

Verbesserung von Flußmündungen an Meeren ohne Tidenbewegung, unter besonderer Berücksichtigung der Ost- und Südküste der Ostsee.

Von Dr.-Ing. Egon Leppik, Reg.- u. Baurat i. R. in Hamburg.

I. Einleitung.

Bei der Behandlung der Frage ist von den natürlichen Verhältnissen in den Mündungsstrecken und an den anliegenden Küsten ausgegangen worden, wonach die durch Regelung der Mündungsstrecke, Anlagen an der Mündung und sonstige Maßnahmen erzielten Ergebnisse festgestellt wurden. Daran schließt sich eine Untersuchung der zur weiteren Verbesserung der Mündungsverhältnisse erforderlichen Maßnahmen.

Die bestehenden Anlagen stellen Modelle im natürlichen Maßstabe dar. Bei ähnlichen Verhältnissen, wie sie streckenweise an der Ost- und Südküste der Ostsee vorliegen, ist es möglich, Vergleiche von Anlagen und Maßnahmen verschiedener Art in ihrer Auswirkung auf die Mündungsverhältnisse durchzuführen. Daraus ergeben sich wertvolle Hinweise zur Verbesserung bestehender Anlagen.

Eine rechnerische Erfassung der Vorgänge kann erst dann zu brauchbaren Ergebnissen führen, wenn durch langjährige, eingehende Untersuchungen die Einwirkung der natürlichen Kräfte auf die Gestaltung der Mündungen genügend geklärt ist. Im einzelnen sind zu untersuchen einerseits die Wasser-, Eis- und Sinkstoffbewegung in der Mündungsstrecke, andererseits in Verbindung mit der Richtung und Stärke der Winde, die Wasserbewegung (Wellen, Brandung, Strömung) und Sandwanderung an der luv- und lee-seitigen Küste. Anhaltspunkte für eine solche Untersuchung ergeben sich aus der Berechnung des Wellenenergiefaktors nach Munch-Petersen (1) und der Zerlegung dieses Faktors in die entsprechenden Komponenten. Solche Berechnungen sind in diesem Bericht für einige Flußmündungen, über die genügend Angaben vorlagen, durchgeführt worden.

Bei der gruppenweisen Betrachtung ähnlicher Mündungsverhältnisse ergeben sich die Vorteile oder Nachteile der einzelnen Anlagen, was zur Klärung des Problems auf breiterer Grundlage dient.

In Ergänzung zu den Untersuchungen an Modellen im natürlichen Maßstab sind auch Modellversuche im kleineren Maßstab zu empfehlen. Aus letzteren erhält man nützliche Hinweise auf die Wasserbewegung in der Mündungsstrecke vor und nach der Einschaltung neuer oder ergänzender Anlagen, während die Sinkstoffbewegung mit Barrenbildung vor der Mündung sich im Modell nicht naturähnlich darstellen läßt. Auch ist die unter der Windwirkung entstehende Wasserbewegung an der Küste im Modell schwer darstellbar. Die Frage der Modellversuche ist noch zum Schluß dieses Be-

richtes im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Modellversuche im natürlichen Maßstabe berührt worden.

Bei der Wahl der Maßnahmen zur Verbesserung der Flußmündungen ist von der bisherigen Entwicklung der Mündungen unter der Auswirkung der maßgebenden Naturvorgänge auszugehen. Dazu gehören die Wasser- und Materialbewegung vom Strom aus und an der Küste.

Die Wasserbewegung in den Mündungsstrecken wird durch den Windstau von seiten der See gehemmt. Auch bei ruhender See besteht eine gewisse Hemmung beim Zusammenstoß der ausströmenden Wassermenge mit der ruhenden Wassermasse der See. Die Wirkung des Staus von seiten der See läßt sich mit der Wirkung eines beweglichen Wehres auf fester Unterlage vergleichen. Dem Anwachsen des Windstaus entspricht eine Hebung des Wehres, was zu einer weiteren Verzögerung und schließlich zu einem Stillstand der Strömung im Mündungsgebiet führt. Zu der mechanischen kommt noch eine physikalische Wirkung, welche durch die Verschiedenheit der Dichte des Fluß- und Meerwassers bedingt ist. Infolgedessen schiebt sich das Meerwasser unter das ausströmende Flußwasser, welches sich dann als Oberschicht noch weiter seewärts ausbreitet. Ganz besonders aber kann die Wasserbewegung vom Strom aus durch die Eisverhältnisse gehemmt werden, erstmalig durch Grund- und Schwebes Eis, was zu einer Verstopfung des Strombettes führen kann, und dann durch Eisversetzungen beim Eisgang.

In unmittelbarer Abhängigkeit von der Wasserbewegung steht die Sinkstoff- und Geschiebebewegung. Infolge der geringen Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Mündungsgebietes ist die Geschiebebewegung örtlich begrenzt, wogegen die Sinkstoffbewegung vom Strom aus bis in das Meer hinausreicht. Beim Windstau kommt es zwar zeitweilig zur Ablagerung von Sinkstoffen innerhalb der Mündungsstrecke, die aber bei nachlassendem Windstau von der Strömung wieder aufgenommen und zur Mündung weiter verfrachtet werden. Erst bei der Mischung von Fluß- und Meerwasser nimmt die Ablagerung von Sinkstoffen einen größeren Umfang an.

Zu der Wasser-, Sinkstoff- und Geschiebebewegung vom Strom aus tritt eine solche längs der Küste, welche zum Teil durch Temperaturunterschiede (Dichteströmung) oder durch Winde (Drift) hervorgerufen wird. Dazu kommt die Wellenbewegung mit Brandung.

Dadurch werden je nach dem Verlauf der Küstenlinie, der Höhenlage der Küste und den Tiefenverhältnissen der See die leichteren Bodenbestandteile in Bewegung gesetzt und verfrachtet. An den Mündungen wird die Wasser- und Materialbewegung längs der Küste durch das ausströmende Flußwasser abgelenkt. Somit hemmen sich beide Wasserbewegungen, von der Küste und vom Fluß aus, gegenseitig, was zur Verminderung der Transportfähigkeit, zu Ablagerungen und Barrenbildungen an den Mündungen führt. Einen gewissen Einfluß auf die Ausbildung der Mündungen übt auch die Corioliskraft (Einfluß der Erdumdrehung) aus, welche in den Breiten der Ostsee auf eine Verlagerung der Mündungen von West nach Ost hinwirkt.

Unter den beschriebenen Verhältnissen entwickeln sich die Fluß- und Strommündungen. Dieser Ausbildungsprozeß ist einerseits ein fortlaufender, wobei sich zeitweilig ein Gleichgewichtszustand ausbilden kann, andererseits sind aber von ausschlaggebender Bedeutung die außergewöhnlichen Naturereignisse: Hochwasser und Eisgang im Strom, Sturmflut von seiten der See. Letztere können die Lage- und Bodengestaltung der Fluß- und Strommündungen weitgehend ändern, wonach es wieder einer längeren Zeit bedarf, bis sich ein annähernder Gleichgewichtszustand einstellt. Von größerer Ein-

wirkung auf die Mündungsverhältnisse können auch künstliche Maßnahmen sein, durch welche meist eine Verbesserung der Tiefenverhältnisse angestrebt wird.

II. Die Strommündungen an der Ost- und Südküste der Ostsee.

Ausgehend von den unter I. dargelegten Richtlinien sind eine Reihe von Strommündungen an der Ost- und Südküste der Ostsee, welche mittleren Seeschiffen zugänglich sind, untersucht worden. Dazu gehören: Narowa (Finnischer Meerbusen), Pernau und Düna (Rigaer Meerbusen), Windau (Ostküste), Memeltief (Kurisches Haff und Memel), Pillautief (Frisches Haff und Pregel), Weichsel, Stolpe, Wipper, Persante, Swine (Stettiner Haff und Oder) und Trave.

Die genannten Mündungen lassen sich in folgende Gruppen zusammenfassen:

1. Mündungen aus Haffs und seeartigen Erweiterungen, die als Ausgleichbecken der in sie mündenden Wasserläufe dienen: Memeltief, Pillautief, Swine und Trave.
2. Einfache Mündungen (ohne Deltabildung):
 - a) Pernau (7162 km²) und Windau (11 500 km²)
 - b) Stolpe (1653 km²), Wipper (2173 km²) und Persante (3145 km²).
3. Mündungen mit Deltabildung: Narowa (56 000 km²), Düna (85 400 km²) und Weichsel (195 000 km²).

Alle angeführten Wasserläufe münden an sandiger Küste. Bei den Mündungen der ersten Gruppe üben in Anbetracht der großen Ausgleichbecken die Eigenschaften der in diese mündenden Wasserläufe keinen merklichen Einfluß auf die Mündungen der Tiefs. Hier sowie auch bei kleineren Niederschlagsgebieten (Gr. 2 b) überwiegt bei der Entwicklung der Mündungsverhältnisse der Einfluß der See. Die Gr. 3 steht unter der Wechselwirkung von Strom und Meer.

Da wegen Raum mangels eine Beschreibung der Verhältnisse an den genannten Strommündungen und der an ihnen bisher durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen nicht möglich ist, folgen über die einzelnen Mündungen außer den Schrifttumshinweisen nur einige ergänzende Angaben: a) über die Ergebnisse der Berechnung des Energiefaktors, b) über die zu empfehlenden weiteren Maßnahmen zur Verbesserung der Mündungsverhältnisse.

1. Die Mündung der Narowa (Narwa) (Abb. 1).

Die Beschreibung der Lage, der Gestaltung und des Bestandes der Mündungsstrecke und der anliegenden Küste, der meteorologischen Vorgänge, des Abflusses, der Wasserbewegung an der Küste (Wellen und Strömungen) sowie der Eisverhältnisse liegt vor in (3).

Nach der Munch-Petersenschen Formel (1) ($E = hs^2 \sqrt{f}$, wo h = Häufigkeit, s = Geschwindigkeit des Windes und f = Abstand vom gegenüberliegenden Meeresufer in der gegebenen Windrichtung) erhält man für diese Mündung nach Einschaltung eines Eisfaktors = 0,75 folgende Werte: E (Wellenenergiefaktor) = 8025, S (senkrechte Komponente = $E \cos \alpha$) = 7950, T (parallele Komponente = $E \sin \alpha$) = - 1000, T_1 (luvseitige) = + 1200, T_2 (leeseitige) = - 2200. Im Verhältnis zur aufwühlenden Energie (S) ist die transportierende (T) klein, wobei zwischen Luv- und Leeseite ein annäherndes Gleichgewicht herrscht.

