW (1945) näher beleuchtet. Wenn auch KEPLER bereits den Zähler und NEWTONS beide Zeitgenossen den Nenner des Gravitationsgesetzes gekannt haben, so schmälert das seine geniale Leistung kaum, die in der Zusammenschau und konsequenten Anwendung dieser Gesetzmäßigkeit lag, zu der allen anderen die ungewöhnliche Geistesgabe NEWTONS fehlte, so daß sein Werk zwar schnell vergriffen, aber wenig verstanden wurde. Zu den begeisterten Anhängern seiner sogenannten statischen Gezeitentheorie zählte HALLEY, der sich selber um die Problematik bemüht und bald den großen Fortschritt erkannt hatte (1696).

Die wesentlichen Ausführungen über die Gezeiten gibt NEWTON in Buch I und III seiner „Prinzipien“. Er beschreibt klar die Entstehung der Spring- und Nippzeiten, den Einfluß der Deklination und der Parallaxe von Mond und Sonne sowie das Zustandekommen der großen bzw. kleinen Gezeitenunterschiede zu den Äquinoktien bzw. Solstitien einschließlich sekundärer Effekte infolge des astronomischen Ablaufs der Bewegungen zwischen Erde, Mond und Sonne.

Besondere Aufmerksamkeit widmet er der täglichen Ungleichheit der Gezeiten, wobei er die Beobachtungen von COLEPRESSE und STURMY heranzieht. Die Erscheinung der Springverspätung sucht er irrtümlich durch das Beharrungsvermögen der Wassermassen zu erklären, wonach die Gezeit vom Entstehungszentrum eine bestimmte Zeit benötigt, um die Küsten der einzelnen Länder zu erreichen. Dabei erwähnt NEWTON die vergrößerten Beträge der Springverspätung in den Tideflüssen und weist auf den Einfluß der Konfiguration der Meeresteile und des Küstenverlaufs hin. Interessant ist sein Versuch, die bereits von HALLEY (1684) beleuchteten Eintagstiden durch die Interferenz von Gezeitenwellen verstehen zu wollen, wobei die Halbtagstiden unterdrückt werden.

Als unmittelbares Ergebnis des Gravitationsgesetzes stellt NEWTON fest, daß die gezeiterzeugenden Differenzkräfte dem Kubus der Entfernung des betreffenden Himmelskörpers von der Erde umgekehrt proportional sind. Er läßt bei seinen Untersuchungen den Mond aus dem Spiel, da ihm dessen Massenverhältnis gegenüber der Erde noch nicht bekannt war. Das erleichtert die Betrachtungen insofern, als er dabei den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems Erde-Sonne als nahe dem Sonnenzentrum befindlich mit dem mittleren Abstand Erde-Sonne  $R$  identisch setzen kann, während der gemeinsame Schwerpunkt des Systems Erde-Mond innerhalb des Erdkörpers in etwa  $\varrho = \frac{3}{4}$  Erdradius  $a$  Abstand vom Zentrum liegt. Aus dem Wert der Sonnenanziehung im Erdmittelpunkt

$$K_0 = \gamma \frac{M}{R^2} = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{R} \right)^2 S = \frac{4}{T^2} \pi^2 R,$$

die gleich der Zentrifugalkraft ist, und der Differenz zum Wert der Sonnenanziehung im Zenit bzw. Nadir folgt in erster Näherung

$$K_Z - Z = - (K_N - Z) = 2 \frac{M}{E} \left( \frac{a}{R} \right)^3 S = 0,0514 \cdot 10^{-6} \cdot S,$$

also ein Verhältnis zwischen solarer gezeiterzeugender Differenzkraft und der irdischen Schwerkraft  $S$  an der Oberfläche von rund 1:20 Millionen, wogegen NEWTON mit einem Betrag von 1:13 Millionen gerechnet hat.

Es ist bezeichnend für die NEWTONSche Unrast, daß er versucht hat, auf dem Umwege über die Gezeitenbeobachtungen zur äquinoktialen Spring- und Nippzeit auf die Masse des Mondes zu schließen, wozu er die Messungen des Kapitäns STURMY bei Bristol (1668) und zur Kontrolle diejenigen von COLEPRESSE für Plymouth (1668) benutzt hat. Nach Umrechnungen bezüglich des Einflusses von Deklination und Parallaxe, die er im Detail wiedergibt, erhält er für das Verhältnis der solaren zu den lunaren gezeiterzeugenden Kräften 1:4,48 oder 22% anstelle des richtigen Wertes von 46%. NEWTON konnte die Größe des Einflusses der Boden- und Tiefenverhältnisse auf die Deformation der Gezeitenwelle nicht absehen, der letztlich zu einer falschen Bestimmung der Mondmasse führen mußte, für die er  $\frac{1}{40}$  der Erdmasse erhielt. Entsprechend folgerte er die Mondsdichte als  $\frac{11}{9} = 122\%$  der Erddichte gegenüber dem wahren Wert von 60,5%.

Überblickt man die statische oder Gleichgewichtstheorie der Gezeiten NEWTONS, in der er die Erde als rings mit einem tiefen Ozean umgeben auffaßte und das

Gleichgewicht zwischen den fluterzeugenden Kräften von Sonne und Mond und den horizontalen Druckdifferenzen im Meer bestimmte, so läßt sich sagen, daß er alle wesentlichen Kräfte mit Ausnahme der Coriolis-Kraft berücksichtigt hat. Daß die Ergebnisse seiner Rechnungen nicht der Wirklichkeit entsprachen, war einerseits in den mangelhaft bekannten astronomischen Daten und zum andern in den terrestrischen Effekten begründet, die letztlich allen späteren theoretischen Untersuchungen einen Riegel vorgeschoben haben. Daß NEWTON trotz dieser Diskrepanzen an seiner Konzeption festhielt, die er selbst als eine erste grobe Näherung des Geschehens in der Natur betrachtete, ist bezeichnend für seine Gedankentiefe. Er hat es auch nicht an Versuchen fehlen lassen, die numerischen Ergebnisse zu kontrollieren, obwohl er damit in dem Werk „Weltsystem“ (postum erschienen 1731) kein Glück hatte. Dagegen treten dort bereits Vorstellungen auf, die an Begriffe wie „Eigenschwingungen“ und „Kontinuität“ erinnern, also recht modern anmuten.

Die Grundformeln der NEWTONSchen statischen Theorie der Gezeiten sind im folgenden Abschnitt wiedergegeben, weitere Einzelheiten zu seinen Anschauungen findet man bei AIRY (1842), HARRIS (1898), PROUDMAN (1927) und THORADE (1928).

Die Forschungen NEWTONS auf dem Gebiet der Gezeiten haben bald eine Reihe von Tidebeobachtungen ausgelöst, so in Le Havre und Dünkirchen 1701/02, in Brest 1711/12 und 1714/16, denen später Jahresreihen für Katwyk 1766, Liverpool 1766/70, Rochefort 1771/72, St. Malo 1775/76 und Toulon 1777/78 folgten. Zu den frühen Beobachtungen in den beiden ersten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts hat CASSINI (1677—1756), der Sohn des bekannten Astronomen, in mehreren Beiträgen seine Ansichten unterbreitet (1710—1720).

Wie lebhaft das Interesse jener Zeit für das Problem von Ebbe und Flut war, zeigt das 1738 von der französischen Akademie der Wissenschaften veranstaltete Preisausschreiben, von dem man sich eine endgültige Klärung des Problems und die Entwicklung von Methoden zur Gezeitenvorhersage erhoffte. Man glaubte, die Schwierigkeiten durch die Fortschritte auf astronomischem Gebiet meistern zu können und ahnte wenig von den komplizierten terrestrischen Einflüssen auf die Bewegung schwingender Wassermassen. Obwohl das Gezeitenproblem ungelöst blieb, verteilte die Akademie den ausgesetzten Preis zu gleichen Teilen an

DANIEL BERNOULLI, Professor der Anatomie und Botanik in Basel,  
MAC LAURIN, Professor der Mathematik in Edinburgh,  
EULER, damals Professor der Mathematik in St. Petersburg  
und den Jesuitenpater CAVALLERI.

Während die erstgenannten sich auf die NEWTONSche Gravitationstheorie stützten, lehnte sich letzterer an die Wirbeltheorie von DESCARTES (1644) und fiel mit seinen Gedankengängen bald der Vergessenheit anheim.

Die bedeutendste Arbeit war diejenige von BERNOULLI (1700—1782). Er entwickelte Elemente der NEWTONSchen Theorie so weit, daß sie mit entsprechenden Modifikationen zum Teil auf brauchbare Darstellungen der wirklichen Gezeiten-

verhältnisse führten. Wie sein Vorgänger NEWTON erkannte er dabei nicht, daß es sich bei den Gezeiten um erzwungene und nicht um freie Schwingungen handelt. In seiner Arbeit entwickelte er die für die Hydrodynamik grundlegende und heute nach ihm benannte Gleichung. Durch geeignete Kunstgriffe führte BERNOULLI die Gezeitenbewegung auf eine scheinbar stationäre Strömung zurück und erzielte dadurch brauchbare Resultate.

Im einzelnen sind noch folgende Ergebnisse erwähnenswert: BERNOULLI nahm das Verhältnis zwischen solarer und lunarer gezeitenerzeugender Differenzkraft zu  $2/5$  oder 40% an, was dem richtigen Wert sehr nahe kommt. Er befaßte sich bereits mit der Verschiebung der Hochwassereintrittszeiten unter der Wirkung beider Kräftegruppen und untersuchte für die lunaren Kräfte den numerischen Unterschied im Apogäum und Perigäum. Seine Rechnungen betrafen ferner die Änderung des Tidenhubs im Ablauf der Spring- und Nipptiden für Winkeldifferenzen zwischen Mond und Sonne im Abstand von jeweils  $10^\circ$  und Abschätzungen des parallaktischen Anteils. Er setzte sich weiter mit dem Einfluß der Deklination und der geographischen Breite auseinander und gab für alle Effekte eine Formel für die Höhe der Gezeit an, in der die Konstanten durch den Tidenhub zur Spring- und Nippzeit festgelegt werden sollten.

Für die Springverspätung nahm er offenbar einen einheitlichen Wert an, den er zum Teil wie NEWTON aus der Trägheit der Wassermassen und zum andern aus einer Retardation der Gravitationswirkung erklären wollte, während die Ursache in den unterschiedlichen Phasenverschiebungen der solaren Tide gegen die solaren und der lunaren Tide gegen die lunaren gezeitenerzeugenden Kräfte besteht.

Weiter blickte er dagegen bei den Hochwasserzeitunterschieden, für die er alle Werte zwischen  $0^h 00^m$  und einem halben Mondtag zuließ und die er an unregelmäßig gestalteten Küsten benutzte, um eine Vorstellung vom Ablauf der Gezeitenwelle zu erhalten, was natürlich nur bei fortschreitenden Wellen möglich ist. Mit NEWTON geht er in der Erklärung fehl, daß die geringen Werte der täglichen Ungleichheit in den Hoch- und Niedrigwassern in den britischen Gewässern auf Meeresschwingungen zurückzuführen seien, bei denen eine vorhergehende größere eine 12 Stunden später folgende kleinere Tide vergrößert und damit die Hubdifferenz reduziert. Diese Ansicht vertritt auch noch LALANDE (1781), der sich 17 Jahre lang dem Gezeitenproblem gewidmet hat und viele wertvolle historische Angaben hinterließ. Erst LAPLACE (1799) hat diese Erscheinung als Überlagerung einer kleinen eintägigen mit einer kräftigen Halbtagstide richtig gedeutet. BERNOULLI war durch die Widersprüche zwischen Rechnung und Wirklichkeit zu der Einsicht gelangt, daß der Tidenhub, die Hafenzzeit, der Betrag der täglichen Ungleichheit etc. mit Sicherheit nur auf der Basis von Beobachtungen gewonnen werden können. Einen Überblick der Auffassungen von BERNOULLI haben Sir JOHN LUBBOCK (1830, 1835) und bald darauf AIRY (1842) gegeben.

Der Schotte MACLAURIN (1698—1746) wies auf Tatsachen hin, die NEWTON nicht gebührend beachtet hatte. So holte er den mathematischen Beweis nach, daß eine homogene Kugel unter dem Einfluß der gezeitenerzeugenden Kräfte von Mond oder Sonne eine ellipsoidförmige Gestalt annimmt, und wies auf die

Existenz einer ablenkenden Kraft der Erdrotation auf bewegte Wasser- und Luftmassen hin, die von LAPLACE aufgegriffen und mathematisch verarbeitet wurde.

Der berühmte EULER (1707—1783) hat die Höhe der Gezeit als Kugelfunktionen der Zenitdistanzen von Mond und Sonne entwickelt, wobei er bis zu den vierten Potenzen der als Koeffizienten auftretenden Parallaxen ging. Durch die Vernachlässigung der gegenseitigen Anziehung der beiden Flutberge erhielt er fehlerhafte Beträge für die Fluthöhen. Im weiteren faßte EULER die Gezeiten als ein Problem bewegter Flüssigkeiten auf und berücksichtigte die Reibung. Da er jedoch die Kontinuität der Wassermassen außer acht ließ, blieben seine Ergebnisse von begrenztem Wert. Auf Einzelheiten der EULERSchen Arbeit ist FERREL (1874) näher eingegangen.

### 5. Die Grundformeln der statischen Theorie der Gezeiten

Der Ausgangspunkt der statischen Gleichgewichtstheorie ist das NEWTONSche Gravitationsgesetz, das für den Mond als Beispiel die Form

$$K = \gamma \frac{m M}{e^2} = \frac{M}{E} \left(\frac{a}{e}\right)^2 S$$

hat, da an der Oberfläche der Erde

$$\gamma m = \frac{a^2}{E} S$$

gilt, wenn  $M$  und  $E$  die Massen von Mond und Erde sind,  $S$  die Schwerkraft an der Erdoberfläche bedeutet und  $a$  der Erdradius ist. Den auf das Mondzentrum gerichteten Gravitationskräften stehen die Zentrifugalkräfte gegenüber, die bei der Drehung des Systems Erde-Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt auftreten, der im Abstand  $\varrho = 3/4 a$  vom Erdzentrum entfernt liegt. Diese Zentrifugalkräfte haben für alle Punkte der Erde denselben Betrag und sind parallel zu der momentanen Verbindungslinie Erde-Mond gerichtet. Ihr Betrag ergibt sich als

$$Z = \frac{4 \pi^2 \varrho}{T^2} = \frac{M}{E} \left(\frac{a}{r}\right)^2 S,$$

da im Erdzentrum  $Z = K_0$  ist. Die Wirkungslinien beider Kräfte bilden miteinander einen sehr kleinen Winkel  $\varepsilon$ , der bei mittlerer Mondndistanz maximal der Horizontalparallaxe gleichkommt, die für den Mond 57 Bogenminuten, für die Sonne dagegen nur 8,8 Bogensekunden beträgt. Die Resultierende beider Kräfte ist die gezeitenerzeugende Differenzkraft, für deren Richtung es eine einfache geometrische Näherungskonstruktion gibt, die unter der Bezeichnung „Regel von Proctor“ bekannt ist.

Aus der Figur Abbildung 4 folgt wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke  $PRS$  und  $PQT$

$$\frac{QT}{PQ} = \frac{K \cos \varepsilon - Z}{K \sin \varepsilon} \quad \text{bzw.} \quad QT = a \frac{K \cos \varepsilon - Z}{K \sin \varepsilon} \sin \vartheta.$$

Mit den Werten von  $K$  und  $Z$  und unter Berücksichtigung der Beziehungen

$$\frac{a}{e} = \frac{\sin \varepsilon}{\sin \vartheta}, \quad \frac{a}{r} = \frac{\sin \varepsilon}{\sin (\vartheta + \varepsilon)}$$

erhält man

$$QT = a \frac{\sin^2 (\vartheta + \varepsilon) \cos \varepsilon - \sin^2 \vartheta}{\sin^2 (\vartheta + \varepsilon)} \cdot \frac{\sin \vartheta}{\sin \varepsilon}.$$

Nach Ausmultiplizieren und Reduktion auf kleine Werte von  $\varepsilon$  folgt schließlich

$$QT = 2 a \cos \vartheta,$$

während

$$OQ = a \cos \vartheta$$

ist. Für den Winkel  $\gamma$  der gezeitenerzeugenden Differenzkraft mit der Verbindungslinie  $OM$  ergibt sich sogleich

$$\tan \gamma = \frac{1}{2} \tan \vartheta.$$

Für einen beliebigen Punkt  $P$  der Erdoberfläche ergibt sich die Richtung der gezeitenerzeugenden Differenzkraft in guter Näherung, wenn man den Abstand Zentrum  $O$ -Lotpunkt  $Q$  auf der Verbindungslinie  $OM$  zweimal über sich hinaus verlängert und  $P$  mit dem Endpunkt  $T$  verbindet.

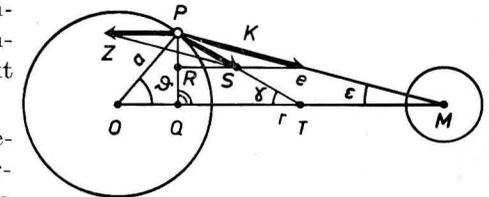


Abb. 4. Zur Ableitung der Richtung der gezeitenerzeugenden Differenzkräfte

Zur Beurteilung der Wirkung der gezeitenerzeugenden Differenzkraft zerlegt man diese in Komponenten, von denen die eine in Richtung  $PO$ , also radial verläuft, während die andere in die Tangentialebene fällt. Die Radial- oder Normalkomponente bedingt nur eine winzige Änderung der Schwerkraft, die in derselben Größenordnung liegende Tangentialkomponente wirkt sich als horizontale Schubkraft auf die Wassermassen aus. Aus der Figur Abbildung 5 folgt mit den Beziehungen

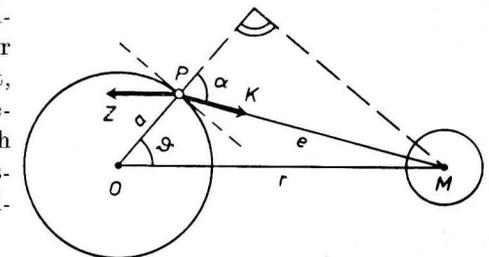


Abb. 5. Zur Ableitung des Betrags der gezeitenerzeugenden Differenzkräfte

$$\sin \alpha = \frac{r}{e} \sin \vartheta, \quad \cos \alpha = \frac{r}{e} \left( \cos \vartheta - \frac{a}{r} \right)$$

für die Tangential- bzw. Normalkomponente der Mondanziehung im Punkte  $P$

$$K_t = \frac{M a^2 r}{E e^3} \sin \vartheta \cdot S,$$

$$K_n = \frac{M a^2 r}{E e^3} \left( \cos \vartheta - \frac{a}{r} \right) \cdot S.$$

Für die beiden Komponenten von  $Z$  kommt dann

$$Z_t = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^2 \sin \vartheta \cdot S, \quad Z_n = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^2 \cos \vartheta \cdot S.$$

Die Beträge der gezeitenerzeugenden Differenzkräfte ergeben sich als  $K_t - Z_t$  und  $K_n - Z_n$ . Da die Komponenten der Gravitation noch den Abstand  $e$  enthalten, reduziert man sie durch die Beziehung

$$e^2 = r^2 \left[ 1 - 2 \left( \frac{a}{r} \right) \cos \vartheta + \left( \frac{a}{r} \right)^2 \right].$$

Während NEWTON diesen Ausdruck direkt benutzte, ging EULER bereits über die zonalen Kugelfunktionen mit der Entwicklung

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^n P_n(\vartheta),$$

wobei

$$P_0(\vartheta) = 1,$$

$$P_1(\vartheta) = \cos \vartheta,$$

$$P_2(\vartheta) = \frac{1}{2} (3 \cos^2 \vartheta - 1) = \frac{1}{4} (1 + 3 \cos 2 \vartheta),$$

$$P_3(\vartheta) = \frac{1}{2} (5 \cos^3 \vartheta - 3 \cos \vartheta) = \frac{1}{8} (3 \cos \vartheta + 5 \cos 3 \vartheta) \text{ etc.}$$

Während als Argumente die Zenitdistanzen auftreten, hat man in den Koeffizienten die Parallaxen von Mond und Sonne mit mittleren numerischen Werten von 0,0166 bzw. 0,000043 vor sich, so daß man bereits mit wenigen Gliedern auskommt.

Da die statische oder Gleichgewichtstheorie nicht alle Erscheinungsformen der Gezeiten zu erklären vermag, genügt für einen Überblick eine erste Näherung. Sie lautet

$$K_t - Z_t = \frac{3}{2} \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 \sin 2 \vartheta \cdot S,$$

$$K_n - Z_n = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 (3 \cos^2 \vartheta - 1) \cdot S$$

und liefert als Sonderfälle bei mittlerer Parallaxe des Mondes

$\vartheta$	0°	45°	90°	135°	180°
$(K_t - Z_t):S$	0	$84,0 \cdot 10^{-9}$	0	$-84,0 \cdot 10^{-9}$	0
$(K_n - Z_n):S$	$111,9 \cdot 10^{-9}$	$28,0 \cdot 10^{-9}$	$-56,0 \cdot 10^{-9}$	$28,0 \cdot 10^{-9}$	$111,9 \cdot 10^{-9}$

Die Normalkomponente verschwindet für  $\tan \vartheta = \pm \sqrt{2}$ , d. h. für  $\vartheta = 54^\circ 43'$  und  $125^\circ 17'$ . Die angegebenen Werte wachsen im Mondperigäum auf 118,5% und fallen im lunaren Apogäum auf 85,2%, während die Schwankungen im Perihel und Aphel mit 105,2% und 95,1% geringer sind.

Für die Größe der gezeitenerzeugenden Differenzkraft selbst ergibt die Quadratwurzel aus der Summe der Komponenten die erste Näherung

$$F = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 \sqrt{3 \cos^2 \vartheta + 1} \cdot S$$

und als Maximum im Zenit und Nadir ( $\vartheta = 0^\circ$  und  $180^\circ$ )

$$F_{\max} = 2 \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 S \quad \text{bzw.} \quad F_{\min} = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 S$$

als Minimum für Zenitdistanzen von  $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$ , so daß sich die Extrema wie 2:1 verhalten.

Zur Bestimmung der Gleichgewichtsfigur eines die ganze Erde rings bedeckenden tiefen Ozeans, der momentan den wirksamen Kräften zu folgen vermag, geht man vom Potential von  $K_n - Z_n$  aus, das man wegen

$$S = m g = \gamma \frac{m E}{a^2}$$

schreiben kann als

$$\Phi = \frac{1}{2} \gamma m M \frac{a^2}{r^3} (3 \cos^2 \vartheta - 1)$$

$$\text{bzw.} \quad \Phi = \frac{1}{2} m g \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 a (3 \cos^2 \vartheta - 1).$$

Im Gleichgewichtszustand muß die Summe aus Schwerepotential  $U = -m g z$  und gezeitenerzeugendem Potential  $\Phi$  konstant sein, also  $U + \Phi = -C$ , woraus die Wasserstandsänderung

$$z = \frac{1}{2} \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 a (3 \cos^2 \vartheta - 1) + C$$

resultiert. Als Extrema bekommt man für den Zenit ( $\vartheta = 0^\circ$ ) und Nadir ( $\vartheta = 180^\circ$ )

$$z_{\max} = \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 a + C$$

und für  $\vartheta = 90^\circ$  bzw.  $270^\circ$

$$z_{\min} = -\frac{1}{2} \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 a + C.$$

Die Differenz wird

$$z_{\max} - z_{\min} = \Delta h = \frac{3}{2} \frac{M}{E} \left( \frac{a}{r} \right)^3 a,$$

so daß man für die Höhe des Flutberges  $2/3 \Delta h$  und die Tiefe des Ebbetals  $1/3 \Delta h$  über dem ungestörten Wasserniveau erhält. Numerisch folgt

$$\Delta h = 84,0 \cdot 10^{-9} \cdot a = 53,5 \text{ cm} \quad \text{für den Mond}$$

und

$$\Delta h = 38,6 \cdot 10^{-9} \cdot a = 24,6 \text{ cm} \quad \text{für die Sonne;}$$

das Verhältnis beider beträgt 46%. Dieses Ergebnis trifft angenähert für die offenen Ozeane zu, versagt aber gänzlich auf den Schelfgebieten. Für das Verhält-



## 6. Die dynamische Gezeitentheorie von LAPLACE und ihre Ergänzungen

Ein knappes Jahrhundert nach NEWTONS hydrostatischer Betrachtungsweise der Gezeiten entwickelte LAPLACE (1749–1827) die dynamische Theorie. Unter Ausnutzung der neuesten Fortschritte auf dem Gebiet der partiellen Differentialgleichungen und Theorie der Flüssigkeiten machte er sich 1774 an die Arbeit. Bereits im folgenden Jahr gab er auf der Basis der von ihm aufgestellten hydrodynamischen Bewegungsgleichungen einen Beitrag über den Einfluß des gezeiten-erzeugenden Potentials von Sonne und Mond auf einen die ganze Erde bedeckenden homogenen Ozean. LAPLACE betrachtete die Gezeiten als Wellen, die durch periodische Kräfte hervorgerufen sind und daher dieselbe Periode haben wie diese. Die Lösung seines Gleichungssystems setzte eine Reihe von vereinfachenden Annahmen voraus, da neben den periodischen Kräften andere Faktoren wie die Coriolis-Kraft, Reibungseinflüsse verschiedener Art und vor allem die Tiefenverteilung maßgebend beteiligt sind, für die er bestimmte theoretische Annahmen machen mußte, die der Wirklichkeit nicht entsprechen.

LAPLACE konnte den Nachweis erbringen, daß sich der Flutberg nur bei großen Wassertiefen, also geringer Reibung, unter dem Mond befindet, bei kleinen Tiefen dagegen das Ebbetal, so daß man von direkten und indirekten Tiden spricht. In seinen hydrodynamischen Gleichungen ist als Sonderfall die Gleichung von BERNOULLI enthalten. Seine Theorie ergab die Existenz von langperiodischen, eintägigen und halbtägigen Tiden, aus deren Kombination er gewisse Rückschlüsse auf verschiedene Eigenarten im Ablauf der Gezeiten ziehen konnte. Die numerischen Ergebnisse blieben trotz des erheblichen mathematischen Aufwands infolge der zahlreichen notwendigen Einschränkungen vor allem bezüglich der Verteilung des Festlandes bescheiden, so daß auf eine Wiedergabe verzichtet sei, die bei DEFANT (1961) in gedrungenen Form zu finden ist. Wertvoll haben sich die Ansätze von LAPLACE später bei der Behandlung der atmosphärischen Gezeiten erwiesen, die u. a. von KERTZ (1957) ausführlich behandelt worden sind.

Die verwickelte LAPLACESche Theorie wurde selbst von Autoritäten wie AIRY (1842) und FERREL (1874) in Einzelheiten bezweifelt, aber von Lord KELVIN (1875) in mehreren Beiträgen bestätigt und weiterentwickelt. Eine Überarbeitung der Theorie besorgte HOUGH (1897), indem er durch geeignete Substitutionen eine schnellere Konvergenz der Reihen mit den Potenzen des Kosinus bzw. Sinus der Zenitdistanzen von Mond und Sonne erreichte und die Anziehung der Wasser-teilchen untereinander berücksichtigte.

Nach den vergeblichen Bemühungen von POINCARÉ (1910) zur Erfassung der Gezeitenbewegung unter den gegebenen Konfigurationen der Ozeane befaßten sich einzelne Forscher mit dem System der Gezeiten in geometrisch einfach gestalteten Becken, insbesondere Zweiecken einer Kugeloberfläche, um damit der tatsächlichen Gestalt der Ozeane etwas näherzukommen, wobei wiederum außerordentliche mathematische Schwierigkeiten zu bewältigen waren. An verdienstvollen Namen seien genannt GOLDSBROUGH (1913, 1914, 1927/28/29/33, 1930/36, 1931), PROUDMAN (1917/31, 1928, 1935, 1942), TAYLOR (1920), dessen Lösung

als Musterbeispiel für diese Arbeiten im 11. Abschnitt näher besprochen wird, sowie DOODSON (1927, 1935/37/38) und GOLDSTEIN (1927, 1928, 1929). Wenn die hier nicht im einzelnen zu diskutierenden Ergebnisse auch wenig direkten praktischen Wert hatten, so haben sie doch dazu beigetragen, prinzipielle Fragen der Gezeitenverteilung in verschiedenen Meeresbecken klären zu helfen, so daß auch diese rein theoretisch orientierten Betrachtungen ihre Rechtfertigung gefunden haben.

Mit der Aufstellung der dynamischen Gezeitentheorie ist indessen das Werk von LAPLACE nicht abgeschlossen. Aus den Widersprüchen mit den praktischen Beobachtungen, die er namentlich für Brest forciert hatte ausführen lassen, entstanden eine Reihe kleinerer Abhandlungen (1790, 1796, 1803, 1815) sowie die maßgeblichen Beiträge in seiner „Himmelsmechanik“ in Buch IV (1799) und Buch XIII (1824), wo er nach Untersuchungen über den Gleichgewichtszustand des deformierten Ozeans die Schwierigkeit der Erfassung der terrestrischen Effekte klar ausgesprochen hat.

LAPLACE schlug deshalb einen zweiten Weg zur Erfassung des Gezeitenablaufs vor, der mehr empirischen Charakter hat und heute als Prinzip der Partialtiden bekannt ist. Dabei werden die komplizierten und in verschiedenen Ebenen verlaufenden Bewegungen von Mond und Sonne in ihrer Wirkung auf eine Anzahl fingierter Gestirne zurückgeführt, die in der Äquatorebene kreisen und deren konstante Umlaufzeiten sich auf der Basis der astronomischen Theorie bestimmen lassen. Er betonte dabei den Einfluß der Kontinente und war sich im klaren darüber, daß die Bestimmung der Koeffizienten der Partialtiden nur aus Beobachtungen erfolgen könne.

Nach diesem grundlegenden Gedanken, den später Lord KELVIN (1867) aufgriff und in die Praxis umsetzte, wandte sich LAPLACE dem Problem der Eliminierung bestimmter Tiden durch die Beobachtung bei einer entsprechenden astronomischen Konstellation zu, wozu für den Hafen Brest 6000 Gezeitendaten mit besonderer Beachtung der Äquinoktial- und Solstitiantiden von BOUVARD analysiert wurden, wobei auch die Reduktion des Windeinflusses vorgenommen wurde. Aus der Analyse der Eintagstiden in Brest zog LAPLACE Rückschlüsse auf deren Einfluß bei der Superposition mit den Halbtagestiden, aus der die tägliche Ungleichheit resultiert. Er gab auch die schon erwähnte richtige Erklärung der Springverspätung aus dem Phasenunterschied der halbtägigen solaren und lunaren Haupttiden.

Wie weit seine Ansprüche an die Genauigkeit bereits gingen, erhellt aus der Tatsache, daß er aus Gezeitenbeobachtungen über eine größere Anzahl von Spring- und Nipptiden folgerte, daß auch noch die lunaren Kräfte, die der vierten Potenz des Abstands Erde-Mond umgekehrt proportional sind, berücksichtigt werden sollten, woraus eine dritteltägige Tide resultiert. Der Einfluß dieses Terms macht  $\frac{1}{45}$  der Deformation der Wasserhülle durch die Gleichgewichtszeit aus, wie BARTELS (1957) hervorgehoben hat. Der entsprechende solare Ausdruck ist bereits bedeutungslos.

Besondere Aufmerksamkeit widmete LAPLACE dem Wandel des Tidenhubs und der täglichen Verspätung der Hochwassereintrittszeiten in Abhängigkeit von den Mondphasen sowie der Deklination und Parallaxe. Im Rahmen dieser Unter-

suchungen wiederholte er die schon von NEWTON vorgenommene Bestimmung der Mondmasse, worüber um jene Zeit gerade astronomische Ermittlungen eingesetzt hatten. Er fand als Ergebnis  $\frac{1}{75}$  der Erdmasse, womit er dem wahren Wert ziemlich nahe kam. Auf die Angabe weiterer Einzelheiten sei verzichtet; man findet sie neben dem nicht ganz einfach zu lesenden Original u. a. bei AIRY (1842), FERREL (1874, 1876, 1889/90), Lord KELVIN (1875), DARWIN (1880, 1886, 1898/1911, 1908) und HOUGH (1897, 1908), PROUDMAN (1917/1931, 1942) und DEFANT (1961).

### 7. Erste Versuche zum Entwurf von Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers (1800—1845)

Bis zur Wirkenszeit von LAPLACE waren Beobachtung wie Theorie überwiegend auf Teilerkenntnisse des Zusammenhangs im Ablauf der Gezeiten gerichtet gewesen. So blieben die Beobachtungen an einzelnen Orten meistens von kurzer Dauer, die nur in Ausnahmefällen den Zeitraum eines Jahres überschritt. Auf die dringliche Forderung von LAPLACE wurden in Brest 1807 langjährige Observationen eingeleitet, die man bis 1822 aufrechterhielt. Fast in dieselbe Zeit fallen Gezeitenbeobachtungen an den London Docks (1808—1826), die gerade nach der napoleonischen Zeit mächtig aufblühten und eine neue Ära des Handels zur See einleiteten, wie SAGER (1960) im einzelnen ausgeführt hat. Übrigens gehörten auch die mehrjährigen Beobachtungen in Liverpool zwischen 1774 und 1792, denen die Herausgabe von Gezeitentafeln durch den Geistlichen HOLDEN (1770) vorausging, in eine Periode intensiver Erweiterung der Dock- und Hafenanlagen. Mit der Ausdehnung der Gezeitenbeobachtungen über längere Zeiträume begann sich auch eine Vergrößerung der Zahl der Beobachtungsstationen anzubahnen. Auf der Basis dieser Stationen und aus der LAPLACESchen Deutung der Gezeiten als Wellenerscheinung großen Maßstabs sind die Anregungen zu verstehen, Ebbe und Flut nicht nur entlang der Küsten, sondern auch über die Oberfläche der Meere verfolgen zu wollen, um so einen globalen Überblick dieser bedeutenden Naturerscheinung zu erlangen. Dabei war der Ausgangspunkt in wohlbekannten und engeren Meeresteilen wie dem Kanal und der Nordsee gegeben, obwohl man für die küstenferneren Gebiete nur wenig Anhaltspunkte besaß, zumal man sich nur vereinzelt auf Inseln stützen konnte.

