

Hydrographische Untersuchungen in der Lübecker Bucht*)

Von Walter Hansen

In der Lübecker Bucht findet am Brodtener Ufer Abbruch statt. Auf Veranlassung der Wasserbaubehörden wurden umfangreiche Untersuchungen in diesem Seegebiet durchgeführt, deren Ergebnisse dem Wasserbau als Hilfsmittel und Unterlagen bei der Erörterung der praktisch zu treffenden baulichen Maßnahmen dienen. Für die Ozeanographie ergab sich in diesem Rahmen folgende Fragestellung: Welche ozeanographischen Faktoren sind für die Küstengestaltung in der Lübecker Bucht, vornehmlich am Brodtener Ufer, mittelbar oder unmittelbar von Bedeutung und welche Wirkung üben sie aus?

Da Wasserbewegung Voraussetzung für den Transport des den Meeresboden und den Strand aufbauenden Materials ist und es sehr schwierig ist, diesen Geschiebetransport zu messen, liegt es nahe, Beziehungen zwischen Wasser- und Bodenmaterialtransport heranzuziehen. Nun gehen aber die Meinungen über die Form dieser Beziehungen zur Zeit noch auseinander; sowohl die Form dieser Gleichungen als auch die in diesen auftretenden Beiwerte, Kennziffern usw., sind nicht hinreichend genau festgelegt, und eine quantitative Auswertung bereitet Schwierigkeiten. Wesentlich ist aber, daß der Transport erst bei Erreichen einer ganz bestimmten Mindestgeschwindigkeit einsetzt; die Geschwindigkeit, bei der das transportierte Material wieder zur Ablagerung kommt, liegt etwas niedriger als die vorgenannte Geschwindigkeit, oder anders ausgedrückt: Erosion erfolgt bei höherer Geschwindigkeit als Sedimentation (2). Diese Grenzgeschwindigkeit ist einigermaßen sicher bekannt in ihrer Abhängigkeit von der Korngröße. Auf Grund dieses Sachverhalts läßt sich für Gebiete, in denen die Stromgeschwindigkeit bekannt ist, angeben, ob überhaupt Bodenmaterial transportiert wird oder nicht.

Voraussetzung für derartige Untersuchungen ist, daß die Stromgeschwindigkeit bekannt ist. Da nur die während der Arbeiten in der Lübecker Bucht neben den Temperatur- und Salzgehaltsbeobachtungen gesammelten Strombeobachtungen allein einen Einblick in die Vorgänge bei speziellen Wetterlagen liefern, war von Anfang an vorgesehen, diese Beobachtungen durch allgemeine Untersuchungen der Wasserbewegung zu ergänzen. Außerdem sollte die Wasserstandsänderung in die Untersuchung einbezogen werden. Zwischen Wasserstand oder Gefälle einerseits und Stromgeschwindigkeit andererseits bestehen Beziehungen, die aus den hydrodynamischen Gleichungen abgeleitet werden und die es ermöglichen, aus dem Gefälle quantitative Angaben über die Stromgeschwindigkeit zu gewinnen. Neuere Ergebnisse der dynamischen Meereskunde gestatten es bei weitgehender Ausnutzung der in den hydrodynamischen Gleichungen gegebenen Zusammenhänge zwischen Strom und Wasserstand und deren Ableitungen, wenn die wirksamen Kräfte bekannt sind, mit einem Minimum an Beobachtungen die örtliche Verteilung der Bewegungsvorgänge zu ermitteln. Ist etwa die an der Oberfläche eines abgeschlossenen Meeresgebietes wirkende tangential Schubkraft des Windes bekannt, dann können der Triftstrom und der Windstau ermittelt werden.

Im einzelnen wirken folgende Kräfte und Einflüsse auf die Wassermassen der Lübecker Bucht: Der Wind erzeugt über die tangential Schubkraft auf die Meeresoberfläche Triftstrom und Windstau. Außerdem steht mit dem winderzeugten Seegang eine mit der Entfernung von der Oberfläche rasch abnehmende Horizontalbewegung in Zusammenhang. Weiterhin ist der Einfluß der Gezeiten- und der nicht sehr selten auftretenden Eigenschwingungen zu untersuchen. Endlich bedingt die Dichteschichtung eine Bewegung. Es kommt nun darauf an, festzustellen, welche Beträge die Stromgeschwindigkeit maximal annehmen kann und welche Wasserstandsänderungen in Verbindung damit auftreten können.

*) In einer ausführlicheren unveröffentlichten Untersuchung sind die Bewegungsvorgänge in der Lübecker Bucht behandelt worden, die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung derselben dar.

