Gegenläufige Restströmung an flachen Gezeitenmeerküsten

Von Harald Göhren

Inhalt

1.	Vorbemerkungen .																		6
2.	Einige Strombeobach	tung	gen	im i	äußer	en	Elbm	nünd	dung	sgeb	iet								6
3.	Entstehung gegenläufiger Restströmungen als Flachwassereffekt													drehender			Gezeiten-		
	ströme																		9
4.	Einfluß auf Sandbew	egui	ng u	nd	Mor	ohol	ogie												12
5.	Zusammenfassung																		15
6.	Schriftenverzeichnis																		15

1. Vorbemerkungen

Zur 12. Coastal Engineering Conference in Washington, 1970, wurde vom Verfasser ein Beitrag unter dem Titel "Deformation of rotational tidal currents in shallow coastal water" geliefert (10), der im wesentlichen mit der folgenden Abhandlung übereinstimmt. Diese wurde jedoch gegenüber dem Vortragspapier in einigen Punkten geändert und ergänzt, weil es angebracht erschien, für den Leserkreis der "Küste" die Ergebnisse mehr in ihrem Bezug zu unserem Küstenraum darzustellen. Das setzt einige Kenntnisse über die Dynamik und Morphologie dieser Region voraus, die bei den Teilnehmern der internationalen Fachtagung nicht erwartet werden konnten.

2. Einige Strombeobachtungen im äußeren Elbmündungsgebiet

In einem größeren Untersuchungsprogramm, das 1963 vom Strom- und Hafenbau Hamburg zur Vorbereitung von Hafenplanungen in der Elbemündung eingeleitet wurde (15), sind u. a. umfangreiche Strommessungen durchgeführt worden. In einem Teilgebiet des Untersuchungsraumes, dem westlich des Neuwerker Watts beginnenden Flachwassergebiet Scharhörnriff und Nordergründe, zeigten die ausgewerteten Meßergebnisse recht eigenartige Strömungsverhältnisse, die mit den bisherigen Vorstellungen über die Gezeitenbewegung dieser Region nur teilweise übereinstimmten.

Abbildung 1 zeigt einen topographischen Plan des Elbmündungsgebietes. Insgesamt wurden hier von der Forschungsgruppe Neuwerk in den Jahren 1964 bis 1970 über 300 Dauerstrommessungen durchgeführt (8). Durch Einsatz eines neuartigen Wattstrommessers¹), für den je nach Einsatzgebiet verschiedene Geräteträger entwickelt wurden (Abb. 2 bis 4), konnten Messungen auch in den bisher kaum erschlossenen Außenwatt- und Flachwasserzonen ausgeführt werden, für die es bis dahin keine geeigneten Dauerstrommeßgeräte gab.

¹) Das Gerät wurde im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms in Zusammenarbeit mit den Hydrowerkstätten in Kiel aus einem für die Meeresforschung gebauten Strommesser weiterentwickelt (5,7); es hat sich recht gut bewährt und wird in zunehmendem Umfang auch von anderen Untersuchungsstellen verwendet.









Abb. 3 Wattdauerstrommesser mit Trägergerüst für Flachwassergebiete und Priele. Meßhöhe über Grund 1,0 m

Der genannte Strömungseffekt zeigte sich besonders deutlich in dem in Abbildung 5 dargestellten Reststrombild, welches die aus den Daten errechneten Restströmungen²) bei mittleren Tideverhältnissen und ohne Windeinflüsse angibt. Man erkennt auf dem äußeren Scharhörnriff einen ausgeprägten, einheitlich nach Nordost gerichteten Reststrom, dessen Intensität von der seewärtigen Station zum Watt hin stetig abnimmt. Im wattnahen Bereich des Scharhörnriffs, auf den Sandbänken der Robbenplate und im flachen Außenwatt vor der Düneninsel Scharhörn ist der Reststrom ebenso ausgeprägt, wenn auch (bedingt durch die mehr gegliederte Sohlenstruktur) in den Richtungen und Geschwindigkeiten nicht so einheitlich, nach Südwesten gerichtet. Insgesamt ergibt sich also ein Bild, das man als "gegenläufiges Reststrom-

²) Der Reststrom wird hier definiert als die vektorielle Summe des Stromes in der Meßebene über eine Tide.

system" bezeichnen könnte und dessen dynamische Ursache nicht ohne weiteres zu erkennen ist. (Es gilt strenggenommen nur für die Meßebene³); es kann jedoch ohne Schwierigkeiten nachgewiesen werden [8], daß dieser Reststromverlauf qualitativ auch den volumenmäßig resultierenden Wassertransport darstellt.)