Als erster hat der englische Arzt YOUNG (1773—1829) den Versuch unternommen, Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers oder sog. Flutstundenlinien einzuführen, wozu ihm allerdings weder die NEWTONSche noch die LAPLACESche Theorie direkt helfen konnten. YOUNG hatte sich seit der Jahrhundertwende neben optischen Arbeiten mit dem Problem der Gezeiten befaßt und in mehreren Veröffentlichungen seine Ergebnisse mitgeteilt (1802, 1807, 1813, 1823, 1824). Er versuchte neben der sehr verwickelten astronomischen eine einfachere Erklärung der Gezeiten zu geben. Dabei ging er vorwiegend von irdischen Einflüssen aus und führte die Flüssigkeitsreibung ein, ließ aber die Erdrotation und die Kontinuitätsgleichung außer acht. Als besonderen Mangel betrachtete er das Fehlen von Tiefen-

angaben des Meeres. Er verlangte eine Analyse der gesamten Tidekurve und nicht nur der Extrema, wie es bisher üblich war, und wies auf die Bedeutung der Schachtpegel hin. Die technischen Voraussetzungen dazu wurden mit der Entwicklung des Registrierpegels 1828 durch den Ingenieur PALMER (1831) erfüllt.

Aus Untersuchungen über die Erregung von Gezeiten in kleinen Meeresbecken schloß YOUNG, daß diese im allgemeinen keine wesentlichen eigenen Tiden haben, sondern durch die Gezeitenwellen der großen Ozeane angeregt werden, weshalb

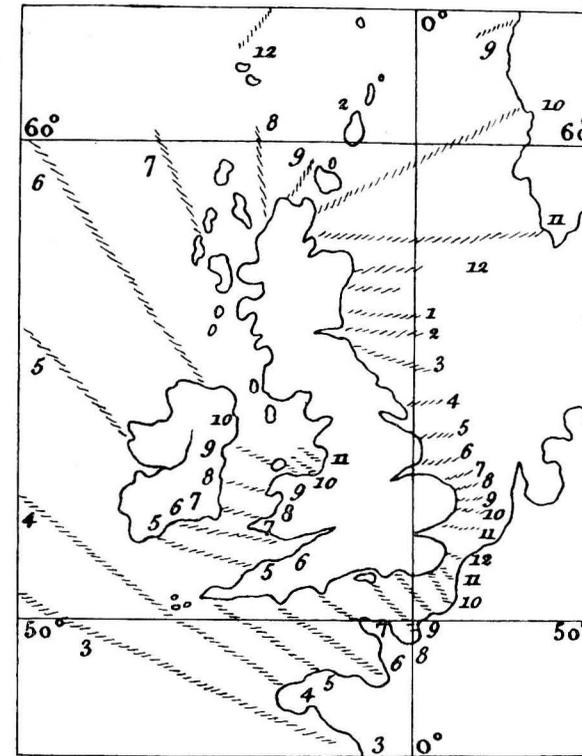


Abb. 7. Die erste Karte mit Flutstundenlinien in Mondstunden von YOUNG (1807)

man auch von Mitschwingungsgezeiten und selbständigen Gezeiten spricht. Daneben wies er auf den Einfluß der Eigenschwingung der Wassermassen von Seen und Buchten hin. 1807 entwarf YOUNG eine Karte mit Linien gleicher Hochwasser-eintrittszeit für die britischen Inseln, die in Abbildung 7 gezeigt ist. In dieser auf die Meridiandurchgangszeit des Mondes orientierten Darstellung erkennt man bereits die Existenz einer in die Nordsee von Norden her eindringenden „schottischen“ und einer von Westen kommenden „Kanalwelle“, die östlich des Pas de Calais zusammentreffen, was sich als regelrechtes Aufeinanderprallen darstellt, wobei unerklärlich bleibt, was nach diesem Ereignis aus den Gezeitenwellen wird. Einer ähnlichen Diskrepanz entging später AIRY (1842) im nördlichen Teil der

Irishen See, wo die atlantische Welle mit dem durch den St.-Georgs-Kanal gelaufenen Zweig zusammentreffen muß, indem dort keine Isolinien mehr verzeichnet stehen. YOUNGS Karten sind relativ schematisch und entsprechend dem spärlichen Beobachtungsmaterial mit zahlreichen Fehlern behaftet, jedoch muß man bedenken, daß noch hundert Jahre später keine einwandfreien Entwürfe vorlagen.

Einen indirekten Beitrag zum Entwurf von Karten mit Flutstundenlinien verdanken wir Sir JOHN LUBBOCK (1803—1865), der die Bezeichnung „cotidal lines“ prägte. Seine Hauptaufgabe sah er darin, der Gezeitenvorhersage auf der Basis der Arbeit von BERNOULLI ein wissenschaftliches Fundament zu geben. Seine Bemühungen fallen in die Anfangszeit der Dampfschiffahrt, die in wenigen Jahrzehnten zum Liniendienst mit Fahrplänen überging und daher zunehmend an verbesserten Gezeitenvorhersagen interessiert war, wie SAGER (1955) näher beleuchtet hat. In den Jahren 1830—1839 erschien in kurzer Folge — teilweise als Fortsetzungen — eine Reihe von Arbeiten in dieser Richtung. Unter Benutzung von 19jährigen Reihen an den London Docks — das entspricht der Dauer eines Umlaufs der Mondbahnknoten in der Ekliptik — ließ LUBBOCK von DESSIOU gründliche Analysen aus 13000 Werten fertigen, in denen der Einfluß der Mondkulmination sowie der Deklination und Parallaxe getrennt erfaßt wurde. Auf den erhaltenen Tafeln beruht das „nonharmonische Verfahren“ der Gezeitenvorhersage, das den bisherigen Methoden weit überlegen war und 1833 zur Herausgabe von „Tide Tables“ für vier englische Häfen (London-Docks, Sheerness, Plymouth, Portsmouth) führte.

Aus seinen umfangreichen Studien konnte er belegen, daß eine Bestimmung der Mondmasse aus Gezeitenwerten, wie dies NEWTON und LAPLACE versucht hatten, wegen der zu verschiedenen Streuung infolge irdischer Einflüsse nicht zu exakten Ergebnissen führen kann. Bei der Zuordnung zwischen Meridiandurchgangszeit des Mondes und den Hochwassereintrittszeiten kam LUBBOCK zu einer verbesserten Übereinstimmung, wenn er nicht die benachbarten Werte kombinierte, sondern das Intervall der Springverspätung — in den britischen Gewässern 3 bis 5 Tiden — einschob. Eine entsprechende Spanne ermittelte er auch für die Deklination des Mondes und den Eintritt der größten täglichen Ungleichheit, deren Werte sich im gleichen Gebiet zwischen 5 und 7 Tagen belaufen. Unter Verwendung aller erreichbaren Unterlagen hat LUBBOCK (1831) schließlich je eine Karte für die Küsten Englands und der übrigen Welt gegeben, in der die Hochwasserzeiten von Küstenorten für Voll- und Neumond einmal in Greenwich-Zeit und zum andern in Ortszeit angegeben sind, wobei letzteres den sogenannten Hafenzeiten entspricht. Auf das Zeichnen von „cotidal lines“ in diesen Karten hat er vorsichtigerweise verzichtet, obwohl ihm mehr Küstendaten zur Verfügung standen als YOUNG drei Jahrzehnte zuvor.

Eng verbunden mit dem Begriff „cotidal charts“ ist WHEWELL (1794—1866), ein äußerst vielseitiger englischer Forscher, der sich in den Jahren von 1833 bis 1854 in einer Reihe von Beiträgen mit der Erscheinung der Gezeiten in allen Meeren und ihrer Vorhersage befaßt hat. Er beschäftigte sich eingehend mit der täglichen Ungleichheit und wies darauf hin, daß die Springverspätung sowie

die deklinationsbedingte und die parallaktische Verspätung ganz unterschiedliche Werte haben, und zwar die letztere um England an der offenen Küste zwischen 1 und 5 Tagen mit merklichen Verzögerungen in den Mündungen der Tideflüsse. An die Stelle des Mondflutintervalls zur Zeit des Voll- oder Neumonds bzw. der Hafenzzeit (establishment) führte WHEWELL die verbesserte Hafenzzeit (corrected establishment) als Mittel aller Mondflut- bzw. Hochwasserintervalle ein, womit er eine gleichmäßigere Streuung der zeitlichen Abweichungen beiderseits der Spring- und Nipptiden (vgl. Erläuterung zu Karte 7 und 8 in Teil II) erreichte, für die er eine Tabelle gab, die für ein mittleres Verhältnis des Nipp- zum Springtidenhub von 1:2 gilt und in leicht berichtiger Form u. a. von MERZ (1923) und später von COURTIER (1938) wiedergegeben wurde.

Bereits 1833 hat WHEWELL einen ersten Versuch zum Entwurf einer Karte der Flutstundenlinien für die Nordsee, den Kanal sowie die englischen und irischen Gewässer unternommen, wobei er sich für die Küste auf die von LUBBOCK (1831) gegebenen Hochwassereintrittszeiten stützen konnte. Die cotidal lines ließ er an der Nordseeküste mehr oder weniger rechtwinklig zum Ufer verlaufen, wie das unter Annahme einer fortschreitenden Welle zutreffen würde. Immerhin zeigte bereits dieser Versuch deutlich, daß die Flutwelle an der englischen Ostküste von Norden nach Süden, an der belgischen und niederländischen von Südwesten nach Nordosten und an der friesischen Küste von Westen nach Osten fortschreitet. Er suchte diese Tatsache durch Interferenzen stehender Schwingungen zu erklären, was angesichts der spärlichen Beobachtungen um jene Zeit geradezu vorausschauend anmutet, daher auch kein Verständnis gefunden hat und in Vergessenheit geriet.

Um den Mangel an Beobachtungen der Gezeiten wettzumachen, ließ WHEWELL 1834 über eine Tideperiode die Wasserstände an den Küsten Englands verfolgen. Im folgenden Jahre brachte er unter Bemühung einflußreicher Persönlichkeiten wie des nachmaligen Admirals BEAUFORT und des Herzogs von WELLINGTON ein in diesem Ausmaß nie dagewesenes Programm zustande: Über drei Wochen lang wurden Hoch- und Niedrigwasser im Juni 1835 an 666 Stationen der europäischen Küsten zwischen Gibraltar und dem Nordkap und der amerikanischen Küste von der Mississippi-Mündung bis zur Fundy-Bay beobachtet. Aus dem gesammelten Material, dessen Bearbeitung wieder DESSIOU übertragen wurde, entwarf WHEWELL eine neue Karte der Flutstundenlinien für die Nordsee und die britischen Gewässer und eine solche für den Atlantik (1836). Für den Pazifik schlug er ein ähnliches Vorgehen vor (1847, 1851).

Seine zweite Karte für die Nordsee, den Kanal und die Irische See zeigt die Abbildung 8. Bereits bei oberflächlicher Betrachtung zeigt sich eine neue Auffassung, indem sich die cotidal lines im Gebiet zwischen der Themse-Mündung und der Schelde-Mündung treffen, wobei jede auf Mondstunden bezogene Flutstundenlinie ihr Gegenstück jenseits des Konvergenzpunktes in einer um 6 Mondstunden späteren oder früheren Linie findet. Im Knotenpunkt aller Flutstundenlinien muß demnach der Übergang vom Hochwasser zum Niedrigwasser erfolgen, und WHEWELL nahm dort folgerichtig einen tidenhubfreien Punkt an. Diese



Abb. 8. Der zweite Entwurf einer cotidal chart von WHEWELL aus dem Jahre 1836  
(Angaben in Mondstunden)

Auffassung wurde bereits wenige Jahre später durch Beobachtungen des Kapitäns HEWETT (1841) auf der „Fairy“ weitgehend bestätigt, der im Gebiet der Hoofden einen sehr geringen Tidenhub feststellen konnte.

In seinen Ausführungen hat WHEWELL (1836) deutlich von der Existenz zweier „rotatory systems of tide-waves“ gesprochen, wobei er als weiteren bedeutenden

Knotenpunkt denjenigen vor der Deutschen Bucht meinte, dessen genaue Lage ihm anzugeben nicht möglich war und der deshalb nur in dem Verlauf der Flutstundenlinien angedeutet werden konnte. Nicht so konsequent war WHEWELL hingegen beim Verlauf der Flutstundenlinien in der Irischen See, wo seine Kurven sich von Norden und Süden her treffen und latitudinal ausweichen, wobei sie vor den Küsten und rings um die Insel Man enden. Man muß dabei jedoch bedenken, daß der Knotenpunkt oder die Amphidromie im Nord-Kanal nur geringe Ausdehnung erreicht und erst durch ein Netz engmaschiger Beobachtungen fixiert werden kann.

Vergleicht man den Verlauf der Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers nach WHEWELL mit den neuesten Karten (Karte 6 des Atlasteils), so ist die Übereinstimmung in der Nordsee — sogar die Flutstundenlinien der Hoofden-Amphidromie tragen die richtigen Zuordnungen der Stunden — ungewöhnlich und nötig zu besonderer Hochachtung vor diesem Gelehrten, dem nur ein Bruchteil der heute bekannten Daten namentlich auf der offenen See zur Verfügung gestanden hat.

Trotz der genialen Weitsicht WHEWELLS, dessen Nordseekarte mit ihren Drehtiden alle folgenden Karten fast ein dreiviertel Jahrhundert hindurch übertroffen hat, fand seine Konzeption keinen Anklang. 1845 trat sein mathematisch gut fundierter Landsmann und Freund AIRY dieser Auffassung energisch entgegen. Da sich aus seinen Untersuchungen über Wellen Folgerungen gegen die WHEWELLSche Atlantikkarte ergaben, widerrief WHEWELL diese 1848, wodurch man auch die Nordseekarte in Zweifel zu ziehen begann, obwohl WHEWELL an dem Begriff der Drehtide festhielt. Erst HARRIS hat 1904 den mathematischen Beweis für die Entstehung solcher Drehtiden aus der Überlagerung von zwei Gruppen stehender Wellen erbracht und somit eine späte Rechtfertigung der WHEWELLSchen Ideen gegeben. Mit den begrifflichen Schwierigkeiten solcher Knotenpunkte bzw. Amphidromien hat sich THORADE (1924) eingehend unter Berücksichtigung von mathematischen Beispielen befaßt, dem wir auch eine historische Zusammenfassung der Auffassungen über Ebbe und Flut in der Nordsee verdanken (1930).

Als Autorität seiner Zeit für Wellen- und Gezeitenfragen galt Sir GEORGE AIRY (1801–1892), der seine intensiven Studien der vorhandenen Theorien unter Berücksichtigung von entsprechendem Beobachtungsmaterial in dem Werk „Tides and Waves“ (1842) verarbeitete und eine mathematische Theorie fortschreitender Wellen in Kanälen geringer Breite, großer Länge und konstanter Wassertiefe aufstellte. Seine Untersuchungen über die Gezeiten in Flußmündungen erwiesen sich als sehr erfolgreich, so beispielsweise im Bristol-Kanal. In dieser Hinsicht übertrafen seine Ergebnisse diejenigen von LAPLACE. Bei Betrachtungen über größere Seegebiete ließ er die Erdrotation außer acht, womit die Folgerungen nur beschränkten Wert hatten. AIRY stellte die Abhängigkeit der Geschwindigkeit fortschreitender Wellen von der Quadratwurzel aus der Tiefe und die damit verbundene Änderung der Richtung der Wellenfronten fest und berechnete die Länge der Flutwellen entlang der englischen Ostküste zu 800 bis 1000 Kilometer, was den wirklichen Werten sehr nahe kommt. Besondere Aufmerksamkeit widmete

er den Gezeitenerscheinungen in Seichtwassergebieten. AIRY hat dabei die lokalen Gesetzmäßigkeiten der Tiden für Deptford an der Themse (1842), Southampton und Ipswich (1843) und fast 20 Stationen an der irischen Küste (1844) erforscht und später auch entferntere Gebiete in die Untersuchungen einbezogen (Malta 1877).

In seinem Hauptwerk (1842) veröffentlichte er eine Karte der Flutstundenlinien für die Nordsee, den Kanal und die Irische See, die in Abbildung 9 wiedergegeben ist. Den Begriff der cotidal lines hat AIRY auf der Basis der LUBBOCKschen Definition konkretisiert als geometrischen Ort von Punkten mit gleicher Eintrittszeit der Hochwasser, der im allgemeinen nicht identisch mit dem Verlauf der Wellenkämme ist, eine Auffassung, der sich auch WHEWELL nach anfänglicher Fehlkonzeption 1848 anschloß, die aber später wieder in Vergessenheit geraten ist und zu mancherlei Verwirrung bis in die jüngste Zeit Anlaß gegeben hat, obwohl sich THORADE (1924) ausführlich anhand von mathematisch belegten Beispielen mit diesen Begriffen auseinandergesetzt hat.

Die Karte der Flutstundenlinien von AIRY hat in der Nordsee viel Ähnlichkeit mit derjenigen von WHEWELL, weicht jedoch im Südwesten erheblich davon ab. Hier läßt AIRY die schottische und die Kanalwelle getrennt verlaufen, wodurch es zu Überschneidungen der cotidal lines kommt. Mit dem tidenhubarmen Punkt bei den Hoofden bekannt, glaubt AIRY dessen Existenz mit seinem Linienverlauf dadurch in Einklang bringen zu können, daß er die Annullierung der Tidenhübe zweier um 6 Mondstunden verschiedener Flutstundenlinien annimmt (Linie III und IX). AIRY übersieht dabei, daß sich bei konsequenter Fortführung der Linien nach der offenen See hin noch mehr Punkte mit sich annähernd auslöschenden Tidenhüben ergeben müßten und macht keine Angaben über den Eintritt des Hochwassers an den Schnittpunkten zweier um mehr oder weniger als einen halben Mondtag verschiedener Flutstundenlinien.

Eine weitere Inkonsequenz des sonst versierten Mathematikers zeigt sich in der Irischen See westlich der Isle of Man (Linie X), wo sich eine Linie gabelt, was physikalisch unmöglich ist, aber auch noch viel später bei MERZ (1923) vorkommt. Immerhin hat AIRY für das Zentrum der Irischen See bereits eine ausgeprägte stehende Schwingung angenommen und die durch beide Zugänge vom Atlantik eindringenden fortschreitenden Wellen demgegenüber als weniger kräftig charakterisiert, wie das nach den Karten 16 und 17 des Atlasteils zutrifft.

Der Linienverlauf im Ärmelkanal ist durch eine starke Ausbuchtung der Linien in der Fortschreitungsrichtung der Hochwassereintrittszeiten gekennzeichnet, wobei zweifellos das von AIRY entdeckte Gesetz der Tiefenabhängigkeit der Wandergeschwindigkeit fortschreitender Wellen eine Rolle gespielt hat, da man die Gezeitenwelle in diesem Raum als eine solche ansah, während dies in Wirklichkeit nur auf den westlichen Kanal einigermaßen zutrifft, wie die Karten 16 und 17 im Teil II zeigen.

In der Folgezeit bestanden die Nordseekarten von WHEWELL und AIRY eine Weile nebeneinander. WHEWELLS erster Entwurf wurde in dem teilweise 1837 abgeschlossenen und 1845 erschienenen „Physikalischen Atlas“ von BERGHAUS mit



A is the point at which Captain Howells observations were made  
 The small figures along the coasts denote the whole range of the tide in yards.  
 The Roman numerals on the Cotidal Lines denote the hour of high water in Greenwich time on the days of new and full moon.  
 The figures on the Cotidal Lines denote the mean interval between the transit of the moon at Greenwich and the high water on those lines.

Published Oct. 1842, by B. Fellowes, 39, Ludgate Street.

J.W. Lowry sculp.

Abb. 9. Karte der Flutstundenlinien von AIRY aus dem Jahre 1842 (Angaben in Mondstunden)

einer für ein solches Werk ungewöhnlich ausführlichen Beschreibung und einem Teil der Tabellen WHEWELLS aufgenommen und von KRÜMMEL (1904) wiedergegeben. In die dritte Auflage des Atlas (1886) kam die AIRYSche Karte, die später auch in den „See-Atlas“ von PERTHES übernommen und noch 1925 aufrechterhalten wurde, obwohl wenige Jahre zuvor die große Umwälzung im Entwurf der Flutstundenlinien eingesetzt hatte. Auch der verdienstvolle DARWIN (der Jüngere) hat noch 1911 die AIRYSche Karte als Grundlage genommen.

In den folgenden Jahrzehnten sind nur wenige Beiträge über Flutstundenlinien erschienen, von denen für die europäischen Küsten keine weiteren Anregungen ausgingen. Nennenswert sind in der Entwicklung der Karten mit Linien gleichen Hochwasserzeitunterschiedes die Arbeiten von BACHE (1806—1867), der sich mit diesbezüglichen Entwürfen für die atlantische bzw. pazifische Küste der Vereinigten Staaten befaßte (1854, 1855, 1856) und 1856 für den Golf vom Mexiko eine Karte mit Flutstundenlinien der halbtägigen und eine solche für die Eintagstiden zur Zeit der größten Deklination gegeben hat.

#### 8. Die Anfänge der Gezeitenstromkarten (1845—1900)

Die Bedeutung der Gezeitenströme für die Schifffahrt ist bereits im Altertum erkannt worden. Neben den Eintrittszeiten der Hochwasser in Abhängigkeit von dem Stundenwinkel des Mondes findet man daher in den alten Seebüchern und Portolanis auch schon Hinweise auf die Gezeitenströme. Diese Informationen setzen sich in den mittelalterlichen französischen Routiers und den englischen Rutters of the Sea fort und werden erweitert. Sie gehen schließlich in die Instructions Nautiques, die Sailing Directions und die Segelanweisungen der neueren Zeit über, enthalten aber nur textliche Fassungen und keine Strombilder.

Erst seit der Forcierung der Gezeitenvorhersagen durch LUBBOCK (1833) erschienen zunehmend ausführliche Beiträge über die Gezeitenströme wie beispielsweise von MONNIER (1835) über den Ärmelkanal, die Nordsee und den St.-Georgs-Kanal. Mit der Weiterentwicklung der Schifffahrt und dem Aufkommen transatlantischer Verbindungen durch die großen Reedereien, von denen als erste die Cunard-Linie 1840 in Liverpool gegründet wurde, entsteht ein wachsendes Bedürfnis zur Erhöhung der Schiffssicherheit, wobei die Gezeitenströme eine besondere Rolle spielen.

Als Pionier der graphischen Darstellung der Tideströme gilt der Kapitän und nachmalige Admiral BEECHEY (1796—1856), der 1848 und 1851 Gezeitenstromkarten herausgab, die bald zum Vorbild ähnlicher Entwürfe wurden. Da seine in den Philosophical Transactions erschienenen Beiträge von grundlegender Bedeutung für die Entwicklung der kartenmäßigen Darstellungen der Tidestromelemente sind, verdienen sie besonderes Augenmerk.

Die Anregung zu gründlichen Untersuchungen der Gezeiten in der Irischen See hat AIRY gegeben; sie wurde vom Ordnance Survey in die Tat umgesetzt, wobei BEECHEY auch den Ärmelkanal in seine Untersuchungen einbezog. Neben den

eigentlichen Stromkarten entstand eine Karte der Fluthöhenlinien für die Irische See auf der Basis der Arbeiten von WHEWELL (1836) und der Feinlotungen mehrerer Kapitäne. Sie enthält in ungewöhnlich großem Maßstab — er macht das siebenfache der jetzigen Beilagekarten der amtlichen Gezeitentafeln aus — die sogenannten co-range lines in Abständen von jeweils 1 Fuß — gegenüber gegenwärtig meistens  $\frac{1}{2}$  Meter — und ist auf ein Springhochwasser von 30 Fuß in Liverpool bezogen, was zu den höchsten astronomischen Tiden gehört. Der großräumige Verlauf der in der Abbildung 10 auszugsweise dargestellten Linien entspricht bereits weitgehend den Karten der Gegenwart (vgl. Karte 1 in Teil II), wenn auch die Tidenhöhe um Courtown (zwischen Carnsore Point und Wicklow) zu weit absinken. Interessant ist noch, daß der Karte schon eine Tabelle zur Lotungsbeschickung beigegeben ist.

BEECHEY stellt in seiner Beschreibung Vergleiche zwischen dem Ärmelkanal und der Irischen See an und konfrontiert die Bucht von St. Malo mit dem Bristol-Kanal in bezug auf den extremen Tidenhub und die Hochwassereintrittszeiten, ferner Liverpool mit Cayeux als Orte eines sekundären Hubmaximums und die kleinen Tidenhöbe von Courtown mit denen bei Swanage unweit St. Albans Head. Schließlich vergleicht er die Hoofden-Amphidromie mit der soeben von Kapitän ROBINSON angegebenen Drehtide bei der Halbinsel Kintyre und stellt somit eine weitreichende Parallelität des Gezeitenregimes in beiden Meeresteilen heraus.

Den Entwurf seiner Gezeitenstromkarten begründet BEECHEY mit dem beachtlichen Einfluß der Tideströme auf Segler und die Gefahren einer Navigation in stromreichen Gebieten namentlich bei Nacht und Nebel. Seine 1846 entstandene Gezeitenstromkarte der Irischen See zeigt Linien mit der Richtung des maximalen Tidestroms zur Zeit der Syzygien, neben denen für etwa 4 Dutzend Stationen in See die Geschwindigkeiten auf  $\frac{1}{10}$  Knoten eingetragen sind. Zwar ist die Methode der Darstellung anfechtbar, da sie kein synoptisches Bild ergibt, weil die Eintrittszeiten des ein- oder auslaufenden Stromes örtlich verschieden sind, so daß die Linien keine Strömungslinien bedeuten, jedoch wird noch heute öfter ähnlich verfahren. Sieht man von diesem Mangel ab, so sind die Werte der Stromkarte, die in Abbildung 11 ausschnittsweise gezeigt ist, nach Stärke und Richtung durchweg zutreffend, wie ein Vergleich mit den Karten der Gegenwart (Karten 9, 12 und 13 in Teil II) bestätigt. Als besonderes Merkmal ist bereits das Stillwassergebiet vor der Dundrum Bay erwähnt, wo Bodenproben einen blauen Schlick ergeben haben.

In demselben Beitrag hat BEECHEY (1848) auch Karten mit den Richtungen des maximalen Tidestroms im Ärmelkanal für 4 Termine zur Springzeit entworfen, von denen er jedoch nicht befriedigt war, weil vom Kanal allgemein und von der Bucht von St. Malo insbesondere zu wenig Strombeobachtungen vorlagen. So beschließt er den Artikel mit einer Bitte an die Admiralität zur Förderung weiterer Beobachtungen, um die Schiffsverluste in den Tidegebieten zu reduzieren. Da Admiral BEAUFORT die Bedeutung dieses Vorschlags erkannt hat, werden in den nächsten Jahren an insgesamt 300 Stationen des Kanals und seiner Zugänge jeweils über einen halben Tag in halbstündlichen Abständen von verankerten Schiffen

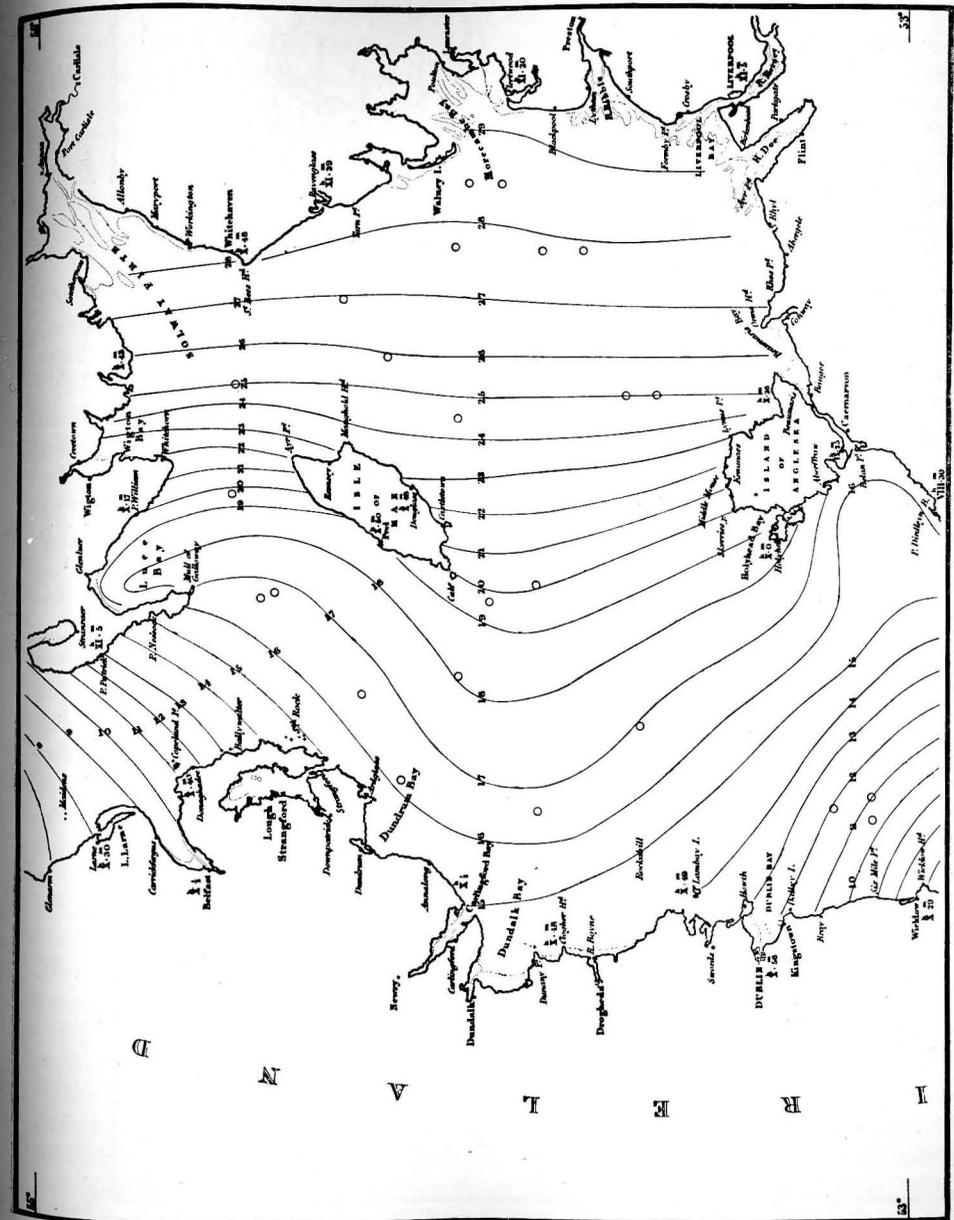


Abb. 10. Die erste Karte mit co-range lines für die Irische See von BEECHEY aus dem Jahre 1848 (Angaben in Fuß, bezogen auf ein Springhochwasser von 30 Fuß in Liverpool)

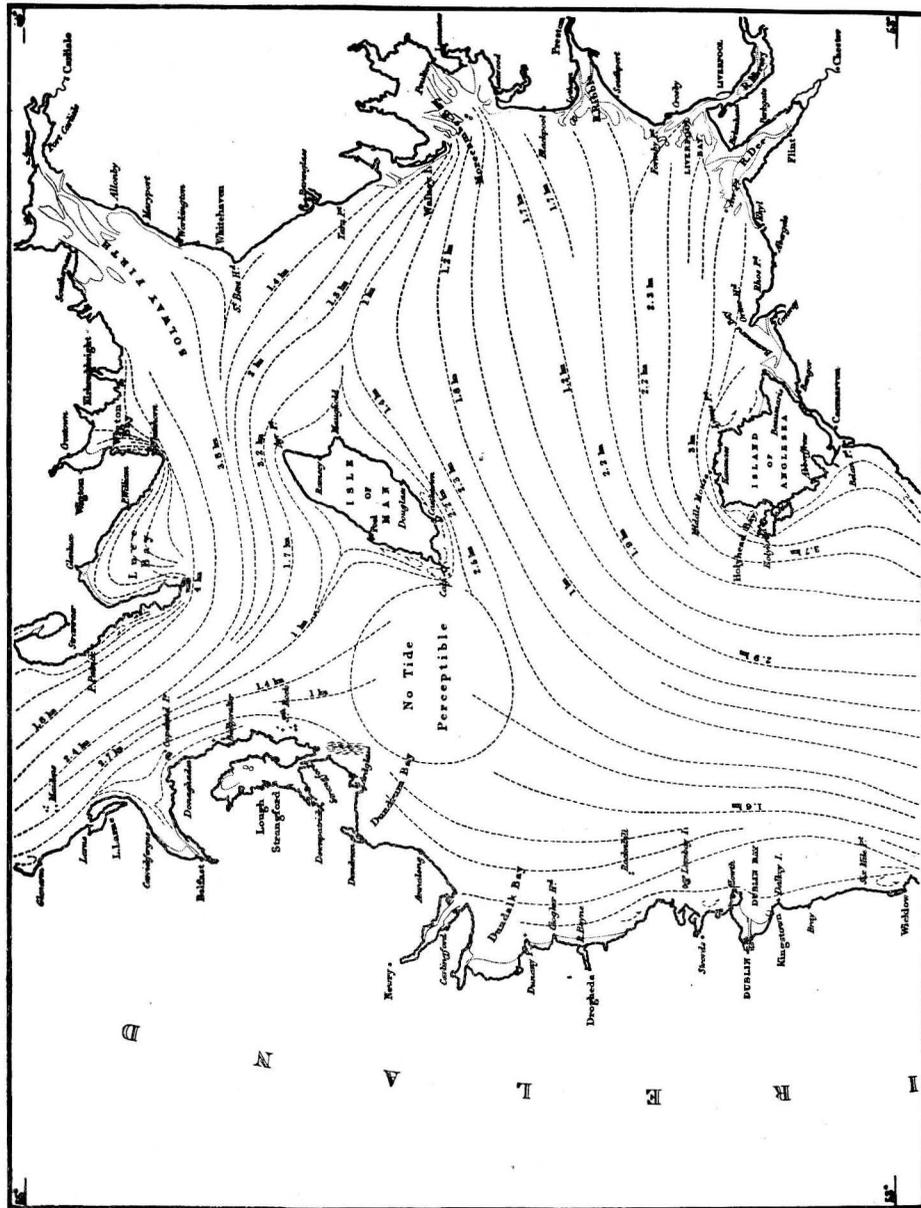


Abb. 11. Richtung und Geschwindigkeiten des maximalen Tidestroms zur Zeit der Syzygien in der Irischen See nach BEECHEY (1848)

aus Strommessungen mit Speziallogs in 2 und 12 Fuß Wassertiefe durchgeführt, woraus 12 Karten mit der Richtung des Gezeitenstroms — bezogen auf die Hochwasserzeit in Dover — entworfen wurden, von denen BEECHEY (1851) 8 publizierte.