Die jährlich zur Mündung gelangende Sinkstoffmenge läßt sich auf Grund einer Reihe von Einzelmessungen wie folgt schätzen:

Tafel 1.

Zeitdauer	Absetzbare Stoffe				
	auf 1 m ³ Wasser		bei einer mittleren Abflußmenge während 8 Mon. von 405 m ³ /sec. während 2 Mon. von 810 m ³ /sec.		
Monate	kg	m ³	m ³ /sec.	m ³ /24 Std.	gesamt m ³
8	0,03	0,00002	0,0081	700	168 000
2	0,12	0,00008	0,0648	5600	336 000
					504 000

Die bisher ausgeführten Verbesserungsmaßnahmen beschränken sich auf Uferbefestigungen und Einschränkung der Breite der Mündung durch Bollwerke auf 180 m. Die Zufahrt zur Mündung wird durch Baggerungen unterhalten. Unter normalen Verhältnissen (keine außergewöhnlichen Eisverhältnisse in der Mündungsstrecke und keine Sturmfluten) betragen die Ablagerungen im Seekanal 50 000 bis 100 000 m³, doch war die notwendige Aushubmasse gewöhnlich geringer. In außergewöhnlichen Jahren ist es zu einer vollständigen Versandung des Seekanals gekommen, wobei zur Freilegung einer Rinne von 100 m Breite und 5—6 m Tiefe 150 000 m³ und mehr gebaggert werden mußten.

Da durch Baggerung allein sich die für die Schifffahrt erforderlichen Tiefen nicht unterhalten lassen, müßten zur Verbesserung der Mündungsverhältnisse folgende Bauten ausgeführt werden:

1. Regelung der Breite der Mündungsstrecke und der eingeengten Mündung auf 250 m mit Befestigung der dem Abbruch unterworfenen Ufer.

2. Bau von Leitdämmen bei einem Abstand von 250 m; von der Mündung auf einer Länge von 750 m in NNW-Richtung und weiter, auf einer Länge von 1000 m, im Bogen allmählich in die W-Richtung übergehend.

Bei der vorgeschlagenen Form würde sich vom Westen aus die Küstenlinie im Bogen an die Leitdämme anschließen und die Materialwanderung von der Küste aus seewärts abgelenkt werden, wonach sich voraussichtlich ein Gleichgewichtszustand ausbilden würde.

Durch Aufbruch des Eises zwischen den Dämmen ist für hemmungslosen Abgang des Eises zu sorgen. Zur Unterhaltung der Tiefen werden auch nach dem Ausbau leichte Baggerungen, insbesondere vor der Einfahrt, erforderlich sein.

2. Die Mündung der Pernau (Abb. 2).

Über die natürlichen Mündungsverhältnisse und die bisher ausgeführten Regelungsarbeiten liegen Angaben in (3) vor. Die Mündung ist durch gleichlaufende Leitdämme eingefasst. Da an der Mündung ein annäherndes Gleichgewicht herrscht, läßt sich in der Fahrrinne durch leichte Baggerungen eine 5,4-m-Tiefe unterhalten.

Zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse in der Bucht müßte ein Kanal von 9 km Länge und 100 m Breite ausgehoben werden. Dazu käme eine Verlängerung der Leitdämme um 700 m, während der übrige Teil des Kanals ungeschützt bleiben könnte. Es ist dabei in Betracht zu ziehen, daß in einer gewissen Entfernung von der Küste die Sandwanderung aufhört und der Boden fester ist.

3. Die Mündung der Düna (Abb. 3).

Die Mündungsstrecke und die anschließende Küste sowie die im Laufe der Zeit ausgeführten Verbesserungsmaßnahmen sind in (3), (4), (7) und (8) beschrieben.

Die Berechnung des Wellenenergiefaktors ergab nach Einschaltung eines Eisfaktors von $0,80 : E = 7200, S = 7090, T = -648, T_1 = 2032, T_2 = -2680$. Dementsprechend findet an der Dünamündung keine durchgehende Sandwanderung statt, sondern es hat sich ein Gleichgewichtszustand ausgebildet, was die Unterhaltung der erforderlichen Fahrwassertiefen im Seegat erleichtert.

Auf Grund einer Reihe von Einzelmessungen läßt sich die jährlich zur Mündung verfrachtete Sinkstoffmenge wie folgt schätzen:

Tafel 2.

Zeitdauer	Absetzbare Stoffe				
	Auf 1 m ³ Wasser		bei einer mittleren Abflußmenge während 10 Mon. von 500 m ³ /sec. während 2 Mon. von 2000 m ³ /sec.		
Monate	kg	m ³	m ³ /sec.	m ³ /24 Std.	gesamt m ³
8	0,03	0,00002	0,010	864	207 360
2	0,15	0,00001	0,200	17280	1034 400
					1241 760

Zur Unterhaltung einer Tiefe von 7,3 m in der Mündungsstrecke und im Seegat, sind jährlich 800 000—900 000 m³ zu baggern, davon im Seegat je nach den Abflußbedingungen 5 bis 30 v.H. Maßgebend für die jährliche Baggermenge ist die Windrichtung während des Eisganges. Im Mittel fällt der Eisgang und das Frühjahrshochwasser mit einer ungünstigen Windrichtung (N 25° W) zusammen. Außer der Sinkstoffbewegung vom Strom aus findet eine solche in geringerem Maße von der Küste aus statt. Die Barre an der Mündung wird durch die Fahrrinne in zwei Teile gespalten. Bei Westwinden verlagert sich die westliche Bank bis in die Fahrrinne. Die östliche Bank liegt fest.

Die Mündung ist durch zwei Leitdämme eingefasst. Durch Verlängerung der Leitdämme könnte die Bildung einer Barre für einige Jahre unterbunden werden, doch würde dadurch der Abgang des Eises erschwert werden. Bei durchbrochenen Dämmen würde sich die Spülkraft des Stromes auf der offenen Strecke aufzehren und die Schifffahrt durch die Querströmung behindert werden. Andererseits scheint sich bei der bestehenden Anlage ein Gleichgewichtszustand ausgebildet zu haben, der nur bei außergewöhnlichen Naturerscheinungen zeitweilig unterbrochen wird. Nachdem im Zeitraum 1788/1923 die Küsten und Tiefenlinien links um 2200 m, rechts um 1000 m vorgerückt waren, hat sich das Vorrücken in den letzten Jahrzehnten verzögert. Deshalb könnte bei planmäßiger Baggerung von einem weiteren Ausbau der Leitdämme bis auf weiteres abgesehen werden.

4. Die Mündung der Windau (Abb. 4).

Die Entwicklung der Mündungsverhältnisse unter der Auswirkung des Ausbaues ist in (3), (5), (6) und (8) beschrieben worden.

Die Berechnung des Energiefaktors ergab folgende Werte: $E = 25 000, S = 18 200, T = +17 700, T_1 = +24 000, T_2 = -6300$. Danach können die aufwühlenden und transportierenden Kräfte als annähernd gleich groß angenommen werden. Von den transportierenden Kräften überwiegt die luvseitige.

Die Anordnung von aufeinander zulaufenden Molen hat sich an der Windaumündung nicht bewährt. Bei der Anlage treten die üblichen Erscheinungen auf: Ablagerungen luvwärts mit allmählichem Vorrücken der Küsten und Tiefenlinien bis 500 m, Anlandungen an der Einfahrt mit zeit-

weiliger Verminderung der Tiefe um 2 bis 3 m, Abbruch leewärts, in einiger Entfernung von der Anlage. Am Ende der Südermole treten Auskolkungen auf, woran sich nördlich eine Sandbank anschließt. Eine Vertiefung der Rinne im Vorhafen ist alle 2 bis 3 Jahre notwendig, wobei 150 000 bis 200 000 m³ zu entfernen sind. Die Fahrrinne auf der Barre muß alljährlich nach den Herbst- und Winterstürmen ausgebaggert werden.

Als zeitweilige Maßnahmen zur Bekämpfung der Barrenbildung an der Mündung können in Frage: Umbau der Molenköpfe und verstärkte Baggerung. Die Molenenden müssen mehr umgebogen werden, wobei die Richtung der die beiden Molenköpfe verbindenden Linie mit der Hauptrichtung des Strandes zusammenfallen sollte und vor allem das Vortreten des Nordermolenkopfes zu beseitigen wäre.

Von weitgehender Bedeutung könnte sich folgende Maßnahme erweisen: Durch den Bau einer bis zur 6-m-Tiefe reichenden Abwehrmole ist westlich von der Hafenanlage die Küstenströmung und die Sandwanderung abzuleiten. Durch die Unterbrechung der Sandzufuhr von West würde sich dann im Bereich der bestehenden Hafenanlage eine Abbruchzone ausbilden, was zur Verminderung der Anlandungen westlich des Hafens und an seiner Einfahrt führen dürfte.

5. Die Mündung des Memeler Tiefs.

(Kurisches Haff, Abb. 5.)

Von den in das Kurische Haff einmündenden Flüssen sind außer der Memel (91 338 km²) die Schmelz und die Darge zu nennen. An der Mündung letzteren Flusses liegt der Seehafen Memel. Das Haff bildet das Absetzbecken der in dasselbe mündenden Flüsse. Mit der See steht das Haff durch das an seiner nördlichen Spitze befindliche Tief in Verbindung. Die Küstenlinie hat die Richtung N 5° W. Die Berechnung des Energiefaktors ergab:

$$E = 24\,900, S = 24\,800, T = 1500, T_1 = +7500, T_2 = -6000.$$

Danach überwiegt die aufwühlende Kraft die transportierende, während die luv- und leeseitigen transportierenden Kräfte annähernd gleich sind.

Der Ausbau der Mündung ist in (9) beschrieben. Die Mündung des Tiefs wird von zwei Leitdämmen eingefasst, Norder (1210) und Süder (1390). Der Abstand zwischen den Leitdämmen beträgt 350 m, die Tiefen an den Köpfen — Norder 5 m, Süder 6 m. Die Verbindungslinie der Köpfe hat eine dem Küstenstrich und den Tiefenlinien gleichlaufende Richtung. Zwischen den Molenköpfen und der Anseglungstonne liegt das Seegat, in welchem die Tiefen (8—9 m) durch Baggerungen unterhalten wurden. Die jährliche Baggermenge beträgt im Mittel 87 000 m³.