Nicht überraschend ist der nach Nordosten setzende Reststrom auf dem äußeren Riff, der sich als Teil des großräumigen Reststromsystems vor der deutschen Nordseeküste deuten läßt,



Abb. 4. Wattdauerstrommesser mit einspülbarem Tragpfahl für Flachwassergebiete, ausgelegt für stärkere Beanspruchung durch Brandung. Meßhöhe über Grund 1,0 m

welches wohl erstmals von WENDICKE (19) beobachtet und beschrieben wurde und später in zahlreichen Forschungsarbeiten bestätigt worden ist, insbesondere von KRÜGER (14), BÖHNECKE (1) und GOE-DECKE (6). Anzumerken ist aber, daß über die hydrodynamische Ursache des beherrschenden linksdrehenden Reststromwirbels in der südöstlichen Nordsee recht unterschiedliche Auffassungen bestehen.

Die südwestlich gerichtete Restströmung auf dem inneren Scharhörnriff, wie sie sich in Abbildung 5 darstellt, läßt sich jedoch nicht mehr in das großräumige Reststromsystem einordnen; sie ist andererseits durch so zahlreiche, räumlich und auch zeitlich auseinanderliegende Messungen nachgewiesen, daß an ihrer Existenz nicht gezweifelt werden kann und daß auch örtliche topographische Einflüsse als Ursache ausgeschlossen werden müssen.

In Abbildung 6 sind für einige der Meßpositionen Ausschnitte gezeichneter Geschwindigkeits- und Richtungsganglinien dargestellt, die einen Einblick in den Gezeitenstromablauf geben. Die Stationen sind in Abbildung 5 bezeichnet. Es erweist sich, daß die gesamte Region durch eine Drehstrombewegung⁴) geprägt ist. Charakteristisch dafür ist der Ganglinienverlauf in den äußeren Positionen 6.64 und

54.66, der rechtsdrehenden elliptischen Strom anzeigt. Bei den Stationen im flachen Wasser vor dem Watt (55 und 56.66) herrscht zur Niedrigwasserzeit alternierender Strom, während um Hochwasser Stromdrehung mit gleichem Drehsinn zu erkennen ist. Die Wattpositionen 8 und 11.65 zeigen schließlich an den Richtungsganglinien, daß hier in der Überflutungsphase immer

³) 3,5 m über der Sohle auf den äußeren Stationen, 1,0 m über Sohle in der wattnahen Flachwasserzone, 0,35 m über Sohle im Watt.

⁴) Drehströmungen entstehen in drehenden Gezeitenwellen (Amphiedromien), die sowohl in den Ozeanen als auch in vielen Nebenmeeren beobachtet werden und die durch Überlagerung von Längs- und Querschwingungen wie auch durch den Einfluß der Corioliskraft erzeugt werden (DIETRICH, Allgemeine Meereskunde, S. 325 ff). Die Gezeitenwellen der Nordsee werden besonders durch den Corioliseffekt zu Amphiedromien verformt (3).

noch eine in der Tendenz gleiche Richtungsänderung der Strömung besteht. Die Geschwindigkeitsganglinien dieser beiden Stationen entsprechen im übrigen kaum noch den gewohnten Vorstellungen von Gezeitenströmungen.

Abbildung 6 zeigt insgesamt, daß der Einfluß der Drehströmung in dem betrachteten Raum⁵) von vorherrschender Bedeutung und bis ins Randwatt hinein vorhanden ist. Noch deutlicher wird dies in Abbildung 7, in der die Meßergebnisse der gleichen Stationen in Form progressiver Vektordiagramme⁶) aufgetragen sind. Es ergeben sich charakteristische spiral- und girlandenförmige Figuren, die in ihrer harmonischen Form auf eine Gesetzmäßigkeit schließen lassen, welche kaum nur eine regionale Ursache und Bedeutung haben kann.