In den Karten ist der Drehsinn besonders hervorgehoben, wogegen die Stromstärke wegen der kürzeren Dauer der Beobachtungen nicht angegeben ist. BEECHEY unterschied Dreh- und alternierende Tideströme und hielt im Gegensatz zu MONNIER (1835) die ersteren für die Ausnahme und letztere für die Regel. Da MONNIER und einige andere Beobachter im Gebiet der Kanalinseln bzw. des offenen Atlantischen Ozeans gemessen hatten, BEECHEY dagegen überwiegend im zentralen Teil und in Küstennähe, erklären sich beide Auffassungen von selbst, wenn man sich die Verteilung beider Stromtypen vor Augen führt (Karte 11 des Atlasteils). Die von BEECHEY bezeichneten Gebiete für Drehströme wie beispielsweise im Gebiet nordwestlich von Texel und um die Kanalinseln decken sich relativ gut mit den heute bekannten Zentren.

Entsprechende Differenzen der Anschauung zwischen BEECHEY und MONNIER finden sich auch bezüglich der Unterschiede zwischen der Hoch- bzw. Niedrigwasserzeit und der Eintrittszeit des Maximalstroms, die MONNIER zusammenfallen ließ, wie das im Westteil des Kanals der Fall ist (vgl. Karten 16 und 17 im Teil II), während BEECHEY eine Viertelperiode, also rund 3 Stunden Differenz annahm, wie dies für das Zentrum des Kanals zutrifft, so daß der Meinungsstreit vom heutigen Gesichtspunkt aus gegenstandslos war.

Des weiteren widmete BEECHEY den lokalen Unterschieden zwischen Hoch- und Niedrigwassereintritt und den Kenterzeiten bzw. Zeiten des geringsten Stroms und ihrer räumlichen Änderung Gedanken. Er zog zu diesem Zweck auch die Nordsee heran und wies auf den etwa gleichen Wert beider Änderungen zwischen Kinnairds Head und Kings Lynn (Wash) mit je 5 Stunden und den großen Gegensatz zwischen Cromer und North Foreland mit 5 bzw. nur  $\frac{1}{2}^h$  für Hochwasser und Tidestrom hin (vgl. Karten 6 und 14 im Teil II). Ähnliche Betrachtungen stellte er für den Kanal an, wo ihm schon zahlreiche Details wie beispielsweise die geringe Änderung der Eintrittszeiten des schwächsten bzw. stärksten Gezeitenstroms im zentralen Teil bekannt waren. Weniger glücklich mußte sein Versuch einer räumlichen Erfassung der Richtung des schwächsten Tidestroms bleiben, was nicht überrascht, wenn man die heute vorliegenden verwickelten Verhältnisse überblickt (Karte 12 des Atlasteils). Daß bis zum Entwurf solcher Karten noch ein Jahrhundert verging, bewegt zu hoher Achtung vor seinem Vorhaben.

Bereits wenige Jahre nach dem Erscheinen von BEECHEYS Beiträgen begann man auch auf der anderen Seite des Atlantiks mit Untersuchungen zu den Gezeitenströmen. Über die für den Linienverkehr — dazu zählten seit 1847 die „Hamburg-Amerikanische Paketfahrt AG“, ein Jahrzehnt später der „Norddeutsche Lloyd“ und ab 1862 die „Compagnie Générale Transatlantique“ — wichtigen Zufahrten von New York berichteten in kurzer Folge SCHOTT (1854), MITCHELL (1856, 1858, 1867) und der schon erwähnte BACHE (1858), während die asiatischen Gewässer erst im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts in den Blickpunkt von Gezeitenstrombeobachtungen rücken.

Inzwischen haben sich in Europa von französischer Seite bereits GIVRY (1851) und KELLER (1855, 1861) mit dem Kanal und der Nordsee und die Engländer HAUGHTON (1857/58, 1862) mit der Irischen See und dem Kanal und SMITH (1866) mit der schottischen Westküste befaßt. Diesen mehr globalen Übersichten folgten örtlich begrenztere Abhandlungen für die belgische Küste und insbesondere die für die Schifffahrt wichtige Scheldemündung von STESSELS (1868) und die Seinemündung von QUINETTE DE ROCHEMONT (1874) und BELLEVILLE (1889), wobei bereits hydraulische Gesichtspunkte eine Rolle spielten. Von deutscher Seite behandelten BRUUN (1877) die schleswig-holsteinische Westküste und BÖRGEN (1880) die südwestliche Nordsee und den Kanal, während in den Jahren 1883 bis 1885 stündliche Beobachtungen des Gezeitenstroms auf 5 Feuerschiffen vor den Mündungen von Weser und Elbe unternommen wurden. Ähnlich gründliche Beobachtungen hatten die Holländer seit 1880 auf den Feuerschiffen der Terschelling-, Schouwen- und Nordhinder-Bank angestellt, deren Anfänge nach ENGELENBURG (1891) bereits einige Jahrzehnte zurückreichten. Um diese Zeit wurde in der dritten Auflage von BERGHAUS' Physikalischem Atlas (1886) ein Abschnitt über die Tidenströme aufgenommen.

In der Folgezeit steht wiederum der Ärmelkanal als am meisten befahrene Schifffahrtsstraße im Vordergrund, und zwar bei ALDRICH (1890), dem Cheflotsen HEDOUIN (1891), der 12 auf die Hochwasserzeit in Cherbourg bezogene Stromkarten mit verschiedenfarbigen Pfeilen für Flut- und Ebbstrom entwarf, und seinem Landsmann HOUETTE (1894), wobei die Initiative zunehmend auf die Hydrographischen Ämter der einzelnen Staaten übergeht. Im letzten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts rücken die Gezeitenströme der Nordsee mehr in den Vordergrund, wobei Arbeiten von PETIT (1892 und 1894), SEEMANN (1893), COLLINS (1894), BUCHAN (1899) und MOORE (1899) zu nennen sind. Mit dem Ausklang des Jahrhunderts legte die Britische Admiralität den ersten offiziellen Gezeitenstromatlas (1899) vor, und seither treten Einzelarbeiten mehr und mehr zurück, da es für ausgedehnte Strommessungen einer umfangreichen Organisation bedarf, die nur von staatlicher Seite getragen werden kann.

### 9. Die Entwicklung der Gezeitenstromatlanten von der Jahrhundertwende bis zur Gegenwart

Während man von den großen Stromsystemen der Ozeane bereits in früheren Jahrhunderten infolge der Versetzung der Segelschiffe, der Trift von Wracks und Eisbergen, über Bord gegangener Ladung sowie durch die seit einem Jahrhundert planmäßig ausgesetzten Flaschenposten eine Vorstellung hatte, versagten diese Methoden bei der Ermittlung der Gezeitenströme im wesentlichen alle. Es blieb nur das alte Navigationsmittel des Logs, das vom verankerten Schiff ausgebracht werden mußte, eine Aufgabe, die sich auf Schiffsreisen im allgemeinen nicht nebenher erledigen ließ. Daraus erklärt sich die relativ späte Erkenntnis der periodischen Meeresströmungen, die sich anfangs vor allem auf Reeden und enge Durchfahrten beschränkte und dann namentlich auf die Umgebung der Feuerschiffe ausdehnte.

Bei gründlicheren Beobachtungen erwies sich das Log mit seinen verschiedenen Varianten als zu ungenau, so daß man nach anderen Geräten suchen mußte. Zunächst machte man sich von der Verbindungsleine los und führte etwa um die Mitte des 19. Jahrhunderts das unter einer tief eingetauchten Boje treibende Stromkreuz ein, das aber für die in großer Frequenz erforderlichen Tidestrombeobachtungen in der Handhabung zu umständlich ist. So zeigen sich bald Bestrebungen zur Entwicklung von in situ arbeitenden Strömungsmeßgeräten, so bei MOORE (1876), der sich parallel dazu noch mit der Verbesserung von Logs beschäftigte, UNWIN (1881), HARLACHER und OTT (1883), die schon eine elektrische Übertragung der gemessenen Geschwindigkeiten ins Auge gefaßt hatten, SHAW (1884) und WOLTMANN (1884). Epochemachend waren die Golfstromforschungen des amerikanischen Leutnants und späteren Admirals PILLSBURY, der zwischen 1885 und 1889 auf dem Dampfer „Blake“ das Problem der Verankerung über große Tiefen bis etwa 4000 m meisterte und einen Strömungsmesser benutzte, dessen Propeller vom Wasser angeströmt wurde und ein Zählwerk durch geeignete Untersetzung betätigte. Zur Richtungsbestimmung diente ihm eine gegen eine Stromfahne arretierbare Kompaßnadel, die allerdings noch keine Abschätzung der Richtungsschwankungen erlaubte. Zu den ersten Bemühungen für die Entwicklung von Strömungsmeßgeräten zählen ferner der hydrometrische Flügel von OTT (1890) und die elektrisch registrierende Anordnung des Kanadiers DAWSON (1897).

Nach der Jahrhundertwende nahm der Bau von Strömungsmessern einen außerordentlichen Aufschwung, wobei in reichlich einem Jahrzehnt die drei Grundtypen mit mechanischer, elektrischer und optischer Registrierung entwickelt wurden. Den Anfang machte 1901 NANSEN mit seinem Pendelstrommesser, den EKMAN (1901) beschrieben und 1906 zusammen mit NANSEN verbessert hat. Eine Weiterentwicklung des Geräts von PILLSBURY stellt der Propell-Strömungsmesser von EKMAN (1905) dar, der im Laufe der Zeit mehrfach verbessert wurde, so u. a. von MERZ (1921), bis er sich für einige Jahrzehnte den Vorrang vor allen anderen Strömungsmeßgeräten sichern konnte. Einen weiteren Fortschritt bedeutete die von dem Schweden PETERSSON (1904, 1905) eingeführte bifilare Aufhängemethode, durch die der in Schiffsnähe der Deviation ausgesetzte Kompaß entbehrlich wurde. Schließlich sei noch der von dem Dänen JACOBSEN (1909) vor allem für den Einsatz auf Feuerschiffen entworfene Libellenstrommesser erwähnt, der dem NANSENschen Gerät verwandt ist. Dem zweiten Typ mit elektrischer Registrierung an Bord verhalf der Finne WITTING (1905, 1908, 1910) zum Durchbruch, dessen Instrument verschiedentlich weiterentwickelt wurde, weil sich damit ganze Meßserien in der Tiefe gewinnen ließen. Dem gleichen Vorteil diente der von PETERSSON (1913) entworfene, optisch in der Tiefe registrierende Strommesser, der später eine Reihe von Abwandlungen erfahren hat und bis zum Einsatz in größeren Tiefen entwickelt worden ist.

Auf weitere Einzelheiten braucht in diesem Rahmen nicht eingegangen zu werden. Man findet sie für die älteren Geräte bei KRÜMMEL (1911), bei THORADE bis zum Stand von 1933; einen kurzen Überblick hat SAGER (1959) gegeben, während BÖHNECKE eine Bibliographie zusammengestellt hat (1955). Die kurze Erwähnung

der Entstehung von Strömungsmeßinstrumenten sollte deutlich machen, daß bis zum Beginn des ersten Weltkrieges die Haupttypen zur Verfügung standen, so daß alle Voraussetzungen gegeben waren, die Beobachtungen der Gezeitenströme namentlich auf der großen Fläche der Nordsee in bislang nicht möglichem Umfang zu betreiben, wie dies 1911 als Empfehlung des Internationalen Rats für Meeresforschung ausgesprochen wurde. Der Ausbruch des Krieges hat dieses Vorhaben letztlich um fast ein Jahrzehnt hinausgezögert, da hydrographische Untersuchungen in den verminten Gebieten unterbleiben mußten.

Verfolgt man die Entwicklung der amtlichen Gezeitenstromkarten zu selbständigen Atlanten, so zeigt sich folgendes Bild: Ab 1880 enthalten die deutschen Gezeitentafeln Tidestromkarten für die Nordsee und den Kanal von 5 Stunden vor bis 6 Stunden nach Hochwasser bei Dover bzw. Cuxhaven, nachdem die Tafeln der Vorjahre sich auf Gezeitenstromangaben für vier Feuerschiffe beschränkt hatten (bezogen auf H. W. in Cuxhaven). Im Jahre 1903 wurde für die Irische See eine Karte mit den Flut- und Ebbeströmen bei Springzeit hinzugefügt, jedoch ebenfalls ohne Stärkeangaben. Inzwischen war vom Hydrographischen Amt der Britischen Admiralität 1899 der erste Gezeitenstromatlas unter dem Titel „Tidal Streams, English and Irish Channels, Coasts of Scotland, North Sea“ herausgegeben, dem 1905 eine Ausgabe für dieselben Seegebiete von BROWN folgte, dessen Werk sich bis zur Gegenwart als kleineres Seitenstück zu den offiziellen Atlanten in mehreren Auflagen behauptet hat. Eine weitere private Ausgabe mit 12 Karten besorgte FIELD 1906.

1905 folgten durch die Deutsche Seewarte die 12 Karten des „Atlas der Gezeiten und Gezeitenströme für das Gebiet der Nordsee und der Britischen Gewässer“, die durch entsprechenden Text ergänzt waren, dessen Schwerpunkt auf den von deutscher Seite am meisten befahrenen Routen durch die südliche Nordsee, die Hoofden und den Kanal, lag. Die Zahl der gekrümmten Strompfeile war unter Benutzung von deutschen, französischen, englischen, belgischen, holländischen und dänischen Angaben auf fast 1200 gebracht und in vier Stärkegruppen unterteilt worden, was eine für die damalige Zeit beachtliche Leistung darstellt. In den Stromkarten waren Ebbe- und Flutstromgebiete farbig angelegt und für eine Reihe von Küstenorten die zeitlichen Beziehungen zum örtlichen Hochwasser gegeben. Da beide Angaben infolge des verschiedenen Charakters der Gezeiten als fortschreitende und stehende Wellen eine sehr unterschiedliche Zuordnung aufweisen, ist man später für die küstenfernen Gebiete von einer Unterscheidung des Gezeitenstroms in Flut- und Ebbestrom wieder abgegangen, die vorwiegend in Ästuaren angebracht ist.

Während die Engländer bereits 1909 eine Neuausgabe als „Tides and Tidal Streams of the British Islands“ besorgten, erhielten die deutschen Gezeitentafeln ab 1907 Gezeitenstromkarten für die Nordsee, den Kanal und die Irische See mit durchschnittlich etwa 450 gekrümmten Pfeilen, die bestimmten Stromgeschwindigkeitsgruppen zugeordnet waren, die sich mit wenig Veränderungen zwei Dezenen behaupteten. Erst 1925 erschien als zweite deutsche Ausgabe der „Atlas der Gezeiten und der Gezeitenströme für das Gebiet der Nordsee, des Kanals und der

britischen Gewässer“, nachdem die Haupttypen der Strommeßgeräte schon ein bis zwei Jahrzehnte existierten, aber infolge des Krieges nur begrenzt zum Einsatz gekommen waren. Eine Ergänzung bildeten die von HESSEN (1929) bearbeiteten „Karten der Strömungen in der Nähe von Helgoland“.

Indessen setzte sich die Tradition der Gezeitenstromangaben in den Gezeitentafeln fort. So findet man Ende der zwanziger Jahre eine wesentlich vergrößerte Pfeilzahl und Tidestromtabellen für 360 Stationen vor. Erst in den Tafeln für das Jahr 1934 hat man sich für den Fortfall der Gezeitenstromkarten entschieden, da bereits ein neues Werk in Vorbereitung war, das 1936 als „Atlas der Gezeitenströme für das Gebiet der Nordsee, des Kanals und der Britischen Gewässer“ erschien. Es enthielt insgesamt 900 Strompfeile, davon 300 mit gesicherten Richtungs- und Stärkeangaben, sowie über 400 Gezeitenstromtabellen und wurde mit geringfügigen Veränderungen 1939, 1943 und 1950 erneut aufgelegt. Fast zur selben Zeit gab die Britische Admiralität (1937) ihren „Atlas of Tides and Tidal Streams, British Islands and adjacent Waters“ heraus, der etwa 500 unregelmäßig angeordnete, gekrümmte Strompfeile mit Angaben in Zehntelknoten für Spring- und Nippzeit, 4 Nebenkarten, eine Karte der Restströme sowie Nomogramme für die Umrechnung der Stromstärke zu einem beliebigen Zeitpunkt enthält und mit verbesserten Neuauflagen 1940, 1943, 1946 und 1952 bis heute das englische Standardwerk geblieben ist.

Auf deutscher Seite hat man erst ab 1937 in den Gezeitentafeln auf die Wiedergabe von Gezeitenstromtabellen verzichtet und damit endgültig die Trennung zwischen Tidenhub und Gezeitenstrom vollzogen. Nachdem der 1950 erfolgte Nachdruck des Gezeitenstromatlas von 1936 als Notlösung betrachtet wurde, publizierte das 1945 gegründete „Deutsche Hydrographische Institut“ in Hamburg 1956 den gänzlich neuen „Atlas der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal und die Britischen Gewässer“. Er enthält neben einer Karte der Maximalströme für etwa 160 Punkte in Küstennähe 13 Hauptkarten mit je fast 1100 Strompfeilen in regelmäßiger Anordnung — 9 in jedem geographischen 1°-Feld der offenen Seegebiete — und Stärken in Zehntelknoten. Die Gezeitenstromtabellen umfassen über 400 Orte und sind meistens nach Spring- und Nippzeit getrennt angegeben. Mit Ausnahme des Fehlens von Nippstromstärken an den Strompfeilen ist das Werk dem englischen Gegenstück wesentlich überlegen, während die Reihe der seit 1945 veröffentlichten englischen Teilkarten in den „Pocket Tidal Atlases“ einen gewissen Ausgleich schafft.

1962 wurde schließlich vom Institut für Meereskunde Warnemünde der „Atlas der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal und die Irische See“ entworfen, in dem auf Vorschlag des Verfassers neben den herkömmlichen Stromkarten solche mit Linien gleicher Maximalstromgeschwindigkeit als nautische Warnkarte, der Linien gleicher Eintrittszeit des größten Gezeitenstroms zwecks schneller Ermittlung des Werts, Angaben zur Spring- bzw. Nippverspätung für die offene See und die Zuordnung der einzelnen Seegebiete zu geeigneten Bezugsorten für die Umrechnung der Gezeitenströme auf einen beliebigen Zeitpunkt enthalten sind. Der Atlas weist ferner als Ergänzung der Hauptkarten 7 Teilkarten mit Strompfeilen für das

Gebiet der Kanalinseln, der Orkneys, des Pentland-Firth, der Humbermündung mit The Wash, der Themsemündung, von Portland Bill und der Insel Wight auf.

#### 10. Die Entwürfe von Gezeitenkarten aus erweiterten Wasserstandsbeobachtungen und theoretischen Ansätzen (1900—1923)

Nach sechs Jahrzehnten Stillstand im Entwurf von Flutstundenlinien tauchte das Problem nach der Jahrhundertwende erneut auf und wurde in den nächsten zwei Jahrzehnten von mehreren Forschern unter verschiedenen, aber überwiegend auf Beobachtungen gegründeten Aspekten, behandelt. Zeitlich an erster Stelle steht der Altmeister der Meereskunde KRÜMMEL (1854—1912), der uns eine Zusammenfassung der Anschauungen über Ebbe und Flut bis zu seiner Zeit gegeben hat. Nachdem er sich bereits 1897 über Gezeitenwellen Gedanken gemacht hatte, neigte er zunehmend zu der Ansicht, in den tidebedingten Wasserbewegungen fortschreitende Wellen vor sich zu haben, wie dies bereits BÖRGEN für die Irische See (1894) und den Kanal einschließlich der südwestlichen Nordsee (1898) angenommen hatte, der übrigens die Bezeichnung Flutstundenlinien geprägt hat.

Bei der Betrachtung der KRÜMMELschen Auffassung von den Flutstundenlinien wird deutlich, daß er noch ganz unter dem Einfluß der Autorität AIRYS stand. Zwar hatte sich die von WHEWELL fixierte Amphidromie bei den Hoofden durch die verdichteten Beobachtungen bestätigt, so daß KRÜMMEL einerseits dessen Karte — leider in der von AIRY entstellten Form — in seine Veröffentlichungen übernommen hat (1904), jedoch zum anderen in seinem Werk „Der Ozean“ (1902) eine Modifikation der AIRYSchen Karte wiedergab, die auch in sein „Handbuch der Ozeanographie“ (1911) Eingang fand. Darin ist der Verlauf der Flutstundenlinien im Kanal und in der Irischen See unverändert, aber die Durchdringung der cotidal lines der schottischen und der Kanalwelle bei den Hoofden vermieden, so daß die Möglichkeit der Amphidromie gegeben war. In dem Entwurf sind einige Isolinien vor der Westküste Schleswigs und Jütlands hinzugefügt und solche unterdrückt, die bei AIRY wie WHEWELL quer über die nördliche Nordsee laufen. Vor der südnorwegischen Küste sind die Ansätze der Flutstundenlinien dagegen dem AIRYSchen Entwurf unterlegen.

Zur Rechtfertigung seiner Konzeption nahm KRÜMMEL ein ganzes System fortschreitender Gezeitenwellen — neben der „schottischen“ und der „Kanalwelle“ noch eine „norwegische“ — an, von denen jede den besonderen Einflüssen der Wassertiefe und damit Ablenkung unterworfen sein sollte. Trotz der Mühe, das Fortschreiten der Tidewellen mit den Tiefenverhältnissen in Einklang bringen zu wollen, vermochte er damit den Beobachtungen nicht entfernt gerecht zu werden, so daß sein Beitrag letztlich wenig konstruktiv geblieben ist.

Auch seine Auffassung, daß die „Kanalwelle“ wesentlichen Anteil an der Gestaltung der Gezeiten der südlichen Nordsee hat, vermochte sich nicht durchzusetzen. Vielmehr hat sich die Meinung Lord KELVINS (1878, 1891), daß eine Sperrung der Straße von Dover die Nordseegezeiten nördlich des 53. Breitenkreises kaum beein-

flussen würde, aus theoretischen Untersuchungen durch TAYLOR (1920), DEFANT (1923) sowie PROUDMAN und DOODSON (1924) bestätigt, wobei in einem solchen Falle die Hoofden-Amphidromie verschwinden würde.

Der Amerikaner HARRIS (1863—1918), dem wir ausgedehnte Studien über die Gezeiten verdanken, vertrat demgegenüber den Standpunkt ausschließlich stehender Wellen, für deren Kreuzen er 1904 einen allgemeinen mathematischen Beweis über die Entstehung von Amphidromien gegeben hat. HARRIS unterteilte die Meeresgebiete in seinen Untersuchungen relativ willkürlich in einzelne Schwingungsgebiete. Seiner vom Jahre 1904 stammenden Karte mit cotidal lines für die Ozeane hatte er bedauerlicherweise eine Theorie zugrunde gelegt, in der die Erdrotation nicht berücksichtigt wurde, so daß ihm kein bleibender Erfolg beschieden war.

Günstiger verhält es sich mit seiner in diesem Rahmen gegebenen Flutstundenkarte für die Nordsee (1904), wobei er klarer als KRÜMMEL die Hoofden-Amphidromie verzeichnete, zu deren Erklärung er ausnahmsweise die Erdrotation herangezogen hatte. Die Karte enthält statt der schon bei WHEWELL angedeuteten großen Amphidromie vor der Deutschen Bucht eine Scharung der cotidal lines in der Nähe der norwegischen Küste vor Egersund und bedeutet in dieser Hinsicht einen Rückschritt. Die Flutstundenlinien sind häufig geradlinig und manchmal sogar mit scharfem Knick gezeichnet, dagegen ist die Zuordnung der Stundenwerte zur Hoofden-Amphidromie richtig. Auf eine Wiedergabe der Karte kann wie bei KRÜMMEL verzichtet werden; man findet sie außer im Original bei DOODSON und WARBURG (1941).

Wie weit man in jenen Jahren noch von einer konkreten Vorstellung über die Amphidromien entfernt war, beweist eine von der Britischen Admiralität akzeptierte Fassung bei TIZARD (1909). Er läßt zwar die cotidal lines in der Umgebung der Hoofden konvergieren, es treffen aber statt 12 dort sogar 24 Linien zusammen, von denen ein Drittel gestrichelt gezeichnet in nördlicher Richtung auf die Doggerbank hin verschwindet. Eine solche Vorstellung ist physikalisch natürlich unhaltbar. Im Kanal — besonders in seinem Zentrum — stellt der Entwurf von TIZARD, der ebenfalls bei DOODSON und WARBURG (1941) wiedergegeben ist, eine wesentliche Verbesserung bezüglich der wahren Verhältnisse dar gegenüber den Karten von WHEWELL und AIRY, da das Ausbauchen der Linien nach Osten bereinigt ist.

Sowohl empirisch als auch theoretisch hat der Österreicher DEFANT (geb. 1884) in jener Periode gearbeitet. Anstoß dazu hatten die Betrachtungen von CHRYSAL (1904, 1905) über die Berechnung von Seiches in Seen gegeben, die von den Japanern TERADA (1906) und ISITANI (1906) aufgegriffen und auf ähnliche Erscheinungen in Teilen der japanischen Inlandsee angewandt wurden. DEFANT ging von den hydrodynamischen Grundlagen für einen Kanal wechselnden Querschnitts aus. Hat ein Kanal an der Stelle  $x$  die Breite  $b(x)$  und die mittlere Tiefe  $h(x)$ , und ist  $u$  die Geschwindigkeit und  $\xi$  der Weg der Wasserteilchen in Kanalrichtung  $x$  sowie  $\zeta$  der augenblickliche Wasserstand über dem ungestörten Niveau, so wird die Bewegungsgleichung im eindimensionalen Fall mit Reibung

$$\frac{\partial u}{\partial t} + k u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + k \frac{\partial \xi}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

und die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{1}{b(x)} \frac{\partial [h(x) \cdot b(x) \cdot u]}{\partial x}$$

oder einfacher

$$\zeta = - \frac{1}{b(x)} \frac{\partial [F(x) \cdot \xi]}{\partial x},$$

wenn  $F(x)$  der Querschnitt an der Stelle  $x$  ist. Setzt man

$$\zeta = Z \cos(\sigma t - \alpha), \quad \xi = X \cos(\sigma t - \varepsilon), \quad \sigma = \frac{2\pi}{T},$$

so wird nach dem Subtraktionstheorem des Kosinus

$$\zeta = \zeta_1 \cos \sigma t + \zeta_2 \sin \sigma t$$

mit

$$\zeta_1 = Z \cos \alpha, \quad \zeta_2 = Z \sin \alpha$$

und

$$\xi = \xi_1 \cos \sigma t + \xi_2 \sin \sigma t$$

mit

$$\xi_1 = X \cos \varepsilon, \quad \xi_2 = X \sin \varepsilon.$$

In die Bewegungsgleichung eingesetzt, folgen Ausdrücke, die entweder mit  $\cos \sigma t$  oder  $\sin \sigma t$  multipliziert sind, so daß man die Form

$$A(x) \cos \sigma t + B(x) \sin \sigma t = 0$$

bekommt. Da diese Gleichung zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein muß, erhält man als Bedingungen

$$A(x) = -\sigma^2 \xi_1 + k \sigma \xi_2 + g \frac{\partial \xi_1}{\partial x} = 0,$$

$$B(x) = -\sigma^2 \xi_2 - k \sigma \xi_1 + g \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = 0.$$

Als zugehörige Differenzgleichungen ergeben sich

$$\Delta \zeta_1 = \frac{1}{g} (\sigma^2 \xi_1 - k \sigma \xi_2) \cdot \Delta x = \frac{\sigma^2}{g} (\xi_1 - k' \xi_2) \cdot \Delta x,$$

$$\Delta \zeta_2 = \frac{1}{g} (\sigma^2 \xi_2 + k \sigma \xi_1) \cdot \Delta x = \frac{\sigma^2}{g} (\xi_2 + k' \xi_1) \cdot \Delta x.$$

Durch dieselbe Überlegung treten an die Stelle der Kontinuitätsgleichung die beiden Formen

$$\zeta_1 = - \frac{1}{b(x)} \frac{\partial [F(x) \cdot \xi_1]}{\partial x}, \quad \zeta_2 = - \frac{1}{b(x)} \frac{\partial [F(x) \cdot \xi_2]}{\partial x},$$

aus denen man durch Integration die für die beiden Differenzgleichungen nötigen Werte von  $\xi_1$  und  $\xi_2$  als

$$\xi_1 = - \frac{1}{F(x)} \int_0^{\Delta x} \zeta_1 b(x) dx,$$

$$\xi_2 = - \frac{1}{F(x)} \int_0^{\Delta x} \zeta_2 b(x) dx$$

erhält.

Kennt man auf einem Kanalquerschnitt  $F(x)$  und  $b(x)$  aus den Seekarten und  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  aus Wasserstandsbeobachtungen, so kann man für einen davon um  $\Delta x$  entfernten Querschnitt die Änderungen  $\Delta \zeta_1$  und  $\Delta \zeta_2$  über die Zwischenwerte  $\xi_1$  und  $\xi_2$  bestimmen, wobei der Reibungskoeffizient  $k$  bzw.  $k' = k/\sigma$  noch zwischen je zwei Querschnitten variiert werden kann. Einzelheiten zur Wahl dieses Koeffizienten findet man bei DEFANT (1922).

Als praktische Anwendung unterteilte DEFANT (1919) das Gebiet des Ärmelkanals in 30 Querschnitte und zusätzlich die Bucht von St. Malo, die Themsemündung und The Wash in jeweils etwa ein halbes Dutzend Querschnitte rechtwinklig zur geographischen Mittellinie und ermittelte successive die betreffenden Funktionen, wobei die Amplitude  $Z$  gegeben ist als

$$Z = \sqrt{\zeta_1^2 + \zeta_2^2}$$

und die Schwingungsphase aus

$$\tan \alpha = \zeta_2 / \zeta_1.$$

Sind  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  mit ähnlichen systematischen Fehlern behaftet — etwa infolge fehlerhafter Abschätzung des Reibungseinflusses —, so wirkt sich das auf die Amplitude merklich, auf die Phase dagegen weniger aus.

Zu den so gefundenen Längs- treten noch Querschwingungen, die durch die Einwirkung der Erdrotation auf die strömenden Wassermassen hervorgerufen werden. Solange in einem Kanalquerschnitt  $F$  die Periode  $\tau$  der Querschwingung — sie wurde für ein rechteckiges Becken, dessen Tiefe klein im Verhältnis zur Breite ist, von MERIAN (1828) als

$$\tau = \frac{2b}{\sqrt{gh}}$$

gegeben — wesentlich kleiner als die Gezeitenperiode  $T$  ist, läßt sich die so bedingte Wasserstandsänderung angeben durch

$$\bar{\zeta} = \frac{2bf}{\nu g T} \cdot \tan \nu \frac{\pi}{2} \cdot \xi,$$

wenn  $f = 2\omega \sin \varphi$  der Coriolisparameter und  $\nu = \tau/T$  das Verhältnis der Perioden von Querschwingung und Gezeit ist.