Im allgemeinen sind die Tiefenverhältnisse vor der Einfahrt und im Seegat beim Vorhandensein eines kräftigen Spülstroms soweit günstig, daß, abgesehen von besonders schweren Stürmen, die erforderlichen Tiefen sich durch verhältnismäßig geringe Baggerungen unterhalten lassen. Deshalb könnte, obwohl die Leitdämme nur bis zur 6-m-Tiefe reichen, von ihrer Verlängerung abgesehen werden, nur müßte das Vorstehen des Nordermolenkopfes durch Verlängerung der Südermole beseitigt werden.

6. Die Mündung des Pillautiefs.

Nach Abschluß des Weichselarmes Nogat im Jahre 1914 ist das Haff hauptsächlich auf die von der See einströmenden Wassermassen angewiesen. Einstrom findet an 108 Tagen (4028 m³/s), Ausstrom an 223 Tagen (4630 m³/s) statt. Somit ist ein kräftiger Spülstrom (1,5 m/s) vorhanden, der mit dem Hauptküstenstrom unter einem rechten Winkel zusammentrifft, wobei Sandmassen zur Ablagerung kommen, die z. T. in das Haff gelangen.

Der Ausbau der Mündung des Tiefs ist in (10) beschrieben. Die Leitdämme haben bei einem Abstand von 360 bis 500 m eine Länge von 1100 m. Die Tiefe an den Köpfen ist folgende: Nordermole 7 m, Südermole 9 m. Die jährliche Baggermenge beträgt im Mittel 200 000 m³, wovon 1/4 auf die Barre entfällt.

Da die Leitdämme schon bis zur 8-m-Tiefe durchgeführt sind, verbleibt als einziges Mittel zur Verbesserung der Mündungsverhältnisse verstärkte Baggerung.

7. Die Mündung der Weichsel (Abb. 6 u. 7).

Die Entwicklung der Mündungsverhältnisse war bedingt von dem Ausbau der Weichselmündungen. Nach Abschluß der Danziger und der Elbinger Weichsel wurde 1895 der Strom bei Schiewenhorst in gerader Richtung ins Meer geleitet. Schließlich wurde 1914/15 der Nogatarm hochwasserfrei abgeschlossen und das ganze Weichselwasser mit allen Sinkstoffen der neuen Mündung Schiewenhorst zugeführt.

Die Abflußmenge beträgt 250 — 1000 — 10 000 m³/s bei einem Jahresmittel von 32 km³. Die Lage des Strandes westlich von Neufahrwasser verändert sich wenig, während östlich dieser Mündung der Strand zu Uferabbrüchen neigt. Von da aus setzt auch eine Sandwanderung ein, doch wird durch Vorwölbung der Küste und vorspringende Bauten ein Teil des wandernden Sandes aufgehalten, so daß die Sandzufuhr von der Küste zur Schiewenhorster Mündung nicht bedeutend ist. Die Berechnung des Energiefaktors für die Schiewenhorster Mündung ergab: $E = 13\,600$, $S = 13\,300$, $T = 3040$, $T_1 = 5600$, $T_2 = -2560$. Danach überwiegt die Sandzufuhr von Westen aus, doch erreicht sie aus den angeführten Gründen keine größeren Ausmaße.

Von ausschlaggebender Bedeutung für die Mündungsverhältnisse der Weichsel ist die Sinkstoffführung dieses Stromes. Vor dem Durchstich bei Schiewenhorst sollen an den alten Weichselmündungen (Danziger, Elbinger, Nogat) im Zeitraum 1840/1890 100 000 000 m³ Sand zur Ablagerung gekommen sein, was im Jahre 2 000 000 m³ ausmacht.

Die Sinkstofffracht oberhalb der Mündungsstrecke ist im Laufe von 3 Jahren (1941/43) durch tägliche Probeentnahme in mehreren Stromprofilen und Filtrierung der Proben gemessen worden. Die Ergebnisse dieser Messungen waren:

1941	bei einer jährlichen Abflußmenge von	245 mm	—	5 565 000 m ³
1942	„ „ „ „ „ „	166 mm	—	2 531 000 m ³
1943	„ „ „ „ „ „	99 mm	—	777 000 m ³

Bei normalen Abflußverhältnissen ist im Unterlauf und in der Mündungsstrecke die Geschiebefracht im Verhältnis zur Sinkstofffracht gering (2—4 v. H.). Nur bei außergewöhnlichem Hochwasser und schweren Eisverhältnissen (Eisgang mit Eisversetzungen) kommt es in der Mündungsstrecke bei verstärktem Gefälle und dementsprechend vergrößerter Schleppkraft zu Vertiefungen der Stromsohle. Dadurch werden größere Geschiebemengen in Bewegung gesetzt, die dann teils als Geschiebe, teils als Sinkstoffe weiter zur Mündung verfrachtet werden.

Eine fortschreitende Senkung der Wasserstände und Vertiefung der Sohle erfolgte im Unterlauf der Weichsel 1. nach dem Durchstich bei Schiewenhorst und 2. nach dem Abschluß der Nogat.

Tafel 3.

Pegel P. N. ü. N. N. oberhalb d. Mündung km	MNW (ungehemmt)				MW				Hebung + Senkung — v. 1890	
	1881 1890	1901 1910	1931 1938	1943	1880 1889	1900 1909	1931 1938	1943	MNW	MW
	v. d. Durch- stich b. Schiew.	n. d. Durch- stich b. Schiew.	n. d. Abschl. d. Nog.		v. d. Durch- stich b. Schiew.	n. d. Durch- stich b. Schiew.	n. d. Abschl. d. Nog.			
	cm ü. P. N.				cm ü. P. N.				cm	
Kurzebrack 8,00 71	255	252	229	200	398	385	364	352	—55	—46
Nogathaupt 4,14 49	264	240	155	130	401	368	299	288	—134	—113
Dirschau —0,51 30	406	360	235	220	453	387	296	300	—186	—153

Bei Dirschau beginnt die Mündungsstrecke. Nachdem sich der Mündungskegel von 1895 ständig vergrößerte und sich zwischen den unregelmäßigen Anhäufungen immer wieder neue Arme bildeten, setzten 1906 Baggerungen ein, die fast jedes Jahr bis 1916 ausgeführt wurden, wonach eine Unterbrechung in diesen Arbeiten eintrat. Im Zeitraum 1906/1916 sind 1.517 000 m³ ausgehoben worden, während der Zugang zum Mündungskegel 1895/1916 21 120 000 m³ betrug. Die Mengenberechnung beruht auf alljährlichen Peilungen einer Wasserfläche von 6×3 km bis zur 15-m-Tiefe. Zur Schaffung eines einheitlichen Bettes für ungehinderte Eis-, Geschiebe- und Sinkstoffabfuhr und dadurch zur Verminderung der Baggerarbeiten ist die Mündung ausgebaut worden. Einem kurzen östlichen Leitdamm folgte ein westlicher. Im Jahre 1941 waren beide Leitdämme bis auf 80 m der im Entwurf vorgesehenen Länge ausgebaut (Abb. 7), wonach die Arbeiten abgeschlossen wurden. Durch den sich entwickelnden Spülstrom erfolgt eine Aufräumung des Strombettes zwischen den Leitdämmen, wobei sich auch in der Barre eine Rinne von 2,5 m bildete.

Auf Tafel 4 ist die Entwicklung der Schiewenhorster Mündung im Zeitraum 1923/37 zu ersehen. Die Peilungsergebnisse sind (11) entnommen. Die Sinkstofffracht ist auf Grundlage der Meßergebnisse 1941/43 unter Berücksichtigung der jährlichen Abflussmengen berechnet worden.

Der außergewöhnliche Zugang der Zeitspannen 1923/24, 1928/29, 1931/32 wurde durch schwere Eisverhältnisse und Hochwasser hervorgerufen. Das Gefälle in der Mündungsstrecke betrug beim HW 24 0,307 ‰ und beim HW 29 0,260 ‰. Dementsprechend entwickelte sich bei den großen Tiefen der Mündungsstrecke eine außerordentliche Schleppkraft, was zur Vertiefung der Stromsohle führte. Den größeren Zugängen in den genannten Zeitspannen folgten auch wiederum größere Abgänge, da die Sinkstoffe des Stromes schon in der vertieften Mündungsstrecke zur Ablagerung kamen, sich zwischen den Leitdämmen infolge günstiger Wind- und Eisverhältnisse ein Spülstrom entwickelte und auch die Küstenströmung eine abtragende Wirkung auf die Barre ausübte. Wie so oft, hat sich die Natur auch in den vorliegenden Fällen nach einer Katastrophe selbst geholfen und die Blockierung der Strommündung verhindert.

Tafel 4.

Materialbilanz an der Mündung bei Schiewenhorst.

Zeit- spannen	Materialbewegung				Bemerkungen
	Sinkstoff- Fracht	Bagge- rungen	+ Zugang — Abgang	Gesamt- zugang	
	1000 m ³				
1895/23				57 700	
1. 5. 23	3 245	56	+ 17 697	75 467	Durch Sohlenvert. um 1 m zusätzliche Fracht $1 \times 400 \times$ $30\,000 = 12\,000\,000$ m ³ .
30. 4. 24					
1. 5. 24	1 235	45	— 23 489	51 978	b. günst. Abfl. auf- räum. Küsten- strömung.
30. 4. 25					
1. 5. 25	2 175	—	— 4 211	47 767	
30. 4. 26					
1. 5. 26	4 390	226	— 6 151	41 616	starker Spülstrom
30. 6. 27					
1. 7. 27	1 677	—	+ 1 554	43 170	
30. 4. 28					
1. 5. 28	1 226	50	+ 13 924	57 093	Zus. Fracht infolge Sohlenvertiefung $0,75 \times 400 \times$ $30\,000 = 9\,000\,000$ m ³
30. 4. 29					
1. 5. 29	1 075	96	— 1 996	55 099	
30. 4. 30					
1. 5. 30	2 300	—	+ 1 612	56 711	
30. 4. 31					
1. 5. 31	2 460	120	+ 9 823	65 534	
30. 4. 32					
1. 5. 32	940	—	— 5 188	60 346	
30. 4. 33					
1. 5. 33	1 030	—	+ 2 024	62 370	Weiterhin wirkt sich aus d. Verlän- gerung d. W-Mole
31. 3. 34					
1. 4. 34	2 157	—	— 3 756	58 614	Bau einer östlichen Hilfsbühne
31. 3. 35					
1. 4. 35	2 160	(130) *	— 1 746	56 868	*) Bag. z. Auffüll. d. Kolkes am Kopfe d. Ostmole
30. 4. 36					
1. 5. 36	2 350	(250) *	+ 1 236	58 104	
30. 4. 37					
i. M.	28 420	593		+ 404	
	2 030	(380) *			

Im Gesamtzugang 1895/1924 (57 700 000 m³) spiegelt sich die durch die Auswirkung des Ausbaues hervorgerufene Sohlenvertiefung von Kurzebrack an. Von der Sinkstoffmenge des Stromes gelangte während des betrachteten Zeitraumes nur ein Teil (etwa 2/3) zur Schiewenhorster Mündung, da der Abschluß der Nogat erst 1915 erfolgte. Bei diesen Voraussetzungen erhält man eine dem tatsächlichen Zugang entsprechende Zahl, wie aus der Tafel 5 zu ersehen ist.