Abb. 5. Gegenläufige Restströmungen im Watt- und Flachwassergebiet westlich von Scharhörn

3. Entstehung gegenläufiger Restströmungen als Flachwassereffekt drehender Gezeitenströme

Die progressiven Vektordiagramme in Abbildung 7 zeigen, daß die spiralförmigen Bahnen der äußeren Stationen als symmetrische Ellipsenströmungen mit einer überlagerten stetigen Nordostströmung aufgefaßt werden können. In den wattnahen Positionen setzt sich offensichtlich nur zur Hochwasserzeit die Drehbewegung durch, während erster Flut- und letzter Ebbestrom als Gefälleströmung alternierenden Charakter haben. Dies führt zu einer plausiblen Erklärung des beobachteten Effektes gegenläufiger Restströmungen, der in Abbildung 8 in schematischer Form dargestellt ist. Ausgang sei eine symmetrische Drehströmung in tiefem

⁵) Es ist bemerkenswert, daß es sich hier um einen rechtsdrehenden Strom handelt, der sich südlich bis in die Wesermündung fortsetzt, im Gegensatz zu den linksdrehenden Strömungen des ost- und nordfriesischen Küstenraumes (13, 16, 17, 18, 19).

⁶) Geschwindigkeiten und Richtungen aller in konstanten Abständen durchgeführten Messungen sind als Vektoren aneinandergereiht (vgl. auch 13). Die Diagramme in Abb. 7 sind durch einen Zeichenautomaten aufgetragen. Durch das kleine Meßwertintervall von 5 Minuten werden glatte und stetige Kurven erhalten. Unter idealisierten Bedingungen – gleicher Strömungsverlauf in einer weiten Umgebung des Meßpunktes – stellt das progressive Vektordiagramm die Bahn eines Wasserteilchens in der Meßebene dar und kann daher auch als ideelle Strombahn bezeichnet werden.







12

ò

0 360°

180

0

ò

19.



ó





12 20. 8. 1966

Abb. 6. Strömungsverlauf an einigen Meßpositionen vor Scharhörn (Lage der Meßstellen s. Abb. 5)

Die Küste, 21 (1971), 6-16

Wasser vor einer flachen Küste. Symmetrisch soll heißen, daß sich das progressive Vektordiagramm nach einer vollen Tide schließt. Unter der Voraussetzung, daß sich die Drehschwingung bis in das bei Niedrigwasser trockenfallende Watt fortsetzt (was durch die oben behandelten Messungen bestätigt wird), ergibt sich hier zwangsläufig ein Reststrom etwa in der Richtung des Tidestromes, der zur Hochwasserzeit vorherrscht. In der Wattrandzone und im flachen Wasser vor dem Watt prägt sich die Drehschwingung ebenfalls nur um die Hochwasserzeit aus, bei geringen Wassertiefen, zur Zeit des Tnw, wird sie durch Reibungseinflüsse gestört und durch Gefälleströmungen überlagert. Die aus den polaren Diagrammen (Stromrosen) nach



Abb. 7. Ideelle Strombahnen nach Dauerstrommessungen im Scharhörner Außenwatt und auf dem Scharhörnriff (Lage der Stationen s. Abb. 5)

dieser Deutung abzuleitenden progressiven Vektordiagramme in Abbildung 8 zeigen genau die Girlandenform, wie sie sich aus den Messungen ergeben hat.