Die Ursachen der Bewegung in der Lübecker Bucht liegen nicht in allen Fällen dortselbst, sondern die Erscheinungen sind zum Teil bedingt durch eine Fernwirkung. Es wird zweckmäßig unterschieden zwischen den örtlich wirkenden Kräften und denjenigen, die sich mittelbar bemerkbar machen. Ganz allgemein kann gesagt werden, daß die Änderungen des Wasserstandes und der Stromgeschwindigkeit um so geringer sind, je kleiner die Fläche des abgeschlossenen Meeresgebietes ist. Steht das Meeresgebiet mit einem anderen ausgedehnteren in Verbindung, dann wird durch Ein- und Ausstrom über die Grenzlinie zwischen den beiden Meeresteilen der kleinere Teil in den Einflußbereich des größeren einbezogen. In der Lübecker Bucht ist als Abgrenzung gegen die Mecklenburger Bucht die Linie Groß Klützhöved—Dahmeshöved gewählt worden. Hydrodynamische Vorgänge in der Ostsee machen sich auf dieser Grenzlinie als Ein- und Ausstrom in die Lübecker Bucht bemerkbar.

Ebenso wie die Fläche als solche eine Rolle spielt, ist auch die Gestalt des Gebietes von Bedeutung. In einer offenen, wenig gegliederten Bucht, wie der Lübecker Bucht, die nahezu rechteckig ist, ist nicht zu erwarten, daß die Ein- und Ausstromgeschwindigkeiten dem Betrage nach gebietsmäßig sehr stark variieren. Lediglich das Gebiet der Travemündung macht eine Ausnahme insofern, als die seenartigen Erweiterungen der Trave oberhalb der Mündung relativ große Wassermassen aufzunehmen vermögen, die den schmalen Flußteil bei Travemünde, der wie eine Düse wirkt, mit beträchtlicher Geschwindigkeit durchströmen. Die vorstehenden Überlegungen zeigen, daß bereits aus der geographischen Lage und Gestalt des Meeresgebietes ein Überblick über die Bewegungsvorgänge erhalten werden kann.

Im folgenden werden die wirksamen Kräfte in ihrer Wirkung auf die Bewegung im einzelnen behandelt.

Die physikalischen Grundlagen für die quantitative Ermittlung der Wasserstände und der Strömungen aus dem Windfeld sind in einer früheren Arbeit behandelt worden (1). Die dort mitgeteilten Gleichungen liefern für verschiedene Windfelder die Gestalt der Meeresoberfläche und die Strömungen. Mit Hilfe der dort mitgeteilten Gleichungen ist zunächst festgestellt worden, daß die unmittelbar auf die Wassermassen der Lübecker Bucht wirkende Schubkraft des Windes nur geringe örtliche Gefälle und Stromgeschwindigkeiten hervorzubringen in der Lage ist. Als Anhaltspunkt sei eine aus Beobachtungen vom freien Meer abgeleitete Beziehung zwischen Wind W und Stromgeschwindigkeit v für mittlere Breiten mitgeteilt:

$$v = 0,0144 \cdot W,$$

mit deren Hilfe die folgenden Werte ermittelt sind:

Windgeschwindigkeit m/sec:	10	15	20	25	30
Stromgeschwindigkeit m/sec:	0,14	0,22	0,29	0,36	0,43

Selbst bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten von 30 m/sec ist die Oberflächenstromgeschwindigkeit noch kleiner als 0,5 m/sec. Hier interessiert in erster Linie die Geschwindigkeit in Bodennähe, diese ist aber nur ein Bruchteil des Oberflächenwertes; maximal kann mit dem dritten Teil gerechnet werden, auf jeden Fall ist dann die Geschwindigkeit so klein, daß keine Erosion am Boden stattfindet. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten wird erst recht kein Transport erfolgen. Der durch den örtlichen Wind in der Lübecker Bucht erzeugte Stau erreicht ebenfalls keine beträchtlichen Werte, wie folgende Zusammenstellung zeigt, die für eine Buchtlänge von 30 km und eine Tiefe von 20 m gilt:

Windgeschwindigkeit m/sec:	5	10	20	30
Stau cm:		2,4	9,5	21,6

Es ist sicher, daß die bei heftigen, orkanartigen Stürmen in der Lübecker Bucht auftretenden Erhöhungen, die mehr als 3 m erreichen können, nicht durch den örtlichen Wind in der Lübecker Bucht bedingt sein können. Während der Sturmflut von 1872 trat in der Ostsee ein Windstau von 3,5 m auf. In derartigen Fällen findet ein Einstrom über die Grenzlinie Dahmeshöved—Groß Klützhöved statt. Die während dieses Einstroms auftretenden Geschwindigkeiten können aus der Geschwindigkeit des Steigens des Wasserstandes ermittelt werden; es ist die Einstromgeschwindigkeit im Eingang zur Lübecker Bucht gleich dem durch den Querschnitt dividierten Produkt aus der Oberfläche und der Steiggeschwindigkeit. Diese erreichte bei der obengenannten Sturmflut von 1872 bei mehr als 30 m/sec Windgeschwindigkeit einen Betrag

von 0,21 m/Std. Im Winter und Frühjahr 1950, wo Stauhöhen von weniger als 1 m beobachtet wurden, war die maximale Steiggeschwindigkeit nur 0,06 m/Std.

Die folgende Tabelle gibt einen Einblick in den Zusammenhang zwischen Steig- und Einstromgeschwindigkeit.

Steiggeschwindigkeit:	0,05	0,10	0,15	0,20 m/Std.
Einstromgeschwindigkeit:	0,02	0,04	0,06	0,08 m/sec

Auch hieraus ist wiederum zu ersehen, daß bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten die Stromgeschwindigkeiten im Eingang zur Lübecker Bucht und in dieser nur Beträge annehmen, die nicht ausreichen, um einen Transport von Bodenmaterial in Gang zu bringen. Angemerkt sei, daß die in der Ostsee auftretenden Steiggeschwindigkeiten wesentlich kleiner sind als diejenigen, die im Zusammenhang mit den Gezeiten in der Deutschen Bucht beobachtet werden.

In der ausführlichen unveröffentlichten Darstellung ist für ausgewählte Windfelder und Ein- und Ausstromfälle die zugehörige Gestalt der Meeresoberfläche und die Stromgeschwindigkeit in der Lübecker Bucht ermittelt worden. In allen Fällen hat sich gezeigt, daß die örtlichen Unterschiede im Wasserstand und die Beträge der Stromgeschwindigkeit in der offenen Lübecker Bucht nur gering sind und daß diese Faktoren nicht die Ursache nennenswerten Bodenmaterialtransportes sein werden.

Außer dem winderzeugten Triftstrom und Windstau kann der Seegang eine Rolle spielen. Aber auch hier läßt sich abschätzen, daß die in der offenen Lübecker Bucht auf Tiefen von etwa 20 m auftretenden, durch den Seegang bedingten horizontalen Wasserbewegungen am Boden so weit abgeklungen sind, daß kein Materialtransport zu erwarten ist. Erst in den Flachwassergebieten, vor allem dort, wo Brandung auftritt, wird das Bodenmaterial aufgehoben und durch die in Verbindung mit den Wellen auftretenden Strömungen in Küstenrichtung transportiert. Diese Strömungen können Beträge bis zu 1 m/sec annehmen. Die Tiefe, in der der Seegang wirksam wird, hängt von den Dimensionen des Seegangs ab; in der Lübecker Bucht wird das größenordnungsmäßig der Küstenstreifen von 0 bis 10 m Tiefe sein.

Wenn auch die Gezeiten in der Ostsee im Vergleich zur Nordsee nicht so stark hervortreten, so sind doch die dadurch bedingten Wasserstandsschwankungen, insbesondere in der Lübecker Bucht, klar erkennbar, vornehmlich bei ruhigen Wetterlagen. Sowohl in Lübeck als auch in Travemünde überwiegen die Halbtagsgezeiten, die Hauptmond tide M_2 erreicht Amplituden von 4 bis 5 cm. Daß die Unterschiede im Wasserstand, bedingt durch die Gezeiten, nicht groß werden können, ergibt sich bereits aus dem vorstehend Gesagten.

Aus den Größenabmessungen für die Lübecker Bucht und dem dort auftretenden Tidenhub kann eine Abschätzung für die mittlere Gezeitenstromgeschwindigkeit gewonnen werden. Es ergibt sich ein Wert von weniger als 1 cm/sec, zu dem wiederum ein sehr geringes Spiegelgefälle von weniger als 10^{-7} und daraus für die Gesamtlänge der Lübecker Bucht von 30 km einen Niveauunterschied von noch nicht $\frac{1}{2}$ cm folgt. Danach sind in der offenen Bucht die Gezeiten praktisch ohne Bedeutung. In der Travemündung liegen die Verhältnisse allerdings anders. Der schmale Flußteil bei Travemünde verbindet die ausgedehnten seeartigen Erweiterungen der Trave mit der Bucht, und diese seeartigen Erweiterungen spielen die Rolle von Spülbecken, so daß die durch die Travemündung im Gezeitenrhythmus ein- und ausströmenden Wassermassen wie in einer Düse zusammengepreßt werden und die Geschwindigkeit Beträge von über 1 m/sec erreichen kann.

