

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Erneuerung des Wassers in der Kieler Bucht im Verlaufe eines Jahres am Beispiel 1960/61¹⁾

Von JOACHIM KRUG

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit behandelt die Frage der Wassererneuerung in der Kieler Bucht unter besonderer Berücksichtigung der bodennahen Schichten aufgrund von 13 Untersuchungsfahrten mit F. K. „Hermann Wattenberg“ 1960/61. Die Erneuerung des Wassers in Bodennähe ist fast ausschließlich von der Zufuhr sauerstoffreichen Wassers durch den Großen Belt abhängig. Das zuströmende Wasser breitet sich dabei zunächst im Ostteil der Kieler Bucht aus und fließt dann durch eine Rinne südlich Veisnäs Flak — in selteneren Fällen auch nördlich Veisnäs Flak — in die dem Kleinen Belt vorgelagerten Becken. Von hier aus wird auch das Wasser der Eckernförder Bucht erneuert.

Die Erneuerung des Wassers durch Vertikalkonvektion, wie sie im Winter bei lange andauernden Einstromlagen erfolgen kann, beginnt am Nordostausgang der Kieler Bucht. Im Westteil der Bucht bleibt wegen des verhältnismäßig schmalen und flachen Ausgangs durch den Kleinen Belt stets eine halin bedingte Schichtung bestehen.

The Renewal of Water in the Kiel Bay during a Year concerned on the Example of 1960/61 (Summary): The present work is treating the renewal of water in the Kiel Bay especially regarding the layers near the bottom of the sea resting upon 13 research cruises by F. K. „Hermann Wattenberg“ in the year 1960/61.

The renewal of water near bottom nearly exclusively depends on the conveyance of water rich in oxygen through the „Großer Belt“. The water coming from the „Großer Belt“ first of all enlarges on the eastern part of the Kiel Bay, then it is flowing through a channel south of „Veisnäs Flak“ — sometimes also north of „Veisnäs Flak“ — to the basins near the „Kleiner Belt“. From here the water of the „Eckernförder Bucht“ will be renewed too.

The renewal of water by vertically convection — possible in winter during a continued stream from the Kattegat to the Baltic — is beginning at the north-eastern entrance of the Kiel Bay. In the western part of the bay always at least two layers of water caused by salinity by reason of the comparatively narrow and flat outlet through the „Kleiner Belt“ are maintained.

1. Einleitung

a) Aufgabe der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll zur Klärung des Problems der Wassererneuerung in der Kieler Bucht beitragen. Die Lösung dieser Frage gestaltet sich in diesem Seegebiet, das als Teil des Übergangsbereiches zwischen Nord- und Ostsee anzusehen ist, schwierig, weil man es mit einem stark geschichteten Meer bei großer Veränderlichkeit der hydrographischen Verhältnisse zu tun hat.

Die Erneuerung des Wassers in einem Seegebiet wird durch vier Faktoren bestimmt:

1. Die Zufuhr aus benachbarten Seegebieten durch Strömung
2. Die Vertikalkonvektion
3. Die festländischen Zuflüsse
4. Den Wasserumsatz mit der Atmosphäre durch Verdunstung und Niederschlag

¹⁾ Gekürzte Fassung der gleichlautenden Dissertation des Verfassers (Mai 1963), ausgeführt mit Förderung des Direktors des Institutes für Meereskunde der Universität Kiel, Herrn Prof. Dr. G. DIETRICH. Die Beobachtungswerte, auf sich die vorliegende Arbeit stützt, sind dort aufgeführt.

Für die Betrachtung der Kieler Bucht können die beiden letzten Faktoren vernachlässigt werden. Die festländischen Zuflüsse sind unbedeutend, da die Wasserscheide zwischen Nord- und Ostsee in den angrenzenden Gebieten nahe der Ostsee verläuft. Der Überschuß des Niederschlages über die Verdunstung läßt sich nach W. BROGMUS (1952) unter der Voraussetzung, daß für die Kieler Bucht die gleichen Verhältnisse gelten wie für die gesamte Beltsee, mit etwa $0,147 \text{ km}^3/\text{Jahr}$ berechnen und ist damit verschwindend klein gegenüber der jährlichen Durchflußmenge von Ostseewasser durch den Fehmarnbelt von etwa $479 \text{ km}^3/\text{Jahr}$.

Die Hauptaufgabe dieser Arbeit erstreckt sich darauf, die Wirkung der Wasserzufuhr aus den benachbarten Seegebieten und die Vertikalkonvektion zu erfassen. Beides sind räumlich wie zeitlich stark veränderliche Vorgänge.

Da bisher keine ausreichenden Beobachtungen vorlagen, mußte die hydrographische Schichtung in ihrer räumlichen Verteilung aufgenommen werden. Diese Aufnahmen mußten wenigstens über ein Jahr ausgedehnt werden, da starke jahreszeitliche Schwankungen bekannt waren. Auf besondere Strommessungen mußte dabei verzichtet werden, da nur kontinuierliche Messungen an mehreren Punkten über verschiedene Tiefenhorizonte zu brauchbaren Ergebnissen für diese Aufgabenstellung geführt hätten. Das jedoch wäre mit einem zu großen technischen Aufwand verbunden gewesen.

b) Bodentopographie

Der Durchstrom durch die Kieler Bucht ist örtlich sehr unterschiedlich in der Wirkung, was in hohem Maße von der Küstengestalt und der Bodentopographie bestimmt ist. Diese Topographie sei daher zunächst unter dem Gesichtspunkt dieser Untersuchung gekennzeichnet.

In ihrer äußeren Gestalt kann die Kieler Bucht grob gesehen als Rechteck betrachtet werden mit einer Kantenlänge von ca. 35 sm in der Ost-Westrichtung und ca. 25 sm in der Nord-Südrichtung. Begrenzt wird sie im Westen und Süden durch die Schleswig-Holsteinische Küste, im Norden durch die Dänischen Inseln Alsen, Aerö und Langeland und im Osten durch die Insel Fehmarn. An der Nordostecke hat sie über den Großen Belt und den Fehmarnbelt Zugang zur eigentlichen Ostsee und zum Kattegat. Der Kleine Belt als Nordwestausgang hat für den Wasserhaushalt nur sekundäre Bedeutung. Der Fehmarnsund im Südosten der Kieler Bucht bleibt für den Wasseraustausch praktisch bedeutungslos.

Die Bodentopographie der Kieler Bucht (Abb. 1) wird beherrscht durch eine Rinne von etwa 25—35 m Tiefe, die das ganze Gebiet in ost—westlicher Richtung vom Fehmarnbelt bis zum Kleinen Belt durchläuft. Eine zweite Rinne stößt vom Großen Belt kommend nahezu senkrecht auf die erste Rinne. Abgesehen von diesem Rinnensystem ist der Ostteil der Kieler Bucht bei einer durchschnittlichen Tiefe von 18—20 m nur schwach gegliedert.

Die topographischen Hauptmerkmale im Westen sind zwei große Flachs, das Veisnäs Flak im Norden und der Stollergrund mit dem Gabelsflach im Süden. Das Veisnäs Flak teilt die große Ost-Westrinne in zwei Arme. Der südliche Arm erstreckt sich bis in die dem Kleinen Belt vorgelagerten Becken. Der Nordarm wird an seiner Ostseite durch einen etwa 22 m tiefen Sattel gegen den Fehmarnbelt abgeschlossen. Der Stollergrund trennt die bodennahen Schichten des gesamten Südwestens der Kieler Bucht von den tiefen Regionen der übrigen Kieler Bucht. Die Eckernförder Bucht hat allerdings von Schlei- münde durch eine 35 m tiefe aber sehr schmale Rinne Zugang zum Kleinen Belt.

Die Kieler Förde ist eine lokale Senke mit Tiefen bis zu 23 m. Die ca. 10 m tiefe Stollergrundrinne stellt eine Verbindung zur Eckernförder Bucht her. Eine bis zu 16 m tiefe Rinne östlich des Gabelsflach bildet einen Zugang zum Ostteil der Kieler Bucht.

c) Bisheriger Stand der Kenntnisse

Es gibt wenige Seegebiete, in denen derart vielfältige und extreme hydrographische Gegebenheiten auf so engem Raum anzutreffen sind, wie gerade in der Beltsee. Die Kieler Bucht als Teil des Austauschgebietes zwischen der Nordsee und dem Kattegat auf der einen Seite und der Ostsee auf der anderen Seite kann dabei von Wassermassen aller drei Seegebiete berührt werden, sie können sogar gleichzeitig angetroffen werden (H. WATTENBERG, 1941). Außer Nordseewasser mit mehr als 30‰ und Ostseewasser mit weniger als 10‰ Salzgehalt spricht man hierbei von Zwischenwasser, bei dem es sich um Oberflächenwasser aus dem Kattegat oder um Mischwasser aus den Belten handeln kann. Der Übergang vom salzreichen Nordseewasser zum salzarmen Ostseewasser verläuft dabei nicht wie früher angenommen kontinuierlich, sondern sprungartig in Fronten (G. NEUMANN, 1940 und H. WEIDEMANN, 1948), die sich mit den Strömungen verlagern.

Die auftretenden Strömungen beruhen auf drei Komponenten: dem Gezeitenstrom, einer ständigen Ausstromkomponente infolge der starken festländischen Zuflüsse in die Ostsee und — als stärkstem Moment bezüglich des Wasseraustausches — den windbedingten Stromkomponenten: direkter Windstrom, Gefällstrom infolge Windstaus und Konvektionsstrom (G. DIETRICH, 1951). Die Gezeitenstromkomponente bleibt ohne wesentliche Bedeutung für den Austausch, da die Geschwindigkeit des Gezeitenstromes im Fehmarnbelt, wie von G. THIEL (1943) und H. THORADE (1943) übereinstimmend festgestellt wurde, bei 4 bis 6 cm/sec liegt mit seltenen Maxima bis etwa 10 cm/sec. Das würde bei einer sechsständigen Stromdauer einem maximalen Wassertransport von ca. $1\frac{1}{4}$ Meile entsprechen. Da diese Strombewegung außerdem einem periodischen Richtungswechsel unterworfen ist, bleibt sie damit für den Wasseraustausch praktisch ohne Bedeutung. An der Oberfläche setzt wegen des Wasserüberschusses der Ostsee aufgrund starker festländischer Zuflüsse ein ständiger Ausstrom, der allen Stromänderungen stetig überlagert ist und damit ebenfalls keinen nennenswerten Einfluß auf den Wechsel der hydrographischen Verhältnisse ausübt. In Bodennähe setzt dagegen wegen des erheblichen Dichtegefälles Nordsee—Ostsee ein ständiger Einstrom, der nur sehr selten und dann auch nur kurzfristig durch starken windbedingten Ausstrom unterbrochen werden kann, (J. P. JACOBSEN, 1913). Die Grenze zwischen Ausstrom und Einstrom ist im Fehmarnbelt bei etwa 15 bis 20 m Tiefe zu suchen, im Langelandbelt bei etwa 25 m Tiefe.