Tafel 5.

Bezeichnung der Stromstrecke	Länge m	Breite m	Vertiefung m	Geschiebemenge m ³
Kurzebrack—Nogathaupt	22 000	250	0,30	1 650 000
Nogathaupt—Dirschau	20 000	300	1,00	6 000 000
Dirschau—Schiewenhorst	30 000	400	1,70	20 400 000
				28 050 000
Zugang an Sinkstoffen $\frac{2}{3} \times 2 000 000 \times 23$				=30 000 000
				=58 000 000

Durch den Ausbau der Schiewenhorster Mündung werden die Sinkstoffe vom Strome aus auf eine größere Tiefe abgeführt. Deshalb sind Baggerungen nur noch ausnahmsweise erforderlich. Die Mündungsverhältnisse haben sich soweit günstig entwickelt, daß auch der Abgang des Eises in der Regel ohne Stockungen sich vollzieht, jedoch unter der Voraussetzung eines rechtzeitigen, falls erforderlich, künstlichen Eisaufbruches. Die Tiefen an der Mündung (2,5 m) genügen zwar nicht den Anforderungen der Seeschifffahrt, doch ist die Schiewenhorster Mündung nicht zu diesem Zwecke angelegt.

8. Die Mündungen der Stolpe, Wipper und Persante (Abb. 8 und 9).

Die Vorteile und Nachteile der Anlagen an den Mündungen dieser Flüsse sind eingehend untersucht und in (12), (13) und (14) beschrieben worden.

Zur Kennzeichnung der Verhältnisse an den Mündungen der Persante und Wipper folgen die Berechnungsergebnisse der Wellenenergiefaktoren

a) Persante: E = 23 000, S = 21 000, T = 9 300, T₁ = 19 600, T₂ = — 10 300

b) Wipper: E = 35 000, S = 33 500, T = 12 400, T₁ = 20 320, T₂ = — 7 920

S : T = 2,5 : 1 (Persante) und = 2,6 : 1 (Wipper)

T₁ : T₂ = 1,9 : 1 „ „ = 2,6 : 1 „

Aus dem Vergleich tritt hervor, daß der Wellenenergiefaktor und seine Komponenten an der WippERMündung größer als an der Persantemündung und daß die luv- und leeseitigen transportierenden Kräfte an der Persantemündung ausgeglichener sind. Diese Ergebnisse stehen auch im Einklang mit den Beobachtungen, wonach die Brandung vor der WippERMündung größer ist.

Durch die berechneten Energiefaktoren werden zwar die Wellenbewegung und die damit im Zusammenhang stehenden Oberflächenströmungen zutreffend gekennzeichnet, doch sind außerdem die Tiefenströmungen zu untersuchen, welche der Windbeeinflussung fast vollkommen entzogen sind und vorwiegend der Küstenrichtung folgen.

An den Mündungen der drei angeführten Flüsse sind die Verhältnisse annähernd gleich, während die Anordnung der Anlagen wesentliche Unterschiede aufweist, insbesondere an der Persante (Kolberg) und an der WippERMündung (Rügenwaldermünde). Von letzteren soll sich die Kolberger Anlage besser bewährt haben. Die luvseitigen Anlandungen und die Barrenbildung

an der Mündung sind bei Kolberg geringer. Auf der Leeseite beider Anlagen treten Uferabbrüche auf, doch haben die Buhnen bei Kolberg erfolgreicher gewirkt. Die Baggerungen sind vor Rügenwaldermünde im Jahresmittel um 25 v. H. größer gewesen als vor Kolberg, wo der Sand gröber und die Durchschnittswassertiefen größer sind. Der Vorteil eines Vorhafens bei Rügenwaldermünde wird durch die Schwierigkeiten der Hafeneinfahrt beeinträchtigt. Eine Verbreiterung dieser Hafeneinfahrt ist in Betracht zu ziehen. Zur Verbesserung der Kolberger Hafeneinfahrt liegen Vorschläge in (14) vor: Schaffung eines Beckens hinter der Hafeneinfahrt, wobei die luvseitige Mole konkav gekrümmt bleiben soll, und Verstärkung der Molenköpfe mit konkav ausgebildeten Außenseiten.

In jedem Fall erscheint es zweckmäßiger, der luvseitigen Mole eine konkave Krümmung zu geben (Kolberg). Bei einer konvexen Krümmung (Rügenwaldermünde, Windau) bildet sich luvseitig erst dann ein annähernder Gleichgewichtszustand, wenn die Strandlinie im Laufe der Jahre einen konkaven Anschluß an die luvseitige Mole erreicht hat.

9. Die Mündung der Swine (Stettiner Haff).

Der Ausbau der Wasserstraße Stettin—Swinemünde ist in (15) beschrieben. Die von der Mündung ausgehenden Leitdämme sind annähernd gleichlaufend, mit einer Krümmung gegen den Hauptküstenstrom. Der Ostdamm (1452 m) überragt den Westdamm (1022 m). Der Abstand zwischen den Leitdämmen beträgt 400—425 m, die Tiefe am Westkopf 2 m, am Ostkopf 6 m. Zwischen den Leitdämmen ist eine 10-m-Fahrwassertiefe vorhanden, wobei bei Ausstrom die Geschwindigkeit 2 m übersteigt. Die jährliche Baggermenge zur Unterhaltung der Tiefen betrug im Mittel 32 000 m³. Der westliche Strand und die 5-m-Tiefenlinie sind nach dem Ausbau um 800 m vorgerückt. Die Wandernde haben von der Luvseite aus den Westmolenkopf umwandert und an der Innenseite eine Sandbank gebildet. Ferner hat sich in Verlängerung dieser Mole eine Sandbank vorgeschoben, die den Kopf der Ostmole weit überragt.

Durch ergänzende Regelung der Swine zwischen Haff und Mündung lassen sich noch vorhandene Unregelmäßigkeiten, welche das Ein- und Ausströmen des Wassers behindern, beseitigen und dadurch den Spülstrom verstärken. Zu erwägen wäre eine Verlängerung der Westmole.

10. Die Mündung der Trave.

a) Die natürlichen Mündungsverhältnisse.

Bis Lübeck hat die Trave ein Niederschlagsgebiet von 1572 km². Der Unterschied zwischen den äußersten Wasserständen beträgt bei Lübeck 546 cm. 4 km unterhalb Lübeck mündet die Trave in ein Seengebiet, welches von der See durch eine Nehrung (Priwall) abgeschlossen ist. Bei Dassow mündet ein weiterer Zubringer, die Stepenitz. Die Mündung der Trave in die See befindet sich bei Travemünde. Der mittlere Abfluß der Trave beträgt bei Lübeck 12,5 m³/s. Bei Travemünde erreicht das Niederschlagsgebiet 2683 km². An die See gibt die Trave i. M. 21,5 m³/s ab, wobei $Q_{min} = 7$ m³/s und $Q_{max} = 107$ m³/s. Das Gefälle zwischen Lübeck und Travemünde ist äußerst gering (0,0004 ‰), wobei der Ausstrom oft durch Einstrom unterbrochen wird. Bei Travemünde findet im Jahr i. M. an 217 Tagen Ausstrom und an 133 Tagen Einstrom statt. Das bezieht sich auf die Oberflächenströmung, während bei der Tiefenströmung die Zahlen sich verschieben können. Bei höheren Wasserständen in der Ostsee kann der Stau bis zum Elbe-Trave-Kanal reichen, bei außergewöhnlichen Sturmfluten sogar bis Bad Oldesloe. In kälteren Wintern wird die Schifffahrt durch Eis gehemmt. Im Zeitraum 1933/43 waren 159 Sperr-

tage, im Jahresmittel 16. Das Geschiebe und die Sinkstoffe der Trave kommen schon im Gebiet von Lübeck zur Ablagerung.

In der Lübecker Bucht (Abb. 10) machen sich hauptsächlich Stau-Strömungen bemerkbar. Bei westlichen Winden steigt der Wasserstand der Ostsee, was sich dann auch auf den Wasserstand in der Lübecker Bucht auswirkt. Die Bucht und die Mündung der Trave ist den Winden zwischen N und O offen. Bei Travemünde beträgt der Unterschied zwischen den äußersten Wasserständen 532 cm. Der luvseitige Strand ist von N nach S, der leeseitige an der Mündung von W nach O und weiter nach ONO gerichtet. Nach der Munch-Petersenschen Formel ergeben sich für den Wellenenergiefaktor und seine Komponenten folgende Werte:

Tafel 6.