Im Ärmelkanal ist die Bedingung für  $\nu$  relativ gut erfüllt, dagegen wächst  $\nu$  gegen die Hoofden hin an und erreicht zwischen der Themsemündung und der Zuiderzee etwa den Wert 1, so daß die Methode in diesem Gebiet versagt. DEFANT stellte für die Flutstundenlinien zwei Karten auf, nämlich eine nach den Beobachtungstatsachen und eine zweite auf Grund seiner theoretischen Berechnungen und konnte eine gute Übereinstimmung erzielen. Nicht ganz so befriedigend fiel dieser Vergleich für die Amplituden an der Nord- und Südküste des Kanals aus, so daß DEFANT auf die Wiedergabe von Linien gleichen Tidenhubs verzichtet hat. Aber bereits die Karte mit den Flutstundenlinien gereicht ihm zur Ehre, als damit den bislang üblichen Spekulationen ein Ende gesetzt wurde und sich bis heute gegenüber seinem Entwurf keine bedeutenden Änderungen mehr ergeben haben. Er berechnete außerdem die Gezeitenströme, die im Kanal überwiegend alternierend

sind, so daß er hier die Komponente in der Querrichtung ohne allzu große Fehler vernachlässigen konnte.

Für die Irische See schloß DEFANT 1920 aus zahlreichen Küstenbeobachtungen auf den Verlauf der Flutstundenlinien und verzeichnete in seinem Entwurf erstmals die schon 70 Jahre vorher von Kapitän ROBINSON entdeckte Amphidromie im Nord-Kanal mit einer in deren unmittelbaren Umgebung exakten Zuordnung der Stundenwerte. Er behandelte anschließend die Gezeiten der Irischen See wieder nach der Theorie der Mitschwingungszeiten eines beiderseits mit dem offenen Meer verbundenen Kanals unter Berücksichtigung der Querschwingungen. Dabei zerlegte er das Gebiet in 18 Querschnitte quer zur Längsrichtung und je etwa ein halbes Dutzend im Solway Firth, der Liverpool-Bay und dem Bristol-Kanal und gelangte in seiner Rechnung zu einer guten Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Eintrittszeiten der Hochwasser, der Tidenhübe und der Gezeitenströme.

DEFANTS Landsmann v. STERNECK (1871—1928) erzielte als erster einen weiteren Fortschritt in der Nordsee, die man nicht mehr mit der Kanaltheorie behandeln kann, da ihre Breite erheblich gegenüber der Länge ist. v. STERNECK betrachtete synchrone stehende Schwingungen der in Komponenten zerlegten Wirkung der halbtägigen lunaren und solaren Haupttide, faßte also die fortschreitenden durch die Interferenz zweier stehender Gezeitenwellen entstanden auf. Aus den Hochwasserintervallen entlang der Küsten schloß er auf die Lage der Knotenlinien beider Schwingungssysteme, in deren Schnittpunkt ein Drehpunkt liegen muß. Den Abstand der Flutstundenlinien bestimmte er genähert nach der MERIANSchen Formel. Allerdings sind seine Prinzipien nicht immer genügend klar zum Ausdruck gekommen.

Infolge dieser Konzeption machen die Flutstundenlinien den Eindruck mit dem Zirkel gezogener Kurven, wie die Abbildung 12 zeigt. In der Nordsee weist die Karte drei Amphidromien auf. Wie bei HARRIS ist die Hoofden-Amphidromie klar fixiert und mit richtigen Stundenwerten versehen. v. STERNECK legte erstmals die Lage der schon von WHEWELL vermuteten Amphidromie vor der Deutschen Bucht fest, wenn auch zu weit nach Südosten. Eine Bestätigung kleiner Tidenhübe in dieser Gegend erbrachte daraufhin 1921 das Vermessungsschiff „Triton“ durch Feinlotungen, über die MERZ im selben Jahr berichtete. Schließlich verzeichnet die Karte noch einen Drehpunkt vor der südnorwegischen Küste, dessen Existenz voraussetzt, daß die aus der südlichen Nordsee zurücklaufende und durch geringe Tiefen, Sände und Watten schon stark geschwächte Gezeitenwelle noch imstande ist, die von Norden eindringende schottische Welle auszulösen.

Im Kanal ist die Führung der Flutstundenlinien am ehesten derjenigen von TIZARD zu vergleichen und stellt trotz der fast kreisbogenförmigen Kurven einen Fortschritt gegenüber den Auffassungen von WHEWELL, AIRY und KRÜMMEL dar. In der Irischen See mutet die STERNECKSche Karte wie diejenige von DEFANT aus demselben Jahr schon recht modern an. Sie verzeichnet die Flutstundenlinien nahezu richtig, wobei die Amphidromie im Nordkanal allerdings weniger präzisiert erscheint als bei DEFANT.

1922 gab v. STERNECK noch eine Karte mit den Flutstundenlinien der Eintags-tiden für die Nordsee heraus und fand je eine Amphidromie im zentralen Teil und unweit der Hoofden. Diese Drehpunkte werden von den Linien gleicher Eintritts-zeit des Hochwassers in 24 Stunden — genaugenommen einem mittleren Sterntag

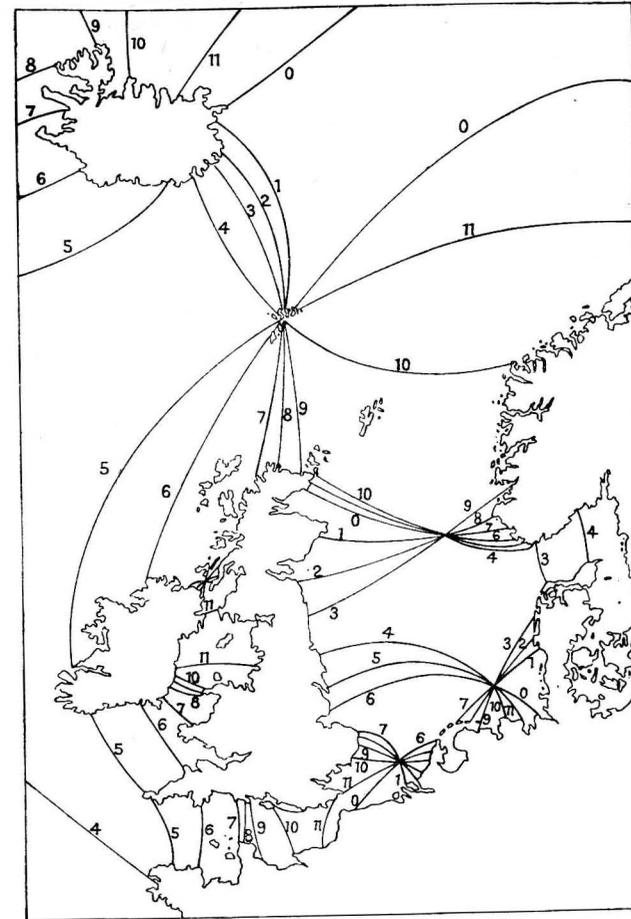


Abb. 12. Karte der Flutstundenlinien nach v. STERNECK (1920)

von 23<sup>h</sup> 56<sup>m</sup> — umlaufen, während MERZ (1923) irrtümlich von einem vollen Mondtag spricht.

Nachdem v. STERNECK neue Messungen von See und Beobachtungen von der südnorwegischen Küste zur Verfügung standen, war er 1925 in der Lage, seine Karte der Flutstundenlinien von 1920 für die Nordsee zu verbessern. Dabei korrigierte er die Position der Amphidromie vor der Deutschen Bucht und stellte außerdem fest, daß vor der südnorwegischen Küste kein Drehpunkt vorhanden sein

kann, womit die Auffassung WHEWELLS (1836) wieder zu ihrem Recht kam. Der Verlauf der Isolinien ist weit weniger schematisch als im ersten Entwurf, erscheint allerdings noch etwas zu glatt für die tatsächlichen, durch die Wassertiefe beeinflussten Verhältnisse. In der Karte sind auch einige Dutzend Lokalwerte aus dem Seegebiet eingetragen, die sich allerdings nicht alle dem Verlauf der Isolinien einfügen. Die Stundenzuordnung bei der Hoofden-Amphidromie ist diesmal falsch angegeben, dagegen kommt diejenige bei dem Drehpunkt vor der Deutschen Bucht der Wahrheit einen Schritt näher.

Rein praktisch orientiert waren die Arbeiten von MERZ (1880—1925), der seit 1920 Beobachtungen in der Nordsee anstellen ließ, über deren Beginn er 1921 berichtete, wobei er die Notwendigkeit betonte, den Gezeitentafeln und den See-Handbüchern Karten mit Flutstunden- und Hubhöhenlinien beizugeben. Als Ausgangspunkt dieser Karten benutzte MERZ die Hochwasserintervalle an den Küstenorten und die aus den Feinlotungen von in See verankerten Schiffen gewonnenen Tidenkurven. Mathematische Überlegungen sind seinen Entwürfen relativ fremd, dafür besaß er nach THORADE (1930) eine ausgesprochene Gabe für das Erkennen von Zusammenhängen in der Natur, die diesen Mangel größtenteils wieder wettgemacht hat.

Seine Karte der Flutstundenlinien (Abb. 13a) weist in der Nordsee zwei Drehpunkte auf. Die Amphidromie vor der Deutschen Bucht ist der Lage nach gut orientiert, zeigt aber dieselbe irrtümliche Stundenzuordnung wie bei v. STERNECK. Nördlich der Küste von Norfolk weist die 6<sup>h</sup>-Linie eine Gabelung auf, wodurch in die Hoofden-Amphidromie 2 Flutstundenlinien dieses Termins laufen, was ausgeschlossen ist. Ohne diese Gabelung wären die Stundenwerte für diesen Drehpunkt einwandfrei. Vor der südnorwegischen Küste zeigt die Karte eine Scharung der Flutstundenlinien mit richtiger Stundenverteilung, der sich v. STERNECK bald anschloß.

Die Linienverteilung im Kanal zeigt noch eine Anlehnung an AIRY und ist weniger gut als bei TZARD. Die Flutstundenlinien in der Irischen See sind einschließlich des Drehpunktes im Nord-Kanal und der zugehörigen Stundenanordnung prinzipiell richtig, wobei die Krümmung der Linien natürlicher als bei v. STERNECK erscheint. Die Karte wurde mit derjenigen für die Hubhöhen 1923 in das Nordsee-Handbuch übernommen und den Gezeitentafeln für das Jahr 1926 beigegeben.

MERZ' Linien gleichen mittleren Springtidenhubs (Abb. 13b) waren die ersten dieser Art nach dem Entwurf für die Irische See durch BEECHEY im Jahre 1848. Die Verteilung des Tidenhubs ist im Kanal wie in der Irischen See relativ zutreffend wiedergegeben mit Ausnahme des Bristol-Kanals, vor dem sich die Isolinien nach außen wölben, sowie der küstenfernen Gebiete zum Atlantik hin, wo die Tidenhübe etwas überschätzt sind. Die Gabelung der 4-m-Linie nordöstlich der Hebrideninsel Lewis ist unreal. Das Bild in der Nordsee ist zutreffend mit Ausnahme des nördlichen Teils und des Gebiets kleiner Tidenhübe im Gebiet vor dem Skagerrak, wo sich die 0,5-m-Linie gabelt und ein Gebiet mit mehr als 1 m Tidenhub einschließt, das nicht existiert. Da die Beobachtungen vom Schiff aus in diesem Teil der Nordsee bei schwachen Tidenhüben und teilweise großen Tiefen sehr schwierig

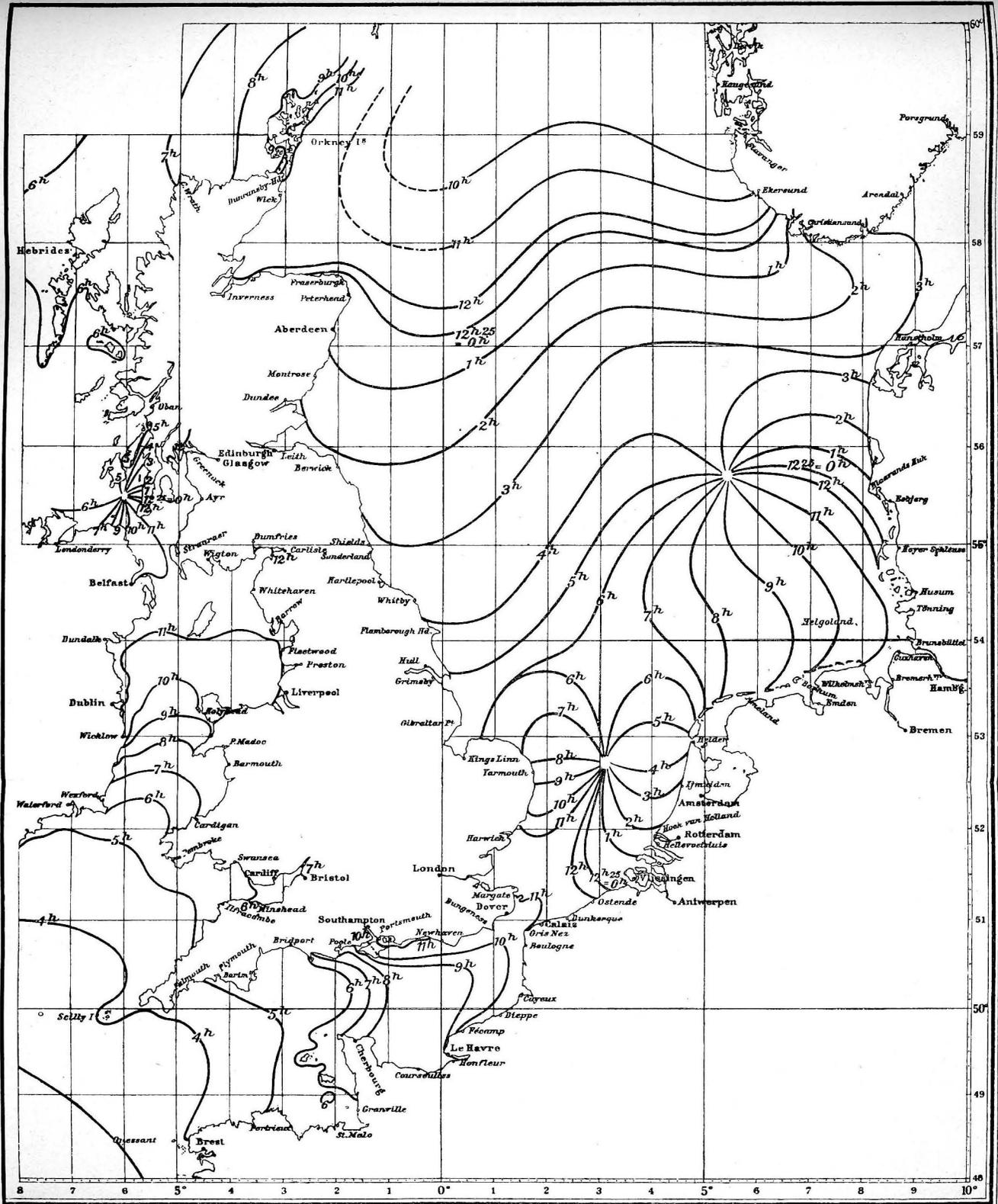


Abb. 13a. Karte der Flutstundenlinien von MERZ (1923) mit den Angaben in mittleren Sonnenstunden

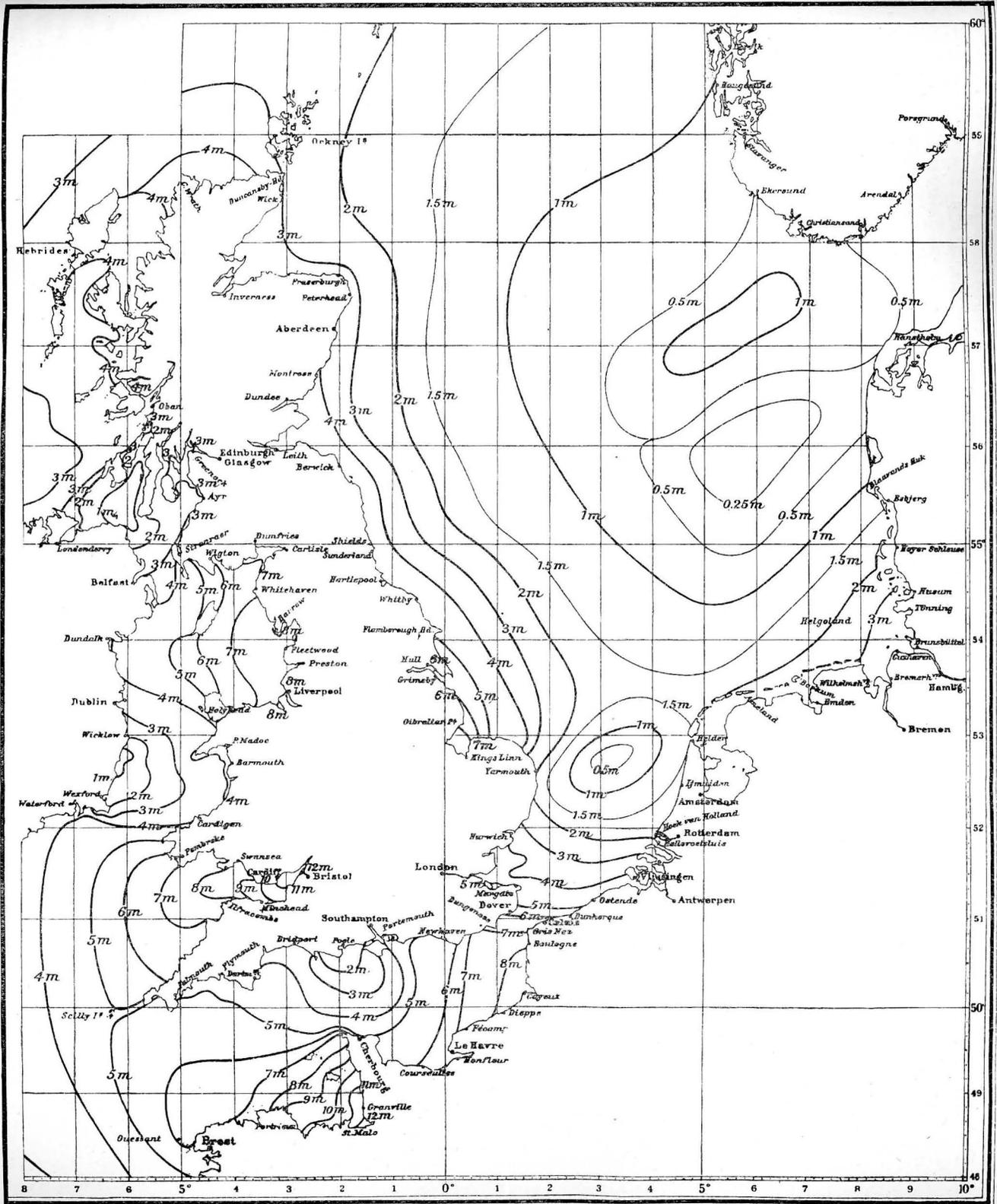


Abb. 13b. Karte der Linien gleichen mittleren Springtidenhubes von MERZ (1923)

sind, konnte man bezüglich der Hubverteilung nicht mehr erwarten. Auf die Fehler gegabelter Isolinien hat CASTENS (1925) nach Konsultation mit dem bekannten Meteorologen KÖPFEN hingewiesen.

Für die praktische Benutzung seiner beiden Karten hat MERZ Ergänzungen gegeben, die nach seinem Tode von THORADE (1927) in das „Handbuch für Küstenvermessungen“ übernommen, später aber durch verbesserte Methoden der Gezeitenberechnung auf See entbehrlich wurden und bald aus dem Gedächtnis verschwanden, was verschiedentlich Anlaß zu einer Überschätzung insbesondere der Aussagekraft der Karte mit den Flutstundenlinien gegeben hat. Diese Karte war nicht für Spring-, sondern für Mittzeit entworfen, wozu MERZ eine Korrekturtabelle mit den Abweichungen der wahren von der in den Karten verzeichneten Hochwassereintrittszeit für jeden beliebigen Tag der Mondperiode beigefügt hat, wie dies analog bereits WHEWELL (1831) und später COURTIER (1938) getan haben. Indessen sind die Korrekturen nicht konstant, sondern vom Verhältnis des mittleren Nipp- zum Springtidenhub abhängig, das in der Nordsee zwischen 40% und reichlich 60% variiert. Die Abweichungen der Eintrittszeiten des Hochwassers gegenüber den Mittelwerten schwanken im Durchschnitt zwischen 55<sup>m</sup> im Nordwesten Schottlands und 30<sup>m</sup> in der inneren Deutschen Bucht, wie die Karten 7 und 8 des Atlasteils zeigen.

Zur Umrechnung des mittleren Springtidenhubs auf momentane Werte hat MERZ 2 Karten entworfen. Die erste gibt Linien gleicher Springverspätung in Stunden und ist wie die zweite noch bei DEFANT (1961) wiedergegeben, obwohl sie auf zu wenig Beobachtungen beruht und bei einer neuen Bearbeitung durch HANSEN (1938) vorsichtiger behandelt wurde, während SAGER (1961) sich auf Mittelwerte in geographischen 1°-Feldern beschränkt hat. Die zweite Karte gibt Linien gleichen Verhältnisses des Nipp- zum Springtidenhub, weist bei den Hoofden wieder eine typische Gabelung auf und ist ebenfalls nicht genügend fundiert. Sie wurde von HANSEN (1938) als Karte mit den Linien gleichen Verhältnisses der  $S_2$ - zur  $M_2$ -Tide für die Nordsee in großen Zügen erneut bearbeitet. Die betreffende Karte 2 des Atlasteils beschränkt sich daher wieder auf die Mittelwerte geographischer 1°-Felder.

Für die nautische Praxis haben sich die Zusatzkarten nicht bewährt, weil sie ausschließlich die lunare und solare Haupttide berücksichtigen, also nur als eine erste Näherung betrachtet werden dürfen, die aber für die Belange der Schifffahrt nicht ausreicht. RAUSCHELBACH ist deshalb dazu übergegangen, die Umrechnung der Gezeiten von den Karten- auf die momentanen Werte unter Benutzung eines geeigneten Bezugsortes über die Gezeitentafeln vorzunehmen, womit die Ungleichheiten der Gezeiten berücksichtigt werden. RAUSCHELBACH, der neben seiner Einstellung auf die praktischen Belange der Navigation in erster Linie mathematisch orientiert war, hat die beiden Hauptkarten von MERZ überarbeitet, die Gabelung der Isolinien beseitigt, einige Verbesserungen besonders im Seegebiet vor dem Skagerrak angebracht und die Flutstundenkarte auf halbe Stunden erweitert, so daß in den Gezeitentafeln für das Jahr 1931 erstmals prinzipiell durchgehend richtige Karten enthalten sind.

Auf einen weiteren Umstand im Zusammenhang mit der Karte der Linien gleichen Tidenhubs hat SCHUMACHER (1924) hingewiesen. Er betonte, daß die Karte kein synchrones Bild der Wasserstandsverteilung zu irgendeinem Zeitpunkt gibt, sondern eine Abstraktion der beobachteten mittleren Springtidenhübe darstellt, die zu verschiedenen Zeitpunkten eintreten, wobei die Hochwasserintervalle, die Tidenkurven und die Springverspätung eine Rolle spielen. Unter vereinfachenden Annahmen berechnete er aus den Haupt- und Nebenkarten von MERZ Linien gleichen Wasserstands der Nordsee für 4 Termine innerhalb einer Tide und gab damit erstmals eine Vorstellung von der vertikalen Bewegung der Meeresoberfläche im Gezeitenwechsel.

### 11. Die theoretische Untersuchung von TAYLOR (1920)

Bis Anfang der zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts waren die beiden Komponenten der Gezeitenbewegung, nämlich der Tidenhub und die Gezeitenströme, in den meisten Arbeiten als voneinander unabhängig angesehen worden, obwohl seit der AIRYSchen Kanaltheorie (1842) die Wechselbeziehungen beider bereits in den Blickpunkt der Betrachtungen gerückt waren. Jedoch wurden die theoretischen Darlegungen nur von wenigen verfolgt und hatten ihre praktische Bedeutung anfangs lediglich in einigen Sonderfällen wie zum Beispiel dem Bristol-Kanal unter Beweis stellen können. Für Meeresgebiete, die nicht mehr schmalen Kanälen gleichen, waren theoretische Untersuchungen relativ spärlich geblieben. Als mit der wachsenden Zahl von Entwürfen für Gezeitenkarten der Nordsee die Frage nach einer prinzipiellen Konzeption auftauchte, besann man sich auf die wenigen theoretischen Vorarbeiten, die zu einer Klärung von Nutzen sein konnten. Die breitere Aufmerksamkeit hat DEFANT (1923) auf diese Problematik gelenkt; sie lautet:

Wie verhalten sich die Gezeiten in einem rechteckigen, an dem einen Ende schmalen, mit dem offenen Ozean in Verbindung stehenden Becken konstanter Tiefe, das der Erdrotation unterworfen ist? An diesem Problem hatte sich bereits Lord KELVIN vergeblich abgemüht, während Lord RAYLEIGH (1903) eine Lösung für kleine Rotationsgeschwindigkeiten geben konnte, die aber für irdische Verhältnisse nicht in Betracht kam. Die vollständige Lösung gelang erst TAYLOR (1922), wobei er auf Vorarbeiten von KELVIN zurückgreifen konnte. Dieser hatte 1879 eine Lösung der Differentialgleichungen der Wasserbewegung in einem unendlich langen Kanal rechteckigen Querschnitts, der um eine vertikale Achse rotiert, gegeben.

Sind  $x$  und  $y$  die Längs- und Querrichtungen des Kanals,  $u$  und  $v$  die Stromgeschwindigkeiten in diesen Richtungen und ist  $\zeta$  die Wasserstandsordinate über dem ungestörten Niveau, so lauten die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen ohne Berücksichtigung der Reibung

$$\frac{\partial u}{\partial t} - f v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + f u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y},$$

wenn  $f = 2 \omega \sin \varphi$  der Coriolis-Parameter ist, und die Kontinuitätsgleichung für seine Wassertiefe  $h$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial h \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v}{\partial y} \right).$$

Nimmt man die Wasserstandsschwankung als periodische Funktion der Zeit an, also

$$\zeta(x, y, t) = \zeta(x, y) \cdot e^{i \sigma t},$$

so erhalten die Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  denselben Zeitfaktor, womit sich die Gleichungen in der Form

$$i \sigma u - f v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad i \sigma v + f u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

und

$$i \sigma \zeta = - \left( \frac{\partial h \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v}{\partial y} \right)$$

schreiben lassen. Aus den beiden Bewegungsgleichungen lassen sich  $u$  und  $v$  eliminieren als

$$u = \frac{g}{\sigma^2 - f^2} \left( i \sigma \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right),$$

$$v = \frac{g}{\sigma^2 - f^2} \left( i \sigma \frac{\partial \zeta}{\partial y} - f \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right).$$

Für eine konstante Wassertiefe  $h$  folgt dann aus der Kontinuitätsgleichung die Schwingungsgleichung des rotierenden Systems

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} + \frac{\sigma^2 - f^2}{g h} \zeta = 0$$

mit der Grenzbedingung  $v = 0$  entlang den Kanalwänden. Dieser Differentialgleichung genügen außer  $\zeta$  auch  $u$  und  $v$ .

Eine Lösung der Gleichung ist

$$\zeta = A \cdot e^{-\frac{f}{\sqrt{g h}} y} \cdot e^{i \sigma \left( t - \frac{x}{\sqrt{g h}} \right)},$$

die aus den Zwischengleichungen für  $u$  und  $v$

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \zeta \quad \text{und} \quad v = 0$$

ergibt. Die Wellen heißen nach ihrem Entdecker KELVIN-Wellen.

Die Resultate besagen, daß in der Querrichtung des Kanals keine Stromkomponente vorhanden ist, da die Coriolis-Kraft sich mit den infolge der Neigung der Wasseroberfläche entstehenden horizontalen Druckgradienten überall im Gleichgewicht befindet. Die Längskomponente ist der Wasserstandserhöhung proportional und phasengleich, die Wellengeschwindigkeit  $c = \sqrt{g h}$  wird durch die Erdrotation nicht beeinflußt. In Blickrichtung der Welle hat man in der rechten Hälfte bis zur Wand exponentiell zunehmende, links entsprechend abnehmende Amplituden. Die Amplitudendifferenz beträgt bei einer Kanalbreite  $2b$  quer über den Kanal

$$\Delta \zeta = 2 A \sinh \frac{f}{\sqrt{g h}} \cdot b \cdot e^{i \sigma \left( t - \frac{x}{\sqrt{g h}} \right)}.$$

Mit zunehmender Breite des Kanals werden die Unterschiede zwar größer, wobei sich die wesentlichen Wasserstandsänderungen auf der rechten Seite vollziehen, während die andere relativ wenig beteiligt wird. Aufschlußreich ist der Quotient der Amplituden gegenüberliegender Punkte, für den man in Fortschrittrichtung der Welle

$$A_{\text{links}} : A_{\text{rechts}} = e^{-\frac{f}{\sqrt{gh}} \cdot 2b}$$

bekommt. Für eine geographische Breite von  $\varphi = 45^\circ$  und eine Tiefe  $h = 90$  m erhält man bei einer Beckenbreite von 100 km noch 70,9%, bei  $2b = 500$  km nur noch 16,2%. In höheren Breiten erfolgt die Abnahme noch schneller. Eine räumliche Vorstellung der KELVIN-Welle gibt die Abbildung 14. Man erkennt, daß sich der Wellenvorgang etappenweise wiederholt. Für die jeweilige Lage des ungestörten Wasserspiegels hat man aus der Bedingung  $\zeta = 0$ , also

$$\cos \sigma \left( t - \frac{x}{\sqrt{gh}} \right) = 0$$

sogleich

$$\frac{x}{\sqrt{gh}} = t - (2n - 1) \frac{T}{4} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

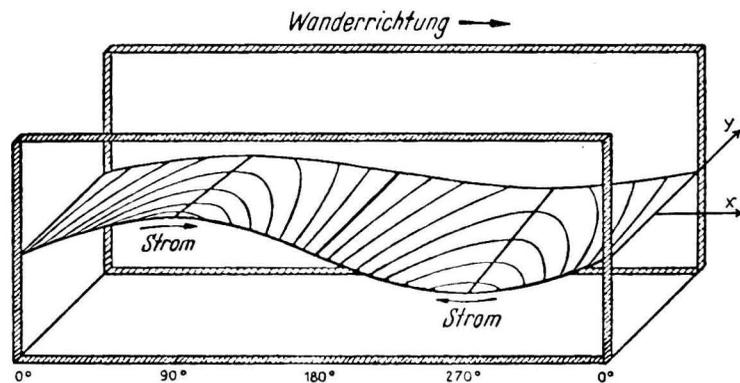


Abb. 14. Schaubild einer KELVIN-Welle (nach DEFANT 1953)

Die Linien des ungestörten Niveaus sind quer zum Kanal orientiert, wobei dort wegen der Proportionalität von  $u$  und  $\zeta$  auch kein Strom herrscht, weil  $v$  durchgehend Null ist.

Sobald die Tiefe nicht mehr konstant ist, treffen diese Betrachtungen nicht mehr zu. PROUDMAN hat 1925 die Gezeitenverteilung für einen Kanal parabolischen Querschnitts bestimmen können. Es zeigte sich dabei, daß die Wellengeschwindigkeit durch die Erdrotation um so mehr reduziert wird, je breiter der Kanal ist. In diesem Fall ergeben sich Querströmungen unregelmäßiger Form, die jedoch nur auf der rechten Kanalseite im Verhältnis zu den Längsschwingungen von Bedeutung sind. Numerische Werte hat DEFANT (1961) gegeben; sie gelten wie alle diese Betrachtungen ohne Berücksichtigung des Reibungseinflusses. Später hat PROUD-

MAN (1946) das Problem nochmals aufgegriffen und an den Kanalwänden Reibung angenommen, über den größeren Tiefen des Zentrums dagegen nicht, womit er den natürlichen Verhältnissen mit vorhandener Wellendissipation nähergekommen ist.

TAYLOR ist 1920 einen bedeutenden Schritt weiter gekommen, als er das Problem auf einen an dem einen Ende geschlossenen Kanal rechteckigen Querschnitts erweiterte. Im Gegensatz zum Fall ohne Erdrotation, wo es genügt, zweigegensinnig fortschreitende Gezeitenwellen zu superponieren, um den Bedingungen einer totalen Reflexion an einer Querwand des Beckens zu genügen, wird die Aufgabe jetzt ungleich komplizierter. TAYLOR war als ersten Schritt 1918 bereits den Weg der Überlagerung zweier KELVIN-Wellen zur Bestimmung der Gezeitenreibung im Südeingang (St.-Georgs-Kanal) der Irischen See gegangen. Nimmt man für die zweite Welle  $180^\circ$  Phasenunterschied, so folgt

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 = -2A \sinh \frac{fy + i\sigma x}{\sqrt{gh}} \cdot e^{i\sigma t}$$

mit dem Realteil

$$\zeta = 2A \left( \cosh \frac{fy}{\sqrt{gh}} \cdot \sin \frac{\sigma x}{\sqrt{gh}} \times \sin \sigma t - \sinh \frac{fy}{\sqrt{gh}} \cdot \cos \frac{\sigma x}{\sqrt{gh}} \cdot \cos \sigma t \right),$$

der für  $x = y = 0$  verschwindet.