In der Zone zwischen dem Tiefwasserbereich (ungestörte Drehströmung) und dem Flachwassergebiet mit gestörter Drehströmung läßt sich nun ohne Schwierigkeiten eine entgegengesetzte Reststromtendenz herleiten. Zum einen – wenn man davon ausgeht, es seien hier die Geschwindigkeiten einer Meßebene dargestellt – muß sich der (küstenparallele) Strom um Niedrigwasser verstärken, weil viel geringere Wassertiefen vorhanden sind als zur Thw-Zeit, der Durchflußquerschnitt somit eingeschränkt ist. Hinzu kommt aber noch ein echter Transport in gleicher Richtung, denn aus Gründen der Kontinuität muß der resultierende Strom im Randwatt- und Flachwasserbereich durch einen entgegengesetzten Strom ausgeglichen werden, der sich auf diese Zwischenzone konzentrieren wird. Mit anderen Worten und angewandt auf das Gebiet vor Scharhörn: Das während jeder Hochwasserphase im Randwatt nach Südwesten transportierte Wasser muß irgendwo in entgegengesetzter Richtung wieder abgeführt werden, vermutlich im äußeren Riffgebiet.

Daraus folgt insgesamt, daß bei drehenden Gezeitenströmungen vor sehr flachen Küsten (denn nur dort kann sich dieser Effekt einstellen) in der Küstenzone gegenläufige Restströmungen zu erwarten sind, wenn die gegebene Deutung zutrifft. Sie müßten somit auch in anderen Bereichen unserer Nordseeküste vorhanden sein, wo die morphologischen und hydrodynamischen Bedingungen ähnlich sind. Leider gibt es keinerlei brauchbare Strombeobachtungen, um das nachzuweisen, weil die Außenwattgebiete und die vorliegenden Flachwasserzonen bisher mangels geeigneter Meßgeräte (s. o.) kaum untersucht sind⁷). Einige Einzelmessungen, die von der Forschungsgruppe Neuwerk im Jahre 1969 im Außenwatt vor Knechtsand und Trischen durchgeführt wurden, bestätigten aber bereits, daß auch hier ähnliche Strömungseffekte vorhanden sind. Abbildung 9 enthält Ausschnitte zweier Messungen, die den gleichen charakteristischen Richtungsverlauf aufweisen wie die Stationsmessungen 55 und 56.65 vor Scharhörn.

Abschließend sei noch bemerkt, daß die versuchte Deutung des in der Elbemündung beobachteten gegenläufigen Reststromsystems in dieser einfachen und mehr anschaulichen Form



Abb. 9. Strömungsverlauf in den Außenwattgebieten von Trischen (linke Darstellung) und Knechtsand (rechte Darstellung)

noch kaum Beweiskraft haben kann und sowohl von der theoretischen Seite als auch – wie oben bereits erwähnt – durch Beobachtungen weiterer Erhärtung bedarf. Das Phänomen als solches für das Untersuchungsgebiet ist aber unzweifelhaft, daß es auch an anderen Küstenabschnitten maßgebend sein kann, nach Auffassung des Verfassers sehr wahrscheinlich.

4. Einfluß auf Sandbewegung und Morphologie

Die oben dargestellten Untersuchungsergebnisse werfen die Frage auf, ob und mit welcher Tendenz Sandtransport und Küstenmorphologie durch solche gegenläufigen Restströmungen beeinflußt werden. Sie ist nicht ohne weiteres zu beantworten, denn man kann aus dem Vorhandensein einer Restströmung zunächst noch nicht auf eine gleichgerichtete Materialbewegung

⁷) Eine von H. ROHDE (2) bearbeitete Zusammenstellung aller Strommessungen der Nachkriegszeit an der deutschen Nordseeküste zeigt, daß sich die recht umfangreichen Stationsmessungen vor allem auf die Ästuarien und Wattrinnen sowie einige geschützte Wattzonen konzentrieren, während Außenwattgebiete, vorgelagerte Platen und Bänke sowie der gesamte Flachwasserbereich bis fast zur 10-m-Tiefenlinie noch kaum in dieser Richtung erforscht sind.



Verformungen der Gezeitenstromellipse im Flachwasserbereich

Abb. 8. Verformung drehender Gezeitenströmungen in flachen Küstengewässern (schematisch)

schließen. Daher kann diese Frage hier auch wieder nur beispielhaft für das Gebiet vor Scharhörn geklärt werden, für das weitere Beobachtungsergebnisse vorliegen.