Bezeichnung der Energiefaktoren	Luvküste	Leeküste
E (Wellenschlagsenergiefaktor)	1134	1134
S (senkrechte Komponente = $\varepsilon \cos \alpha$)	745	855
T (parallele Komponente = $\varepsilon \sin \alpha$)	855	745
Verhältnis S : T	0,9 : 1	1,15 : 1

Infolge der geschützten Lage der Bucht, wobei nur die Winde zwischen N und O auflandig sind, sind der Wellenschlagsenergiefaktor und dementsprechend seine Komponenten verhältnismäßig klein. Luvseitig der Mündung befindet sich in einer Entfernung von 1,7 km eine Steilküste, das Brodtener Ufer, welches Abbruch unterworfen ist. Die Küste besteht aus Geschiebemergel mit Tonzwischenschichten. In trockenem Zustande ist das eine harte Masse, welche sich jedoch im Wasser auflöst. Die Zerstörung erfolgt einerseits durch die Brandung von seiten der See, andererseits durch das von oben herabsickernde atmosphärische Wasser. Durch Frosteinwirkungen wird die Zerstörung beschleunigt. Da rechts und links vom Brodtener Ufer die Küste zurückgewichen ist, wozu eine fortschreitende Senkung beigetragen hat, ist die Zerstörung dieser Steilküste ein natürlicher Vorgang, der sich aber durch künstliche Maßnahmen aufhalten läßt. Im Laufe der letzten 100 Jahre ist die Küste um 50 m zurückgetreten. Vor der Steilküste findet weder Sandflug auf dem trockenen Strande noch Sandwanderung in der Brandungszone statt. Deshalb ist auch die Sandbewegung am Strande zur Mündung hin gering. Im allgemeinen scheint an der Mündung der Trave ein Gleichgewichtszustand zu bestehen, der für die Unterhaltung der für die Schifffahrt erforderlichen Tiefen günstig ist.

b) Regelung der Mündungstrecke und der Mündung.

Der erweiterte Flußlauf von der Stadt Lübeck abwärts wurde allmählich zum Seekanal ausgebildet. Der Seekanal von Lübeck bis Travemünde wurde bis auf 8,5 m bei einer Sohlenbreite von 80 bis 100 m vertieft. Die Mündung selbst ist durch kurze Leitdämme eingefasst, von denen der Norderdamm um 200 m den Süderdamm überragt. Die Tiefen an den Molenköpfen sind gleich Null, doch in der Fahrrinne zwischen den Leitdämmen halten sich die Tiefen gut. Die angeführten Regelungsarbeiten sind von Rheder beschrieben worden (15). Auf der Barre an der Mündung sind Baggerungen im Durchschnitt nur jedes zweite Jahr erforderlich, wobei die Baggermenge 20 000 m³ nicht übersteigt. Außerdem sind alle 4—5 Jahre Baggerungen unterhalb Lübeck (km 1—5) auf einer Strecke mit moorigem Untergrund und zwischen km 14 und 15 ausgeführt worden. Im Seegat außerhalb der Mündung ist nur selten gebaggert worden. Die geschützte Lage der Mündung, die geringe Sandbewegung und der bestehende Gleichgewichtszustand haben sich auf die

Mündungsverhältnisse bei Travemünde außerordentlich günstig ausgewirkt, so daß die für die Schifffahrt erforderlichen Tiefen sich mühelos halten lassen.

Zu erwähnen ist noch, daß der Badestrand in Travemünde (Iuvseitig) an Sandmangel leidet, wobei die geplanten Schutzanlagen am Brodtener Ufer sich nachteilig auswirken könnten. Diese Frage bedarf aber noch der näheren Klärung durch Messung der Oberflächen-, Tiefen- und Grundströmungen sowie durch systematische Peilungen, um die Materialwanderung an der Küste und in den tieferen Schichten zu erfassen.

III. Schlußfolgerungen.

Wie in der Einleitung hervorgehoben und bei der Beschreibung der einzelnen Mündungen erläutert worden ist, sind die Verbesserungsmaßnahmen im Einklang mit den natürlichen Vorgängen (Wind, Wasser- und Materialbewegung) durchzuführen. Das Endergebnis dieser Naturvorgänge spiegelt sich in der Ausbildung der Mündung mit einer vorgelagerten Barre, deren Lage und Umfang durch den Materialtransport aus dem Fluß und von der Küste bedingt ist. Der Materialtransport vom Fluß aus läßt sich qualitativ und quantitativ erfassen. Dazu gehören eine fortlaufende Entnahme von Wasserproben im Laufe einiger Jahre und deren Untersuchung (Filtrierung und Verdampfung) sowie systematische Bestimmungen der Abflusmengen. Außerdem sind die Veränderungen in der Sohlenlage der Mündungsstrecke zu erfassen, woraus sich ein weiterer Zugang an Material zum Mündungskegel ergeben kann. Die Materialbewegung längs der Küste läßt sich mengenmäßig nur in Einzelfällen (z. B. bei natürlichen oder künstlichen Küstenvorsprüngen) ermitteln. An größeren Strommündungen überwiegt die Geschiebe- und Sinkstoffbewegung vom Strom aus, wobei auch der anliegende Strand und der Vorstrand vom Strom aus mit Sand angereichert werden. Bei kleineren Flüssen dagegen werden die Mündungsverhältnisse vom Meer aus beherrscht.

Die Wasserbewegung an der Küste (Wellen und Strömungen) ist abhängig von der Richtung und der Stärke der Winde. Da die Wasserbewegung und Sandwanderung an der Küste bei stürmischer See schwer meßbar sind, ist versucht worden, zur Schätzung dieser Bewegungen von der Richtung und der Stärke der Winde auszugehen (Munch-Petersen). Für die Wellenbewegung (Höhe, Länge, Geschwindigkeit und Brandung) ist in Binnenmeeren außer der Windrichtung und -stärke noch die Streichlänge (Entfernung von der gegenüberliegenden Küste) maßgebend. Aus diesen Faktoren erhält man den Wellenenergiefaktor, welcher der Schleppkraft in den Strömen entspricht. Nach Zerlegung des Wellenenergiefaktors in eine zur Küstenlinie senkrechte und eine dazu parallele Komponente erhält man die zerstörende und die transportierende Kraft. Letztere ergibt sich als Differenz einer linksseitigen (Iuv-) und einer rechtsseitigen (Iec-) Teilkraft. Inwieweit diese Kräfte zur Auswirkung kommen, hängt naturgemäß von der Lage, Gestaltung (Tiefenverhältnisse) und Bestand (Gesteinsart, Sand, Schlamm) der Küste ab.

Wie aus den vorhergehenden Beispielen hervorgeht, erhält man auf diesem Wege nützliche Hinweise zur Beurteilung der Wasser- und Materialbewegung an der Küste. Dabei bleiben aber die Tiefen und Grundströmungen (Sog), welche unmittelbar auf die Bodengestaltung wirken, unberücksichtigt. Als weiterer Schritt zur exakten Forschung ist daher die Messung dieser Strömungen erforderlich, was bei stürmischer See, durch welche die größten Veränderungen hervorgerufen werden, nicht durchführbar ist. Immerhin sind solche Messungen, soweit möglich, auszuführen.

Aus der Materialbewegung von der Küste und vom Strom aus bildet sich der Mündungskegel. Durch systematische Peilungen lassen sich die mengen-

mäßigen Veränderungen des Mündungskegels feststellen und mit der in demselben Zeitabschnitt erfolgten Materialzufuhr vom Strom und von der Küste aus vergleichen. Aus dieser Bilanz ist zu ersehen, welchen Schwankungen die Größe des Mündungskegels unterworfen ist und von welchen Faktoren (Eisgang, Hochwasser, Sturmflut) diese Schwankungen bedingt sind. Langjährige Untersuchungen solcher Art ergeben wertvolle Hinweise für die erforderlichen Baggerarbeiten sowie auch für etwaige Veränderungen oder Ergänzungen der bestehenden baulichen Anlagen zur Fassung der Mündung.

Im Einklang mit den Untersuchungen in der Natur ergeben wertvolle Hinweise für den Aufbau auch Modellversuche. Die Vorgänge in der Natur lassen sich in ihrer Gesamtheit im Modell nicht darstellen. Untersucht werden kann nur die Wirkung von Einzelkräften unter Ausschaltung der übrigen Kraftwirkungen. Dazu gehört in erster Linie die Stauwirkung von seiten der See auf die Mündungsstrecke. Zur Regelung des von der See einströmenden Wassers dient dann ein Steuerpegel mit einer Sollkurve an der Mündung. Die Naturähnlichkeit ergibt sich aus den Wasserstandsschwankungen an den übrigen Pegeln der Mündungsstrecke. Mit Versuchen dieser Art läßt sich die voraussichtliche Wirkung von geplanten Regelungsbauten auf die Wasserbewegung prüfen. Als Vorbild können Modellversuche mit Flußmündungen im Tidegebiet dienen, welche mit Erfolg sowohl im Laboratorium (17) als auch im Freien (Elbe- und Emsmodell) durchgeführt worden sind. Bei tidelosen Flüssen fehlt zwar die Regelmäßigkeit der Bewegung durch die überragende Kraft der Gezeiten, doch können für den Stau Mittelwerte aus einer Reihe von Sturmfluten zugrunde gelegt werden. Bei überwiegendem Einfluß der Wasserbewegung an der Küste lassen sich Versuche mit der Küstenströmung und mit künstlicher Erzeugung von Brandungswellen ausführen. Als Beispiel dieser Art kann auf die Modellversuche von Krefzner (18) hingewiesen werden. Ein Zusammenwirken beider Wasserbewegungen, vom Strom und von der Küste aus, ist bisher im Modell nicht untersucht worden. Als weiteres Glied müßte die Sandbewegung vom Strom und von der Küste untersucht werden, was aber beim heutigen Stand der Versuchstechnik im Modell naturähnlich nicht darstellbar ist. Bei den Vorgängen in der Natur sind noch von wesentlicher Bedeutung die Dichteunterschiede des Fluß- und Meerwassers. Dieser Umstand läßt sich im Modell des verzerrten Maßstabes wegen (Längen zu Höhen) nicht berücksichtigen. Somit sind die Möglichkeiten für Versuche mit tidelosen Strommündungen zwar beschränkt, doch kann eine Reihe von Einzelversuchen zum Verständnis der Gesamtwirkung aller in Betracht kommenden Faktoren beitragen.

Bei den beschriebenen Mündungen der Ost- und Südküste der Ostsee sind durch Darstellung der örtlichen Lage und der Naturvorgänge Vergleichsmöglichkeiten für die Wirksamkeit der durchgeführten Regelungsarbeiten gegeben. Ein annähernder Gleichgewichtszustand besteht an folgenden Mündungen: Pernau, Düna und Weichsel. Günstige Bedingungen liegen auch vor an den Mündungen von Wasserläufen mit einem großen Ausgleichbecken vor der Mündung: Memeler Tief, Pillauer Tief, Swine und Trave. Die Mündung der Narowa bedarf noch des Ausbaues. Durch die Anlagen an den Mündungen der Windau und Wipper ist anfangs der Gleichgewichtszustand an der Küste weitgehend gestört worden, doch hat sich auch an diesen Mündungen nach einigen Jahrzehnten ein annähernder Gleichgewichtszustand eingestellt, nach dem sich die Küstenlinien den vorspringenden Mündungsanlagen angepaßt haben. In geringerem Maße ist der Gleichgewichtszustand durch die Anlagen an den Mündungen der Stolpe und Persante gestört worden.