Die windbedingten Stromkomponenten machen sich auf vielfältige Weise im Wasserhaushalt der Beltsee und damit auch der Kieler Bucht bemerkbar. Ostwinde, wie sie im Idealfall durch ein über Skandinavien festliegendes Hochdruckgebiet verursacht werden, führen stets zu einer Intensivierung des Ausstromes (W. MANEGOLD, 1935/36). Die auf den normalen Zugbahnen nördlich von unserem Gebiet vorbeiziehenden Zyklonen bringen West- oder Südwestwinde mit sich, die den Ausstrom an der Oberfläche zu Einstrom umkehren können. Starke Weststürme führen stets zu einer Erniedrigung des Wasserspiegels im Arkonabecken und zu einem Stau im Kattegat und damit zu einem Gefällstrom in die Ostsee (G. DIETRICH, 1951). Im Extremfall, besonders im Winter kann solch ein Einstrom jede Vertikalschichtung zum Zusammenbrechen bringen. Eine bisher vorhandene Sprungschicht bildet sich dann zu einer Front aus, die sich bis an die Grenzen der Beltsee (Darßer Schwelle) verschieben kann. Starke Ostwinde verursachen auf umgekehrtem Wege einen Gefällstrom aus der Ostsee hinaus und eine Verstärkung der Wasserschichtung, weil sich das ausströmende leichte Ostseewasser über das in der Beltsee vorhandene Wasser höherer Dichte lagert (G. DIETRICH, 1951).

Unabhängig von dem rein windbedingten Oberflächenstrom treten im Herbst und Frühjahr noch zwei jahreszeitlich bedingte, grundsätzlich verschiedene Stromverhält-

nisse auf, die sich auf den Wasserhaushalt der Beltsee entscheidend auswirken. Im Frühjahr wird der Ausstrom an der Oberfläche infolge der durch Schmelzwasser verstärkten Süßwasserzuflüsse in die Ostsee intensiviert. Damit verstärkt sich auch der Einstrom in Bodennähe als Kompensationsstrom (R. KÄNDLER, 1951). Die hiermit angeregte Bildung einer Dichteschichtung wird noch dadurch unterstützt, daß der Bodenstrom zu dieser Jahreszeit meist reines Nordseewasser mit sich führt (H. WATTENBERG, 1941). Eine zusätzliche Intensivierung erfährt diese Stromsituation noch durch die zu dieser Jahreszeit (Mai) meistens vorherrschenden Ostwinde. Im Herbst zur Zeit der Herbststürme aus westlichen Richtungen setzt dagegen ein kräftiger windbedingter Gefällstrom aus dem Kattegat in die Beltsee, treibt das bisherige Beltseewasser in die Ostsee und füllt die Beltsee mit Mischwasser aus dem Kattegat aus (R. KÄNDLER, 1951). Damit wird der Oberflächensalzgehalt erhöht und der Bodensalzgehalt erniedrigt. Zusammen mit den abnehmenden Oberflächentemperaturen bewirkt dieser Strom dann eine Schwächung der Dichteschichtung, in Extremfällen bis zum völligen Zusammenbruch. Damit wird dann auch die Vertikalkonvektion in Gang gesetzt (R. KÄNDLER, 1951).

Weitere Beobachtungen haben ergeben, daß die Verlagerung der Fronten weniger durch die Intensität als durch die zeitliche Dauer eines Stromes begünstigt wird (H. WATTENBERG, 1941). Dabei liegt die Dauer der Ausstromfälle im Durchschnitt um 50% über der Zeitdauer von Einstromfällen. In der Kieler Bucht vollziehen sich die Änderungen der hydrographischen Verhältnisse in der Regel nicht allmählich, sondern in der Art fortschreitender Fronten (H. WATTENBERG, 1949). Alle größeren Veränderungen gehen von der Nordostecke der Kieler Bucht aus. Ein Ausstrom wird sich infolge der ablenkenden Wirkung der Corioliskraft vom Fehmarnbelt aus zunächst in den Großen Belt bewegen und erst in zweiter Linie in die Kieler Bucht vorstoßen. Hier schreitet er, wie Beobachtungen beim Feuerschiff Kiel und an einer Landstation bei Mommark zeigen, an der Nordseite in der Regel am schnellsten voran. Ein Einstrom läuft — ebenfalls infolge der Corioliskraft — vom Großen Belt kommend zunächst in die Kieler Bucht und fällt der Ausstromfront gleichsam in den Rücken (H. WATTENBERG, 1941). Einstrom setzt ebenfalls durch den Kleinen Belt, tritt aber in der Wasserzusammensetzung erst sehr spät — nach einem etwa 14 Tage andauernden Einstrom — in Erscheinung, weil er gegenüber dem Strom aus dem Großen Belt wegen des geringen Wirkquerschnittes des Kleinen Belt (etwa $\frac{1}{13}$ des Großen Belt) wesentlich weniger intensiv ist und zunächst aufgestautes Wasser aus dem Kleinen Belt mit sich führt (H. WATTENBERG, 1949). Im folgenden soll untersucht werden, inwieweit sich die oben angeführten Vorgänge auf das Geschehen in den tieferen Regionen der Kieler Bucht auswirken.

2. Verwendete Beobachtungen

Großräumige hydrographische Untersuchungen in der Kieler Bucht über einen längeren Zeitraum hinaus lagen bisher nicht vor. So wurde zunächst ein Netz von 57 Beobachtungspunkten geschaffen, mit dem alle hydrographisch wichtigen Punkte der Kieler Bucht erfaßt werden konnten (Abb. 2). Sie wurden in einem jeweils dreitägigen Turnus mit dem Forschungskutter „Hermann Wattenberg“ abgefahren. Um mit Sicherheit einen vollen Jahresgang zu erfassen, erstreckten sich die Untersuchungen über dreizehn Monate mit monatlichen Ausfahrten von März 1960 bis März 1961 einschließlich (s. Tab. 1).

Um die dreizehn Ausfahrten einer hydrographischen Gesamtsituation zuordnen zu können, wurden die vom Deutschen Hydrographischen Institut Hamburg veröffentlichten Beobachtungen der drei deutschen Ostseefeuerschiffe Kiel, Flensburg und Feh-

Tabelle 1. Übersicht über die Ausfahrten und Untersuchungen

Lfd. Nr.	Reisedauer		Anzahl der Stationen	davon doppelt	Anzahl der Proben			
	von — bis	Tage			S‰	T°	O ₂	
1	1.— 4.	3. 60	4	66	3	253	286	221
2	5.— 8.	4. 60	4	65	3	251	283	219
3	17.—20.	5. 60	4	65	3	251	283	219
4	14.—16.	6. 60	3	57	1	230	230	171
5	12.—14.	7. 60	3	57	1	230	230	171
6	16.—18.	8. 60	3	57	1	230	230	171
7	6.— 8.	9. 60	3	57	1	230	230	171
8	27.—29.	10. 60	3	56		227	227	169
9	22.—24.	11. 60	3	57	1	230	230	171
10	20.—22.	12. 60	3	57	1	230	230	171
11	25.—27.	1. 61	3	57	1	230	230	171
12	22.—24.	2. 61	3	57	1	230	230	171
13	15.—17.	3. 61	3	57	1	230	230	171
Summe			42	765	18	3052	3149	2367

Gesamtsumme der Proben:

8 541

marnbelt herangezogen. Besonders gute Dienste für die Einordnung in die verschiedenen Stadien von Ein- und Ausstrom der Ostsee leisteten dabei die vierstündlichen Strombeobachtungen auf Feuerschiff Fehmarnbelt.

Die Ausfahrten von „Hermann Wattenberg“ konnten nicht einer jeweiligen Aus- oder Einstromlage angepaßt werden, sondern mußten in Form vorher festgelegter Terminfahrten durchgeführt werden. Die insgesamt 13 Ausfahrten gaben Einblick in verschiedene Stadien der Ein- und Ausstromlagen. Sie werden an dieser Stelle nicht alle diskutiert, sondern es werden für Sommer und Winter je eine möglichst ausgeprägte Aus- und Einstromsituation erfaßt.

An den Beobachtungsstationen wurden die Temperaturverteilung gemessen, sowie Wasserproben zur Salzgehalts- und Sauerstoffbestimmung entnommen. An ausgewählten Punkten geschah es in 5-m-Abständen (s. Abb. 2), an den übrigen in drei Tiefenlagen.

Die Bestimmung des Salzgehaltes aus den Wasserproben erfolgte auf refraktometrischem Wege und lieferte unter Berücksichtigung aller möglichen Fehlerquellen Werte mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ S‰. Diese Genauigkeit reicht für die in der Kieler Bucht auftretenden hohen Salzgehaltsunterschiede voll aus.

Der Sauerstoffgehalt wurde in mg O₂/l Wasser durch Titration an Bord bestimmt. Später erfolgte auf tabellarischem Wege die Umrechnung auf Sättigungsprozente. Wie Untersuchungen von K. GRASSHOFF (1962) mit einer elektrochemischen Bestimmungsmethode ergeben haben, sind die durch manuelle Titration gefundenen Werte bei Wasser mit geringer Sauerstoffkonzentration infolge unvermeidbarer Fehler beim Abfüllen der Proben als zu hoch anzusehen. Bei einem durch Titration gefundenen Sauerstoffgehalt von etwa 5 Sättigungsprozenten und darunter muß man sogar mit der Anwesenheit von Schwefelwasserstoff rechnen.

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 1)

Abb. 1: Tiefenkarte der Kieler Bucht.

Abb. 2: Lage der angelaufenen Stationen und der benutzten Vertikalschnitte.