In einem vom äußeren Scharhörnriff auf das Watt verlaufenden Profil wurden an 5 Stellen Messungen mit Luminophoren durchgeführt (9). Abbildung 10 zeigt die gefundenen Materialausbreitungen, wie sie sich aus den Konzentrationsverteilungen ergeben. Trotz der durch die Richtungsvariabilität der Strömungen (vgl. Abb. 6) bedingten weiten Streuung sind eindeutig die vorherrschenden oder resultierenden Transportrichtungen zu erkennen, die überraschend gut mit dem Reststrombild in Abbildung 5 übereinstimmen. Auf dem äußeren Scharnhörnriff wandert der Sand nordöstlich bis östlich, im Scharnhörner Außenwatt dagegen südlich. An der dazwischenliegenden Meßstelle (die etwa in der Grenzlinie des gegenläufigen Reststromsystems)



Abb. 10. Sandbewegung im Scharhörner Außenwatt und auf dem Scharhörnriff nach durchgeführten Leitstoffmessungen (Anm.: Konzentrationsverteilungen gegenüber Kartenmaßstab 2,5fach vergrößert)

liegt) ist die Bewegung etwas indifferent, die Resultierende beider Ausbreitungszungen weist jedoch nach Südwesten.

Die durchgeführten Leitstoffmessungen beweisen, daß in diesem Gebiet eine der gegenläufigen Restströmung etwa gleichgerichtete Materialbewegung stattfindet, wobei das Ergebnis zunächst auf die meteorologisch ungestörte Gezeitenbewegung eingeschränkt werden muß. Daß in einem so exponierten Küstenabschnitt unter Starkwindeinfluß durch Seegang, Brandung und Triffströmungen andere Materialbewegungen entstehen (7), liegt auf der Hand, ist im Rahmen dieses Beitrags jedoch nicht weiter zu behandeln.

Dafür soll noch auf einen interessanten Aspekt der morphologischen Küstengestaltung hingewiesen werden. Bereits in Abschnitt 3 wurde ausgeführt, daß auch vor Trischen und Knechtsand ähnliche gegenläufige Restströmungen zu vermuten sind. Betrachtet man die Topographie dieser drei Regionen (Abb. 11), so fallen gewisse Ähnlichkeiten auf. Wie bei Scharhörn liegen auch bei Trischen und Knechtsand vor dem Watt mehrere Sandbänke, die sich staffelförmig nach Südwesten vorbauen. Die südlich der drei Wattkomplexe liegenden großen Wattströme (Neufahrwasser bei der Marner Plate, Till südlich des Neuwerker Watts und Robinsbalje im Knechtsandgebiet), die innerhalb der Watten etwa nach Nordwesten verlaufen, schwenken im



Abb. 11. Morphologie der Küstengebiete um Trischen, Scharhörn und Knechtsand (nach Seekarten Nr. 2 und 138 von 1959). Die eingezeichneten Pfeile stellen das System gegenläufiger Restströmungen dar

Bereich der Sandbänke nach Südwesten, um weiter seewärts wieder die alte nordwestliche Richtung einzuschlagen. Man gewinnt unwillkürlich den Eindruck, als würden die Wattströme durch die Sandbänke nach Südwesten abgedrängt.

Die Ähnlichkeit der morphologischen Formen bei gleichartigen hydrodynamischen Vorgängen läßt darauf schließen, daß hier Zusammenhänge bestehen. Die vorgelagerten Sandbänke lassen sich als Akkumulationsgebiete im Schnittpunkt der von Westen kommenden Brandungskräfte, des südwestlich gerichteten wattnahen Reststromes und der Südost-Nordwest gerichteten Prielströmungen deuten. Dies stellt jedoch nicht mehr als eine Hypothese dar und bedürfte weiterer Beweise, die bei dem komplexen Wechselspiel zwischen hydrodynamischen Kräften, Sandtransport und Sohlenformation nicht leicht zu gewinnen sind.

5. Zusammenfassung

Strombeobachtungen im Gebiet der Elbemündung ergaben, daß im Watt- und Flachwassergebiet westlich von Scharhörn ein bemerkenswertes System gegenläufiger Restströmungen vorhanden ist. Der Reststrom setzt im äußeren Abschnitt dieser Flachwasserregion nach Nordosten – in Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen – weiter küstenwärts, auf den vorgelagerten Sandbänken und im Randwatt in entgegengesetzter Richtung, nach Südwesten.