Neben den Gezeiten sind die in der Ostsee auftretenden Eigenschwingungen zu erwähnen, die auch in der Lübecker Bucht beobachtet werden. Die Perioden dieser Eigenschwingung hängen von der Gestalt und von der Tiefe des Meeresteiles ab, in dem sie auftreten. Da die Ostsee in ihrer Gesamtheit sehr reich gegliedert ist, geraten nicht nur die Wassermassen der Ostsee insgesamt in Schwingungen, sondern auch einzelne Teile dieses Meeres, vornehmlich mehr oder weniger abgeschlossene Buchten, können zu selbständigen Schwingungen angeregt werden, die in den anderen Teilen der Ostsee nicht bemerkbar sind. So kann z. B. in der Lübecker Bucht eine Eigenschwingung auftreten, die einen Knoten etwa auf der Linie Dahmeshöved—Groß Klützhöved besitzt. Die Periode dieser Schwingung beträgt rund 2 Stunden 20 Minuten. Eine solche Schwingung wurde am 2. 4. und 22. 4. 1950 beobachtet; an sich sind

diese Schwingungen recht häufig. Am ausgeprägtesten werden die durch diese Schwingungen bedingten Wasserstandsänderungen in der Neustädter Bucht festgestellt.

Neben diesen kurzfristigen Eigenschwingungen, die auf die Lübecker Bucht beschränkt sind, werden hier Schwingungen beobachtet, die Periodendauern bis zu 24 Stunden oder mehr besitzen. Diese sind als Schwingungen ausgedehnter Wassermassen zu verstehen, und zwar kommen hierfür Teile der Ostsee oder die gesamte Ostsee in Frage. Für den Teil der Ostsee vom Fehmarnbelt bis in den Bottnischen und Finnischen Meerbusen ergibt sich als längste Schwingungsdauer 39 Stunden.

Für die Ostsee ohne Bottnischen Meerbusen werden folgende Schwingungsdauern erhalten:

	einknotige	zweiknotige	dreiknotige Schwingung
Periodendauer in Stunden:	28	18	11

wobei nach den üblichen Verfahren für eindimensionale Kanäle gerechnet wurde (3). Ganz grob ergibt sich aus der Länge $l = 1500$ km und einer mittleren Tiefe von 50 m für die Ostsee eine Dauer der Grundschiwingung von 37 Stunden, die sich dem oben angegebenen Wert recht gut nähert. Dieses ist ein Beispiel dafür, daß selbst in der recht kompliziert gestalteten Ostsee die einfache Schwingungsformel für den rechteckigen Kanal eine durchaus brauchbare Näherung liefert.

Ganz allgemein gilt: Je ausgedehnter und je flacher die schwingende Wassermasse ist, desto länger wird die Dauer der einknotigen Schwingung. Die Amplituden dieser können insbesondere im Finnischen Meerbusen Werte bis zu einem Meter und mehr erreichen. Diese Eigenschwingungen können durch den Wind oder durch Luftdruckänderungen angefacht werden.

Da die Wassermassen in der Lübecker Bucht Salzgehaltsunterschiede aufweisen, kann der Einfluß des Windes an der Salzgehaltsverteilung festgestellt werden. In den großen Tiefen ist salzreiches Wasser, in den oberflächennahen Schichten salzarmes Wasser vorhanden. Bei Winden aus westlichen Richtungen, die die Oberflächenwassermassen aus der Bucht hinaustransportieren, steigt das salzreiche Bodenwasser vor der Küste auf und füllt hier auch die oberflächennahen Schichten aus. Bei Winden aus östlichen Richtungen wird das salzärmere Oberflächenwasser in die Bucht hineingetrieben und die salzreiche Bodenschicht nach See zu verlagert, so daß in den inneren Teilen der Lübecker Bucht nahezu homogener Salzgehalt von der Oberfläche bis zum Boden bei derartigen Wetterlagen beobachtet wird.