Für die Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers — bisher als Flutstundenlinien bezeichnet — gibt die Bedingung  $\zeta = 0$

$$\tanh \frac{fy}{\sqrt{gh}} = \tan \frac{\sigma x}{\sqrt{gh}} \cdot \tan \frac{2\pi}{T} \left( t + \frac{T}{4} \right).$$

Für kleine  $x$  und  $y$  bekommt man in Ursprungsnähe die Geradenschar

$$y = \frac{\sigma}{f} \tan \frac{2\pi}{T} \left( t + \frac{T}{4} \right) \cdot x$$

mit der in der Abbildung 15 eingetragenen Stundenzuordnung. Nähert man sich in der Umgebung der  $x$ -Achse der Stelle, für die  $\sigma x / \sqrt{gh} \rightarrow \pi/2$  geht, so folgt die Hyperbelschar

$$xy = \frac{gh}{f\sigma} \tan \frac{2\pi}{T} \left( t + \frac{T}{4} \right),$$

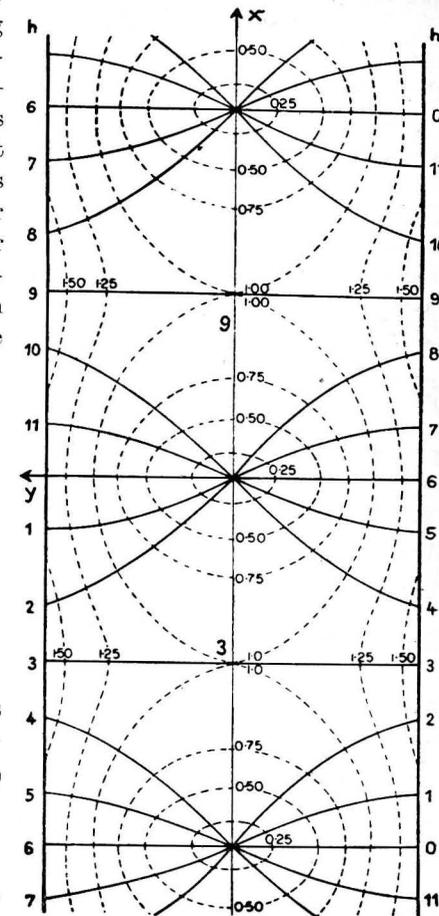


Abb. 15. Superposition zweier KELVIN-Wellen (nach DEFANT 1957, 1961)

die speziell für  $T/4$  und  $3/4 T$  in die beiden Koordinatenachsen ausartet, wie dies die Abbildung 15 erkennen läßt.

Aus den Bewegungsgleichungen folgt für die Stromkomponenten

$$u = 2 A \sqrt{\frac{g}{h}} \cosh \frac{f y + i \sigma x}{\sqrt{g h}} \cdot e^{i \sigma t}, \quad v = 0$$

und damit gegenüber  $\zeta$

$$u = - \sqrt{\frac{g}{h}} \coth \frac{f y + i \sigma x}{\sqrt{g h}} \cdot \zeta.$$

Die Längskomponente  $u$  ist jetzt nicht mehr unmittelbar proportional zur resultierenden Amplitude  $\zeta$ , verschwindet aber gemeinsam mit dieser. Eine Querströmung ist wie bei der einfachen KELVIN-Welle nicht vorhanden. In Abständen von jeweils  $T/2$  liegen auf der  $x$ -Achse Niedrigwasserpunkte, für die zugleich  $\zeta$  und  $u$  Null sind. Die Bewegungsvorgänge haben den Charakter von Drehwellen in einzelnen Abschnitten des Beckens, wobei die Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers sternförmig angeordnet sind. Die Amplituden nehmen von der im Zentrum jeder Zelle liegenden Amphidromie nach allen Seiten zu, die Richtung der Längsströmung ist in beiden Kanalhälften entgegengesetzt.

Bei der Überlagerung der beiden KELVIN-Wellen gibt es nirgends einen Beckenquerschnitt, in dem die horizontale Wasserbewegung zu jedem Zeitpunkt Null wird, was sich auch bei Variation der Phasen nicht ändert. Deshalb versuchte TAYLOR eine weitere Lösung der Bewegungsgleichungen zu finden, deren Querkomponente an den Beckenwänden verschwindet, während die Längskomponente für einen bestimmten Querschnitt mit derjenigen der superponierten KELVIN-Wellen übereinstimmen muß, damit die Differenz der Ansätze für diesen Querschnitt keine Bewegung ergibt, wie das bei totaler Reflexion erfüllt sein muß.

Weitere Lösungen der Bewegungsgleichungen hatten bereits 1910 POINCARÉ und unabhängig von ihm PROUDMAN (1913) gefunden, wobei Querströmungen auftraten. Jedoch ist die Existenz dieser nach ihrem ersten Entdecker benannten Wellen an relativ breite Kanäle gebunden. Die für das Problem geeignete Lösung liegt in Ausdrücken der Form

$$v_n = A_n e^{-s_n x + i \frac{n \pi}{2b} y} \cdot e^{i \sigma t}$$

mit

$$s_n = \sqrt{\left(\frac{n \pi}{2b}\right)^2 - \frac{\sigma^2 - f^2}{g h}},$$

woraus wegen der Randbedingung  $v(\pm b) = 0$  für gerade  $n$

$$v_n = B_n e^{-s_n x} \cdot \sin \frac{n \pi}{2b} y \cdot e^{i \sigma t}$$

und für ungerade  $n$

$$v_n = i C_n e^{-s_n x} \cdot \cos \frac{n \pi}{2b} y \cdot e^{i \sigma t}$$

folgt. Als Lösung für  $u$  fand TAYLOR Ansätze vom Typ

$$u_n = e^{-s_n x} \left( D_n \cos \frac{n \pi}{2b} y + i E_n \sin \frac{n \pi}{2b} y \right) e^{i \sigma t},$$

wobei  $D_n$  und  $E_n$  wegen der aus den Bewegungsgleichungen folgenden Identität

$$i \sigma \frac{\partial u}{\partial y} - f \frac{\partial u}{\partial x} = i \sigma \frac{\partial v}{\partial x} + f \frac{\partial v}{\partial y}$$

mit den  $B_n$  und  $C_n$  verknüpft sind, und zwar

$$B_n = \frac{n \pi}{2 b s_n} D_n - \frac{f}{\sigma} E_n \quad \text{für gerade } n$$

und

$$C_n = \frac{f}{\sigma} D_n - \frac{n \pi}{2 b s_n} E_n \quad \text{für ungerade } n.$$

Die Gesamtlösung für die gewählten Zusatzfunktionen von  $u$  und  $v$  ist dann gegeben durch

$$v = \sum v_n, \quad u = \sum u_n,$$

wobei jeweils abwechselnd die den ungeraden und geraden Zeigern zugeordnete Form gewählt werden muß. TAYLOR konnte zeigen, daß bei 10 Funktionen im allgemeinen eine hinreichende Annäherung an die geforderten Bedingungen erzielt werden konnte.

Diese Störbewegung besteht aus Querschwingungen im innersten Kanalteil, die in Richtung auf die offene Seite hin schnell exponentiell abklingen, und läßt sich nach Amplitude und Phase so bestimmen, daß die geforderte Annullierung der Bewegung bei der Überlagerung mit den beiden KELVIN-Wellen eintritt, so daß  $u$  am Kanalende Null wird, während  $v$  nach der offenen Seite hin bald abklingt, so daß dort das Bild der beiden KELVIN-Wellen vorherrscht. TAYLOR entwickelte die Superposition beider KELVIN-Wellen einerseits und der Störbewegungen andererseits in unendliche Reihen und verglich die Koeffizienten, wobei er auf unendliche Determinanten kam. Einen einfacheren Weg beschritt DEFANT (1925), der eine Näherung zu den Entwicklungen von TAYLOR darstellt und den mathematischen Aufwand stark reduziert.

Die Möglichkeit der totalen Reflexion ist an die Bedingung geknüpft, daß  $s_n$  nicht imaginär wird, also

$$\frac{\sigma^2 - f^2}{g h} < \left(\frac{n \pi}{2 b}\right)^2$$

bleibt. Mit  $\sigma = 2 \pi / T$ ,  $f = 2 \omega \sin \varphi = 4 \pi \sin \varphi / 24$  Stunden und der Tatsache, daß die Perioden der Eigenschwingungen eines Kanals der Breite  $2b$  in der Querrichtung sich als  $\tau_n = 4 b / n \sqrt{g h}$  geben lassen, lautet die Bedingung

$$\left(\frac{\tau_n}{T}\right)^2 < 1 + \left(\frac{\tau_n \sin \varphi}{12 \text{ Stunden}}\right)^2.$$

Mit  $\tau_n : T = q_n$  und  $T : 12 \text{ Stunden} = 1,03505$  folgt für Halbtagstiden exakt

$$q_n < 1 / \sqrt{1 - 1,071 \sin^2 \varphi}$$

oder genähert

$$q_n < 1 / \cos \varphi,$$

was für alle Schwingungen erfüllt ist, wenn es für diejenige mit der längsten Periode ( $n = 1$ ) zutrifft.

Die Bedingung fällt um so einschränkender aus, je kleiner die Wassertiefe  $h$  und die geographische Breite  $\varphi$  und je größer die Beckenbreite  $2b$  ist. TAYLOR hat als Beispiel eine Bucht mit einer mittleren geographischen Breite von  $53^\circ$  N, einer Tiefe von 74 m und einer Breite von 465 km für 84 regelmäßig angeordnete Punkte durchgerechnet, wie dies dem idealisierten Fall der Nordsee entspricht.

Das Resultat der Linien gleichen Tidenhubs und gleicher Eintrittszeit des Hochwassers zeigt die Abbildung 16a, wobei die Bezeichnung der Stundenlinien so geändert worden ist, daß sie den wahren Verhältnissen optimal nahekommt. Man sieht, daß die innere Amphidromie umgestaltet worden ist, während die äußere kaum betroffen wird. Die Amplituden erreichen an den Wänden relativ und in den Ecken absolut die höchsten Beträge. In Wirklichkeit trifft letzteres für die Deutsche Bucht real, für die flämische Bucht als Folge des Einflusses der Kanalwelle modifiziert zu. Die innere Amphidromie wird durch Reibungseinflüsse der Gezeitenwellen nach Osten verlagert, die äußere trifft dieser Effekt noch weit stärker, so daß sie in eine bloße Scharung der Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers entarten kann, wie dies für die Gesamtheit der Tiden der Fall ist, während HANSEN (1952) für die  $M_2$ -Tide noch einen Drehpunkt nahe der südnorwegischen Küste verzeichnet hat.

Bei der Stromverteilung (Abb. 16b) dominiert im ganzen äußeren Becken sowie entlang der Wände alternierender Strom, während im inneren Teil Stromellipsen vorherrschen, die unweit des Beckenendes mit ihren großen Achsen parallel zur Querwand orientiert sind, dann aber in die Gegenrichtung wechseln. So befindet sich zwischen der inneren Amphidromie und dem Beckenende ein Punkt mit nahezu Nullstrom zwischen den beiden Amphidromien, wie das in stark modifizierter Form in der Nordsee der Fall ist (vgl. Karten 11, 12 und 13 des Teils II), wobei allerdings der Gezeitenstrom nirgends verschwindet. Eine merkliche Diskrepanz tut sich allerdings für die Umlaufrichtung der Tideströme auf, die nach TAYLOR derjenigen der Erdrotation bei allen größeren Stromellipsen entsprechen soll, während die wahren Verhältnisse (Karte 11 des Atlasteils) zum großen Teil entgegengesetzt liegen. Diese Tatsache ist DEFANT (1923) entgangen, als er die Stromverteilung nach TAYLOR für vier Phasen berechnete und mit den Beobachtungstatsachen verglich, die sich damals noch überwiegend auf die Küstennähe mit alternierenden Strömen beschränkten. Dagegen hat PROUDMAN auf diese Unstimmigkeit bereits 1924 verwiesen.

Wenn auch die mathematisch schwierige Lösung von TAYLOR an rechteckige Becken gebunden ist und die Berücksichtigung unregelmäßiger Küstenkonturen nicht erlaubt, so hat sie doch eindringlich den engen Zusammenhang zwischen Wasserstandschwankungen und Gezeitenströmen deutlich werden lassen, womit sich eine neue Aera im Entwurf von Karten mit Linien gleichen Tidenhubs und gleicher Phase der Gezeit angebahnt hat, die sich in relativ kurzer Zeit durchzusetzen vermochte, weil fast gleichzeitig von zwei Seiten verschiedene Methoden dienstbar gemacht wurden, die zu einander sehr ähnlichen Resultaten geführt haben.

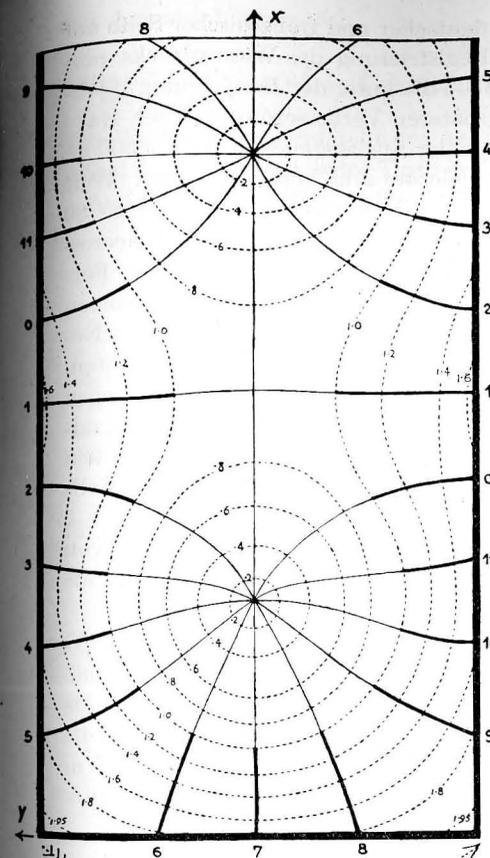


Abb. 16a. Linien gleicher Amplitude und Phase der TAYLOR-Lösung für ein Becken rechteckigen Querschnitts

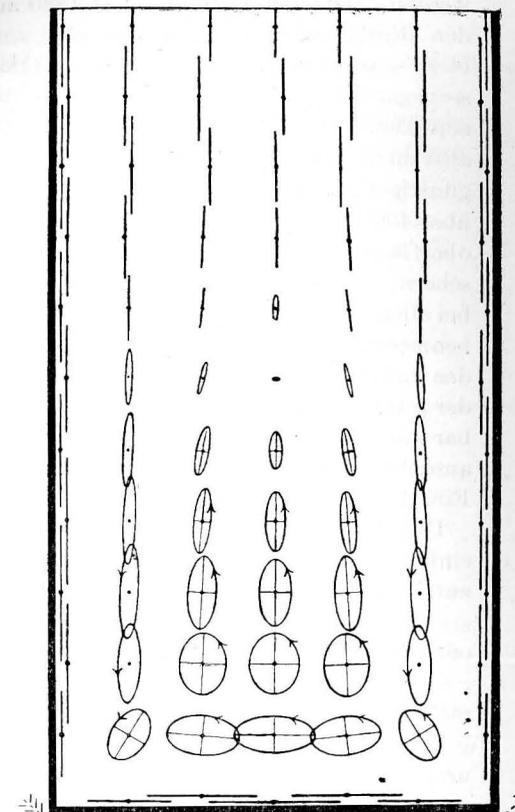


Abb. 16b. Gezeitenstromellipsen der TAYLOR-Lösung für ein Becken rechteckigen Querschnitts

## 12. Die Methode von DEFANT (1923)

Während sich MERZ ausschließlich auf Beobachtungen gestützt hatte, TAYLOR dagegen einen rein theoretischen Weg ging, war das vorhandene Material der Gezeitenstrombeobachtungen bislang in der Nordsee für den Entwurf von Gezeitenkarten fast ungenützt geblieben. Mit Hinblick auf die Ozeane war es klar geworden, daß man kaum je mit Daten des Tidenhubs in solchem Umfang rechnen konnte, daß sich daraus Karten entwerfen lassen würden. Die Feinlotungen zur Bestimmung der Schwankung der Wasseroberfläche konnten in günstigen Fällen — ruhige See, Windstille, nicht zu starke Ströme — bis 100 m Tiefe ausgedehnt

werden. Daneben hatte man seit 1880 auf deutscher und französischer Seite auf den Meeresboden versenkbar Geräte zur Registrierung des Wasserdrucks probiert — so FAVÉ (1887) und MENSING (1898) —, die unter der Bezeichnung Hochseepegel bekannt wurden. Aber selbst die späteren Verbesserungen durch RAUSCHELBACH 1932 und GRAAFEN 1934 blieben in der Auslegetiefe auf 200 bis 300 m, also die Schelfgebiete, beschränkt, wobei die Geräte sehr kostspielig sind. Weit günstiger steht es dagegen mit Strommessungen, die PILLSBURY bereits 1888/89 über 4000 m Tiefe gemeistert hat und so über größeren Gebieten unserer Meeresoberflächen möglich sind. DEFANT (geb. 1884) gehört zu jener Gruppe von Forschern, die den engen Zusammenhang von Wasserstand und Gezeitenströmen bei allen Untersuchungen im Auge hatten. Nachdem er die Gezeiten schmalere Nebenmeere mit Erfolg behandelt hatte, reizte ihn das Problem der Nordseegezeiten, das inzwischen sozusagen reif geworden war. Da seine bisherige Methode wegen der relativ großen Breite der Nordsee im Verhältnis zu ihrer Länge nicht anwendbar war und sich die Lösung von TAYLOR nicht auf unregelmäßig gestaltete Becken ausdehnen ließ, beschritt DEFANT einen anderen Weg, der allerdings ebenfalls Einschränkungen unterworfen ist.

DEFANT ging von der Annahme aus, daß die Wasserstandsschwankungen von einfacher harmonischer Form sind, wie das streng nur jeweils für eine Partialtide zutrifft. Er setzte

$$\zeta(x, y, t) = Z(x, y) \cos(\sigma t - \alpha)$$

oder

$$\zeta = \zeta_1 \cos \sigma t + \zeta_2 \sin \sigma t$$

mit

$$\zeta_1 = Z \cos \alpha, \quad \zeta_2 = Z \sin \alpha$$

und

$$\zeta_1^2 + \zeta_2^2 = Z^2, \quad \zeta_2/\zeta_1 = \tan \alpha.$$

Entsprechende Ansätze machte er für die Komponenten des Gezeitenstroms

$$u = U \cos(\sigma t - \beta) = u_1 \cos \sigma t + u_2 \sin \sigma t,$$

$$v = V \cos(\sigma t - \gamma) = v_1 \cos \sigma t + v_2 \sin \sigma t,$$

wobei  $u$  und  $v$  zueinander rechtwinklig sind, sonst aber beliebig orientiert sein können.

Für den Zusammenhang von  $u_1, u_2$  und  $v_1, v_2$  mit den Hauptachsen der Gezeitenstromellipse erhält man mit

$$w^2 = u^2 + v^2 = \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2 + v_1^2 + v_2^2) + \frac{1}{2}(u_1^2 + v_1^2 - u_2^2 - v_2^2) \cos 2\sigma t \\ + (u_1 u_2 + v_1 v_2) \sin 2\sigma t$$

aus  $\partial(w^2)/\partial t = 0$  als Eintrittszeit  $t^*$  des Maximalstroms

$$\tan 2\sigma t^* = 2 \frac{u_1 u_2 + v_1 v_2}{u_1^2 + v_1^2 - u_2^2 - v_2^2},$$

mit dem zugehörigen

$$w_{\max}^2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + v_1^2 + v_2^2 \pm \sqrt{(u_1^2 + v_1^2 - u_2^2 - v_2^2)^2 + 4(u_1 u_2 + v_1 v_2)^2}}.$$

Der Wert von  $w_{\min}$  entsteht aus zeitlicher Verschiebung um eine Viertelperiode, wobei der zweite und dritte Term in dem Ausdruck für  $w^2$  sein Vorzeichen ändert.

Aus den entsprechenden Sonderfällen

$$w_{\max} \cdot \cos \delta^* = u_1 \cos \sigma t^* + u_2 \sin \sigma t^*, \\ -w_{\min} \cdot \sin \delta^* = -u_1 \sin \sigma t^* + u_2 \cos \sigma t^*, \\ w_{\max} \cdot \sin \delta^* = v_1 \cos \sigma t^* + v_2 \sin \sigma t^*, \\ w_{\min} \cdot \cos \delta^* = -v_1 \sin \sigma t^* + v_2 \cos \sigma t^*$$

folgt nach Elimination der Zeitglieder aus den Zwischengleichungen

$$(w_{\max}^2 - w_{\min}^2) \sin 2\delta^* = 2(u_1 v_1 + u_2 v_2)$$

und

$$(w_{\max}^2 - w_{\min}^2) \cos 2\delta^* = u_1^2 + u_2^2 - v_1^2 - v_2^2$$

für den Winkel  $\delta^*$  der Hauptstromrichtung gegen die  $x$ -Achse

$$\tan 2\delta^* = 2 \frac{u_1 v_1 + u_2 v_2}{u_1^2 + u_2^2 - v_1^2 - v_2^2}.$$

DEFANT ermittelte aus dem damals noch relativ ungenauen Gezeitenstromatlas der Deutschen Seewarte unter Ausgleichung der Werte der in stündlichen Abständen gegebenen Strompfeile Amplituden und Phasen der Längs- und Querströmung, die er in Karten darstellte, wodurch er in der Lage war, namentlich in Gebieten mit recht unregelmäßig vorhandenen Beobachtungen ein homogeneres Ausgangsmaterial zu schaffen. Aus den  $U, V, \beta$  und  $\gamma$  berechnete er dann

$$u_1 = U \cos \beta, \quad u_2 = U \sin \beta, \quad v_1 = V \cos \gamma, \quad v_2 = V \sin \gamma.$$

Setzt man die Ansätze für  $u$  und  $v$  in die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial h \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v}{\partial y}\right)$$

ein und beachtet, daß sie zu jedem beliebigen Zeitpunkt erfüllt sein muß, so zerfällt sie in die beiden Gleichungen

$$\zeta_1 = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial h \cdot u_2}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v_2}{\partial y} \right),$$

$$\zeta_2 = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial h \cdot u_1}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v_1}{\partial y} \right),$$

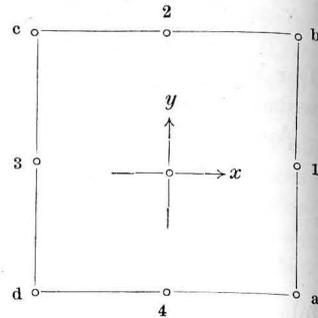
die eine Verknüpfung zwischen den Teilkomponenten  $u_1, u_2$  sowie  $v_1, v_2$  und den Teilordinaten des Wasserstands  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  darstellen, aus denen man  $Z$  und  $\alpha$  und damit die Wasserstandsfunktion  $\zeta$  berechnen kann.

DEFANT unterteilte die Nordsee in ein Netz von 165 flächengleichen Quadraten, die etwa in der Richtung der geographischen Mittelachse kantenorientiert waren.

Als Kantenlänge erhielt er reichlich 50 km, so daß die Annahme einer konstanten Wassertiefe in jedem Quadrat als einigermaßen gerechtfertigt gelten durfte. Bezeichnet man die Eckpunkte eines solchen Quadrats mit  $a, b, c, d$  und die Seitenmitten mit 1, 2, 3, 4, so kann man die beiden Differentialgleichungen bei einer Kantenlänge  $\Delta x = \Delta y = l$  als Differenzengleichungen schreiben, nämlich

$$\zeta_1 = \frac{h}{\sigma l} [u_2(1) - u_2(3) + v_2(2) - v_2(4)],$$

$$\zeta_2 = -\frac{h}{\sigma l} [u_1(1) - u_1(3) + v_1(2) - v_1(4)],$$



oder von den Werten in den Eckpunkten ausgehend bei einfachem arithmetischem Mittel

$$\zeta_1 = \frac{h}{2\sigma l} [u_2(a) + u_2(b) - u_2(c) - u_2(d) - v_2(a) + v_2(b) + v_2(c) - v_2(d)],$$

$$\zeta_2 = -\frac{h}{2\sigma l} [u_1(a) + u_1(b) - u_1(c) - u_1(d) - v_1(a) + v_1(b) + v_1(c) - v_1(d)].$$

Die Werte in den Eckpunkten werden als gemeinsame Punkte mehrerer Quadrate bevorzugt, um eine geringere Punktzahl zu erzielen und damit den Arbeitsumfang zu reduzieren.

Mit diesem Verfahren wird aus den beobachteten Gezeitenströmen der Wassermassenumsatz innerhalb des durch die quadratische Grundfläche  $l^2$  und die Höhe  $h$  bestimmten Prismas ermittelt und als Wasserstandserhöhung bzw. Erniedrigung ausgedrückt, die für den Mittelpunkt des Quadrates gilt. Soll die Methode genaue Werte liefern, so müssen die Stromdaten in den 4 Eckpunkten möglichst genau bekannt sein. Der Vorteil der Methode liegt darin, daß man von den Werten der weiteren Umgebung unabhängig ist und auf die gerade in Küstennähe sehr wechselnden Amplituden der Gezeit verzichten kann.

Bei unebenem Meeresboden sind die Höhen der 4 Wände nicht mehr identisch, und in sehr flachen Gewässern kann sich durch die Wasserstandsschwankungen die Prismenhöhe  $h$  so stark ändern, daß dies berücksichtigt werden muß, wie THORADE (1924) bemerkte. Weit mehr fällt aber ins Gewicht, daß die Methode Gezeitenströme voraussetzt, die nach Richtung und Stärke tiefenunabhängig sind, so daß der Oberflächenwert ohne weiteres für das ganze Prisma gilt. Da diese Bedingung nicht genügend erfüllt ist, kann das Verfahren nur genäherte Werte liefern. Unter Benutzung der Oberflächenwerte erhält man zu große Wasserstandsschwankungen, da sich in den unteren Wasserschichten geringere Bewegungen der Wasserkörper abspielen, die künstlich den Oberflächenwerten angeglichen werden. So weist DEFANTS Karte mit der Amplitude der Gezeitenwelle auch etwas zu große Werte auf, die sich in einer Verschiebung der Linien gleichen Tidenhubs von den Küsten nach See zu kundtun.

Seine Karte gleicher Phasen der Gezeitenwelle, die aus insgesamt 105 regelmäßig zueinander angeordneten Punkten folgt und in der Abbildung 17 wiedergegeben ist, zeigt drei Drehpunkte, wobei die Stundenzuordnung nur für die Hoofden-Amphidromie zutreffend ist. Bei den beiden anderen Drehpunkten sind die Fehlbezeichnungen dieselben wie bei v. STERNECK, jedoch sind die Flutstundenlinien wesentlich natürlicher angeordnet.

Während DEFANT einen kosinusförmigen Verlauf des Wasserstands angenommen hat, der durch die Ermittlung der Amplitude  $Z$  und der Phase  $\alpha$  festgelegt

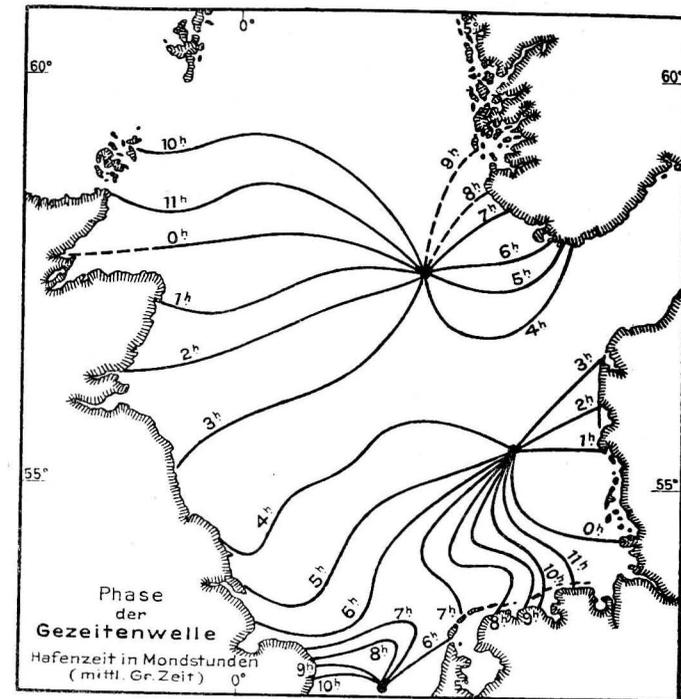


Abb. 17. Linien gleicher Phasen für die Nordsee von DEFANT 1923

ist, hat THORADE (1924) darauf hingewiesen, daß dies eine gewisse Willkür bedeutet. Tatsächlich entfernt sich der Verlauf der Tidekurve namentlich in seichten, küstennahen Gewässern örtlich erheblich von dem Idealfall, wie die Beispiele von Tidenkurven in den Gezeitentafeln (Cuxhaven, Hoek van Holland, Vlissingen, Le Havre, Portsmouth) zeigen. Dann trifft sowohl der Ansatz für  $\zeta$  als auch für  $u$  und  $v$  in der einfachen Form nicht mehr zu. In diesem Fall ist die Benutzung der Karten mit den Gezeitenströmen in stündlichen — THORADE denkt eventuell sogar an halbstündliche — Daten erforderlich, die aber auch für die Tiefe vorliegen müßten.

Als dann ist wieder der Entwurf von Karten gleicher Amplitude und Phase in zwei Richtungen — etwa West-Ost und Süd-Nord — für verschiedene Tiefen-

horizonte notwendig, um unmittelbar aus der Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial h \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v}{\partial y} \right)$$

nach Übergang zur Form der Differenzengleichung

$$\dot{\zeta} = - \frac{1}{T} (h_1 \bar{u}_1 - h_3 \bar{u}_3 + h_2 \bar{v}_2 - h_4 \bar{v}_4)$$

die Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels zu ermitteln, aus der sich dann stückweise die Tidekurve und damit Amplitude und Phase ergibt.

### 13. Die Methode von PROUDMAN und DOODSON (1924)

PROUDMAN (geb. 1888) und DOODSON (geb. 1890) benutzten statt der Kontinuitätsgleichung die Bewegungsgleichungen und berücksichtigten noch den Reibungseinfluß. Den schon benutzten Ansätzen

$$\begin{aligned} \zeta &= \zeta_1 \cos \sigma t + \zeta_2 \sin \sigma t, \\ u &= u_1 \cos \sigma t + u_2 \sin \sigma t \text{ (Ostkomponente),} \\ v &= v_1 \cos \sigma t + v_2 \sin \sigma t \text{ (Nordkomponente)} \end{aligned}$$

fügten sie

$$\begin{aligned} F &= F_1 \cos \sigma t + F_2 \sin \sigma t, \\ G &= G_1 \cos \sigma t + G_2 \sin \sigma t \end{aligned}$$

als Reibungsgrößen für die beiden Stromkomponenten hinzu. TAYLOR hatte 1918 bei Untersuchungen der Gezeitenreibung für die Irische See eine quadratische Abhängigkeit von der mittleren Stromgeschwindigkeit gefunden, wobei

$$F = k \cdot u \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{und} \quad G = k \cdot v \cdot \sqrt{u^2 + v^2}$$

mit  $k = 0,002$  benutzt wurde, was statthaft erscheint, falls keine lebhaftete Bodentopographie vorhanden ist.

In die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - f v &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{F}{h}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + f u &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{G}{h} \end{aligned}$$

eingesetzt, die zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein müssen, erhält man die folgenden 4 vom Zeitglied freien Gleichungen

$$\begin{aligned} \sigma u_2 - f v_1 &= -g \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} - \frac{F_1}{h}, \\ -\sigma u_1 - f v_2 &= -g \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} - \frac{F_2}{h}, \\ \sigma v_2 + f u_1 &= -g \frac{\partial \zeta_1}{\partial y} - \frac{G_1}{h}, \\ -\sigma v_1 + f u_2 &= -g \frac{\partial \zeta_2}{\partial y} - \frac{G_2}{h}, \end{aligned}$$

die sich in der Form

$$\begin{aligned} 10^7 \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} &= -a u_2 + b v_1 - c F_1, \\ 10^7 \frac{\partial \zeta_1}{\partial y} &= -a v_2 - b u_1 - c G_1, \\ 10^7 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} &= a u_1 + b v_2 - c F_2, \\ 10^7 \frac{\partial \zeta_2}{\partial y} &= a v_1 - b u_2 - c G_2 \end{aligned}$$

schreiben lassen, wobei

$$\begin{aligned} a &= 10^7 \sigma / g = 1,432, \\ b &= 10^7 f / g = 1,487 \sin \varphi, \\ c &= 10^7 / g h = 1,019 \cdot 10^4 / h \end{aligned}$$

ist.

Ausgangspunkt für die Berechnung der 4 Oberflächengradienten sind die Werte von  $u_1, u_2$  und  $v_1, v_2$  für die halbtägige Hauptmond tide  $M_2$ . Man erhält sie für einen beliebigen Punkt, wenn dort die  $u$ - und  $v$ -Komponenten des Gezeitenstroms aus Strombeobachtungen analysiert worden sind. Läßt man speziell  $t = 0$  mit dem Eintritt des Maximalstroms zusammenfallen und kombiniert dann äquidistante Zeiten vor und nach diesem Termin, so wird zum Beispiel für die Ostkomponente

$$\begin{aligned} u &= u_1 \cos \sigma t + u_2 \sin \sigma t, \\ u(t_1) &= u_1 \cos \sigma t_1 + u_2 \sin \sigma t_1, \\ u(-t_1) &= u_1 \cos \sigma t_1 - u_2 \sin \sigma t_1, \end{aligned}$$

also

$$u_1 = \frac{u(t_1) + u(-t_1)}{2 \cos \sigma t_1} \quad \text{und} \quad u_2 = \frac{u(t_1) - u(-t_1)}{2 \sin \sigma t_1}.$$

Da im allgemeinen die Strombeobachtungen in stündlichen Abständen vorliegen, kann man aus den 6 Paaren solcher Werte über eine Tideperiode ausgleichen und damit  $u_1, u_2$  und analog  $v_1, v_2$  auf 5 cm/sec genau ermitteln, was gerade den Gezeitenstromangaben auf  $1/10$  Knoten entspricht, wie sie in den genauesten Gezeitenstromkarten verzeichnet sind.