Bei annäherndem Gleichgewichtszustand oder beim Vorhandensein von Ausgleichbecken (Pernau, Düna und Weichsel sowie Memeler Tief, Pillauer Tief und Swine) haben sich gleichlaufende Leitdämme bewährt. Dabei erscheint es nicht immer erforderlich, die Leitdämme bis zur neutralen Zone (9—10-m-Tiefe) durchzuführen, da bei annäherndem Gleichgewichtszustand sich die Tiefen außerhalb der Brandungszone durch verhältnismäßig geringe Baggerungen erhalten lassen. Es ist jedoch zweckmäßig, beide Leitdämme bis zu einer an die Köpfe der Leitdämme parallel zur Küstenlinie angelegten Tangente durchzuführen, da sonst um den kürzeren Molenkopf eine Nehrungsströmung einsetzt, die zur Ablagerung führt. An dem Kopf der kürzeren Mole setzt meist eine Barrenbildung parallel der längeren Mole ein. Wesentlich ist auch die Form der Molenenden. Vorzuziehen ist eine konkave Form zur Ablenkung der Strömung von der Mündung. Bei allem sind die Einfahrtsmöglichkeiten zu berücksichtigen, wozu die Einfahrt in die Richtung der vorherrschenden stärkeren Winde anzulegen ist.

Da ein Vorhafen an der Mündung für die Schifffahrt erwünscht ist, sind schräg aufeinander zulaufende Molen unter gewissen Umständen zweckmäßig.

Dabei ist in der Richtung der vorherrschenden Küstenströmung die Mole konkav zu krümmen, um die Sandwanderung weiter seewärts abzulenken. Bei konvex gekrümmten Molen (Windau, Rügenwaldermünde) hat sich im Laufe der Zeit die luvseitige Strandlinie konkav an die luvseitige Mole angeschlossen, wonach ein Gleichgewichtszustand eingetreten ist. Dieser Umstand erhärtet die viel umstrittene Meinung, daß eine konkave Krümmung der entsprechenden Mole zweckentsprechender ist. Die Abtragungen leewärts einer vorspringenden Anlage sind nachteilig, doch stellt sich auch da im Laufe der Jahre meist ein Gleichgewichtszustand ein. Durch rechtzeitige Befestigung der leeseitigen Küste läßt sich der Abbruch vermindern. Doch müßte damit im Zusammenhang die Frage der Sandwanderung unter den veränderten Zuständen vorher geklärt werden.

Die wesentlicheren Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Maßnahmen zur Verbesserung der Mündungen sind im Einklang mit der Wasser- und Materialbewegung vom Strom und von der Küste aus durchzuführen. Dazu sind die Sinkstofffracht des Flusses und die durch eine Sohlenvertiefung der Mündungsstrecke entstandene zusätzliche Fracht zu bestimmen, ferner, soweit möglich, die Sandwanderung an der Küste. Besonders zu berücksichtigen sind die Auswirkungen des Eisganges, des Hochwassers und der Sturmfluten.

2. Die Wasser- und Sandbewegung an der Küste wird durch den Energiefaktor ($E = h \cdot s^2 \cdot \sqrt{f}$) in Binnenmeeren zutreffend gekennzeichnet. Zur genaueren Kenntnis der Vorgänge in den tieferen Schichten sind aber Messungen der Tiefen- und Grundströmungen erforderlich.

3. Bei Kenntnis der Naturvorgänge ergeben die Untersuchungen von Veränderungen der Mündungsverhältnisse unter der Auswirkung bestehender Anlagen wertvolle Hinweise für die Verbesserung solcher Anlagen als auch für Neuanlagen.

4. Durch Modellversuche läßt sich die Wirkung von Einzelkräften unter Ausschaltung der übrigen Kraftwirkungen untersuchen, insbesondere in bezug auf die Wasserbewegung. In ihrer Gesamtheit lassen sich die Naturvorgänge im Modell nicht darstellen.

5. Bei einem annähernden Gleichgewichtszustand oder beim Vorhandensein von größeren Ausgleichbecken vor der Mündung genügen gleichlaufende

Leitdämme, deren Länge bei einem annähernden Gleichgewichtszustande unter der Voraussetzung von periodischen Baggerungen im Seegat beschränkt werden kann.

6. Die Anlage eines Vorhafens an der Mündung ist zweckmäßig, wobei die in der Richtung der vorherrschenden Küstenströmung und Sandwanderung gelegene Mole konkav zu krümmen ist.

7. Besonderes Gewicht ist auf eine für die Schifffahrt gefahrlose Einfahrt zu legen, was durch die Anlage der Einfahrt in der Richtung der vorherrschenden stärkeren Winde und durch eine entsprechende Lage und Form der Molenköpfe anzustreben ist.

Literaturverzeichnis.

- (1) Munch-Petersen, Über Materialwanderung an der Küste. (Bericht zur V. Baltischen Hydrologischen Konferenz, Helsingfors 1936.)
- (2) Verbesserung der Mündungen der Flüsse, welche sich in Meere ohne Ebbe und Flut ergießen. (Bericht zum X. Internationalen Schiffahrtskongreß, Mailand 1905.)
- (3) Leppik, Flußmündungen mit Barrenbildung an der baltischen Ostseeküste. (Zeitschrift für Bauwesen, 1927, 1. bis 6. Heft [Ingenieurbauteil].)
- (4) von Naghel, Erläuterungsbericht zum Entwurf der Verbesserung der Einfahrt zum Rigaschen Hafen.
- (5) Schistovsky, Der Windauer Hafen.
- (6) Ivanina und Aeckerle, Bau der Häfen an sandigen Küsten. (Bericht zum XI. Internationalen Schiffahrtskongreß 1908.)
- (7) Revelis, Materialwanderung an der lettischen Küste. (Bericht zur VI. Baltischen Hydrologischen Konferenz 1938.)
- (8) Knaps, Prüfung der Formel von Munch-Petersen. (Bericht zur VI. Baltischen Hydrologischen Konferenz 1938.)
- (9) Weber, Der Memeler Hafen. (Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 1925.)
- (10) Prengel, Der Ausbau des Königsberger Seekanals. (Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 1925.)
- (11) Rozankowski, Die Küste der Weichselmündung. (Bericht zur VI. Baltischen Hydrologischen Konferenz 1938.)
- (12) Musset: a) Untersuchungen über die Einwirkung der Form der Molen auf Küstenströmungen und Sandwanderungen vor den Hafeneinfahrten. (Zeitschrift für Bauwesen 1920.)
 b) Weitere Untersuchungen über die Einwirkung der Form der Molen auf Küstenströmungen und Sandwanderungen. (Zeitschrift für Bauwesen 1922.)
 c) Untersuchungen über den Zusammenhang der Sandbewegungen und Wassertiefenschwankungen in den Hafeneinfahrten mit den Windstärkeschwankungen für die Häfen zu Rügenwaldermünde und Kolberg, sowie daraus für Molenbauten sich ergebende Grundsätze. (Zeitschrift für Bauwesen 1923.)
 d) Über Sandwanderung, Dünenbildung und Veränderung der Ufer an der hinterpommerschen Küste. (Zeitschrift für Bauwesen, 1924.)
- (13) Heiser, Über die zweckmäßigste Anordnung der äußeren Hafendämme von Seehäfen an sandiger Küste mit Rücksicht auf den Einfluß, den die auf die Umgestaltung der Ufer einwirkenden Naturkräfte ausüben, unter besonderer Betrachtung der Verhältnisse an der deutschen Ostseeküste. (Zeitschrift für Bauwesen 1920.)
- (14) Krause, Beitrag zur Frage der Häfen an sinkstoffführenden Küsten. (Bautechnik 1935.)
- (15) Fachndrich, Die Wasserstraße Stettin—Swinemünde. (Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 1922/23.)
- (16) Rehder, Die bauliche und wirtschaftliche Ausgestaltung und Nutzbarmachung der Lübecker Hauptschiffahrtstraße.
- (17) Seifert: a) Modellversuche für Tideflüsse. (Z. VDI 1937.)
 b) Modellversuche für Tideflüsse. (Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft 1937.)
- (18) Kressner, Modellversuche über die Wirkung der Strömungen und Brandungswellen auf einen sandigen Meeresstrand und die zweckmäßige Anlage von Strandbuhnen. (Bautechnik 1928.)