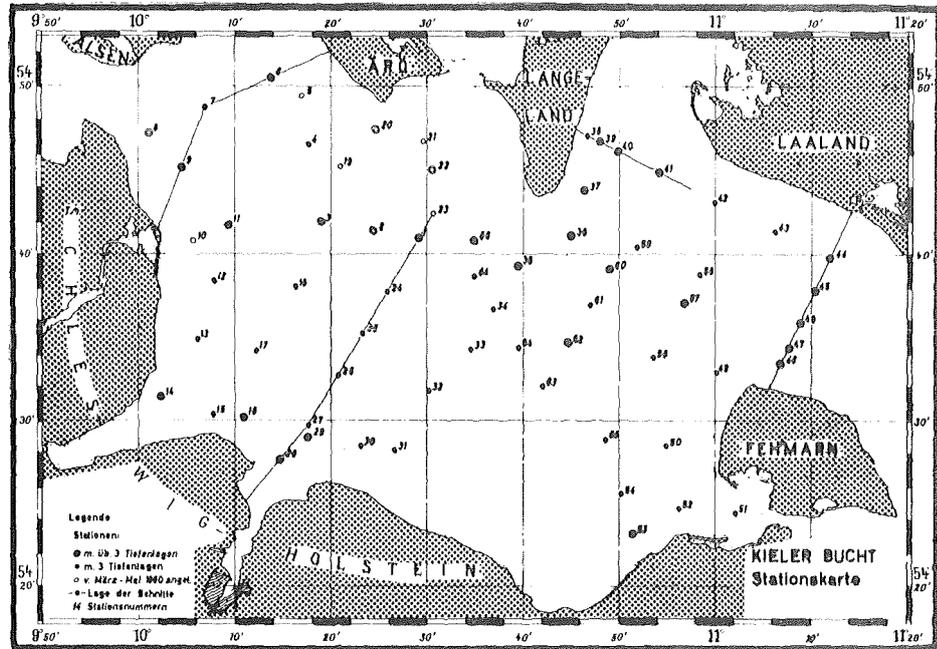


Abb.1

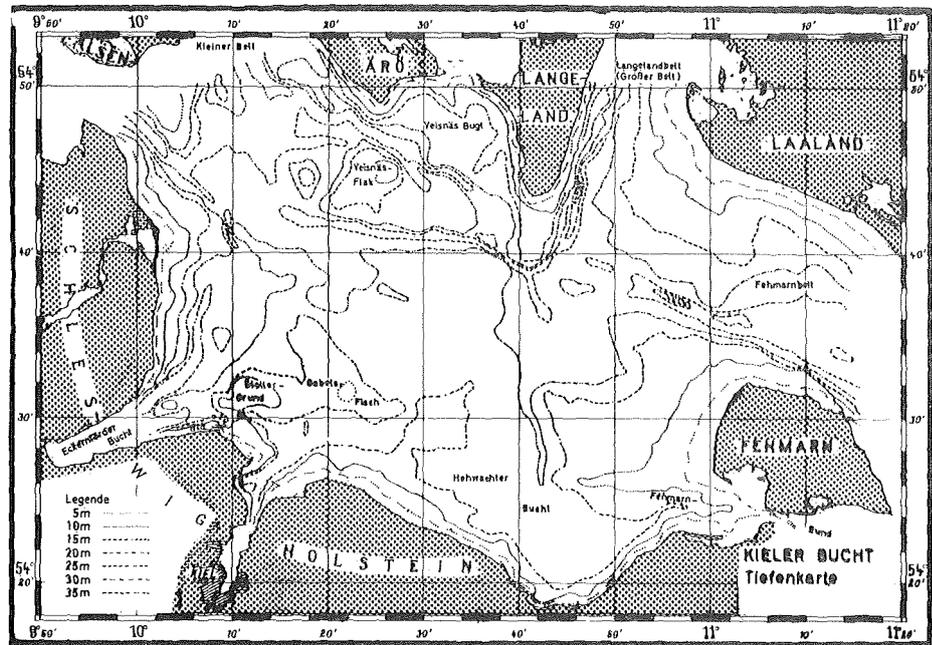


Abb.2

Mittlerer Jahrgang 1951 bis 1960

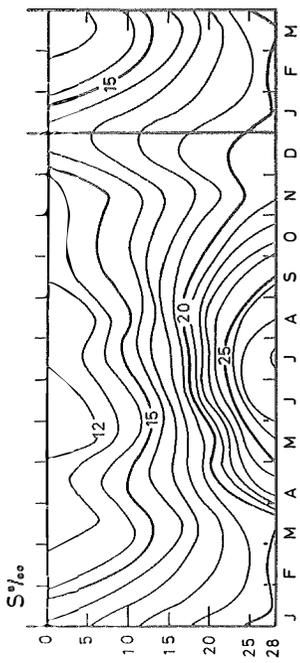


Abb. 3a

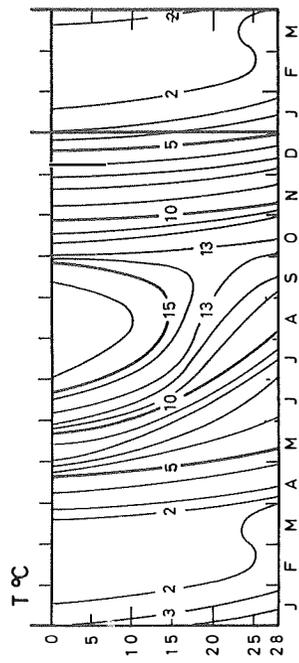


Abb. 4a

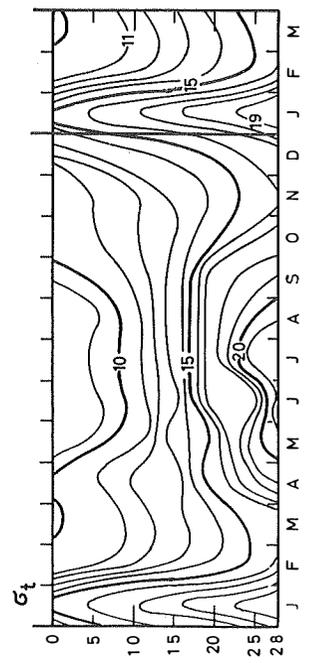


Abb. 5a

Aktueller Jahrgang 1960/61

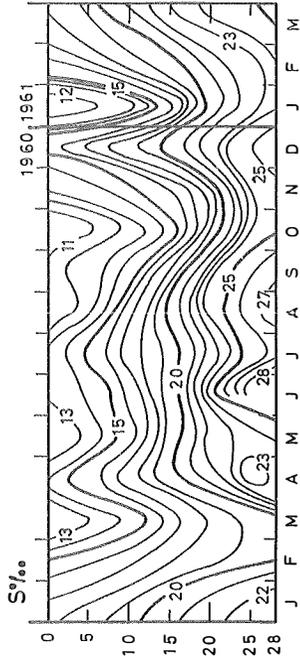


Abb. 3b

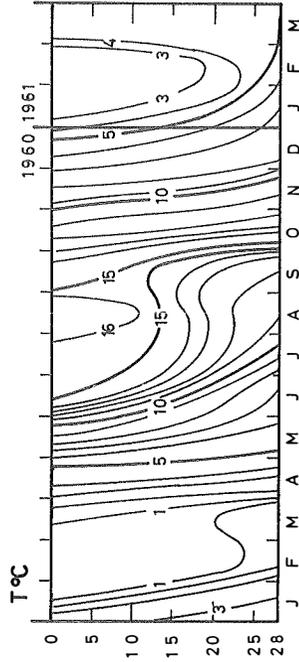


Abb. 4b

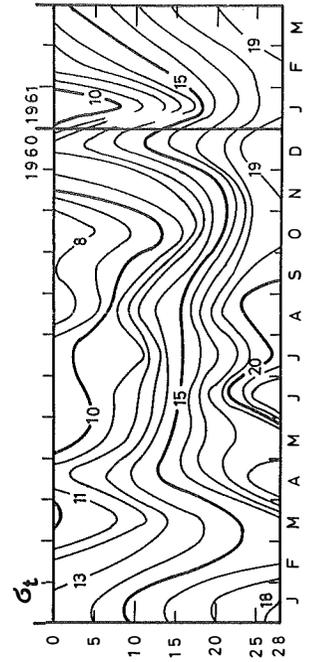


Abb. 5b

3. Mittlerer und aktueller Jahresgang der Schichtung

Im folgenden soll der Jahresgang der Dichteschichtung am Feuerschiff Fehmarnbelt für das Jahr 1960/61 mit dem mittleren Jahresgang der dort auftretenden Schichtung verglichen werden. Dazu werden die Monatsmittel von Salzgehalt, Temperatur und Dichte für die Monate Januar 1960 bis März 1961 graphisch aufgetragen und den über 10 Jahre gemittelten Monatsmitteln der Jahre 1951 bis 1960 gegenübergestellt (Abb. 3 bis 5).

a) Mittlerer Jahresgang

In der graphischen Darstellung der Zehnjahresmittel bestätigen sich die in Kapitel 1c beschriebenen jahreszeitlichen Änderungen (R. KÄNDLER, 1951). Im Januar ist die gesamte Wassersäule mit Wasser zwischen 15 und 20 ‰ ausgefüllt (Abb. 3a). Mit Februar setzt ein Zustrom salzarmen Ostseewassers ein. Ende März erfolgt ein Ansteigen des Bodensalzgehaltes und damit die Ausbildung einer Dichtesprungschicht (Abb. 5a), die sich in den Monaten Juli bis September mit gleichbleibender Intensität konstant in einer Tiefe von ca. 15 Metern hält. Im gleichen Zeitraum ist auch eine wesentliche Temperaturschichtung zu beobachten (Abb. 4a). Bereits im Oktober ist keine eigentliche Dichtesprungschicht mehr vorhanden. Die ganzen Wintermonate bis Anfang März beträgt der Dichteunterschied über die gesamte Wassersäule ungefähr $\Delta\rho = 0,006$, wobei über den Monat Januar eine Dichtezunahme von $\Delta\rho$ ungefähr 0,005 auf Grund einer Salzgehaltzunahme zu verzeichnen ist. Hierdurch wird die Dichteschichtung in sich jedoch nicht beeinflusst.

b) Aktueller Jahresgang

Im Januar 1960 führte ein Ostseewassereinbruch zu einer starken Aussüßung und Abkühlung der gesamten Wassersäule. Im März findet in Übereinstimmung mit den langjährigen Mitteln in den tieferen Schichten eine Salzgehaltzunahme statt, die allerdings wesentlich stärker als normal verläuft, so daß bereits im April in 10 bis 15 Meter Tiefe eine ausgesprochene haline Sprungschicht anzutreffen ist (Abb. 3b). Die im Sommer 1960 vorherrschenden Ostwinde führen zu einem verstärkten Ausstrom an der Oberfläche und damit zu einer ständigen Intensivierung des Dichtesprunges (Abb. 5b). Eine kräftige Zufuhr salzarmen Wassers im Herbst verhindert bis zum Oktober die Auflösung des Dichtesprunges, führt im Gegenteil zu einer weiteren Intensivierung und zur Verlagerung in eine größere Tiefe. Ein starker Ausstrom an der Oberfläche zur Jahreswende 1960/61 bewirkt eine neuerliche Verstärkung der Schichtung. Erst eine extreme Einstromperiode im März 1961 löst die Dichteschichtung auf, und zwar nahezu vollständig. Infolge der besonderen Stromverhältnisse des beschriebenen Winters läßt sich selbst im Februar 1961 noch eine merkbare Temperaturschichtung von $\Delta T = 4^\circ$ erkennen, wobei auch die tiefsten Temperaturen noch 1,5 bis 2° C über den mittleren Temperaturen liegen (Abb. 4b).

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2)

- Abb. 3: a) mittlerer Jahresgang der Salzgehaltsschichtung über 10 Jahre bei Feuerschiff Fehmarnbelt, dargestellt anhand der Monatsmittel des Salzgehaltes von 1951 bis 1960.
b) aktueller Jahresgang der Salzgehaltsschichtung von Januar 1960 bis März 1961, dargestellt anhand der Monatsmittel des Salzgehaltes bei Feuerschiff Fehmarnbelt.
- Abb. 4: a) mittlerer Jahresgang der Temperaturschichtung beim Feuerschiff Fehmarnbelt
b) aktueller Jahresgang der Temperaturschichtung beim Feuerschiff Fehmarnbelt
- Abb. 5: a) mittlerer Jahresgang der Dichteschichtung beim Feuerschiff Fehmarnbelt
b) aktueller Jahresgang der Dichteschichtung beim Feuerschiff Fehmarnbelt

Die im Jahr 1960/61 über das ganze Jahr hinweg stärker als sonst vorherrschenden Ausstromsituationen führen zu einer verstärkten Dichteschichtung und lassen besonders im Herbst und Winter eine wesentlich intensivere Schichtung als normal hervortreten.

4. Erneuerung des Wassers bei Ausstrom und Einstrom

Die hydrographische Struktur der Kieler Bucht wird wie die eines jeden Meeres von den jahreszeitlichen Änderungen der thermohalinen Schichtung bestimmt. Wegen der extrem starken halinen Schichtung der Kieler Bucht bleibt der Zusammenbruch der thermisch bedingten Stabilität im Winter ohne direkten Einfluß auf die gesamte Schichtung.