Aus den Oberflächengradienten in Richtung der  $x$ - und  $y$ -Achse läßt sich der Wert in einer beliebigen Richtung aus

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial s} = \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} \cdot \frac{dx}{ds} + \frac{\partial \zeta_1}{\partial y} \cdot \frac{dy}{ds}$$

bestimmen, wobei  $dx/ds = \cos \delta$  und  $dy/ds = \sin \delta$  sind, wenn  $\delta$  der Richtungswinkel mit der  $x$ -Achse ist. Auf diese Weise kann man das Gefälle der Meeresoberfläche von einem Punkt mit bekannter Amplitude — meistens wird das ein Küstenort sein — zu einem mit unbekannter Amplitude linear berechnen. Das Gefälle entlang einer solchen Linie quer über ein Meeresgebiet ergibt sich um so genauer,

je enger die Punkte mit Strombeobachtungen liegen und je exakter diese sind. Beginnt man von beiden Endpunkten der Linie aus, so müssen sich die berechneten Werte der Teilamplituden treffen, worin eine Kontrollmöglichkeit besteht. Aus  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  erhält man dann Amplitude  $Z$  und Phase  $\alpha$  in gewohnter Weise zu

$$Z = \sqrt{\zeta_1^2 + \zeta_2^2} \quad \text{und} \quad \alpha = \arctan \zeta_2 / \zeta_1.$$

Neben der Bestimmung von  $Z$  und  $\alpha$  ermöglicht die Methode von PROUDMAN und DOODSON noch die Ermittlung der Richtung der Linien gleicher Amplitude  $Z = \text{konst.}$  und gleicher Phase  $\alpha = \text{konst.}$  Sind die Winkel dieser Linien mit der  $x$ -Achse resp.  $\psi$  und  $\chi$ , so ist für eine Funktion  $F(x, y) = 0$  der Tangens des Richtungswinkels

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\frac{\partial f}{\partial y}}$$

und für  $Z$  und  $\alpha$  entsprechend

$$\tan \psi = - \frac{\zeta_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} + \zeta_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x}}{\zeta_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial y} + \zeta_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial y}}$$

bzw.

$$\tan \chi = - \frac{\zeta_1 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} - \zeta_2 \frac{\partial \zeta_1}{\partial x}}{\zeta_1 \frac{\partial \zeta_2}{\partial y} - \zeta_2 \frac{\partial \zeta_1}{\partial y}}.$$

In den Punkten mit Strombeobachtungen erscheinen somit entlang den Linien über das Meeresgebiet neben den Amplituden und Phasen noch die Richtungen der Linien gleicher Amplitude und gleicher Phase als weiterer Anhaltspunkt für den Entwurf von Gezeitenkarten. PROUDMAN und DOODSON bestimmten für die offene Nordsee die Linien gleicher Amplitude aus 37 Höhen- und Richtungsangaben, die Linien gleicher Phase aus 34 Wertegruppen. Dazu kamen noch direkte Beobachtungen von Phasen an 31 und von Amplituden an 21 Positionen, die entweder durch Feinlotungen, den Einsatz von Hochseepegeln oder Messungen von Unterseebooten aus beigebracht worden sind.

Eine besondere Rolle spielen beim Entwurf der Karten die unmittelbaren Küstendaten, von denen beide Forscher reichlich hundert verwendet haben. Dabei ist natürlich zu bedenken, daß sich die Küstengestaltung maßgeblich auf die Gezeitenkonstanten auswirkt, so daß man sich möglichst auf einfach gestaltete Küstenabschnitte beschränken muß. Für die Gebiete in Küstennähe kann man wiederum theoretisch arbeiten, weil sich dann Vereinfachungen der Bewegungsgleichungen ergeben.

Legt man an einem solchen Punkt speziell die  $x$ -Achse in die Maximalstromrichtung, so wird bei der bereits gewählten Zeitählung

$$u_1 = U, \quad u_2 = v_1 = 0, \quad v_2 = V$$

und damit  $F_2 = G_1 = 0$ . Die Bewegungsgleichungen reduzieren sich für ein solches Koordinatensystem auf

$$g \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} = - \frac{F_1}{h}, \quad g \frac{\partial \zeta_1}{\partial y} = - \sigma V - f U,$$

$$g \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} = \sigma U + f V, \quad g \frac{\partial \zeta_2}{\partial y} = - \frac{G_2}{h}.$$

In die Gleichungen für  $\tan \psi$  und  $\tan \chi$  eingesetzt, erhält man mit  $\zeta_2 / \zeta_1 = \tan \alpha$

$$\tan \psi = \frac{h(\sigma U + f V) \tan \alpha - F_1}{h(\sigma V + f U) + G_2 \tan \alpha},$$

$$\tan \chi = - \frac{h(\sigma U + f V) + F_1 \tan \alpha}{h(\sigma V + f U) \tan \alpha - G_2},$$

wobei  $\alpha$  jetzt die Phase des Hochwassers gegenüber der Eintrittszeit des Maximalstroms bedeutet, so daß  $\alpha / \sigma = \Delta t$  der Zeitunterschied zwischen Hochwasser und stärkstem Gezeitenstrom ist. Der Wert von  $\Delta t$  war bereits damals für eine Anzahl von Punkten in Küstennähe bekannt. Die Maximalstromrichtung liegt bei relativ gerader Küste parallel zu dieser, und  $V$  wird sehr klein, so daß man wegen  $F_1 = k U^2$  und  $G_2 = 0$  einfacher

$$\tan \psi = \frac{\sigma}{f} \tan \sigma \cdot \Delta t - \frac{k}{hf} U,$$

$$\tan \chi = - \frac{\sigma}{f} \cot \sigma \cdot \Delta t + \frac{k}{hf} U$$

erhält.

Numerisch kann man für die Nordsee die Koeffizienten als  $\sigma / f = 1,2$  und  $k / f = 0,00007$  ansetzen, so daß die Reibungsglieder im Sonderfall der Küstennähe bezüglich  $\psi$  und  $\chi$  kaum mehr eine Rolle spielen. Man trägt ihnen durch eine kleine Variation beider Winkel Rechnung.

Im Falle fortschreitender Wellen ist  $\Delta t = 0$  und damit

$$\tan \psi = - \frac{k}{hf} U, \quad \tan \chi = \infty,$$

die Linien gleicher Amplitude verlaufen fast parallel zur Küste, diejenigen gleicher Phase senkrecht dazu. Bei stehenden Wellen wird  $\Delta t = T/4$ , also

$$\tan \psi = \infty, \quad \tan \chi = + \frac{k}{hf} U,$$

und die Verhältnisse vertauschen sich praktisch. PROUDMAN und DOODSON haben von dieser Möglichkeit nur wenig Gebrauch gemacht, und zwar bei den Amplituden nur für 6 und bei den Phasen für 10 Punkte. Aus allen Berechnungen entwarfen sie je eine Arbeitskarte mit den Richtungen und Beträgen der Linienelemente für  $Z$  und  $\alpha$ . Wenn auch die Kenntnis der Richtung von einigen Dutzend Tangenten sehr aufschlußreich ist, so weisen die Arbeitskarten doch noch große Areale auf, die bis auf die Küstenwerte lückenhaft geblieben sind, so daß noch reichlich

Spielraum für das Ziehen der Linien vorhanden war, wogegen die Werte bei DEFANT vollkommen regelmäßig angeordnet waren. Allerdings läßt sich dieser Mangel bei den englischen Forschern durch mehr Basiswerte beheben.

Die 1924 publizierte Karte mit den Linien gleicher Phase weist ebenfalls drei Amphidromien auf, wie die Abbildung 18 zeigt. Dabei liegt die nördliche Amphi-

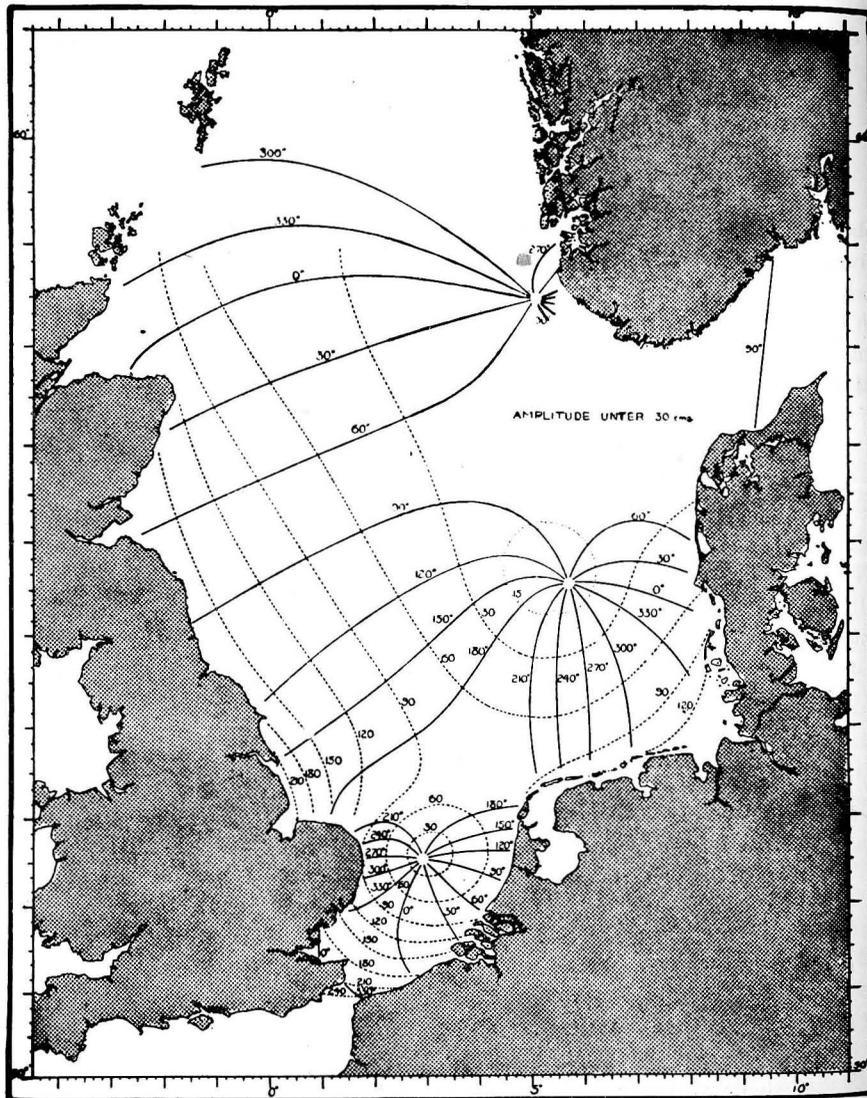


Abb. 18. Linien gleicher Amplitude und Phase der Nordseezeiten von PROUDMAN und DOODSON 1924

dromie dicht unter der Küste und wird von den Bearbeitern mit Vorbehalt angeführt. Die Stundenzuordnung ist für die Hoofden-Amphidromie richtig, für den Drehpunkt vor der Deutschen Bucht gegenüber v. STERNECK und DEFANT um 1 Stunde verbessert, aber noch um 1 Stunde verspätet. Der Verlauf der Linien gleicher Amplitude entspricht besser den inzwischen gewonnenen Ergebnissen als derjenige bei DEFANT. Alle Linien verlaufen relativ ausgeglichen, was einerseits in der Methode seinen Grund hat, bei der die Wassertiefe  $h$  nur bei den kleinen Reibungsgliedern eingeht, und andererseits eine Folge der zu geringen Zahl der Ausgangspunkte ist. In DEFANTS Karte erscheint demgegenüber die Tiefenverteilung etwas reichlich betont, da er durchgängig mit den Oberflächenwerten der Strömung gerechnet hat.

Im Jahre 1931 haben DOODSON und CORKAN (1932) das Verfahren auf den Kanal und die Irische See angewandt und für beide Seegebiete entsprechende Karten entworfen, die ebenfalls auf die  $M_2$ -Tide bezogen waren. In beiden Fällen wurden im Verhältnis zur Größe des Seegebiets erheblich mehr Daten verarbeitet als seinerzeit bei der Nordsee, so daß die Karten als sicherer fundiert gelten können. Auf die Wiedergabe der Karten sei verzichtet, da sie den heutigen sehr ähneln; man findet sie außer in den Originalarbeiten wieder bei DOODSON und WARBURG (1941).

#### 14. Das Randwertverfahren von HANSEN (1943)

HANSEN (geb. 1909) benutzte praktisch dieselben Ausgangsgleichungen wie PROUDMAN und DOODSON, nämlich

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - f v &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{F}{h}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + f u &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{G}{h}\end{aligned}$$

mit ähnlichen Reibungsansätzen

$$\begin{aligned}F &= -k u w_{\max}, \\ G &= -k v w_{\max}.\end{aligned}$$

Mit der Abkürzung  $\frac{k}{h} w_{\max} = r$ , wobei  $r$  für die einzelnen Eckpunkte der Quadrate jeweils aus Tabellen bestimmt wird, hat man in vereinfachter Schreibweise

$$\begin{aligned}u_t - f v &= -g \zeta_x + r u, \\ v_t + f u &= -g \zeta_y + r v,\end{aligned}$$

wobei die Indices die partielle Differentiation angeben.

Ein Vergleich mit dem Faktor  $k$  bei PROUDMAN und DOODSON, wo  $k = 0,002$  bei dem Ansatz  $F = k u w$  gewählt wurde, zeigt bei umgekehrter Proportionalität der Reibungskräfte zur Wassertiefe, daß  $k$  bei HANSEN zwischen 0,0029 bei 5 m und 0,0024 bei 50 m Tiefe schwankt. Da er außerdem  $k$  proportional zu  $w_{\max}$  gesetzt hat, bedeutet das eine stärkere Berücksichtigung der Reibungseinflüsse.

Für die Funktionen  $\zeta(x, y, t)$ ,  $u(x, y, t)$  und  $v(x, y, t)$  führt man nun einen komplexen Zeitfaktor ein, dessen Argument negativ gewählt wird, nämlich

$$\zeta(x, y, t) = \zeta(x, y) \cdot e^{-i\sigma t} = (\zeta_1 + i\zeta_2) (\cos \sigma t - i \sin \sigma t),$$

$$u(x, y, t) = u(x, y) \cdot e^{-i\sigma t} = (u_1 + iu_2) (\cos \sigma t - i \sin \sigma t),$$

$$v(x, y, t) = v(x, y) \cdot e^{-i\sigma t} = (v_1 + iv_2) (\cos \sigma t - i \sin \sigma t).$$

Durch den negativen Exponenten folgen für die Realteile

$$\zeta = \zeta_1 \cos \sigma t + \zeta_2 \sin \sigma t = Z \cos (\sigma t - \alpha),$$

$$u = u_1 \cos \sigma t + u_2 \sin \sigma t = U \cos (\sigma t - \beta),$$

$$v = v_1 \cos \sigma t + v_2 \sin \sigma t = V \cos (\sigma t - \gamma),$$

d. h. die schon öfter verwendeten Ausdrücke. Wählt man die Zeitvariable so, daß  $t = 0$  mit dem Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich zusammenfällt, so geben  $\zeta_1$ ,  $u_1$  und  $v_1$  die Wasserstands- und Geschwindigkeitskomponenten zur Zeit der Greenwich-Kulmination des Mondes und  $\zeta_2$ ,  $u_2$  und  $v_2$  eine Viertelperiode oder 3 Mondstunden später an.

Mit den komplexen Funktionen  $\zeta$ ,  $u$  und  $v$  nehmen die Bewegungsgleichungen die Form

$$\lambda u - f v + g \zeta_x = 0,$$

$$\lambda v + f u + g \zeta_y = 0$$

an, wenn  $r - i\sigma = \lambda$  gesetzt wird, wozu wieder die Kontinuitätsgleichung

$$(h \cdot u)_x + (h \cdot v)_y - i\sigma \zeta = 0$$

kommt. Für die Geschwindigkeitskomponenten folgt

$$u = \frac{-g}{f^2 + \lambda^2} (\lambda \zeta_x + f \zeta_y),$$

$$v = \frac{g}{f^2 + \lambda^2} (f \zeta_x - \lambda \zeta_y);$$

sie sind also bestimmt, so lange  $f^2 + \lambda^2 \neq 0$  ist. Im Gegensatz zu TAYLOR wird die Wassertiefe hier als variabel angesetzt, womit die Kontinuitätsgleichung mit den Ausdrücken von  $u$  und  $v$  die Form annimmt

$$\Delta \zeta + \frac{1}{h} (h_x \zeta_x + h_y \zeta_y) + \frac{f}{\lambda h} (h_x \zeta_y - h_y \zeta_x) + \frac{i\sigma}{\lambda g h} (f^2 + \lambda^2) \cdot \zeta = 0,$$

wenn  $\Delta \zeta = \zeta_{xx} + \zeta_{yy}$  der LAPLACESCHE Operator ist.

HANSEN hat sodann mit Hilfe des Integralsatzes von GAUSS bewiesen, daß die Gezeiten eines Meeresgebiets  $G$  bei vorhandener Reibung  $r$  eindeutig bestimmt sind, wenn entweder der Wasserstand  $\zeta$  oder die Normalkomponente  $u_n$  und  $v_n$  des Gezeitenstroms entlang den Begrenzungslinien von  $G$  — Kurve  $C_1$  als Küstenbegrenzung und  $C_2$  als Trennlinie zu einem anderen Meeresgebiet — bekannt ist. Entlang  $C_1$  verschwinden  $u_n$  und  $v_n$ , da der Gezeitenstrom hier küstenparallel setzt. Es wird im allgemeinen der Fall vorliegen, daß die Werte von  $\zeta$  entlang der Küsten und  $u_n$ ,  $v_n$  auf der Trennlinie zum Nachbargebiet ermittelt werden, so

daß man auf alle Betrachtungen innerhalb des Meeresgebiets selbst verzichten kann und — eine nachher noch zu nennende Einschränkung ausgenommen — nur die Tiefenverteilung benötigt. Als Bedingung ergibt sich die Forderung, daß weder die Begrenzungslinie  $C_2$  eine Knotenlinie ( $\zeta = 0$ ) ist, noch das Gebiet  $G$  eine solche enthält. Da sich die Gezeitenbeobachtungen ausschließlich auf den Rand von  $G$  beschränken, spricht HANSEN von seiner Methode als einem Randwertverfahren. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Tatsache einer außerordentlichen Reduktion der Tidenhub- und Strombeobachtungen, was vor allem für die Ozeane von Bedeutung ist, wo allerdings in den Ausgangsgleichungen im Gegensatz zu den Nebenmeeren die gezeitenerzeugenden Kräfte selbst berücksichtigt werden müssen, was aber keine prinzipiellen Schwierigkeiten macht.

Wie bei DEFANT, der übrigens 1923 einige der bei HANSEN gegebenen Gleichungen — unter Einschränkung auf konstante Wassertiefe — bereits angegeben hat, muß die Schwingungsgleichung der Gezeiten nun in eine Differenzgleichung verwandelt werden, wobei das Meeresgebiet wieder in quadratische Felder zerlegt wird, deren Konturen sich jetzt dem Verlauf der Grenzlinien  $C_1$  und  $C_2$  möglichst gut anpassen müssen. Wählt man als Seitenlänge  $l$  und die früher gewählte Bezeichnung der Punkte, wobei der Mittelpunkt den Funktionswerten  $f(x_0, y_0)$  entsprechen möge, so vollzieht sich der Übergang von den ersten und zweiten partiellen Ableitungen zu den entsprechenden finiten Ausdrücken als

$$f_x \approx \frac{f(x+l, y) - f(x-l, y)}{2l},$$

$$f_y \approx \frac{f(x, y+l) - f(x, y-l)}{2l},$$

$$f_{xx} \approx \frac{f(x+l, y) + f(x-l, y) - 2f(x, y)}{l^2},$$

$$f_{yy} \approx \frac{f(x, y+l) + f(x, y-l) - 2f(x, y)}{l^2}$$

und für den LAPLACESCHEN Operator zu

$$\Delta f \approx \frac{f(x+l, y) + f(x-l, y) + f(x, y+l) + f(x, y-l) - 4f(x, y)}{l^2}.$$

Mit der Punktezuordnung

$$f(x, y) = f_0, \quad f(x+l, y) = f_1,$$

$$f(x, y+l) = f_2, \quad f(x-l, y) = f_3,$$

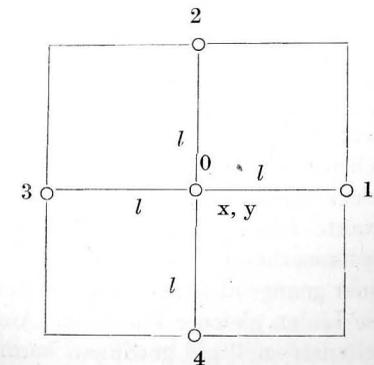
$$f(x, y-l) = f_4$$

hat man einfacher

$$f_x \approx \frac{f_1 - f_3}{2l}, \quad f_y \approx \frac{f_2 - f_4}{2l},$$

$$f_{xx} \approx \frac{f_1 + f_3 - 2f_0}{l^2}, \quad f_{yy} \approx \frac{f_2 + f_4 - 2f_0}{l^2},$$

$$\Delta f \approx \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 - 4f_0}{l^2}.$$



Diese Ausdrücke werden in die Differentialgleichung für die Wasserbewegung eingesetzt, die damit die Form

$$\frac{1}{l^2} (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 - 4\zeta_0) + \frac{1}{4l^2 h_0} [(h_1 - h_3)(\zeta_1 - \zeta_3) + (h_2 - h_4)(\zeta_2 - \zeta_4)] \\ + \frac{f}{4l^2 \lambda h_0} [(h_1 - h_3)(\zeta_2 - \zeta_4) - (h_2 - h_4)(\zeta_1 - \zeta_3)] + \frac{i\sigma}{\lambda g h_0} (f^2 + \lambda^2) \cdot \zeta_0 = 0$$

bekommt. Nach den einzelnen Punkten geordnet folgt

$$\zeta_1 \left[ 1 + \frac{1}{4h_0} (h_1 - h_3) - \frac{f}{4\lambda h_0} (h_2 - h_4) \right] + \zeta_2 \left[ 1 + \frac{1}{4h_0} (h_2 - h_4) + \frac{f}{4\lambda h_0} (h_1 - h_3) \right] \\ + \zeta_3 \left[ 1 - \frac{1}{4h_0} (h_1 - h_3) + \frac{f}{4\lambda h_0} (h_2 - h_4) \right] + \zeta_4 \left[ 1 - \frac{1}{4h_0} (h_2 - h_4) - \frac{f}{4\lambda h_0} (h_1 - h_3) \right] \\ - \zeta_0 \left[ 4 - \frac{i\sigma l^2}{\lambda g h_0} (f^2 + \lambda^2) \right] = 0,$$

wobei  $\lambda = r - i\sigma$  bzw.  $\frac{1}{\lambda} = \frac{r + i\sigma}{r^2 + \sigma^2}$  ist.

Diese Differenzgleichung stellt den Zusammenhang zwischen dem komplexen Funktionswert  $\zeta$  im Punkt  $x, y$  und den Funktionswerten in den vier benachbarten Gitterpunkten her. Für jeden Gitterpunkt — ausgenommen die Punkte der Berandung — wird eine solche Differenzgleichung aufgestellt, in der die Koeffizienten der Funktionen  $\zeta_0$  bis  $\zeta_4$  die jeweiligen Wassertiefen, den Coriolis-Parameter, die Winkelgeschwindigkeit der betreffenden Partia tide, den Reibungskoeffizienten  $r$  und bei  $\zeta_0$  außerdem noch die Erdbeschleunigung und die Seitenlänge des Quadrats enthalten.

Die insgesamt auftretende Anzahl der Funktionswerte ist gleich der Zahl der inneren Gitterpunkte plus derjenigen der Randpunkte. Da die Funktionswerte in den letzteren bekannt oder mit denjenigen der Nachbarpunkte durch eine lineare Beziehung verknüpft sind, ist in dem System linearer Gleichungen die Anzahl der Unbekannten gleich der Anzahl der Gleichungen. Das System ist immer dann eindeutig lösbar, wenn die Determinante des Koeffizientenschemas von Null verschieden ist. Verschwindet die Determinante, so treten Eigenschwingungen auf, womit die Lösung nicht mehr eindeutig bestimmt ist, wie HANSEN (1952) nachgewiesen hat.

Zur Auflösung des Systems von  $n$  linearen Gleichungen mit ebenso vielen Unbekannten wandte er ein Iterationsverfahren an, wobei von einem beliebig vorgegebenen Wertesystem ausgegangen und durch eine geeignete Rechenvorschrift ein neues Wertesystem bestimmt wird, das eine verbesserte Approximation an die exakte Lösung des Gleichungssystems darstellt. Die Auflösung des gesamten Systems dieser linearen Gleichungen erfordert eine erhebliche Rechenarbeit. Bei einer genügend feinen Untergliederung erhält man gute Resultate, aus denen man die Linien gleicher Phase und Amplitude einer Tide sowie die Elemente der Gezeitenstromellipse gewinnen kann.

Unter bestimmten Verhältnissen läßt sich daraus der Übergang zu Tiden mit wenig voneinander abweichender Winkelgeschwindigkeit als gute Näherung herleiten, wie HANSEN bereits 1938 dargelegt hat. Wie alle hydrodynamisch basierten Methoden — TAYLOR, DEFANT, PROUDMAN und DOODSON — gibt das Verfahren keinen Aufschluß über die Ursachen der Gezeiten. Offen geblieben ist bis heute die Erweiterung des Randwertverfahrens auf das Problem der Seichtwassertiden, bei denen die konvektiven Glieder der Bewegungsgleichungen nicht mehr vernachlässigt werden dürfen.

HANSEN wandte nach einer Erprobung für den Nordatlantischen Ozean (1949) sein Verfahren 1952 auf die mittlere und südliche Nordsee an, wobei das Gebiet um die Hoofden ausgeschlossen und als Begrenzung im Norden der 57. Breitenkreis genommen wurde, da weiter nördlich nicht genügend zuverlässige Strombeobachtungen mehr vorhanden waren, was entlang der Begrenzungslinie sehr bedeutend ist, da sich hierauf ein wesentlicher Teil des Verfahrens stützt. Als Maschenweite des quadratischen Gitternetzes wurden 83 km gewählt, insgesamt sind 21 innere und 18 Randpunkte vorhanden, so daß 42 reelle Unbekannte zu bestimmen waren.

Für den Coriolis-Parameter wurde ein mittlerer Betrag der geographischen Breite von  $55^\circ$  zugrunde gelegt, bei den Tiefenangaben wurde für jeden Punkt der Mittelwert über die vier dort zusammenstoßenden Gitterquadrate genommen, um örtliche Anomalien in ihrer Auswirkung zu beschränken. Zur Bestimmung der Reibungseinflüsse waren die Maximalwerte der Gezeitenströme erforderlich, die aus Beobachtungen gewonnen werden mußten. In diesem Punkt liegt eine Einschränkung des Randwertverfahrens, da man für das Gebiet  $G$  die Beträge der Maximalströme wenigstens überschlägig kennen muß, um die Reibungsglieder berücksichtigen zu können.

An Ausgangswerten verwendete HANSEN für die  $M_2$ -Tide der Nordsee das Verzeichnis der harmonischen Gezeitenkonstanten des Internationalen Bureaus Monaco, aus denen  $\zeta$ ,  $Z$  und  $\alpha$  für zahlreiche Küstenorte entnommen werden können. Für die Gezeitenströme auf der nördlichen Begrenzungslinie lagen nur wenige fertige harmonische Analysen vor, dagegen eine Reihe von Angaben in den Gezeitenstromatlanten für jede volle Stunde vor und nach dem Meridiandurchgang des Mondes in Greenwich. Da diese Werte für die Ost- und Nordkomponente keinen rein harmonischen Verlauf haben, machte sich eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate notwendig. Ist zum Beispiel  $u_A(t)$  der zeitliche Verlauf der Ostkomponente nach den Beobachtungen bzw. dem Gezeitenstromatlas, so muß das über einen halben Mondtag erstreckte Integral

$$\int_{-T/2}^{T/2} [u_A(t) - u_1 \cos \sigma t - u_2 \sin \sigma t]^2 dt$$

ein Minimum werden, weshalb die Ableitungen nach den Komponenten  $u_1$  und  $u_2$  verschwinden müssen, also

$$\int_{-T/2}^{T/2} [u_A(t) - u_1 \cos \sigma t - u_2 \sin \sigma t] \cos \sigma t dt = 0$$

und

$$\int_{-T/2}^{T/2} [u_A(t) - u_1 \cos \sigma t - u_2 \sin \sigma t] \sin \sigma t dt = 0$$

werden. Ausgerechnet folgt

$$u_1 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_A(t) \cos \sigma t dt, \quad u_2 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_A(t) \sin \sigma t dt$$

und entsprechend

$$v_1 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v_A(t) \cos \sigma t dt, \quad v_2 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v_A(t) \sin \sigma t dt.$$

Liegen die Integranden gezeichnet vor, so kann man die Integrale planimetrisch ermitteln und aus  $u_1$ ,  $u_2$  und  $v_1$ ,  $v_2$  analog der von PROUDMAN und DOODSON gewählten Weise die partiellen Ableitungen von  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  und damit diese selbst berechnen, wie sie in der Differenzgleichung benötigt werden.

Die Karte mit den Linien gleicher Phase und Amplitude der halbtägigen Hauptmond tide  $M_2$  für die Nordsee zeigt die Abbildung 19, wobei jedoch zu bedenken ist, daß sie nur bis 57°N auf dem Randwertverfahren beruht, während die übrigen Werte ergänzt sind. Gegenüber den früheren Karten ist die Stundenzuordnung der Amphidromie vor der Deutschen Bucht berichtigt. Vor der süd-norwegischen Küste erscheint wie bei v. STERNECK, DEFANT, PROUDMAN und DOODSON ein Drehpunkt, der wie bei den letztgenannten dicht unter der Küste liegt, wobei er aber außerhalb des Bereichs der Berechnungen fällt, also bereits dem ergänzten Gebiet angehört.

In einer neuen Arbeit hat HANSEN (1962) sein Verfahren für ein viel engeres Gitternetz (Abstand 18,5 km) in der Nordsee einschließlich Kanaleingang und Skagerrak bis auf die Höhe der Orkney-Inseln wiederholt. Die mit elektronischen Rechenanlagen gewonnenen Ergebnisse hat er in Form gleicher Linien für  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  veröffentlicht. Aus diesen beiden Karten wird ersichtlich, daß die Amphidromie vor der norwegischen Küste nicht mehr vorhanden ist, daß sich in dem betreffenden Gebiet keine Linien  $\zeta_1 = \zeta_2 = 0$  mehr kreuzen. Andererseits stehen die theoretischen Ergebnisse mit den spärlichen Angaben der harmonischen Konstanten in den offiziellen Gezeitentafeln im Bereich des Skagerraks nicht ganz im Einklang, so daß die Ergebnisse in diesem Gebiet noch als vorläufig zu betrachten sind.