Die Gezeitenbewegung ist durch Drehströmungen gekennzeichnet, die bis ins Randwatt hinein wirksam sind. Aus der zunehmenden Störung der Drehschwingung mit abnehmender Wassertiefe ergibt sich eine plausible Erklärung für die Ursache der beobachteten gegenläufigen Restströmung.

Es ist zu vermuten und kann bereits durch Messungen aus den Wattgebieten vor Trischen und Knechtsand erhärtet werden, daß dieser Effekt auch in anderen Küstengebieten mit ähnlichen hydrodynamischen und morphologischen Verhältnissen auftritt.

Leitstoffmessungen im Gebiet des Scharhörnriffs ergaben, daß hier eine dem gegenläufigen Reststrom etwa gleichgerichtete Sandbewegung vorhanden ist. Die besondere morphologische Prägung der Flachwasserregion südwestlich von Scharhörn, die in sehr ähnlicher Form auch vor dem Knechtsand und vor Trischen zu finden ist, läßt darauf schließen, daß das gegenläufige Reststromsystem auch küstenmorphologisch von Bedeutung ist.

6. Schriftenverzeichnis

- BÖHNECKE, G.: Salzgehalt und Strömungen der Nordsee. Veröff. Inst. Meereskunde. N. F. A. 10, Berlin (1922).
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU AUSSENSTELLE KÜSTE: Strömungsmessungen im Bereich der deutschen Nordseeküste 1948–1968. Unveröff. Bericht, Hamburg (1969).
- 3. DEFANT, A.: Grundlagen einer Theorie der Nordseegezeiten. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteorol. 51 (1923).
- 4. DIETRICH, G., KALLE, H.: Allgemeine Meereskunde. Berlin, Gebrüder Bornträger (1957).
- 5. DIETRICH, G., SIEDLER, G.: Ein neuer Dauerstrommesser. Kieler Meeresforschung 1 (1963).
- 6. GOEDECKE, E.: Beiträge zur Hydrographie der Konvergenz der Deutschen Bucht. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteorol. 69 (1941).
- 7. GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. Franzius-Inst. 30 (1968).
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamburger Küstenforsch. 6 (1969).
- 9. Göhren, H.: Untersuchungen mit fluoreszierenden Leitstoffen im südlichen Außenelbegebiet. Hamburger Küstenforsch. 10 (1969).
- GÖHREN, H.: Deformation of rotational tidal currents in shallow coastal water. Proc. CEC Washington (1970).

16

- 11. HANSEN, W.: Gezeiten und Gezeitenströme der halbtägigen Hauptmondtide M2 in der Nordsee. DHZ 1 (1952).
- 12. HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe. Jb. Hafenbautechn. Ges. 18 (1939/40).
- 13. KNOP, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitt. Leichtweiß-Inst. Braunschweig 1 (1961).
- 14. KRÜGER, W.: Meer und Küste bei Wangeroog und die Kräfte, die auf ihre Gestaltung einwirken. Bauwesen (1911).
- 15. LAUCHT, H.: Ursachen und Ziele der Hamburger Küstenforschung. Hamb. Küstenforsch. 1 (1968).
- 16. NEUMANN, H., MEIER, C.: Die Oberflächenströme in der Deutschen Bucht. DHZ 17 (1964).
- 17. SCHUMACHER, A., THORADE, H.: Die Gezeiten der Sylter Gewässer nach den Beobachtungen im August 1921. Arch. Deutsche Seewarte 41 (1923) 2. I. Die Gezeitenströmungen.
- 18. THORADE, H.: Gezeitenuntersuchungen in der Deutschen Bucht der Nordsee. Arch. Deutsche Seewarte 46 (1928) 3.
- 19. WENDICKE, F.: Hydrographisch-biologische Untersuchungen auf den Feuerschiffen der Nordsee. Die hydrographischen Ergebnisse. Veröff. Inst. Meereskde. Berlin N.F. 3 (1913).