Ein zweiter, sehr wesentlicher Faktor für die Veränderungen der hydrographischen Verhältnisse der Kieler Bucht sind die Strömungsverhältnisse in der Beltsee, für uns repräsentiert durch Aus- und Einstrom im Fehmarnbelt. Diese Stromlagen bestimmen das hydrographische Bild des besprochenen Seegebietes unabhängig von den jahreszeitlichen Veränderungen und sind in ihren Auswirkungen oftmals wesentlich einschneidender, so daß es sinnvoll erscheint, das Problem der Wassererneuerung im Hinblick auf verschiedene Stromsituationen zu betrachten.

Um eine sinnvolle Auswahl der im folgenden behandelten vier Situationen zu ermöglichen, wurden die Meßergebnisse der jeweiligen Ausfahrten zu den Beobachtungen des Feuerschiffes Fehmarnbelt in Beziehung gesetzt. Die Routinebeobachtungen des genannten Feuerschiffes im fraglichen Zeitraum wurden graphisch aufgetragen und ergaben damit ein Bild des jahreszeitlichen Verlaufes von Temperatur und Salzgehalt am Boden und an der Oberfläche, sowie des Oberflächenstromes über den gesamten Untersuchungszeitraum. Um ein deutlicheres Bild der hydrographischen Verhältnisse zu erhalten, wurden nicht die in situ gemessenen Stromwerte direkt aufgetragen, sondern aufsummiert und als Stromsummenkurve über die fragliche Zeit dargestellt (Abb. 6). Bei der Aufsummierung der Stromwerte wurden alle Werte von 26° über Ost und Süd bis 205° einschließlich als Einstrom und alle Werte von 206° über West und Nord bis 25° einschließlich als Ausstrom gewertet.

Für das Winterhalbjahr gestaltete sich die Auswahl der Beispiele recht einfach. Für die Ausstromsituation lag eine Beobachtung Ende Januar 1961 vor am Ende einer fast 8 Wochen andauernden Ausstromperiode und für eine Einstromlage Mitte März 1961 nach einem bereits zwei Woche andauernden intensiven Einstrom. Weniger günstig verteilten sich die Ausfahrten über das Sommerhalbjahr. Für eine Ausstromlage wäre im Mai 1960 ein anscheinend günstiger Beobachtungsfall gegeben. Zu dieser Zeit bildete sich jedoch erst eine sommerliche Sprungschicht heran, so daß zu diesem Zeitpunkt noch keine repräsentativen Aussagen über die Erneuerung des Wassers zu Zeiten sommerlicher thermohaliner Schichtung gemacht werden konnten. So mußten für die Darstellung der Erneuerung im Sommerhalbjahr die Beobachtungen von Juli 1960 für eine Ausstromlage und von August 1960 für eine Einstromlage herangezogen werden. In beiden Fällen setzte der jeweilige Strom erst seit wenigen Tagen, sie fielen aber als einzige Beobachtungen zu Zeiten nennenswerter Strombewegungen in die Zeit der sommerlichen thermohalinen Schichtung. Allerdings versprachen die beiden so dicht beieinanderliegenden Beobachtungen auch Angaben zu liefern über Änderungen der Schichtung innerhalb der Kieler Bucht während zweier aufeinanderfolgender verschiedener Stromlagen.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

Abb. 6: Stromsummenkurve für die Oberfläche, sowie Salzgehalts- und Temperaturgang für Oberfläche und Boden beim Feuerschiff Fehmarnbelt von Februar 1960 bis März 1961.

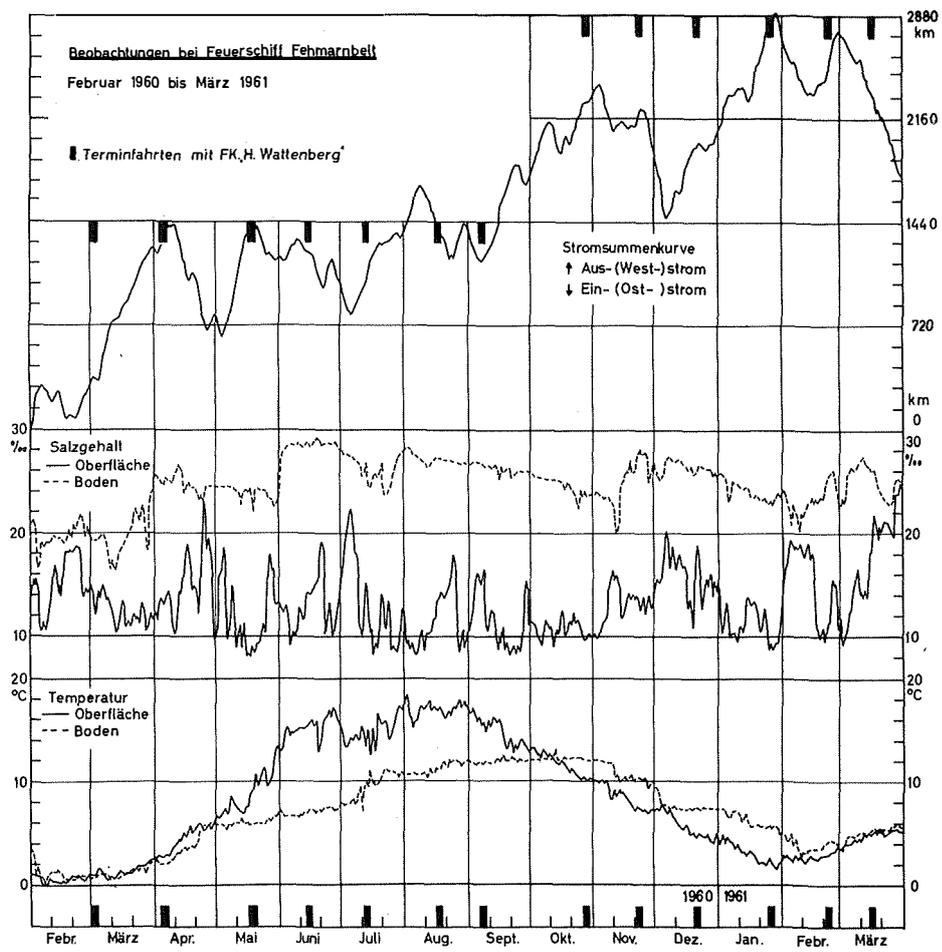


Abb. 6

Tafel 3 (zu J. Krug)

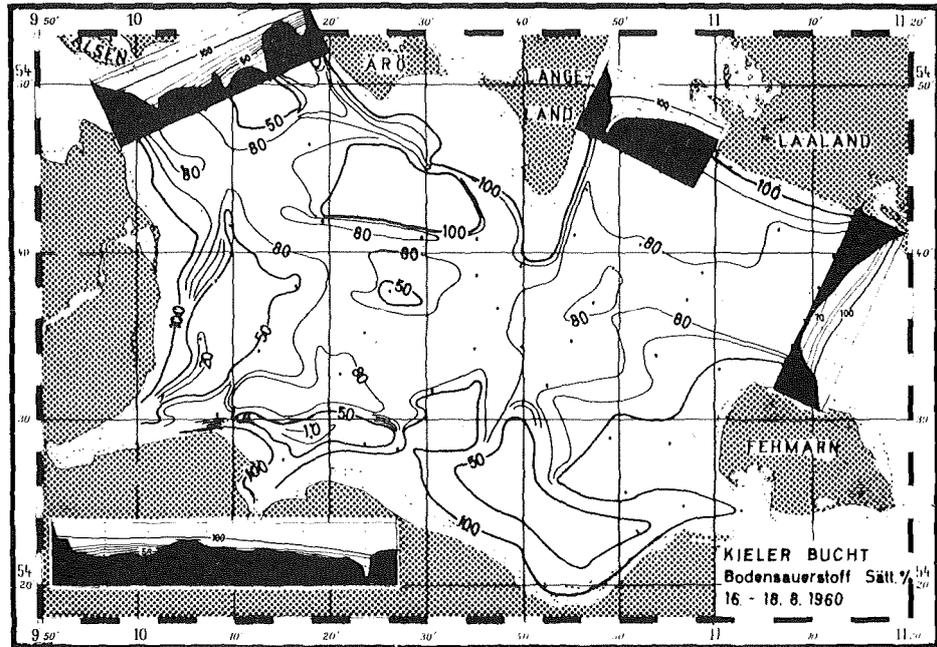


Abb.7

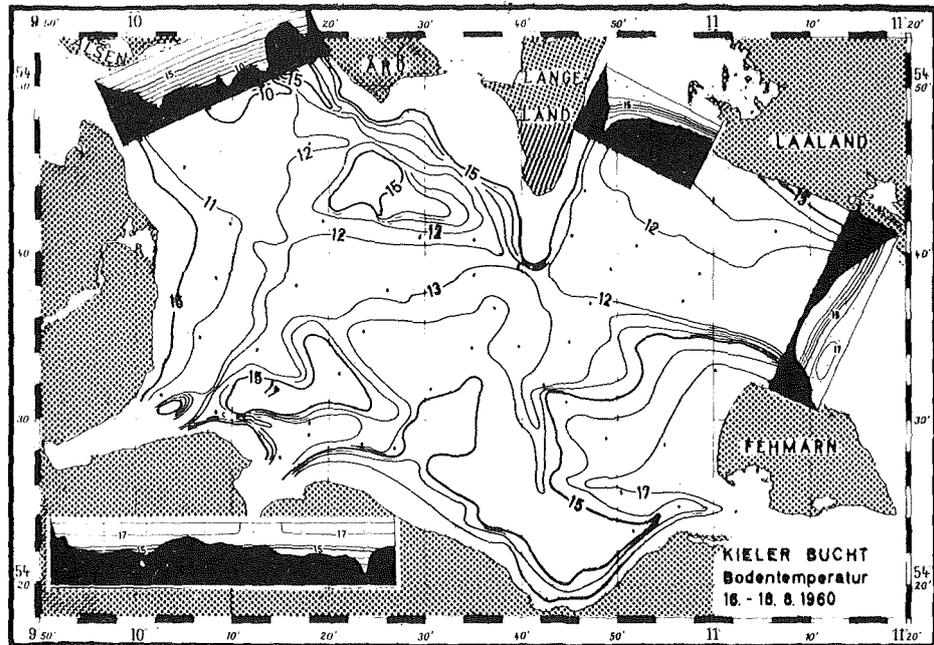


Abb.8

4a) Erneuerung des Wassers bei Einstrom

Sommer (16.—18. 8. 1960).

Vor der Meßfahrt mit „Hermann Wattenberg“ hatte anschließend an einen 32 Tage andauernden Ausstrom seit 10 Tagen ein Einstrom in die Ostsee gesetzt (Abb. 6). Mit Beginn des Einstromes nimmt der Oberflächensalzgehalt im Fehmarnbelt ständig zu — im Verlauf des gesamten Einstromes um $10 S^0/00$. Am Boden führt dieser Einstrom zu keiner wesentlichen Änderung. Man kann jedoch etwa eine Woche vor Beginn des Einstromes einen beträchtlichen Salzgehaltsanstieg am Boden beobachten (Ende Juli), der über die folgenden drei Monate im wesentlichen konstant bleibt.