In letzter Zeit ist das Randwertverfahren von GRIJALVA (1962) auf den Ärmelkanal ausgedehnt worden, wobei die Maschenweite auf fast 20 km herabgedrückt wurde. Die Rechnungen wurden wegen des erheblichen Umfangs mit der Elektronenrechenmaschine IBM 704 durchgeführt. Bei den Geschwindigkeiten der Gezeitenströme wurde die Änderung mit der Tiefe berücksichtigt, für die bei ungeschichteten Wassermassen v. VEEN (1936) in der Straße von Dover und HANSEN (1952) in der Elbe und Ems das Potenzgesetz

$$w = w_0 \left( \frac{z}{h} \right)^{1/5}$$

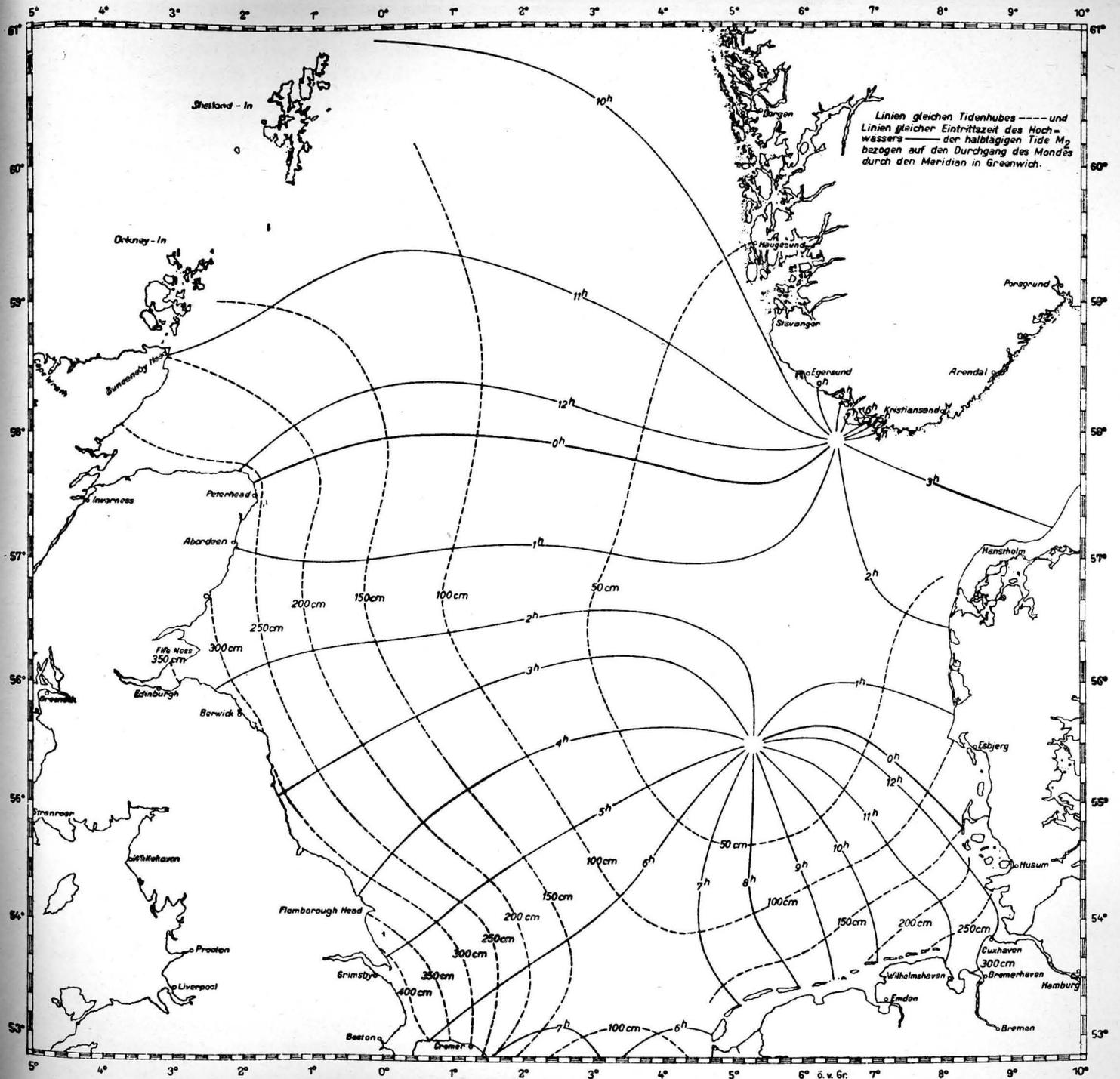


Abb. 19. Linien gleicher Phase und Amplitude der  $M_2$ -Tide für die Nordsee nach HANSEN 1952

gefunden haben. Dabei bedeutet  $w$  die Tidestromgeschwindigkeit in der Schicht  $z$  Meter über dem Boden und  $w_0$  an der Oberfläche, für die  $z = h$  wird. Alsdann ist der Mittelwert der Gezeitenstromgeschwindigkeit von der Oberfläche bis zum Boden — unter der Voraussetzung unveränderter Richtung in den verschiedenen Tiefen — gegeben durch

$$\bar{w} = -\frac{1}{h} \int_0^h w dz = \frac{5}{6} w_0.$$

Bei der praktischen Durchführung ergaben sich Schwierigkeiten in der relativ seichten Seine-Bucht und der tiefenmäßig sehr differenzierten Bucht von St. Malo, wo die Gezeitenverteilung noch durch die Kanalinseln beeinträchtigt wird. Die Karten gleicher Phase und Amplitude zeigen eine weitgehende Übereinstimmung mit denjenigen von DOODSON und CORKAN (1932).

#### 15. Karten mit verschiedenen Elementen des Tidenhubs und der Gezeitenströme

Mit den Arbeiten von MERZ, DEFANT, PROUDMAN und DOODSON hatte man um 1923/24 in großen Zügen einen Überblick über den Ablauf der Gezeiten in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See erlangt, der später durch DOODSON und CORKAN (1932) sowie HANSEN (1950, 1952) präzisiert wurde, wie in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich dargestellt worden ist. Es interessieren jetzt die Bemühungen, über diese Karten mit Linien gleicher Eintrittszeit und gleichen Springtidenhubs hinaus weitere Elemente des Gezeitenablaufs in ihrer geographischen Verteilung zu erfassen. Dabei ist der Anstoß häufig von praktischen Belangen ausgegangen, wie anschließend gezeigt wird.

Zunächst sind die Grundkarten, die ab 1926 in die Gezeitentafeln aufgenommen und seither mehrfach verbessert worden sind (1931, 1944, 1948, 1961), für die in ihren Gezeitenverhältnissen unübersichtlichen Gebiete in der Deutschen Bucht großmaßstäblich ergänzt worden, und zwar bereits 1923 von SCHUHMACHER und THORADE für das Gebiet der Sylter Gewässer mit Abständen der Flutstundenlinien von 10 Minuten und der Linien gleichen Tidenhubs von 10 cm. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die für Wattengebiete äußerst wichtige Lotungsbeschickung für die Entwürfe von Tiefenkarten gelegt, worüber SAGER (1961) methodisch informiert hat. Als weiteres Teilgebiet wurde die Jade 1931 von BLUM erfaßt, während MÖLLER (1933) einen großmaßstäblichen Entwurf über den Verlauf der Flutstundenlinien und der Linien gleichen Tidenhubs in den von SCHUMACHER und THORADE gewählten Intervallen für das Tidegebiet der Deutschen Bucht besorgte, der bei dem damals vorhandenen Beobachtungsmaterial als gewagt erscheinen mußte und sich auch nicht behaupten konnte. Für Gebiete um die ostfriesischen Inseln hat WALTHER (1934) unter dem Gesichtspunkt der Bedeutung der Gezeitenströme im Norderneyer Seegat für die Sandwanderung und damit für den Uferschutz entsprechende Studien unternommen, wobei die Zeitabstände der Isolinien sogar auf 5 Minuten herabgesetzt werden

konnten. Eine offizielle Darstellung für die gesamte Küste von Schleswig-Holstein wurde 1959 im „Deutschen Planungsatlas“ gegeben.

Von französischer Seite wurden im Zusammenhang mit den Studien zum Anschluß des inneren Teils des Golfs von St. Malo bis zu den Iles Chausey für die Errichtung eines Gezeitenkraftwerks eine Reihe von Gezeitenbeobachtungen durchgeführt. Als Ergebnis konnte BONNEFILLE (1962) Karten mit den Linien gleicher Eintrittszeit des Hochwassers mit 5<sup>m</sup>-Abständen und Linien gleichen Tidenhubs für 3 verschiedene Zeitpunkte des Mondphasenintervalls und Abständen von 1/2 m vorlegen, wobei die jeweilige Verschiebung der Flutstundenlinien infolge des wechselnden Tidenhubs aufschlußreich ist.

Als eine neue Gruppe von Karten hat MERZ 1923 Linien gleicher Verhältnisse des Nipp- zum Springtidenhub und gleicher Verspätung des Eintritts der Springzeit für die Nordsee gegeben, über die bereits im 10. Abschnitt berichtet wurde, wobei auch die Unzulänglichkeiten erwähnt worden sind. Diese Karten waren als Hilfe für den Nautiker gedacht, bis man zu der Umrechnung des Tidenhubs über die Bezugsorte in den Gezeitentafeln übergang. Von beiden Karten hat SCHUMACHER 1924 Gebrauch gemacht, um aus den Grundkarten die Wasserstandsverteilung über die Nordsee für 4 Termine darzustellen, wobei er entsprechend den damaligen Kenntnissen naturgemäß einige Einschränkungen machen mußte. Sein Gedanke ist erst ein Vierteljahrhundert später von HANSEN (1952) bei der Anwendung des Randwertverfahrens für die  $M_2$ -Tide in der Nordsee abermals zur Ausführung gekommen, wobei wegen des rein harmonischen Verhaltens einer Partialtide 2 Termine zur Fixierung des gesamten Schwingungsvorgangs ausreichen.

1938 hat HANSEN die von MERZ gegebenen Zusatzkarten auf andere Art bearbeitet und Karten mit Linien gleicher Quotienten  $M_2 : S_2$  — aus denen sich der Übergang zum Verhältnis des mittleren Nipp- zum Springtidenhub durch  $(M_2/S_2 - 1) : (M_2/S_2 + 1)$  vollziehen läßt — sowie Linien gleicher Phasendifferenz zwischen der  $S_2$ - und  $M_2$ -Tide verzeichnet. Er stellte ferner heraus, daß Tiden mit wenig unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit wegen der gleichen Randbedingungen in einem Meer mit nicht zu breiter Verbindung zum Ozean insbesondere an den Küsten ein recht ähnliches Verhalten zeigen. Zu diesem Zweck unternahm er Vergleiche zwischen den Tiden  $M_2$ ,  $S_2$  und  $K_1$ ,  $O_1$  sowie  $M_4$ ,  $MS_4$  und konnte nachweisen, daß in erster Näherung einfache Beziehungen zwischen den Amplituden und Phasen bestehen.

Aus systematischen Analysen war das Marineobservatorium Wilhelmshaven bereits ein Jahr später in der Lage, Karten mit Linien der harmonischen Konstanten — Amplituden und Phasen — der 10 Haupttiden für die Deutsche Bucht und die Nordsee herauszugeben, die für die offene See als Unterlagen zu dem von RAUSCHELBACH vorgeschlagenen abgekürzten harmonischen Verfahren zur Berechnung der Gezeiten dienen sollten, das besonders bei Vermessungsarbeiten und Expeditionen von Bedeutung ist, um die Feinlotungen auf das sogenannte Seekartennull zu beschicken, über dessen Definition bei HORN (1944) und SAGER (1960) Einzelheiten ausgeführt sind.

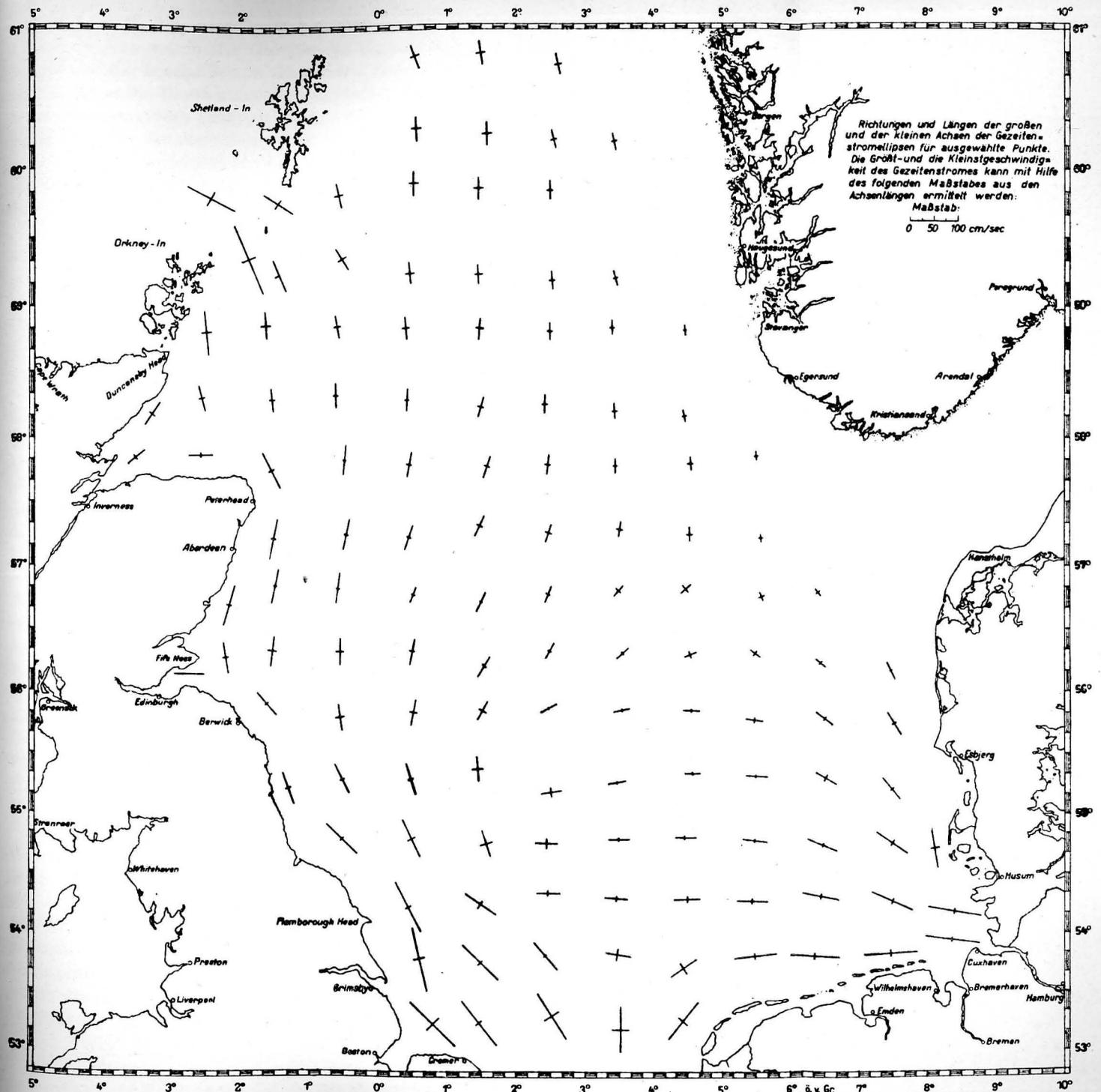


Abb. 20. Achsenverhältnisse der Gezeitenstromellipsen in der Nordsee nach HANSEN 1952

Eine neue Epoche setzte im Jahre 1950 ein, als DIETRICH eine Karte mit den Linien gleicher maximaler Gezeitenstromgeschwindigkeit für die Nordsee, den Kanal und die Irische See in Abständen von 20 cm/sec gab, um daraus Rückschlüsse über die Einwirkung der Gezeitenstromturbulenz auf die Schichtung der Wassermassen (1950, 1952) zu ziehen, während HANSEN gleichzeitig Karten mit Elementen der Gezeitenstromellipse für das Gebiet des Ärmelkanals publizierte, was einen außerordentlichen Schritt vorwärts bedeutete, als es damit ermöglicht wurde, umfassende Vorstellungen vom Ablauf des Gezeitenstroms zu bekommen, die aus den Strompfeilen in den Atlanten nicht ohne weiteres zu erlangen sind.

HANSEN gab Linien gleicher Geschwindigkeit ( $\frac{1}{2}$ -kn-Stufen) und gleicher Eintrittszeit des größten Gezeitenstroms sowie gleichen Achsenverhältnisses und derselben Richtung der großen Achse der Gezeitenstromellipse. Dabei stellte sich heraus, daß die Gezeitenströme in weiten Teilen des Kanals quasialternierenden Charakter haben, nicht aber im Westeingang, wie das TAYLOR (1922) bei seiner Lösung für ein rechteckiges Becken — der Pas de Calais geschlossen gedacht — an dem mit dem offenen Meer in Verbindung stehenden Eingang gefunden hatte. Aus der Karte der Maximalgeschwindigkeit hat PRATJE (1950) enge Zusammenhänge zwischen der Sedimentation und den Gezeitenströmen erkannt, wobei die feineren Komponenten sich nur bei geringen Stromgeschwindigkeiten zu halten vermögen, die im Kanal lediglich in wenigen Buchten vorkommen, während die Gebiete mit Strommaxima deutlich von den gröberen Komponenten vom groben Sand über den Kies bis zum Fels eingenommen werden, was besonders augenfällig vor der Spitze der Halbinsel Cotentin und in der Dover-Enge in Erscheinung tritt.

1952 hat HANSEN eine sehr ausführliche Darstellung der Gezeiten und Gezeitenströme der halbtägigen Hauptmond tide  $M_2$  für die Nordsee gegeben. Im Rahmen seines Randwertverfahrens, das er für das Gebiet von etwa  $53^\circ\text{N}$  bis  $57^\circ\text{N}$  anwandte, hat er Linien gleichen Wasserstands zur Zeit des Meridiandurchgangs des Mondes in Greenwich ( $\zeta_1$ ) und eine Viertelperiode später ( $\zeta_2$ ) mit Abständen von 10 cm gegeben und aus den Zusammenhängen beider die Linien gleichen Tidenhubs und gleicher Eintrittszeit des Hochwassers abgeleitet. Als Elemente der Gezeitenstromellipse berechnete er aus den Funktionen  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $v_1$  und  $v_2$  die Größe der Achsen und deren Verhältnis und Richtung sowie die Eintrittszeit des Maximalstroms nach den im Abschnitt 12 entwickelten Formeln und gab für alle Elemente Karten mit der geographischen Verteilung.

Bei den Richtungen beschränkte er sich auf die Angabe der Lage der Achsen der Gezeitenstromellipse für durchschnittlich 2 Punkte je  $1^\circ$ -Feld. Diese Darstellung ist in Abbildung 20 wiedergegeben, weil sie interessant ist für einen Vergleich mit der Lösung von TAYLOR (vgl. Abb. 16b), wobei sich neben einer grundsätzlich ähnlichen Tendenz an den Rändern doch eine Reihe Abweichungen bezüglich der Orientierung der Stromellipsen sowie des Achsenverhältnisses und des Umlaufsinns ergeben. Wie am Westeingang des Kanals hat auch die nördliche Nordsee keine alternierenden Tidesströme, so daß die Brauchbarkeit rein theoretischer Ansätze für wirkliche Meeresbecken bisher recht begrenzt erscheint.

1962 hat GRIJALVA das Randwertverfahren für die  $M_2$ -Tide auf den Ärmelkanal angewandt und neben den Grundkarten auch solche mit den Linien gleicher Größtgeschwindigkeit und ihrer Richtung entworfen. Bedenkt man, daß HANSEN Springzeitwerte gewählt hat, so ist die Übereinstimmung beider Karten — die  $S_2$ -Tide ist durchschnittlich im Kanal halb so groß wie die  $M_2$ -Tide — nicht schlecht, dagegen zeigen die Linien gleicher Richtung der großen Achse reichlich große Unterschiede und bleiben für die Bucht von St. Malo praktisch ohne Aussagekraft, wobei von den dort auftretenden Schwierigkeiten schon im vorigen Abschnitt die Rede war.

Einen weiteren Schritt hat BONNEFILLE 1956 getan. Er entwickelte zunächst Karten mit den Linien gleicher Eintrittszeit des Maximalstroms zur mittleren Springzeit für den Kanal und die Irische See und übernahm für die Nordsee weitgehend die Karte von HANSEN (1952), die jedoch nur für die  $M_2$ -Tide ausgelegt ist und drei Punkte mit Kreisstrom aufweist. Im Kanal weicht die Karte von derjenigen von HANSEN (1950) ab, läßt den Linienverlauf in der inneren Bucht von St. Malo ebenfalls noch offen und zeigt den relativ klaren Verlauf im Zentrum des Kanals (Vgl. Karte 14 des Atlasteils) etwas verworren. In der Irischen See, wo sehr einheitliche Werte der Eintrittszeiten des größten Gezeitenstroms von 1 bis 2<sup>h</sup> nach dem Meridiandurchgang des Mondes in Greenwich herrschen, hat BONNEFILLE zwischen der Insel Man und der Irischen Küste einen Punkt mit Kreisstrom angenommen, in dem er — wie übrigens auch bei dem Zirkularstrompunkt unweit der Hoofden — zwei Isolinien mit derselben Bezifferung münden läßt, was nicht zugänglich ist. Durch diese irrtümliche Anordnung der Stundenlinien bleibt die Karte für die Irische See praktisch wertlos und führt bei der anschließend vollzogenen Differenzbildung zwischen den Eintrittszeiten des Maximalstroms und des Hochwassers zur mittleren Springzeit zu Fehlkonsequenzen, wie ein Vergleich mit der Karte 16 des Atlasteils zeigt. Für die Nordsee und einigermaßen auch den Kanal geben die Differenzkarten eine Vorstellung von dem Zeitunterschied der beiden Eintrittszeiten, der für die Beurteilung des Energietransports der Gezeitenwellen von Bedeutung ist, der bei Phasengleichheit — das heißt bei einer reinen fortschreitenden Welle — ein Maximum erreicht. Auch bei diesen Untersuchungen stand der Gedanke an eine Nutzung der Gezeitenenergie Pate.

Verschafft man sich einen Überblick der wesentlichen Schritte im Entwurf von Karten mit Elementen des Tidenhubs und des Gezeitenstroms bis etwa zum Jahre 1960, so ergibt sich das Bild der Tabelle 2. Aus der Aufstellung ist ersichtlich, daß die Nordsee am ausführlichsten behandelt worden ist, für den Kanal und vor allem die Irische See dagegen zum Teil noch Lücken bei der Eintrittszeit und Richtung des Maximalstroms, dem Verhältnis der Achsen der Gezeitenstromellipse, der Differenz der Eintrittszeiten von Maximalstrom und Hochwasser, den Werten der Springverspätung und des Verhältnisses von Nipp- zu Springtidenhub sowie den Linien gleichen Wasserstandes vorhanden sind.

Diese Tatsache hat den Verfasser seit 1958 bewogen, die noch fehlenden Karten nach Möglichkeit zu entwerfen, wobei der Einheitlichkeit halber die Nordsee, der Kanal und die Irische See unter gleichen Gesichtspunkten bearbeitet werden muß-

TABELLE 2. Entwicklung der Karten mit Elementen des Tidenhubs und der Gezeitenström in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See bis 1960

Kartentyp mit Isolinien für	Nordsee	Kanal	Irische See
Hochwassereintrittszeiten	YOUNG 1807 WHEWELL 1836 AIRY 1842 HARRIS 1904 TIZARD 1909 KRÜMMEL 1902/11 — v. STERNECK 1920 MERZ 1923 DEFANT 1923 PROUDMAN/DOODSON ( $M_2$ ) 1924 — HANSEN ( $M_2$ ) 1952	YOUNG 1807 WHEWELL 1836 AIRY 1842 — TIZARD 1909 KRÜMMEL 1902/11 DEFANT 1919 v. STERNECK 1920 MERZ 1923 — — DOODSON/CORKAN ( $M_2$ ) 1932 —	YOUNG 1807 WHEWELL 1836 AIRY 1842 — TIZARD 1909 KRÜMMEL 1902/11 DEFANT 1920 v. STERNECK 1920 MERZ 1923 — — DOODSON/CORKAN ( $M_2$ ) 1932 —
Tidenhub	— MERZ 1923 DEFANT 1923 PROUDMAN/DOODSON ( $M_2$ ) 1924 — HANSEN ( $M_2$ ) 1952	— MERZ 1923 — — DOODSON/CORKAN ( $M_2$ ) 1932 —	BEECHEY 1848 MERZ 1923 — — DOODSON/CORKAN ( $M_2$ ) 1932 —
Springverspätung	MERZ 1923 HANSEN 1938	— —	— —
Nipp/Springtidenhub	MERZ 1923 HANSEN 1938	— —	— —
gleicher Wasserstand	SCHUMACHER 1924 HANSEN ( $M_2$ ) 1952	— —	— —
Maximaler Gezeitenstrom	— DIETRICH 1950 HANSEN ( $M_2$ ) 1952	— DIETRICH 1950 HANSEN 1950	(BEECHEY 1848) DIETRICH 1950 —
Eintrittszeit des Maximalstroms	HANSEN ( $M_2$ ) 1952 —	HANSEN 1950 BONNEFILLE 1956	— (BONNEFILLE 1956)
Minimal/Maximalstromstärke	HANSEN ( $M_2$ ) 1952	HANSEN 1950	—
Richtung des Maximalstroms	— (HANSEN 1952)	(BEECHEY 1851) HANSEN 1950	(BEECHEY 1848) —
Differenz der Eintrittszeiten von Maximalstrom und Hochwasser	BONNEFILLE 1956	BONNEFILLE 1956	(BONNEFILLE 1956)

Bemerkung: Eingeklammerte Namen deuten auf unvollständige Angaben hin.

ten. Dabei wurde von dem Entwurf der Linien gleichen Wasserstands abgesehen, da diese den Atlasteil zu umfangreich gestaltet hätten und als ein eigener Komplex gesondert behandelt werden sollen. Die Übersicht enthält bis 1960 keine Karten über den Wechsel des Tidenhubs und die Abweichungen der Hochwasser-eintrittszeiten vom Mittelwert sowie des Verhältnisses zwischen Nipp- und Spring-tidestrom und der Abweichung der Eintrittszeiten des Maximalstroms von den mittleren Werten im Ablauf einer Tideperiode, die als Ergänzung zu den vorhandenen Karten sehr erwünscht sind.

Inzwischen konnten folgende Entwürfe des Verfassers für die genannten Seegebiete vorgelegt werden:

Eine als nautische Warnkarte interpretierte Karte mit Linien gleicher Größtgeschwindigkeit des Gezeitenstroms zur mittleren Springzeit (1960, 1961), aus der in zwei zur Zeit in Druck befindlichen Arbeiten Rückschlüsse auf den Einfluß der Gezeitenströme auf die Sedimentation und die Schichtung der Wassermassen gezogen werden können;

eine Karte der Eintrittszeiten des maximalen Gezeitenstroms zur mittleren Springzeit sowie deren extremen Abweichungen vom Mittelwert (1961), durch die eine wesentliche Vereinfachung der Bestimmung des jeweiligen Eintritts des stärksten Tidestroms zu einem beliebigen Zeitpunkt erreicht werden konnte, die in der Nautik eine Rolle spielt (1962);

eine Karte mit Mittelwerten der Springverspätung für geographische 1°-Felder in Zehnteltagen (1961);

eine Karte mit Abweichungen der Hochwassereintrittszeiten vom Mittelwert für geographische 1°-Felder als Ergänzung zu der Grundkarte mit den Flutstundenlinien (1962);

eine Karte mit Linien gleichen Verhältnisses des maximalen Nipp- zum Springtidestrom (1962) und Folgerungen über die Abweichung von den Tidenhubquotienten;

Karten mit Linien bzw. Sektoren gleicher Richtung des maximalen Gezeitenstroms als Seitenstück zu den Karten gleicher Stärke und Eintrittszeit des Maximalstroms (1962) sowie

eine Karte mit Linien gleichen Verhältnisses des kleinsten zum größten mittleren Springtidenhub (1963).

Da diese Karten an verschiedenen Stellen und in unterschiedlichen Maßstäben zur Veröffentlichung gelangt sind und inzwischen die noch fehlenden Entwürfe abgeschlossen werden konnten, sind sie in ihrer Gesamtheit als „Atlas der Elemente des Tidenhubs und der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal und die Irische See“ zusammengefaßt worden und bilden den Teil II dieser Thematik. Da dieser Teil aus Gründen des großen Formats gesondert zum Druck gelangt ist, wurde die Beschreibung aller Karten dort so gehalten, daß sie über Entstehungsgeschichte und Anwendungsbereich so weit Auskunft gibt, daß eine verständnisvolle Handhabung gewährleistet ist, wobei allerdings einige Wiederholungen gegenüber dem Teil I unvermeidbar geworden sind, die jedoch methodisch keinen Nachteil bedeuten.

## Literaturverzeichnis

- AIRY, G. B., On the laws of the rise and fall of the tide in the river Thames. *Philosoph. Transact. Royal Society*. London 1842.
- AIRY, G. B., Tides and Waves. In: *Encyclopaedia Metropolitana*. London 1842 (als Einzelwerk Glasgow 1849).
- AIRY, G. B., On the laws of individual tides at Southampton and at Ipswich. *Philosoph. Transact. Royal Society*. London 1843.
- AIRY, G. B., On the laws of the tides on the coast of Ireland, as inferred from an extensive series of observations made in connection with the Ordnance Survey of Ireland. *Philosoph. Transact. Royal Society*. London 1844.
- AIRY, G. B., Sur une anomalie extraordinaire dans les marées d'un point de la côte orientale d'Irlande. *Comptes Rendus*, Vol. XIX. Paris 1844.
- AIRY, G. B., Un théorème sur les marées. *Les deux mondes*, Vol. XII. Paris 1866.
- AIRY, G. B., On a controverted point in Laplace's theory of the tides. *Philosoph. Magazine*. London 1875.
- AIRY, G. B., On the tides of Malta. *Philosoph. Transact. Royal Society*. London 1877.
- AIRY, G. B., On the harmonic analyser and the tidal predictor. *Min. Proceed. Institute Civil Engineers*. London 1881.
- ALDRICH, P., Notes on the tidal streams at the entrance to the English Channel. *Hydrograph. Office Admiralty*. London 1890 und *Annales Hydrographiques*, Paris 1892.
- BACHE, A. D., Preliminary determination of the co-tidal lines of the Atlantic and Pacific coasts of the United States. *Proceed. American Assoc. for the Advancement of Sciences*, 8th Meeting. Cambridge (Mass.) 1854.
- BACHE, A. D., Approximate co-tidal lines of the Pacific coast of the United States. *Proceed. American Assoc. for the Advancement of Sciences*, 9th Meeting. Cambridge (Mass.) 1855.
- BACHE, A. D., Preliminary determination of the co-tidal lines on the Atlantic coast of the United States. *American Journal of Science and Arts*. New Haven 1856.
- BACHE, A. D., Approximate co-tidal lines of the diurnal and semi-diurnal tides of the coast of the United States on the Gulf of Mexico. *Proceed. American Assoc. for the Advancement of Sciences*, 10th Meeting. Cambridge (Mass.) 1856.
- BACHE, A. D., On the tidal currents of New York Bay, near Sandy Hook. *United States Coast Survey Report*. Washington 1858.
- BARTELS, J., Gezeitenkräfte. In: *Handbuch der Physik*. Bd. XLVIII. Berlin/Heidelberg/Göttingen 1957.
- BEDA, The complete works of Venerable Bede in the original latin (herausgegeben von J. A. Giles) Vol. VI. London 1843.
- BEDA VENERABILIS, Opera omnia. Teil: De tempore ratione. Paris 1862.
- BEECHY, F. W., Report of observations made upon the tides of the Irish Sea, and upon the great similarity of tidal phenomena of the Irish and English Channels. *Philosoph. Transact. Royal Society*. London 1848.
- BEECHY, F. W., Report of further observations upon the tidal streams of the North Sea and English Channel, with remarks upon the laws by which those streams appear to be governed. *Philosoph. Transact. Royal Society*. London 1851.
- BEHRMANN, W., Über die niederdeutschen Seebücher des fünfzehnten und sechzehnten Jahrhunderts. *Mitteil. der Geograph. Gesellsch. in Hamburg*, Bd. XXI. Hamburg 1906.
- BELLEVILLIE, Monographie du régime hydraulique de la Seine Maritime. *Congrès International des Travaux Maritimes* (Beobachtungen 1883–85). Paris 1889.

- BERGHAUS, H., Physikalischer Handatlas. Erster Band. Gotha 1845.
- BERGHAUS, H., Physikalischer Atlas. 3. Ausgabe (Tidenströme), No. 20, 23. Gotha 1886 und 1892.
- BERNOULLI, D., Traité sur le flux et reflux de la mer. Recueil des pièces qui ont remporté le prix de l'Académie Royale des Sciences. Paris 1740.
- BLUM, M., Die Gezeiten der Jade. Veröff. des Instituts für Meereskunde, Neue Folge, Reihe A, Heft 22. Berlin 1931.
- BÖHNECKE, G., The principles of measuring currents. Assoc. d'Océanographie Physique. Bergen 1955.
- BÖRGEN, C., Über die Gezeitenströmungen in dem englischen Kanal und dem südwestlichen Teil der Nordsee. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1880.
- BÖRGEN, C., Die Gezeitenerscheinungen im Irischen Kanal. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1894.
- BÖRGEN, C., Über die Gezeitenerscheinungen in dem Englischen Kanal und dem südwestlichen Teile der Nordsee. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1898.
- BONNEFILLE, R., Étude de la marée en Manche. In: Les usines marémotrices françaises. Société Hydrotechnique de France. Grenoble 1956.
- BONNEFILLE, R., Les observations de marée effectuées par Électricité de France dans le Golf de Saint Malo. Proceed. of the Symposium on Mathematical-Hydrodynamical Methods of Physical Oceanography. Hamburg September 1961. Hamburg 1962.
- BOWDEN, K. F., Physical Oceanography of the Irish Sea., Fishery Investigations, Series 2, Vol. 18. London 1955.
- BROWN, T. and Son, Tidal Streams for the whole of the British coasts, Ireland and North Sea. Glasgow 1905.
- BRUNN, C. G., Flut- und Strombeobachtungen an der Westküste Schlesiens 1863. Zeitschr. f. Architektur u. Ingenieurwesen, Bd. 23. Hannover 1877.
- BUCHAN, A., Tidal currents of the North Sea. Proceed. Royal Society of Edinburgh, Vol 22. Edinburgh 1899.
- CÄSAR, G. J., De Bello Gallico (Buch IV, Kap. 28—31 u. Buch V, Kap. 10 u. 11). Deutsche Übersetzung von Stegemann. Leipzig 1939.
- CASSINI, J., Mehrere Abhandlungen über Ebbe und Flut, sämtlich in: Mémoires de l'Académie Royale des Sciences. Paris 1710—1720.
- CASTENS, G., Eigenartige Isolinien. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1925.
- CHILDREY, J., Animadversions on Dr. Wallis's Hypothesis about the Flux and Reflux of the Sea. Philosoph. Transact. Royal Society., Vol. V. London 1670.
- CHRYSAL, G., Some results in the mathematical theory of seiches. Proceed. Royal Society of Edinburgh. Edinburgh 1904.
- CHRYSAL, G., Some further results in the mathematical theory of seiches. Proceed. Royal Society of Edinburgh. Edinburgh 1905.
- CHRYSAL, G., On the hydrodynamical theory of seiches. Transact. Royal Society of Edinburgh. Edinburgh 1905.
- COLEPESSE, S., Tides observed at Plymouth. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. II. London 1668.
- COLLINS, H., 1. Twelve charts of the tidal streams on the West Coast of Scotland; 2. Twelve charts of the tidal streams of the North Sea and its coasts. London 1894.
- COURTIER, A., Marées. Service Hydrographique de la Marine. Paris 1938.
- DARWIN, G. H., Encyclopaedia Britannica. London 1880 u. 1902.
- DARWIN, G. H., On the dynamical theory of the tides of long period. Proceed. Royal Society. London 1886.
- DARWIN, G. H. und TURNER, H. H., On the correction of the equilibrium theory of tides for the continents. Proceed. Royal Society, Vol. 40. London 1886.
- DARWIN, G. H., Tides and kindred phenomena in the solar system. Boston (Mass.) und London 1898 und London 1911.