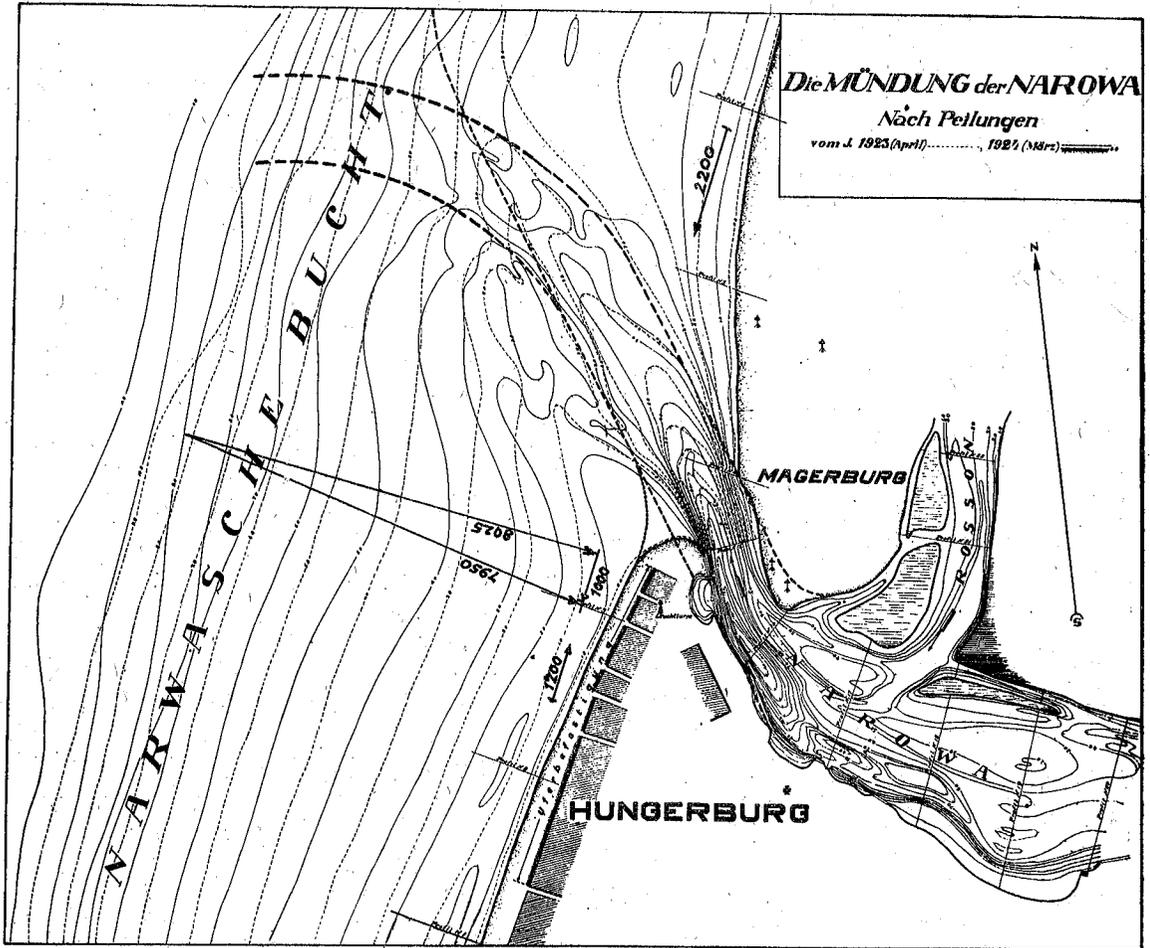
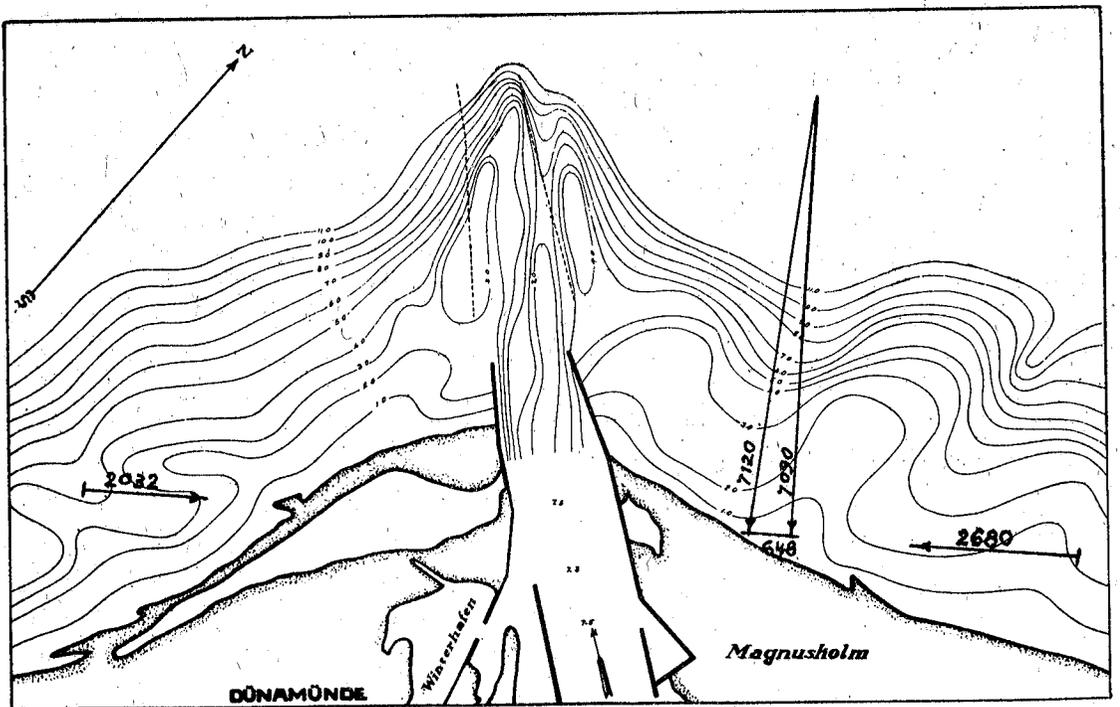
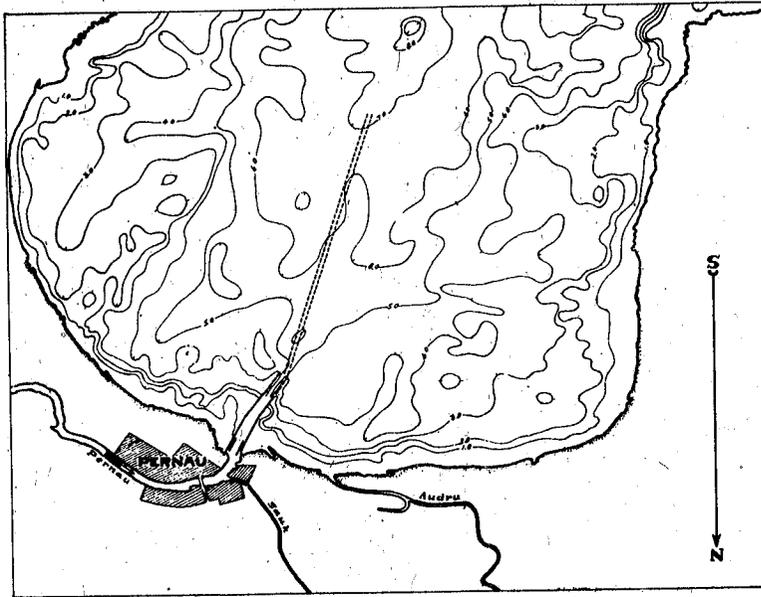
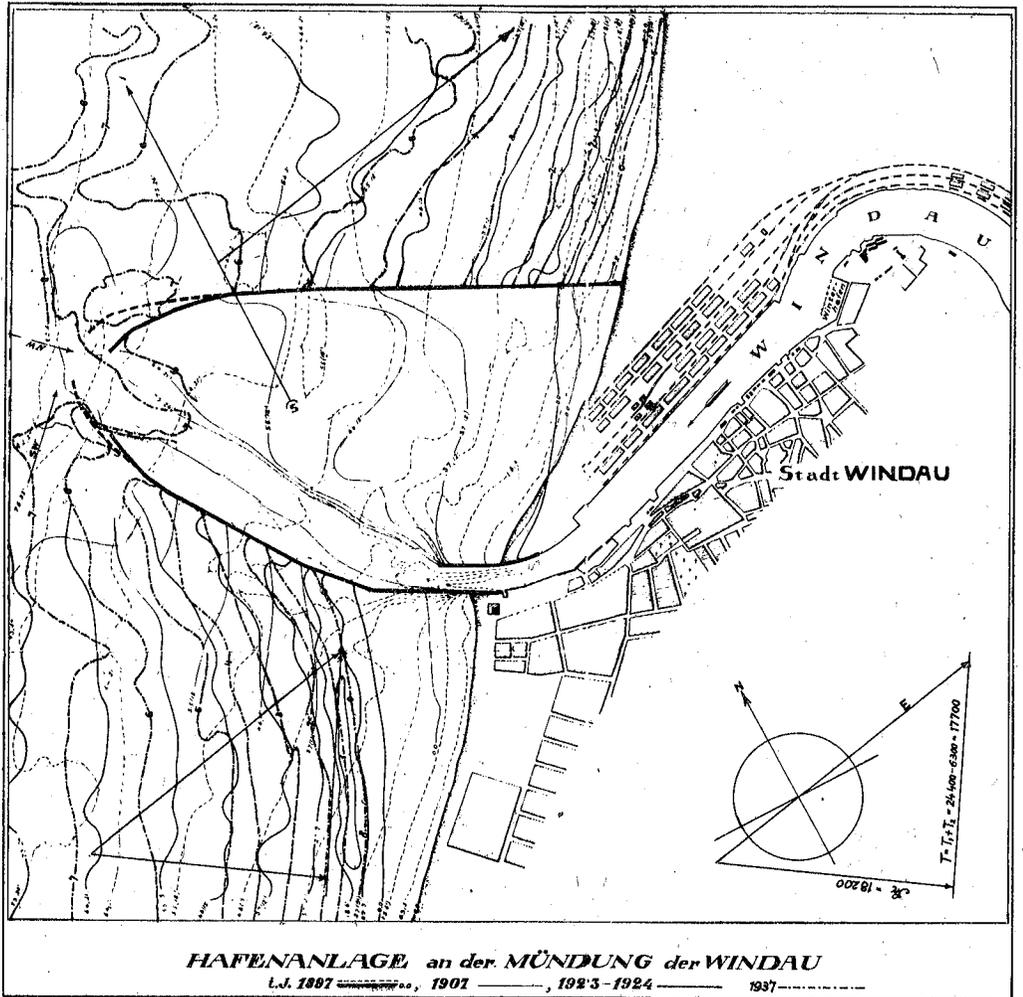
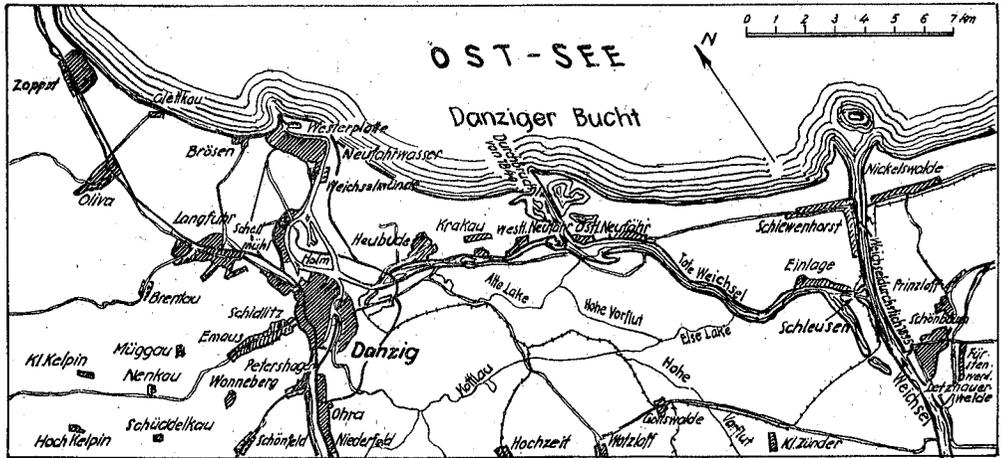
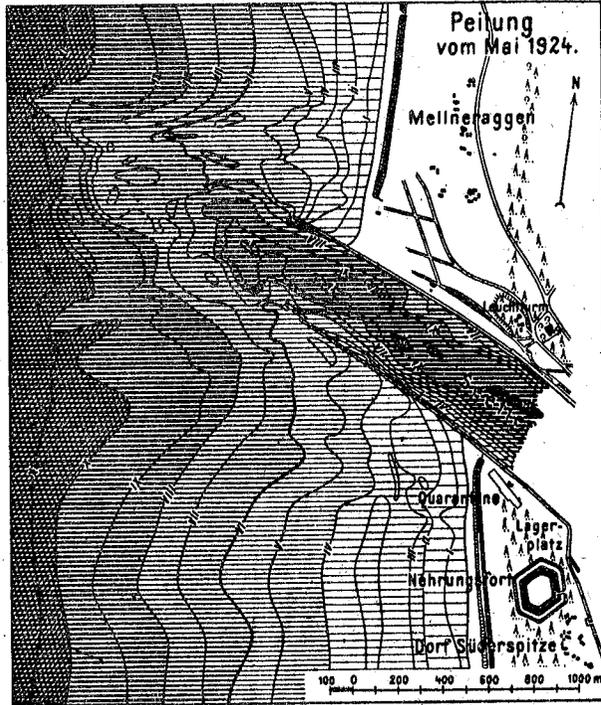