Die Front, die den Salzgehaltsanstieg in Bodennähe verursacht hat, besteht aus sauerstoffreichem Kattegatwasser aus oberflächennahen Schichten, das mit einem von J. P. JACOBSEN (1913) beschriebenen Bodeneinstrom scheinbar unabhängig vom Geschehen an der Oberfläche die Kieler Bucht erreicht hat und nun den Boden der Kieler Bucht und des Fehmarnbelt in den tiefsten Regionen bedeckt (Abb. 7). Der Boden der Kieler Bucht ist damit im östlichen und mittleren Teil mit sauerstoffreichem Wasser bedeckt, während in den flacheren Randgebieten im Süden und den nur schwer zugänglichen Gebieten im Westen der Kieler Bucht der Sauerstoffgehalt des Wassers erheblich abgenommen hat.

Im Westen stößt das vom Fehmarnbelt her in die Kieler Bucht eingedrungene Bodenwasser auf Wassermassen gleicher Dichte, so daß einer Ausbreitung des zugeströmten Wassers westlich der beiden großen Flachs Stollergrund und Veisnäs Flak eine Grenze gesetzt ist (Abb. 10).

Die Salzgehaltsbeobachtungen am Boden lassen keine genaue Abgrenzung zwischen älterem und jüngerem Bodenwasser erkennen (Abb. 10). Die Schnitte über die Ausgänge der Kieler Bucht weisen jedoch darauf hin, daß sich vom Langelandbelt her am Boden ein Einstrom in die Kieler Bucht schob. Während im Kleinen Belt ein kontinuierlicher Salzgehaltsanstieg über die gesamte Wassertiefe zu beobachten ist, haben sich im Großen Belt und im Fehmarnbelt ausgeprägte Salzgehaltssprungschichten gebildet. Außerdem liegt der Salzgehalt im Langelandbelt mit $28 S^0/00$ um $3 S^0/00$ höher als im Kleinen Belt auf gleicher Tiefe.

Das Bodenwasser ist im Ostteil der Kieler Bucht um etwa $1,5-2^{\circ} C$ wärmer als im Westen auf gleicher Tiefe (Abb. 8). Das Wasser muß also, bevor es den Boden der Kieler Bucht erreichte, mit wärmeren, d. h. höherliegenden Schichten Verbindung gehabt haben. Der verhältnismäßig hohe Salzgehalt in Verbindung mit dem extrem hohen Sauerstoffgehalt und den verhältnismäßig hohen Temperaturen läßt darauf schließen, daß es sich bei diesem Wasser, das hier die tiefsten Regionen der Kieler Bucht beherrscht, um oberflächennahes Wasser aus dem Kattegat handelt, das dadurch in die Tiefe gedrückt wurde, daß sich das salzarme Wasser des Ausstromes, der im Juli im Fehmarnbelt zu beobachten war (Abb. 6), über eine Front von Kattegatwasser schob. Hier gelangte es dann mit dem von J. P. JACOBSEN (1913) beobachteten ständigen Einstrom in den Fehmarnbelt und die Kieler Bucht. Beobachtungen, die diese Feststellung rechtfertigen, werden in Kapitel 6 noch eingehend behandelt werden.

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 4)

Abb. 7: Bodensauerstoff in Sätt. % 16.—18. 8. 1960

Abb. 8: Bodentemperatur in $^{\circ}C$ 16.—18. 8. 1960

Anmerkung: Vertikalschnitte in den Kartendarstellungen Nr. 7 bis Nr. 24 sind 200fach übertieft.

Die Oberfläche wird noch weitgehend vom Wasser der letzten Ausstromperiode beherrscht (Abb. 9). Im Langelandbelt und südlich der Südspitze Langelands ist salzreiches Wasser zu beobachten, das von dem zur Zeit der Beobachtung setzenden Einstrom mitgeführt wurde. 13 Tage nach ihrem Erscheinen im Fehmarnbelt tritt die hier angedeutete Front auch beim Feuerschiff Kiel auf (s. Abb. 25: Monatswechsel Aug./Sept.). Das unter der Insel Ärö vorhandene salzreiche Wasser stammt noch von einem früheren Einstrom her; es ist von dem im Vormonat aufgetretenen Ausstrom nach Nordwesten verlagert worden. Ein Einstrom durch den Kleinen Belt kann in der kurzen Zeit, die der momentane Einstrom andauert, noch nicht im Salzgehalt in Erscheinung getreten sein, besonders, da wegen der ruhigen lokalen Wetterlage dem Einstrom kein Gefällstrom aus der Kieler Bucht in die Ostsee vorhergegangen ist.

Winter (15.—17. 3. 1961).

Zur Zeit der Meßfahrt setzt seit über zwei Wochen ein intensiver windbedingter Einstrom an der Oberfläche in die Ostsee, der bei Feuerschiff Fehmarnbelt einen sehr starken Salzgehaltsanstieg verursacht (Abb. 6). Am Boden sinkt der Salzgehalt nach anfänglichem Anstieg von 23 S⁰/₀₀ auf 28 S⁰/₀₀ rapide ab, bis schließlich nach vier Wochen Einstrom ein völliger Salzgehaltsausgleich mit der Oberfläche geschaffen ist. Im Langelandbelt führt der Einstrom zur Zeit der Untersuchung bereits völlig homogenes Wasser mit einem Salzgehalt von ca. 24,5 S⁰/₀₀ mit sich (Abb. 14). Die homogene Front ist zum Zeitpunkt der Aufnahme (15. 3. 61) wenige Kilometer über die Stationsreihe im Langelandbelt vorgedrungen (vergleiche auf Abb. 13 u. 14 die 24 S⁰/₀₀ und 25 S⁰/₀₀ Isohalinen).

Vom Kleinen Belt dringt Wasser mit einem maximalen Salzgehalt von etwas mehr als 20 S⁰/₀₀ in die Kieler Bucht ein, das im Westen eine homogene Deckschicht von 20 bis 25 Metern Mächtigkeit bildet. Das Fortschreiten der beiden Einstromfronten an der Oberfläche läßt sich am besten an den 20 S⁰/₀₀-Isohalinen verfolgen (Abb. 13). Das bisher an der Oberfläche der Kieler Bucht befindliche Wasser wird nach Südosten zum Fehmarnsund verschoben, durch den es in die Mecklenburger Bucht abfließt. Diese Tatsache ist auf die Wirkung der zu dieser Zeit vorherrschenden starken Westwinde zurückzuführen, die zunächst einen Gefällstrom aus der Kieler Bucht nach Osten erzeugten.

Während der hier beschriebenen Einstromperiode findet von Osten her beginnend eine konvektive Wassererneuerung über alle Tiefenhorizonte statt, da dieser extreme Einstrom schon nach 15 Tagen Dauer völlig homogenes Wasser mit sich führt. Die Sauerstoffbeobachtungen zeigen nach Osten eine ständige Sauerstoffzunahme bis zur Sättigung auch in den tiefsten Regionen (Abb. 11). Von einer Erneuerung ausgenommen waren nur noch die bodennahen Schichten der Eckernförder Bucht und der Kieler Förde. Gegen Ende der Einstromperiode erreichte die vom Kleinen Belt her vordringende Front das Feuerschiff Kiel (Abb. 25) und füllt die Kieler Förde bis zum Boden mit homogenem Wasser aus (Abb. 26).

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 5)

Abb. 9: Oberflächensalzgehalt in S⁰/₀₀ 16.—18. 8. 1960

Abb. 10: Bodensalzgehalt in S⁰/₀₀ 16.—18. 8. 1960

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 6)