Insgesamt ergibt sich folgendes Bild der Bewegungsvorgänge in der Lübecker Bucht: In der freien Bucht sind die örtlichen Unterschiede des Wasserstandes und damit auch die Stromgeschwindigkeit, insbesondere in Bodennähe, nur gering; im allgemeinen wird kein Materialtransport stattfinden. In einem schmalen Küstenstreifen wird durch Seegang und vor allem durch die Brandung das Bodenmaterial in Bewegung gesetzt und durch die in diesem Bereich auftretende Küstenströmung küstenparallel oder auch durch den dem Triftstrom entgegengerichteten Bodenstrom seewärts transportiert. Wenn das Bodenmaterial seewärts verlagert wird, dann ist aber zu erwarten, daß sehr bald die Geschwindigkeit so weit absinkt, daß das mitgeschleppte Material wieder abgesetzt wird. Die insbesondere auch für den Wasserbau bedeutungsvollen ozeanographischen Vorgänge und morphologischen Veränderungen sind demnach auf einen relativ schmalen Küstenstreifen beschränkt, außerhalb desselben passiert praktisch nichts mehr; selbst wenn der Wasserstand in der Lübecker Bucht um Meter ansteigt, so ist die damit verbundene Einstromgeschwindigkeit sogar bei den heftigsten bisher beobachteten Sturmfluten so gering, daß nicht mit Materialtransport gerechnet werden darf.

Wesentlich anders liegen die Dinge in denjenigen Meeresgebieten, in denen die Gezeiten eine Rolle spielen; hier können auch auf tieferem Wasser Bewegungen in horizontaler und vertikaler Richtung auftreten, und selbst in Bodennähe sind noch Stromgeschwindigkeiten möglich, die einen Materialtransport bedingen. Während der Triftstrom eine rasche Abnahme von der Oberfläche bis zum Boden erfährt, besitzt der Gezeitenstrom eine nahezu konstante Geschwindigkeit von der Oberfläche bis in Bodennähe. Hinzu kommt noch, daß etwa die in der Deutschen Bucht auftretenden Gezeitenströme jedenfalls partiell wesentlich höhere Beträge der Geschwindigkeit erreichen, als selbst die bei hohen Windgeschwindigkeiten auftreten-

den Triftströme. Dementsprechend ist in Gezeitengebieten auch nicht die Zone morphologischer Veränderungen auf einen schmalen Küstenstreifen beschränkt, sondern erstreckt sich über das gesamte Meeresgebiet.

Daraus ergibt sich für meereskundliche Untersuchungen, die im Hinblick auf wasserbau-liche Maßnahmen im Küstenbereich angestellt werden, die Folgerung, daß in den Seegebieten, in denen die Gezeiten ohne Bedeutung sind, die Arbeiten auf einen relativ schmalen Küstenstreifen konzentriert werden können, in Gezeitengebieten dagegen sollten die Untersuchungen auf ein möglichst umfassendes Meeresgebiet ausgedehnt werden.

Zusammenfassend gilt folgendes: Wasserstandsänderungen der Lübecker Bucht über 0,5 m bis zu einigen Metern kommen nur dann vor, wenn entsprechende Wassermassen in die Bucht ein- oder aus der Bucht ausströmen. Die hierbei auftretenden Stromgeschwindigkeiten bleiben gering (maximal 20 cm/sec). Das zeigen sowohl die Beobachtungen als auch die dynamischen Untersuchungen. Diese Erscheinung, daß nämlich bei erheblichen Wasserstandsänderungen die Stromgeschwindigkeit von derselben Größenordnung ist wie die, die bei den Wasserstandsänderungen geringen Ausmaßes auftreten, mag zunächst befremden, wird aber sofort verständlich, wenn den obigen Überlegungen entsprechend beobachtet wird, daß für die Stromgeschwindigkeiten nicht die Wasserstände, sondern die Gefälle entscheidend sind. Beobachtung und Theorie haben gezeigt, daß dieses Gefälle bei Wasserstandsänderung von absolut geringem Ausmaß ebenso groß und größer werden kann, als das bei absolut großen Änderungen auftretende Gefälle.

Es erscheint dementsprechend grundsätzlich unzuweckmäßig, etwa einzelne Wasserstands- und Strombeobachtungen in Beziehung zur Wetterlage zu bringen und Zusammenhängen zwischen diesen Größen nachzuspüren. Aus diesem Grunde wurden in der vorliegenden Untersuchung die Beobachtungen nach hydrodynamischen Gesichtspunkten behandelt.

Schriftenverzeichnis

1. HANSEN, W.: Beobachtungen des Windstaus und Triftstroms im Modellkanal. Dtsch. Hydrogr. Z. Bd. 4, H. 3, S. 81—91, 1951.
2. SVERDRUP, JOHNSON, FLEMING: The Oceans. 3. Aufl., New York, 1949.
3. THORADE, H.: Probleme der Wasserwellen. Probleme der Kosmischen Physik. Bd. XIII u. XIV. Hamburg 1931.