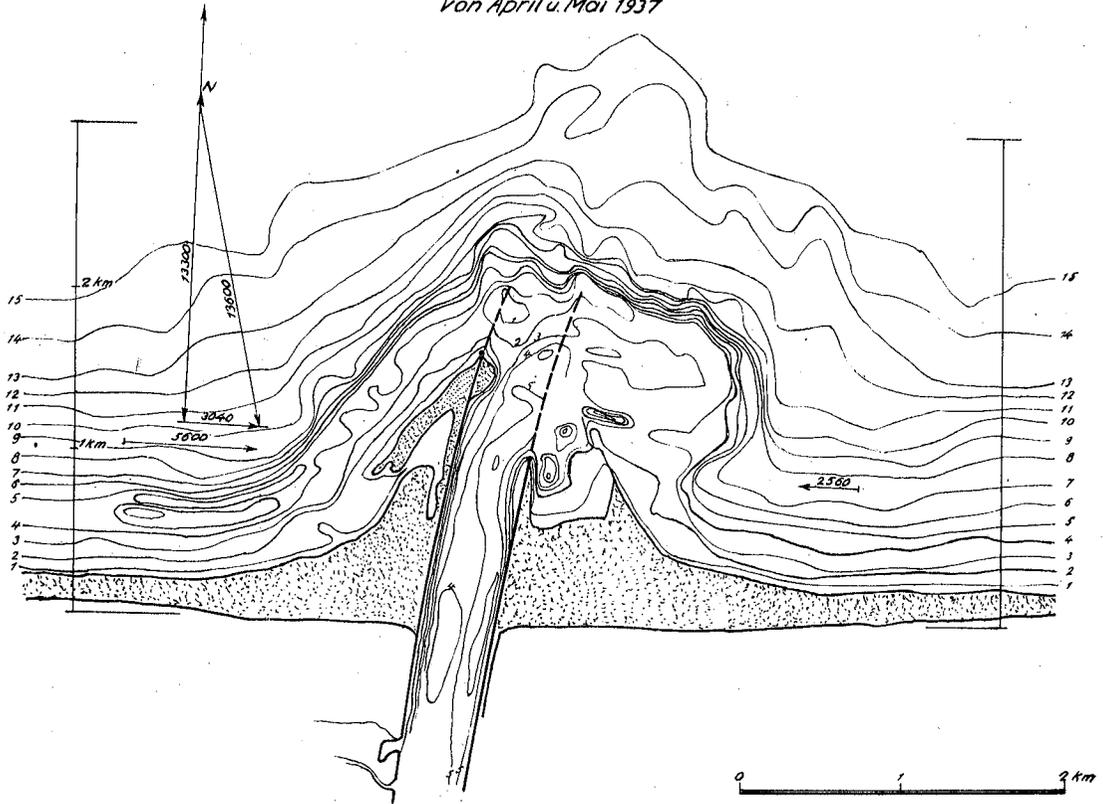
Abb. 2-3

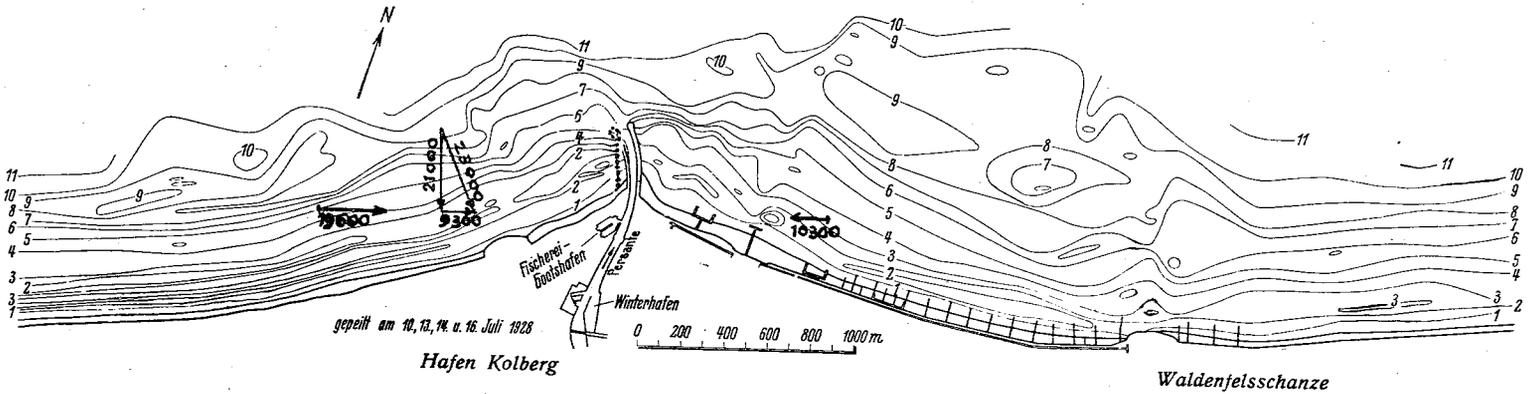
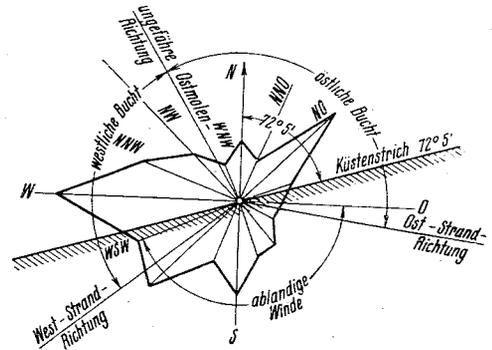
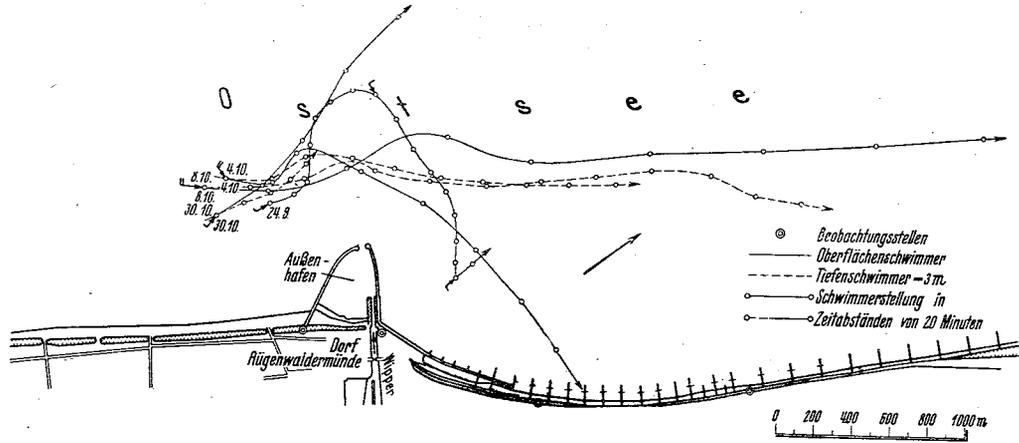




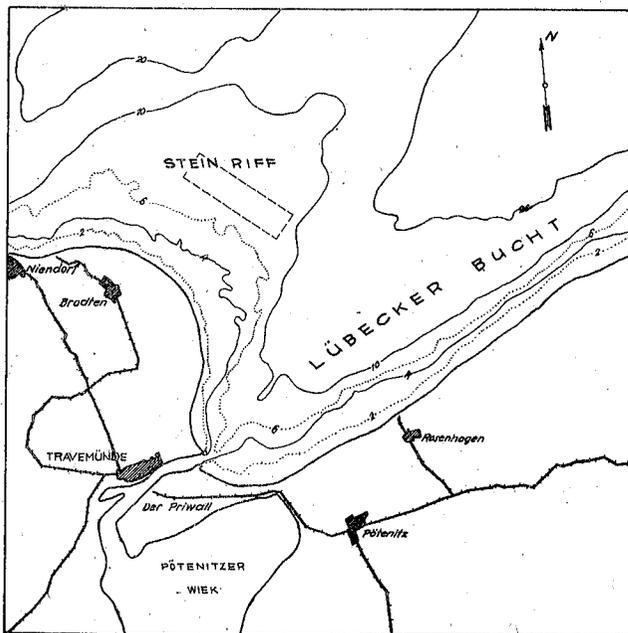


*Tiefenplan
von April u. Mai 1937*





Die Lübecker Bucht



Tiefenlinien