Abb. 11: Bodensauerstoff in Sätt. % 15.—17. 3. 1961

Abb. 12: Bodentemperatur in °C 15.—17. 3. 1961

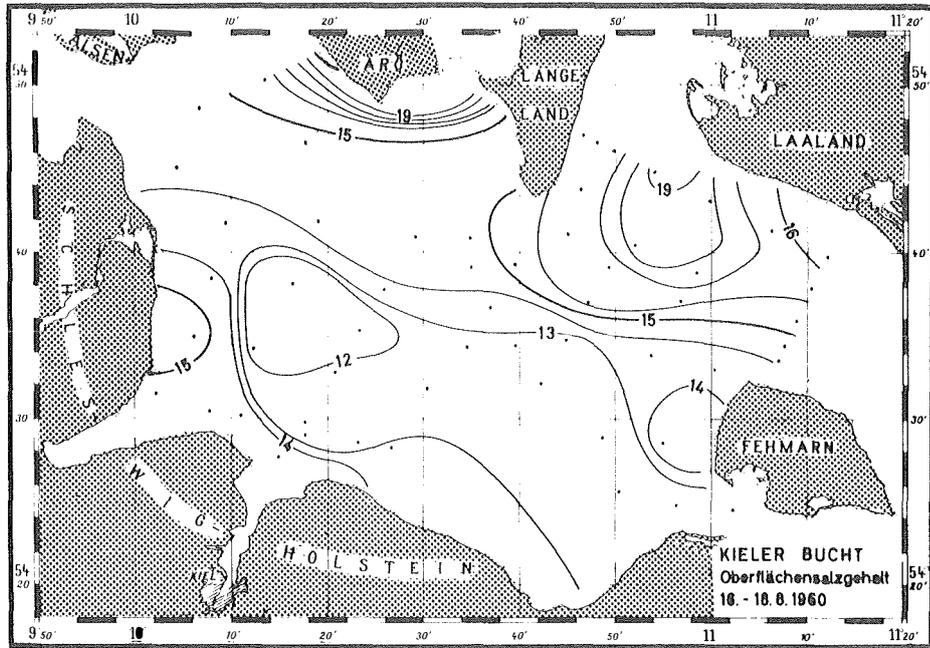


Abb.9

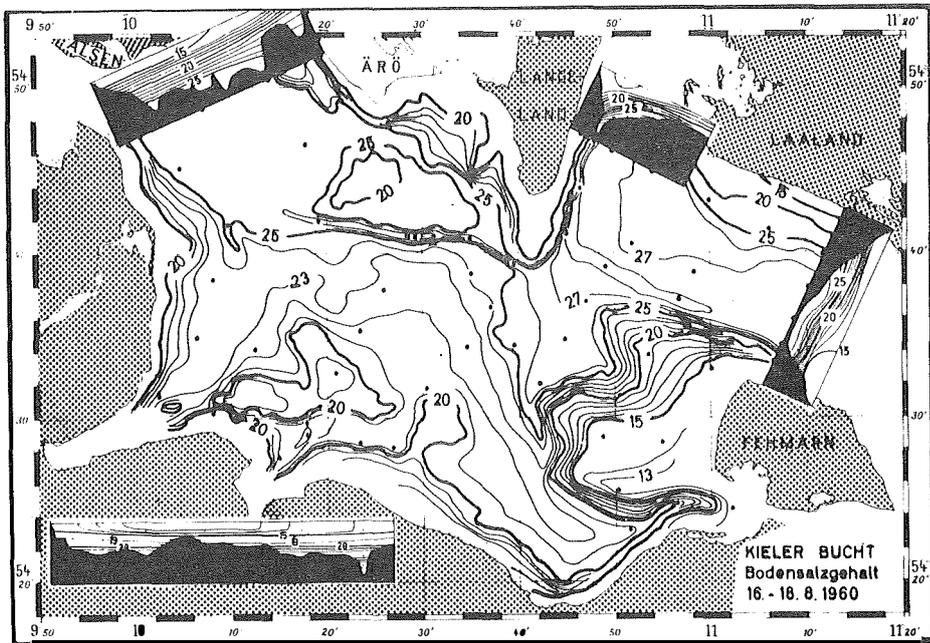


Abb.10

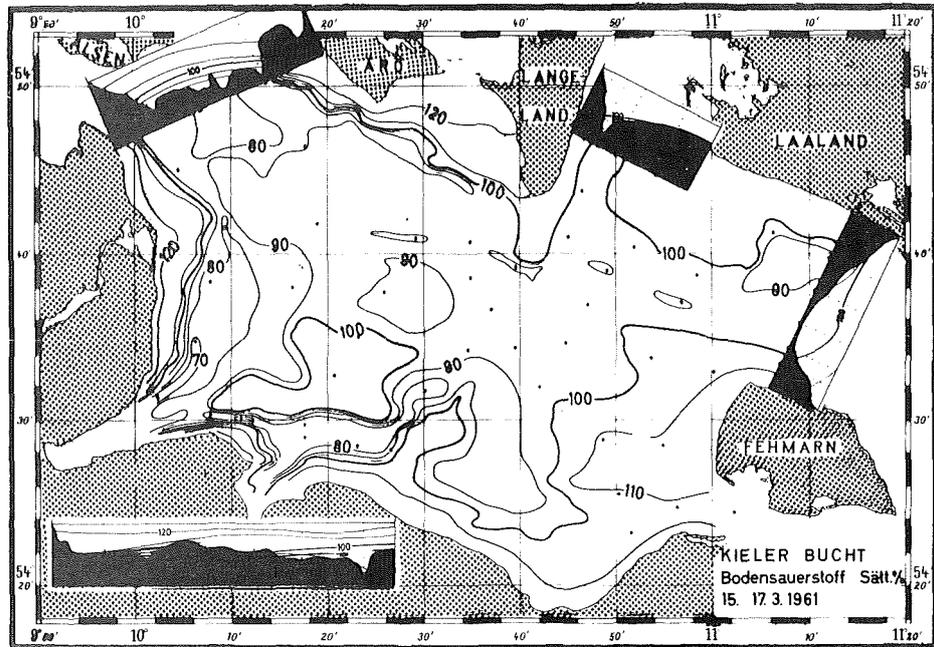


Abb.11

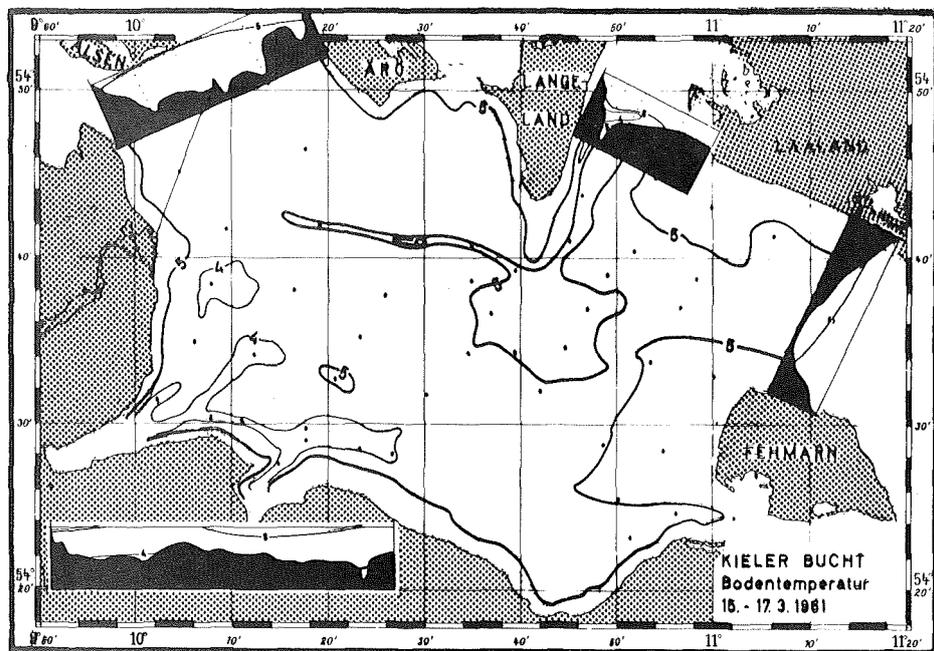


Abb.12

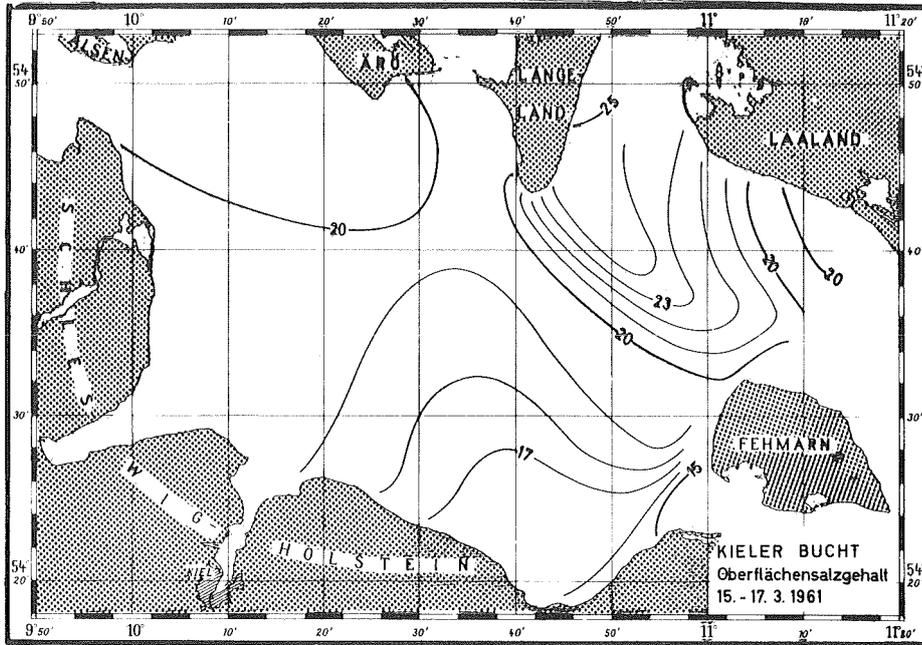


Abb.13

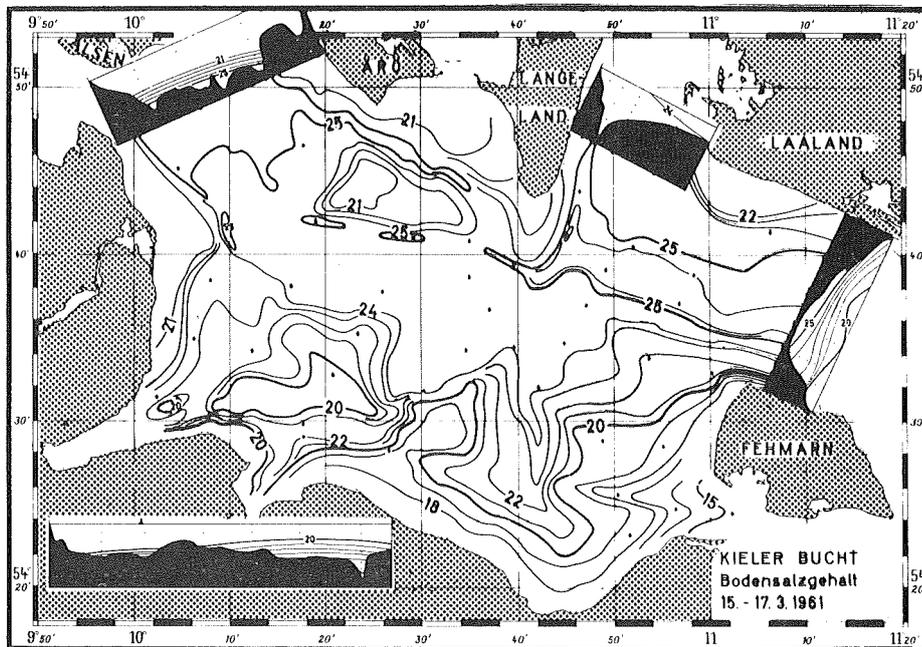


Abb.14

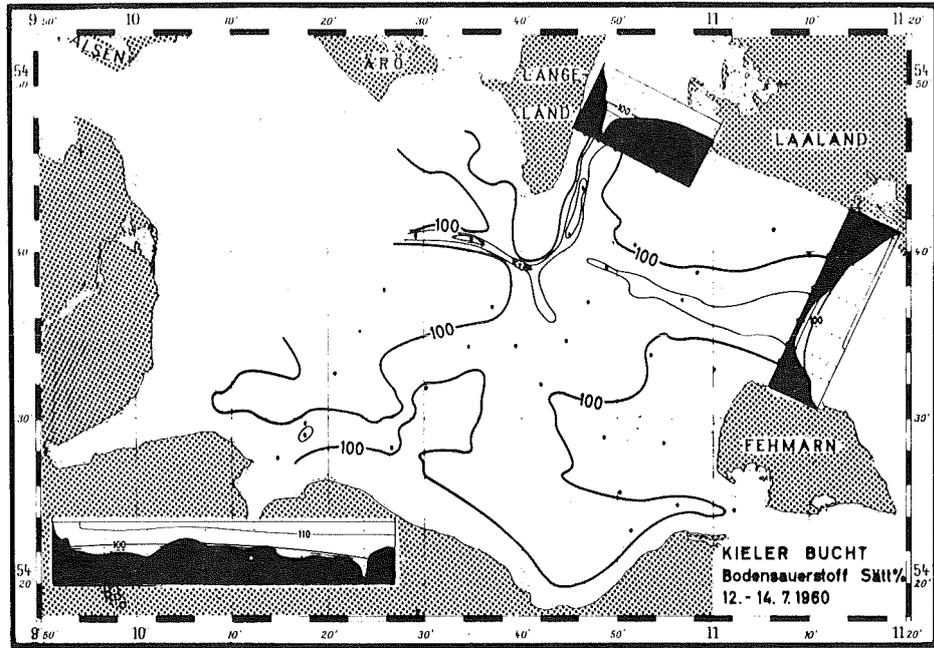


Abb.15

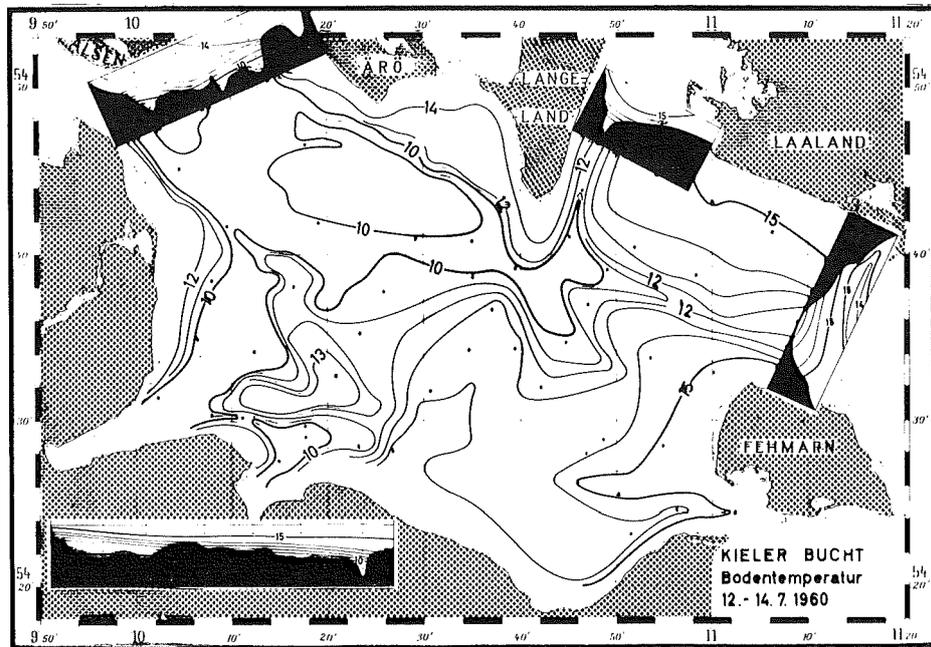


Abb.16

An dieser Stelle kann keine Auskunft darüber gegeben werden, inwieweit die bodennahen Schichten der Eckernförder Bucht in eine Erneuerung durch den beobachteten Einstrom einbezogen sind, da das verhältnismäßig salzarme Wasser, das durch den Kleinen Belt einströmt, den Boden nicht erreicht. Es ist zu vermuten, daß sich die beiden Fronten im Laufe der Zeit überlagern, und die von Osten kommende Front auch die Eckernförder Bucht noch erreichen wird.