- DARWIN, G. H. und HOUGH, S. S., Bewegung der Hydrosphäre. Encyclopaedie der Mathemat. Wissensch. VI, 1, B. Leipzig 1908.
- DARWIN, G. H., Tide. Encyclopaedia Britannica. XXVI. Cambridge 1911.
- DAWSON, W. B., Method of observing currents. In: Survey of tides and currents in Canadian Waters. Report of Progress. Ottawa 1897.
- DEFANT, A., Untersuchungen über die Gezeitenerscheinungen in Mittel- und Randmeeren, in Buchten und Kanälen. IV. Teil: Der Einfluß der Reibung auf die Gezeiten der Randmeere. V. Teil: Die hydrodynamische Theorie der Gezeiten und Gezeitenströmungen im Englischen Kanal und in dem südwestlichen Teile der Nordsee. Denkschriften der Akademie der Wissensch. in Wien. Mathem.-Naturwissensch. Klasse, 96. Bd. Wien 1919.
- DEFANT, A., Die Gezeiten und Gezeitenströmungen im Irischen Kanal. Sitzungsberichte der Akademie der Wissensch. in Wien. Mathem.-Naturwissensch. Klasse, Abt. IIa. 129 Bd. Wien 1920.
- DEFANT, A., Die Gezeitenreibung in Nebenmeeren und Kanälen. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1922.
- DEFANT, A., Die Gezeiten der Nordsee, Beobachtung und Theorie. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1923.
- DEFANT, A., Grundlagen einer Theorie der Nordseegezeiten. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1923.
- DEFANT, A., Gezeitenprobleme des Meeres in Landnähe. In: Probleme der Kosmischen Physik. Hamburg 1925.
- DEFANT, A., Ebbe und Flut des Meeres, der Atmosphäre und der Erdkruste. Berlin/Heidelberg/Göttingen 1953.
- DEFANT, A., Flutwellen und Gezeiten des Wassers. In: Handbuch der Physik, Bd. XLVIII. Berlin/Heidelberg/Göttingen 1957.
- DEFANT, A., Physical Oceanography, Vol. 2. Oxford/London/New York/Paris 1961.
- DESCARTES, R., Principia philosophiae. Amsterdam 1644.
- Deutscher Planungsatlas. Band 3. Schleswig-Holstein, Karte 17. Hannover 1959.
- DIETRICH, G., Die natürlichen Regionen von Nord- und Ostsee auf hydrographischer Grundlage. Kieler Meeresforschungen, Bd. VII, H. 2. Kiel 1950.
- DIETRICH, G., Einfluß der Gezeitenstromturbulenz auf die hydrographische Schichtung der Nordsee. Archiv für Meteorol., Geophys. u. Bioklimatol. Serie A: Meteorol. u. Geophys. Bd. 7. Wien 1954.
- DIO CASSIUS, Römische Geschichte (Buch LIV, Kap. 32). Übersetzung von Tafel. Stuttgart 1837.
- DOODSON, A. T., Application of numerical methods of integration to tidal dynamics. Monthly Notes Royal Astronom. Society, Geophysic. Suppl. Vol I. London 1927.
- DOODSON, A. T. und CORKAN, R. H., The principal constituent of the Tides in the English and Irish Channels. Philosoph. Transact. Royal Society. Series A. London 1932.
- DOODSON, A. T., Tides in oceans bounded by meridians. Ocean bounded by complete meridian. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1935, 1937 u. 1938.
- DOODSON, A. T., und WARBURG, H. D., Admiralty Manual of Tides. Hydrographic Department Admiralty. London 1941.
- EKMAN, V. W., On a new current meter invented by Prof. F. Nansen. Nyt Mag. Naturvidensk. Christiania 1901.
- EKMAN, V. W., Kurze Beschreibung eines Propell-Strommessers. Conseil Internat. pour l'Exploration de la Mer. Kopenhagen 1905.
- EKMAN, V. W., Current-measurements by means of a buoy and releasing clockwork. Conseil Internat. pour l'Exploration de la Mer. Kopenhagen 1906.
- ENGELNBERG, E., Strombeobachtungen auf der Nord-Hinder-Bank. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1891.
- EULER, L., Inquisitio physica in causam fluxus et refluxus maris. Recueil des pièces qui ont remportés le prix de l'Académie des Sciences. Paris 1740.

- FAVÉ, L., Marégraphie plongeur. Recherches des Chronomètr. et Instruments Scientifiques. Paris 1887.
- FERREL, W., Tidal Researches. Unites States Coast and Geodetic Survey. Washington 1874.
- FERREL, W., On a controverted point in Laplace's theory of the tides. Philosoph. Magazine, Vol. V. London 1876.
- FERREL, W., Laplace's solution of the tidal equations. Astronom. Journal, Vol. IX u. X. Boston (Mass.) 1889 u. 1890.
- FIELD, A. M., Tidal Streams (British Isles), London 1906.
- FISCHER, TH., Sammlung mittelalterlicher Welt- und Seekarten. Venedig 1886.
- FLAMSTEED, J., A correct Tide Table, showing the true Times of the High-waters at London Bridge, to every Day in the Year 1683. Philosoph. Transact. Royal Society. Vol. XIII. London 1682—83 und Vol. XIV. London 1683—84.
- GIVRY, Le pilot français (Instructions nautiques des côtes septrionales de France). Paris 1842—1851.
- GOLDSBROUGH, G. R., The dynamical theory of the tides in a polar basin. Proceed. London Mathemat. Society, Vol. XIV. London 1913.
- GOLDSBROUGH, G. R., The dynamical theory of the tides in a zonal basin. Proceed. London Mathemat. Society, Vol. XIV. London 1914.
- GOLDSBROUGH, G. R., The tides in oceans on a rotating globe. Proceed. Royal Society, Series A. London 1927, 1928, 1929 u. 1933.
- GOLDSBROUGH, G. R., The tidal oscillations in an elliptic basin of variable depth. Proceed. Royal Society, Series A. London 1930 u. 1936.
- GOLDSBROUGH, G. R., The tidal oscillations in rectangular basins. Proceed. Royal Society, Series A. London 1931.
- GOLDSTEIN, S., The free oscillations of water in a canal of elliptic plan. Proceed. London Mathemat. Society. London 1927.
- GOLDSTEIN, S., A special case of tidal motion in elliptic basins. Monthly Notes Royal Astronom. Society, Geophysic. Suppl. Vol. 2. London 1928.
- GOLDSTEIN, S., Tidal motion in rotating elliptic basins of constant depth. Monthly Notes Royal Astronom. Society, Geophysic. Suppl., Vol. 2. London 1929.
- GRIJALVA, N., The  $M_2$ -tide in the English Channel. Proceed. of the Symposium on Mathematical-Hydrodynamical Methods of Physical Oceanography. Hamburg September 1961. Hamburg 1962.
- GÜNTHER, S., Die Wellenbewegung des Meeres: Ebbe und Fluth. In: Lehrbuch der Geophysik und Physikalischen Geographie, Bd. 2, Teil IV. Stuttgart 1885.
- Hakluyt's Collection of the Early Voyages, Travels, and Discoveries of the English Nation. London 1809—12.
- HALLEY, E., A Theory of the Tides at the Bar of Tonquin. Philosoph. Transact. Royal Society. Vol. XIV. London 1684.
- HALLEY, E., The true theory of tides, the extracted from Mr. Isaac Newton's treatise, entitled Philosophiae naturalis principia mathematica. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. XIX. London 1696.
- HANSEN, W., Amplitudenverhältnis und Phasenunterschied der harmonischen Konstanten in der Nordsee. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1938.
- HANSEN, W., Ermittlung der Gezeiten in beliebig geformten Meeresgebieten unter Benutzung der Randwerte. Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorol. Berlin 1943.
- HANSEN, W., Die halbtägigen Gezeiten im Nordatlantischen Ozean. Deutsche Hydrograph. Zeitschr. Hamburg 1949.
- HANSEN, W., Gezeitenströme im Englischen Kanal. Deutsche Hydrograph. Zeitschr. Hamburg 1950.
- HANSEN, W., Gezeiten und Gezeitenströme der halbtägigen Hauptmondtide  $M_2$  in der Nordsee. Deutsche Hydrograph. Zeitschr. Ergänzungsheft 1. Hamburg 1952.

- HANSEN, W., Dynamische Ozeanographie. In: Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen, Bd. 3. Berlin 1952.
- HANSEN, W., Tides. In: The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. Vol. 1: Physical Oceanography. New York/London 1962.
- HARLACHER, A. R., und OTT, A., Stromgeschwindigkeitsmesser mit elektrischer Übertragung. Zeitschr. f. Instrumentenkunde. Berlin 1883.
- HARRIS, R. A., Manual of Tides. Appendix No. 8 — Report for 1897. Washington 1898. Teil IV B, Appendix No. 5. Washington 1904.
- HAUGHTON, S., On the tides and tidal currents of the Irish Sea and English Channel. Journal Royal Dublin Society. Dublin 1857 u. 1858.
- HAUGHTON, S., Manual of tides and tidal currents. London 1862.
- HEDOUIN, M., Cartes des courants de la Manche et de l'entrée de la Mer du Nord. Service Hydrographique de la Marine. Paris 1891.
- HESSEN, K., Karten der Strömungen in der Nähe von Helgoland. Veröff. des Marine-Observatoriums in Wilhelmshaven 1929.
- HEWETT, W., Letter to Captain Beaufort. British Assoc. Report, Vol. 2. London 1841.
- HORN, W., Das Seekartennull. Mitteil des. Chefs des Hydrograph. Dienstes, Nr. 3. Berlin 1944.
- HOUGH, S. S., On the application of harmonic analysis to the dynamical theory of the tides. Philosoph. Transact. Royal Society, Series A. London 1897.
- ISITANI, D., Calculations of periods of seiches. Proceed. Physic. Mathemat. Society of Tokio. Tokio 1906.
- JACOBSEN, J. P., Der Libellenstrommesser. Conseil Internat. pour l'Exploration de la Mer. Kopenhagen 1909.
- KAEMMEL, O., Deutsche Geschichte, Bd. I. Leipzig 1911.
- KELLER, F. A. E., Routier compteur des courants de la Manche et de la Mer du Nord. Paris 1855.
- KELLER, F. A. E., Exposé du régime des courants dans la Manche et la Mer d'Allemagne. Paris 1861.
- KELVIN, Lord W., Report of „Committee for the purpose of promoting the extension, improvement and harmonic analysis of tidal observations“. British Assoc. Report for the year 1868. London 1868.
- KELVIN, Lord W., On an alleged error in Laplace's theory on the tides. Philosoph. Magazine. London 1875.
- KELVIN, Lord W., Note on the „oscillations of the first species“ in Laplace's theory of the tides. Philosoph. Magazine. London 1875.
- KELVIN, Lord W., General integration of Laplace's differential equations of the tides. Philosoph. Magazine. London 1875.
- KELVIN, Lord W., Influence of the Straits of Dover on the tides of the British Channel and the North Sea. British Assoc. Report und Nature. London 1878.
- KELVIN, Lord W., On gravitational oscillations of rotating water. Proceed. Royal Society of Edinburgh. Edinburgh 1879. Philosoph. Magazine. London 1879.
- KELVIN, Lord W., The Tide. Popular Lectures and addresses, Bd. III. London 1881.
- KELVIN, Lord W. und TAIT, P. G., Treatise on Natural Philosophy. I. 2d Edition. Cambridge 1883.
- KEPLER, J., Astronomia nova de motibus stellae Martis ex observationibus Tychoonis Brahe. Prag 1609.
- KEPLER, J., Harmonices mundi libri V. Linz 1619.
- KEPLER, J., Opera omnia (8 Bände, herausgegeben von Ch. Frisch). Frankfurt 1858—1871.
- KERTZ, W., Atmosphärische Gezeiten. In: Handbuch der Physik, Bd. XLVIII. Berlin/Heidelberg/Göttingen 1957.
- KOPPMANN, K., Das Seebuch (mit einer nautischen Einleitung von A. Breusing). Bremen 1876.

- KRETSCHMER, K., Die italienischen Portolane des Mittelalters. Ein Beitrag zur Geschichte der Kartographie und Nautik. Veröff. des Instituts für Meereskunde und des Geographischen Instituts, Heft 13. Berlin 1909.
- KRÜMMEL, O., Über Gezeitenwellen. Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol. Berlin 1897.
- KRÜMMEL, O., Der Ozean. Eine Einführung in die allgemeine Meereskunde. Wien/Leipzig/Prag 1902.
- KRÜMMEL, O., Die deutschen Meere im Rahmen der internationalen Meeresforschung. Veröff. d. Instituts f. Meereskunde, H. 6. Berlin 1904.
- KRÜMMEL, O., Handbuch der Ozeanographie, Bd. 2 (2. Aufl.). Stuttgart 1911.
- LALANDE, J. J., Traité du flux et du reflux de la mer. Astronomie, Bd. 4. Paris 1781.
- LANG, A. W., Ostfrieslands Küste in der Darstellung der älteren Segelhandbücher. Ostfreesland-Kalender. 36. Jahrg. Norden 1953.
- LAPLACE, P. S. DE, Recherches sur plusieurs points du système du monde. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences. Paris 1775 u. 1776.
- LAPLACE, P. S. DE, Mémoire sur le flux et reflux de la mer. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences. Paris 1790.
- LAPLACE, P. S. DE, Du flux et le reflux de la mer. Exposition du système du monde, Vol. I u. III. Paris 1796.
- LAPLACE, P. S. DE, Mécanique Céleste, Buch IV. Paris 1799.
- LAPLACE, P. S. DE, Mécanique Céleste. Buch IV u. XIII. Paris 1799 u. 1824.
- LAPLACE, P. S. DE, Sur les marées. Bulletin de la Société Philomatique de Paris. Paris 1803.
- LAPLACE, P. S. DE, Mémoire sur le flux et le reflux de la mer. Journal de Physique. Paris 1815.
- LEDEBUR, L. v., Dynastische Forschungen. Bructerer. Berlin 1853.
- LUBBOCK, Sir J. W., Account on the "Traité sur le flux et reflux de la mer" of D. Bernoulli, and a treatise on the attraction of ellipsoids. London 1830.
- LUBBOCK, Sir J. W., On the tides in the port of London. Philosoph. Magazine, Vol. II und Philosoph. Transact. Royal Society. London 1830 u. 1831.
- LUBBOCK, Sir J. W., On the Tides. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1831, 1833, 1834 u. 1837.
- LUBBOCK, Sir J. W., On the tides on the coast of Great Britain. Philosoph. Magazine, Vol. II. London 1831.
- LUBBOCK, Sir J. W., Report on the tides. British Assoc. Report. London 1832.
- LUBBOCK, Sir J. W., Note on the tides in the Port of London. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1832 u. 1836.
- LUBBOCK, Sir J. W., On Bernoulli's theory of the tides. Philosophical Magazine, Vol. III. London 1835.
- LUBBOCK, Sir J. W., Discussion of tide observations made at Liverpool. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1835 u. 1836.
- LUBBOCK, Sir J. W., Account of the recent discussion of observations on the tides. British Assoc. Report. London 1836 u. 1837.
- LUBBOCK, Sir J. W., An elementary treatise on the tides. London 1839.
- MAC LAURIN, C., De causa physica fluxus et refluxus maris. Recueil des pièces qui ont remporté le prix de l'Académie Royale des Sciences. Paris 1740.
- Marineobservatorium Wilhelmshaven. Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten 0-20 für das Gebiet der Deutschen Bucht. Ausgabe A. Berlin 1939.
- Marineobservatorium Wilhelmshaven. Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten für das Gebiet der Nordsee. Ausgabe B. Berlin 1939.
- MENSING, A., Pneumatischer Flutmesser. Deutsche Mechaniker-Zeitung. Berlin 1898.
- MERIAN, R., Über die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefäßen. Basel 1828.
- MERZ, A., Stark- und Schwachstrommesser. Veröff. des Inst. f. Meereskunde, Reihe A. Berlin 1921.
- MERZ, A., Gezeitenforschungen in der Nordsee. Annalen der Hydrograph. u. Maritim. Meteorol. Berlin 1921.

- MERZ, A., Forschungen über die Gezeiten der Nordsee. Zeitschr. d. Gesellsch. f. Erdkunde. Berlin 1923.
- MERZ, A., Die Gezeiten der Nordsee. In: Nordsee-Handbuch. Südlicher Teil. Berlin 1923.
- MITCHELL, H., Tides and tidal currents of New York Harbor and its dependencies, and at Sandy Hook. United States Coast Survey Report. Washington 1856.
- MITCHELL, H., Currents in the East River at Hell Gate and Throg's Neck, the sub-currents of New York Bay and Harbor. United States Coast Survey Report, Washington 1858.
- MITCHELL, H., Tides and currents of Hell Gate, New York. United States Coast Survey Report. Washington 1867.
- MOES, E. W., De Amsterdamsche Boekdrukkers en Uitgevers in de sestiende eeuw. Amsterdam 1900.
- MONNIER, P., Mémoire sur les courants de la Manche, de la Mer d'Allemagne et du canal St.-George. Imprimerie Royale. Paris 1835.
- MOORE, B. T., On a current-meter, a deep sea current indicator and an improved ship's log. Min. Proceed. of the Institute of Civil Engineers. London 1876.
- MOORE, W. U., Tidal currents and undercurrents in the Strait of Dover 1896. Hydrographic Department, Admiralty. London 1899.
- MORAY, R., Extraordinary tides in the West Isles of Scotland. Philosoph. Trans. Royal Society, Vol. I. London 1665.
- MORAY, R., Considerations and inquiries concerning tides. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. I. London 1666.
- MORAY, R., Patterns of the tables proposed to be made for observing tides. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. I. London 1666.
- MORAY, R., An account of the current of the tides about the Orcades. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. VIII. London 1673.
- MÖLLER, L., Das Tidegebiet der Deutschen Bucht (Die Vertikalkomponente der Gezeiten). Veröff. des Instituts für Meereskunde, Neue Folge, Reihe A, Heft 23. Berlin 1933.
- NANSEN, F., Methods for measuring direction and velocity of currents in the sea. Conseil International pour l'Exploration de la mer. Kopenhagen 1906.
- NEWTON, Sir I., Philosophiae naturalis principia mathematica. London 1687, 1713 u. Amsterdam 1723.
- NEWTON, Sir I., De mundi systemate liber. London 1731.
- NORDENSKIÖLD, A. E. v., Periplus, an essay on the early history of charts and sailing directions (Übersetzung aus dem schwedischen Original von F. A. Bather). Stockholm 1897.
- OTT, A., Hydrometrischer Universalflügel. Zeitschr. f. Instrumentenkunde. Berlin 1890.
- PALMER, H. R., Description of a graphical register of tides and waves. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1831.
- PAULY-WISSOWA, A. F., Real-Enzyklopaedie der Klassischen Altertumswissenschaften, Bd. 10. Stuttgart 1919.
- PERTHES, J., Justus Perthes' See-Atlas. Gotha 1925.
- PESCHEL, Geschichte der Erdkunde. München 1865.
- PETIT, P. R. V. L., Études sur les courants de la Mer du Nord. Annales des Travaux Publics. Brüssel 1892 u. 1894.
- PETTERSSON, O., Der Bifilar-Strommesser. Svenska Hydrogr. Biol. Komm. Skrifter. Göteborg 1904.
- PETTERSSON, O., Beschreibung des Bifilar-Strommessers. Conseil international pour l'exploration de la mer. Kopenhagen 1905.
- PETTERSSON, O., Photographisch registrierender Tiefenstrommesser für Dauerbeobachtungen. Svenska Hydrogr. Biol. Komm. Skrifter. Göteborg 1913.
- PILLSBURY, J. E., Report on deep-sea current work in the Gulf Stream. United States Coats and Geodetic Survey Report. Washington 1885.

- PILLSBURY, J. E., Report of Gulf Stream explorations. United States Coast and Geodetic Survey Reports. Washington 1886, 1887 u. 1889.
- PILLSBURY, J. E., The Gulf Stream. A description of the methods employed in the investigation and the results of the research. United States Coast and Geodetic Survey Report. Appendix No. 10. Washington 1890.
- PLINIUS DER ÄLTERE, Naturgeschichte (Übersetzt von J. D. Denso), I. Bd. Rostock u. Greifswald 1764.
- POINCARÉ, H., Théorie des Marées. In: *Leçons de Mécanique Céleste* III. Paris 1910.
- POINCARÉ, H., Anwendung der Theorie der Integralgleichungen auf die Flutbewegung des Meeres. Leipzig 1910.
- PRATJE, O., Die Bodenbedeckung des englischen Kanals und die maximalen Gezeitenstromgeschwindigkeiten. *Deutsche Hydrograph. Zeitschr.* Hamburg 1950.
- PROUDMAN, J., On some cases of tidal motion of rotating sheets of water. *Proceed. London Mathemat. Society*, Vol. 12. London 1913.
- PROUDMAN, J., On the dynamical equations of the tides. *Proceed. London Mathemat. Society*. London 1917 u. 1931.
- PROUDMAN, J. und DOODSON, A. T., The principal constituent of the tides of the North Sea. *Philosoph. Transact. Royal Society, Series A*. London 1924.
- PROUDMAN, J., Tides in a channel. *Philosoph. Magazine*. London 1925.
- PROUDMAN, J., I. Newton's work on the theory of tides. In: Isaac Newton, 1642—1727. A memorial volume issued by the Mathematical Association. London 1927.
- PROUDMAN, J., On the tides in a flat semicircular sea of uniform depth. *Monthly Notes Royal Astronom. Society; Geophysic. Suppl.* Vol. 2. London 1928.
- PROUDMAN, J., Note on the distribution of tides in a basin possessing a line of symmetry. *Monthly Notes Royal Astronom. Society, Geophysic. Suppl.* Vol. 2. London 1928.
- PROUDMAN, J., On a general expansion in the theory of tides. *Proceed. London Mathemat. Society*. London 1928.
- PROUDMAN, J., Tides in oceans bounded by meridians. Ocean bounded by complete meridian: General equations. *Philosoph. Transact. Royal Society, Series A*. London 1935.
- PROUDMAN, J., On Laplace's differential equations for the tides. *Proceed. London Mathematical Society, Series A*. London 1942.
- PROUDMAN, J., On the distribution of tides over a channel. *Proceed. London Mathemat. Society*. London 1946.
- QUINETTE DE ROCHEMONT, Régime des courants et des marées à l'embouchure de la Seine (Strommessungen 1869/70). Le Havre 1874.
- RAUSCHELBACH, H., Grundlagen für einen neuen Hochseepegel. *Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol.* Berlin 1932.
- RAYLEIGH, Lord, On the free vibrations of systems affected with small rotatory terms. *Philosoph. Magazine*. London 1903.
- RAYLEIGH, Lord, On the vibrations of a rectangular sheet of rotating liquid. *Philosoph. Magazine*. London 1903.
- RICCIOLI, G. B., *Almagestum Novum*. Bologna 1651.
- SAGER, G., Gezeitenvoraussagen und Gezeitenrechenmaschinen. Seehydrographischer Dienst der DDR. Warnemünde 1955.
- SAGER, G., Ebbe und Flut. VEB Hermann Haack. Gotha 1959.
- SAGER, G., Gezeiten und Schifffahrt. Fachbuchverlag. Leipzig 1959.
- SAGER, G., Die Entwicklung der Dockhäfen. *Geographische Berichte*. H. 16. Berlin 1960.
- SAGER, G., Das Seekartennull der europäischen Küsten. *Vermessungstechnik*. H. 7. Berlin 1960.
- SAGER, G., Die Größtgeschwindigkeiten der Gezeitenströme zur mittleren Springzeit in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Beiträge zur Meereskunde*, H. 1. Berlin 1960.
- SAGER, G., Die Methoden der Lotungsbeschickung und ihre Mängel. *Vermessungstechnik*. H. 1. Berlin 1961.

- SAGER, G., Eine Karte der maximalen Gezeitenströme für die Nordsee, den Englischen Kanal und die Irische See. *Bücherei der Funkortung*, Bd. 8, H. VIII „Navigation und Sicherheit der Schifffahrt“. Dortmund 1961.
- SAGER, G., Eine Karte der Linien gleicher Eintrittszeit des maximalen Gezeitenstroms für die Nordsee, den Englischen Kanal und die Irische See. *Bücherei der Funkortung*, Bd. 8, H. VIII „Navigation und Sicherheit der Schifffahrt“. Dortmund 1961.
- SAGER, G., Die Beiträge der Springverspätung in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Seeverkehr*, H. 11. Berlin 1961.
- SAGER, G., Die Hauptrichtungen der Gezeitenströme in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Seeverkehr*, H. 4. Berlin 1962.
- SAGER, G., Die Variation der Hochwassereintrittszeiten in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See im Ablauf einer Tideperiode. *Beiträge zur Meereskunde*, H. 5. Berlin 1962.
- SAGER, G., Die Richtung der maximalen Gezeitenströme in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Beiträge zur Meereskunde*, H. 6. Berlin 1962.
- SAGER, G., Das Verhältnis der maximalen Gezeitenströme bei mittlerer Nipp- und Springzeit in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See auf Grund englischer Gezeitenstrombeobachtungen. *Beiträge zur Meereskunde*, H. 6. Berlin 1962.
- SAGER, G., Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Eintrittszeit des stärksten Gezeitenstroms. *Seeverkehr*, H. 11. Berlin 1962.
- SAGER, G., Das Verhältnis des kleinsten zum größten Gezeitenstrom bei mittlerer Springzeit in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Beiträge zur Meereskunde*, H. 9. Berlin 1963.
- SAGER, G., Der Einfluß der Gezeitenstromturbulenz auf die thermische Schichtung der Wassermassen in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Beiträge zur Meereskunde* (in Druck).
- SAGER, G., Die Beziehungen zwischen den Gezeitenströmen und der Meeresbodenbedeckung in der Nordsee, dem Kanal und der Irischen See. *Petermanns Geograph. Mitteil.* 2. Gotha 1963.
- SCALIGER, J. C., *Exotericarum Exercitationem ad Cardanum*. Frankfurt 1592 (Erstausgabe 1557).
- SCHOTT, C. A., Result of an investigation of the tidal currents in Long Island Sound. *Proceed. American. Assoc. for the Advancement of Science*. 8th Meeting. Cambridge (Mass.) 1854.
- SCHUMACHER, A. und THORADE, H., Die Gezeiten der Sylter Gewässer nach den Beobachtungen im August 1921. *Aus d. Archiv d. Deutsch. Seewarte*, Bd. 41, No. 2. Hamburg 1923.
- SCHUMACHER, A., Darstellung des Gezeitenvorgangs in der Nordsee durch Isohypsenkarten der Meeresoberfläche. *Annalen des Hydrographie u. Maritim. Meteorol.* Berlin 1924.
- SEEMANN, C. H., 12 Stromkarten für jede Stunde der Tide bei Dover, umfassend das Gebiet der südlichen Nordsee, des Englischen Kanals, des Bristol-Kanals und des südlichen Teils vom Irischen Kanal. Hamburg 1893.
- SHAW, H., Strömungsmesser. *Dinglers Polytechn. Journal*. Berlin 1884.
- SMITH, A., On the tidal currents on the West Coast of Scotland. *Proceed. Royal Society*, Vol. 15. London 1866.
- STERNECK, R. v., Die Gezeiten der Ozeane. *Sitzungsberichte d. Akadem. der Wissensch. in Wien, Mathemat.-Naturwiss. Klasse, Abt. IIa*, 129. Bd. Wien 1920.
- STERNECK, R. v., Die Gezeiten im Atlantischen Ozean. *Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol.* Berlin 1920.
- STERNECK, R. v., Neue Weltkarten der Flutstundenlinien. *Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol.* Berlin 1922.
- STERNECK, R. v., Zu den halbtägigen Gezeiten der Nordsee. *Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol.* Berlin 1925.
- STESSELS, A., Des courants de marées sur le litoral de Belgique. *Annales des Travaux Publics*. Brüssel 1868.
- STESSELS, A., Des courants de marées dans l'Escaut. *Annales des Travaux Publics*. Brüssel 1868.
- 7 Meereskunde, H. 11

- STRABOS's Geographie (übersetzt von K. Kärcher). Stuttgart 1831.
- STURMY, S., Tides at Hong Road, four Miles from Bristol. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. II u. III. London 1668.
- TACTUS Annalen (Buch I, Kap. 70 u. Buch II, Kap. 5 bis 25). In: Werke (Deutsch von Roth). Stuttgart 1854.
- TAYLOR, G. I., Tidal friction in the Irish Sea. Philosoph. Transact. Royal Society, Series A. Vol. 220. London 1919.
- TAYLOR, G. I., Tidal oscillations in gulfs and rectangular basins. Proceed. London Mathemat. Society, Vol. 20. London 1922.
- TERADA, T., Notes on seiches; calculations of their periods and nodes. Proceed. Phys. Mathemat. Society Tokio. Tokio 1906.
- THOMSON, W., siehe KELVIN, Lord W.
- THORADE, H., Flutstundenlinien und Flutwelle. Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol. Berlin 1924.
- THORADE, H., Einige Bemerkungen über Amphidromien. Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol. Berlin 1924.
- THORADE, H., Bemerkungen zu A. Defants letzten Gezeitenarbeiten. Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol. Berlin 1924.
- THORADE, H., Die Gezeiten. In: Handbuch für Küstenvermessungen. Berlin 1927.
- THORADE, H., Newtons Anschauungen über Flut und Ebbe. Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol. Berlin 1928.
- THORADE, H., Ebbe und Flut in der Nordsee. Petermanns Geograph. Mitteil. Ergänzungsheft 209. Gotha 1930.
- THORADE, H., Methoden zum Studium der Meeresströmungen. In: Abderhaldens Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden, Bd. 2. Berlin u. Wien 1933.
- TIZARD, T. H., The tides and tidal streams of the British Islands, the North Sea and the North coast of France. Hydrograph. Office, Admiralty. London 1909.
- UNWIN, W. C., Current meters. Min. Proceed. Institute of Civil Engineers. London 1881.
- VEEN, J. VAN, Onderzoekningen in de Hoofden. s'-Gravenhage 1936.
- WAGNER, H., Leitfaden durch den Entwicklungsgang der Seekarten. 11. Deutsch. Geographentag. Bremen 1895.
- WALLIS, J., Hypothesis on the flux and reflux of the Sea. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. I. London 1666.
- WALLIS, J., De aestu maris, hypothesis nova, 1668. In: Mathematical Work of Wallis (herausgegeben von Scott 1938).
- WALLIS, J., On the variety of the annual tides in several places of England. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. II. London 1668.
- WALLIS, J., Answer to Childrey's animadversions. Philosoph. Transact. Royal Society, Vol. V. London 1670.
- WALTHER, F., Die Gezeiten- und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Bautechnik. Berlin 1934.
- WAWILOW, S. J., Isaac Newton (1945). Deutsche Ausgabe Berlin 1951.
- WHEWELL, W., Research on the Tides. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1833, 1834, 1835, 1836, 1837, 1838, 1839, 1840, 1847, 1850.
- WHEWELL, W., Essay towards a first approximation to a map of cotidal lines. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1833.
- WHEWELL, W., On the results of tide observations made in June 1834 at the Coast Guard Stations in Great Britain and Ireland. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1835.
- WHEWELL, W., Researches on the Tides. On the results of an extensive system of tide observations made on the coasts of Europe and America in June 1835. Philosoph. Transact. Royal Society. London 1836.
- WHEWELL, W., Tides. In: Herschel's Manual of scientific enquiry. London 1849.
- WHEWELL, W., On our ignorance of the tides. British Assoc. Report. London 1851.

- WITTING, R. J., Kurze Beschreibung eines elektrisch registrierenden Strommessers. Conseil International pour l'exploration de la mer. Kopenhagen 1905.
- WITTING, R. J., Etliches über Strommessung. Conseil International pour l'exploration de la mer. Kopenhagen 1905.
- WITTING, R. J., Strommessung. Finnländische Hydrographisch-Biologische Untersuchungen. Helsingfors 1908.
- WITTING, R. J., Neuer elektrisch registrierender Strommesser. Öfvers. Finska Vetensk. Soc. Förhandl. 52 A. Helsingfors 1910.
- WOLTMANN-HOLSBOER-RIBBERS, Apparat zur Bestimmung der Geschwindigkeit und Richtung des Stroms. Annalen der Hydrographie u. Maritim. Meteorol. Berlin 1884.
- YOUNG, TH., A course of lectures on natural and experimental philosophy. London 1802.
- YOUNG, TH., A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts, Bd. II. London 1807.
- YOUNG, TH., A theory of tides. Nicholson's Journal, Vol. 35. London 1813.
- YOUNG, TH., Tides. Encyclopaedia Britannica. 8th edition. London 1823.
- YOUNG, TH., The theory of tides. Brande's Quarterly Journal of Science, Vol. 17. London 1824.

Abgeschlossen im April 1963