Dieser extrem starke und langandauernde Einstrom zu einer Zeit, in der keinerlei thermisch begünstigte Stabilität mehr besteht (Abb. 12), ermöglichte eine Wassererneuerung in der Kieler Bucht durch Vertikalkonvektion, wobei jedoch der Westteil, der an der Oberfläche von der durch den Kleinen Belt eindringenden Front erreicht wird, in den tieferen Regionen schon keine rein konvektive Erneuerung mehr erfährt.

Leider liegen keine Beobachtungen vor über einen solch extremen Einstrom zu Zeiten starker thermohaliner Schichtung, so daß nichts darüber gesagt werden kann, ob ein solcher Einstrom auch dann in der Lage wäre, eine konvektive Wassererneuerung über alle Tiefenhorizonte wenigstens in Teilen der Kieler Bucht herbeizuführen. Da sich die Stabilität der Schichtung in der Kieler Bucht jedoch hauptsächlich auf die Zunahme des Salzgehaltes zum Boden hin stützt (s. a. Kap. 6), ist anzunehmen, daß ein Einstrom, der in der Lage ist, die haline Schichtung völlig aufzulösen, durch Turbulenzerscheinungen auch die thermisch bedingte Stabilität durchbrechen kann. Ein längerer Einstrom im Juni 1960 hat die thermische Schichtung der oberen 20 m Wassertiefe der Kieler Bucht soweit auflösen können, daß zu dieser Zeit eine homogene Schicht über die genannte Tiefe entstehen konnte. Reste dieser Erscheinung sind auf den Abbildungen 15 und 18 noch zu erkennen.

4b) Erneuerung des Wassers bei Ausstrom

Sommer (12.—14. 7. 1960).

Zu Beginn der Meßfahrt setzt durch den Fehmarnbelt seit fünf Tagen ein Ausstrom, der gerade in den Tagen der Untersuchungen erheblich zunahm (Abb. 6). Innerhalb der genannten fünf Tage nahm der Salzgehalt an der Oberfläche bereits um 6 S‰ ab, Der Bodensalzgehalt verringerte sich langsam.

Mit dem Einsetzen der Geschwindigkeitssteigerung wird am Feuerschiff Fehmarnbelt ein kurzer starker Salzgehaltsanstieg an der Oberfläche festgestellt (Abb. 6), der aber auf die Mitte des Fehmarnbelt beschränkt bleibt (Abb. 17). Dieses Phänomen eines örtlichen Salzgehaltsanstieges bei einer Intensivierung des Ausstromes erklärt sich aus der Bernoulli'schen Kontinuitätsbedingung

$$p + \frac{v^2}{2} \rho + g h \rho = \text{const};$$

So tritt mit der Geschwindigkeitserhöhung des Ausstromes eine Verengung des Stromprofils ein. Da die Strömungsfläche beim Ausstrom im Fehmarnbelt nach Norden geneigt ist, kann bei einer solchen Verengung des Profils im Süden Wasser aus tieferen

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 7)

Abb. 13: Oberflächensalzgehalt in S‰/‰ 15.—17. 3. 1961

Abb. 14: Bodensalzgehalt in S‰/‰ 15.—17. 3. 1961

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 8)

Abb. 15: Bodensauerstoff in Sätt. ‰ 12.—14. 7. 1960

Abb. 16: Bodentemperatur in °C 12.—14. 7. 1960

Regionen an die Oberfläche gelangen (Vergleiche in Abb. 18 im Schnitt über den Fehmarnbelt die Isohalinen für 10 S‰ und 15 S‰).

Innerhalb der Kieler Bucht wird die hydrographische Struktur des Wasserkörpers noch von den Wassermassen bestimmt, die der kürzlich zu Ende gegangene Einstrom mit sich geführt hat. Nur im Nordosten der Kieler Bucht im Gebiet zwischen Großem Belt und Fehmarnbelt macht sich der Ausstrom mit einer Front salzarmen Ostseewassers bemerkbar (Abb. 17). Dieses vom Ausstrom mitgeführte Wasser lagert sich als 5 bis 10 m mächtige Deckschicht über das bisher in der Kieler Bucht vorhandene Wasser (Abb. 18, Schnitte über den Fehmarnbelt und den Großen Belt und Abb. 16, Schnitt über den Fehmarnbelt). Auf diese Weise wird eine Trennschicht aufgebaut, die jede Verbindung zwischen der Deckschicht und den darunterliegenden Wassermassen unterbindet. Das Fehlen einer Schichtung im Sauerstoffgehalt an dieser Stelle könnte vermuten lassen, daß diese erwähnte Trennung doch nicht vollständig ist. Man muß dabei jedoch beachten, daß in der gesamten Kieler Bucht bereits eine tiefgreifende Schicht vollständig mit Sauerstoff gesättigten Wassers vorhanden ist. Nach dem in Kap. 6 aufgeführten Richardsonschen Gesetz ist zwischen den beiden erwähnten Schichten auch kein turbulenter Austausch mehr möglich.

Der dem momentan beobachteten Ausstrom vorhergegangene Einstrom hat in der ganzen Kieler Bucht eine bis zu 20 m mächtige gut durchmischte Deckschicht entstehen lassen (Abb. 15 u. 18), der sich im Osten das vom Ausstrom mitgeführte Ostseewasser überlagert hat. Der in diesem Wasser vorhandene Sauerstoff ist in den folgenden Monaten einer erheblichen Zehrung unterworfen. Lediglich die tiefsten Regionen werden durch Zustrom oberflächennahen Kattegatwassers mit frischem Sauerstoff versorgt. Dieser Zustrom frischen Wassers am Boden ist als mittelbare Folge des zur Zeit laufenden Oberflächenausstromes anzusehen. Der an der Oberfläche nach Norden setzende Ausstrom lagert sich über salzreichere und damit dichtere Wassermassen des Großen Belt und später des Kattegat und drückt diese damit in den Bereich des von J. P. JACOBSEN (1913) beobachteten Einstromes in der Tiefe.

Während der hier aufgezeichneten Messungen ist beim Feuerschiff Fehmarnbelt ein sprunghafter Temperaturanstieg in Bodennähe zu beobachten (Abb. 6). Dieser Temperaturanstieg deutet darauf hin, daß hier bereits Wasser aus oberflächennahen Schichten des Großen Beltes den Fehmarnbelt erreicht. Etwa 2 Wochen nach der beschriebenen Untersuchung passiert eine Front salzreichen Wassers den Boden des Fehmarnbeltes. Bei dieser Front handelt es sich um oberflächennahes Wasser aus dem südlichen Kattegat oder dem nördlichen Großen Belt, das nun die tiefsten Regionen der Kieler Bucht mit frischem Wasser versorgt.

Die auf Abb. 16 im Fehmarnbelt zu beobachtende Temperaturinversion ist ein von H. WEIDEMANN (1948) beschriebener sogenannter „Kälteballen“, der seine Entstehung ähnlich wie das beschriebene Zutagetreten tieferer Wasserschichten im Süden des Fehmarnbelt einer Zunahme der Stromgeschwindigkeit — hier allerdings bereits an der

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 9)

Abb. 17: Oberflächensalzgehalt in S‰ 12.—14. 7. 1960

Abb. 18: Bodensalzgehalt in S‰ 12.—14. 7. 1960

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 10)

Abb. 19: Bodensauerstoff in Sätt. % 25.—27. 1. 1961

Abb. 20: Bodentemperatur in °C 25.—27. 1. 1961

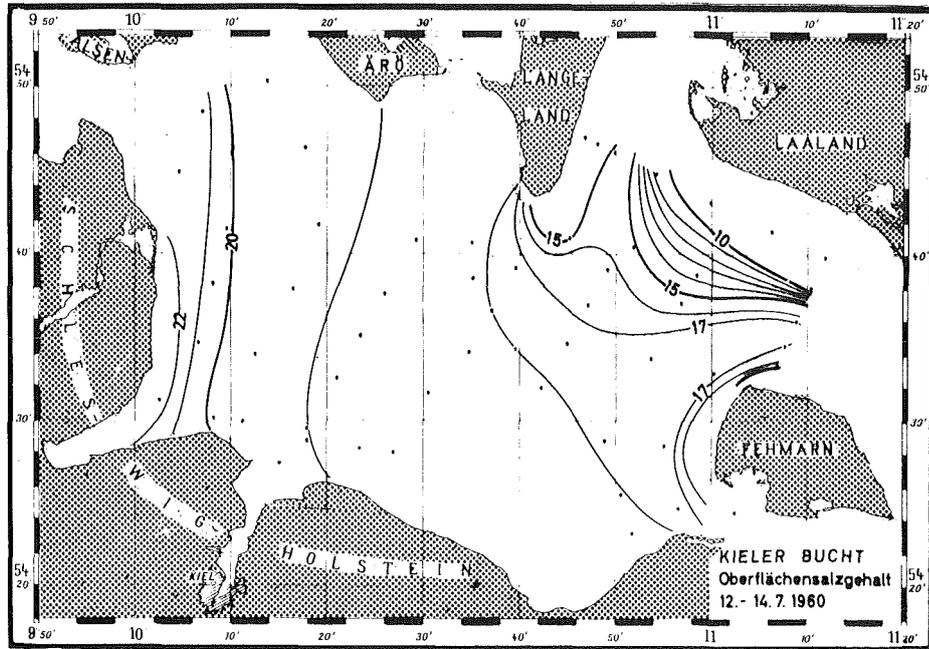


Abb.17

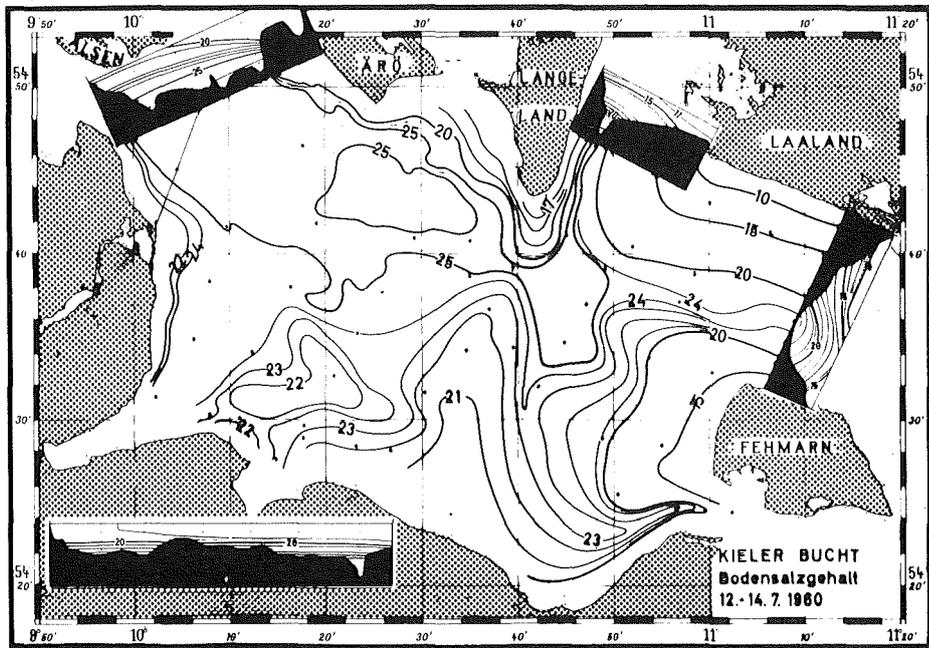


Abb.18

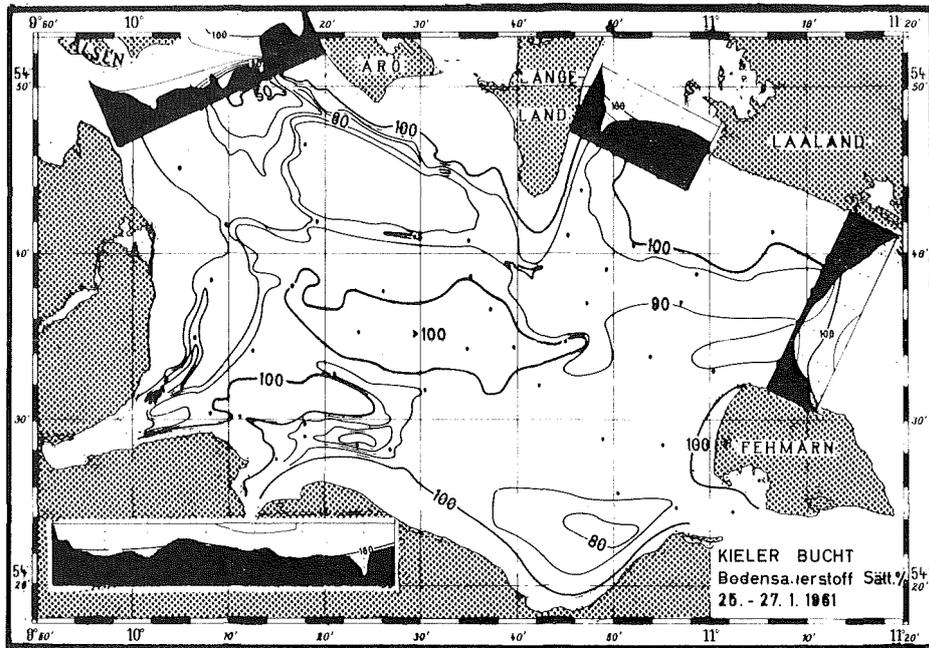


Abb.19

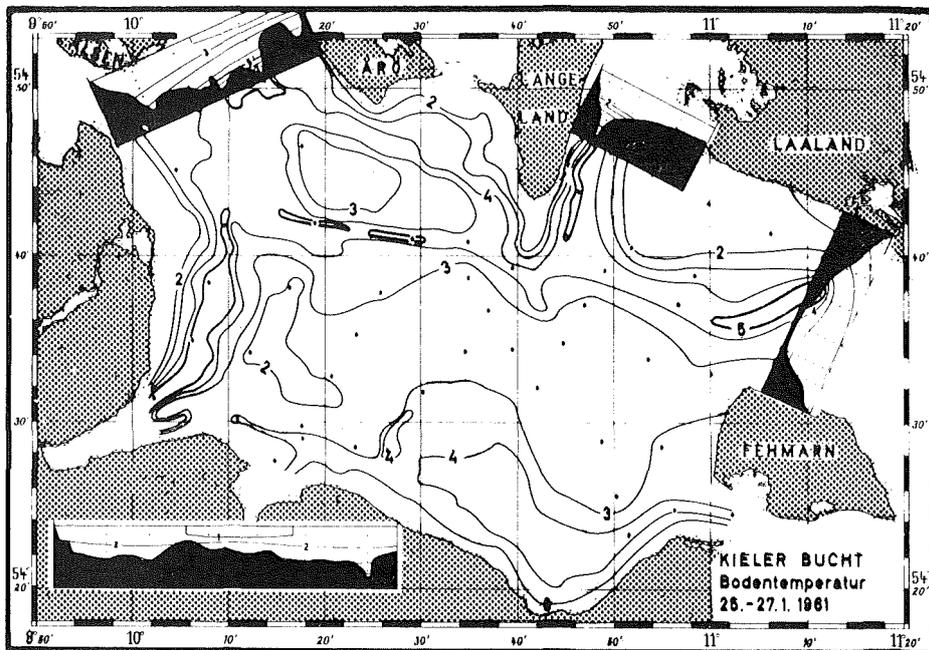


Abb.20

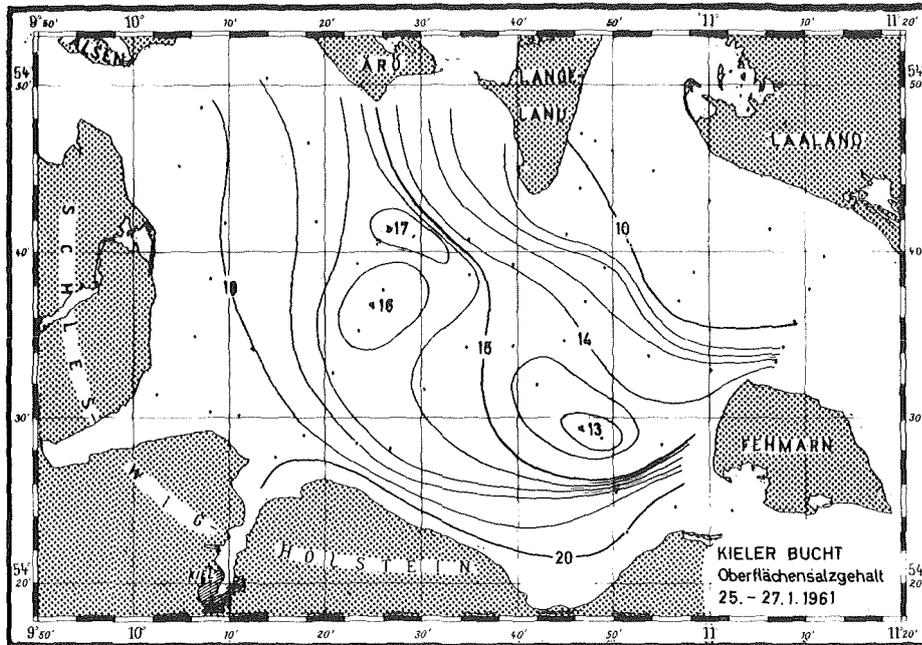


Abb.21

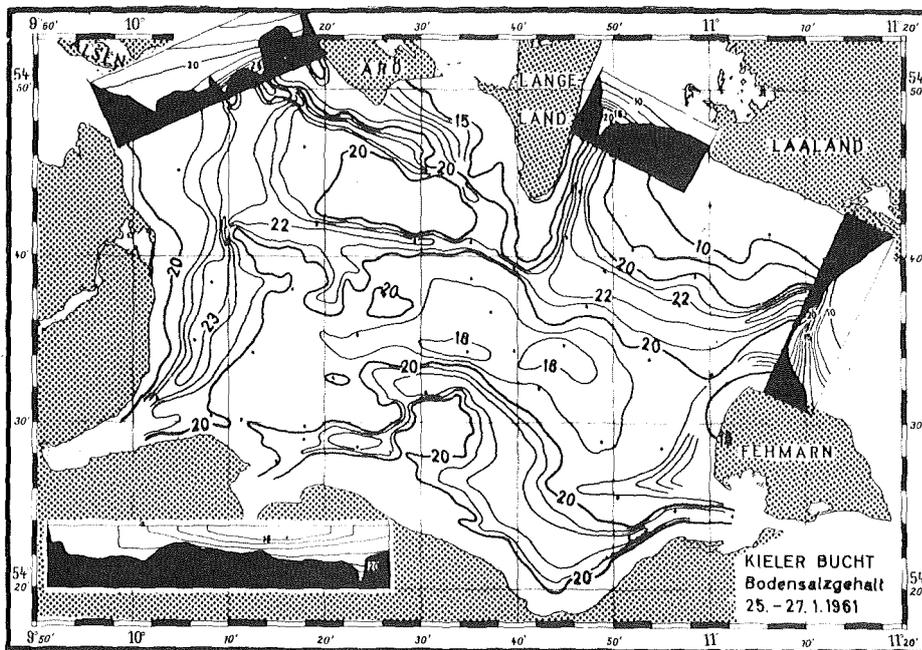


Abb.22

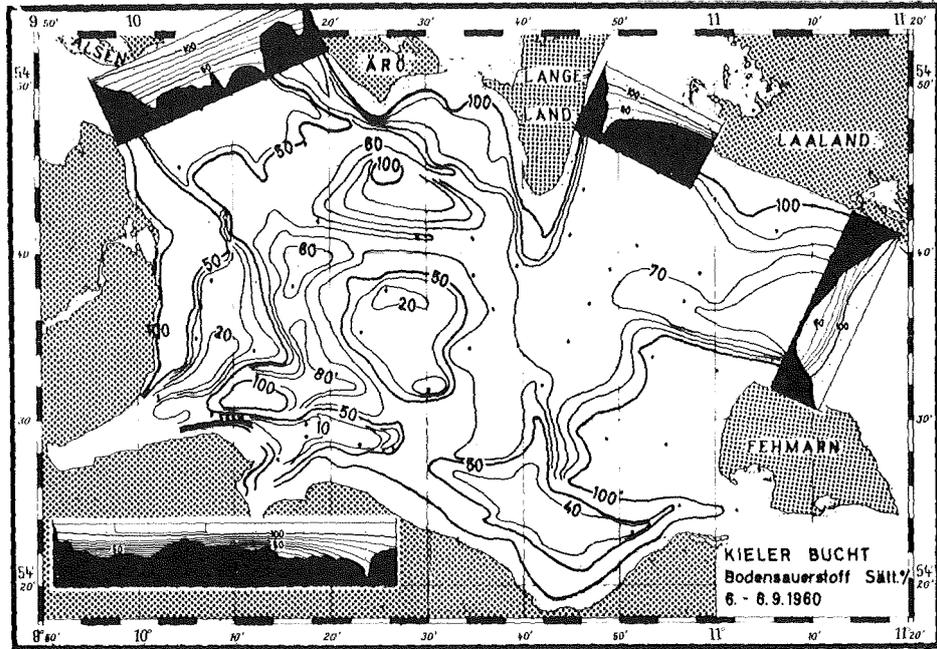


Abb.23

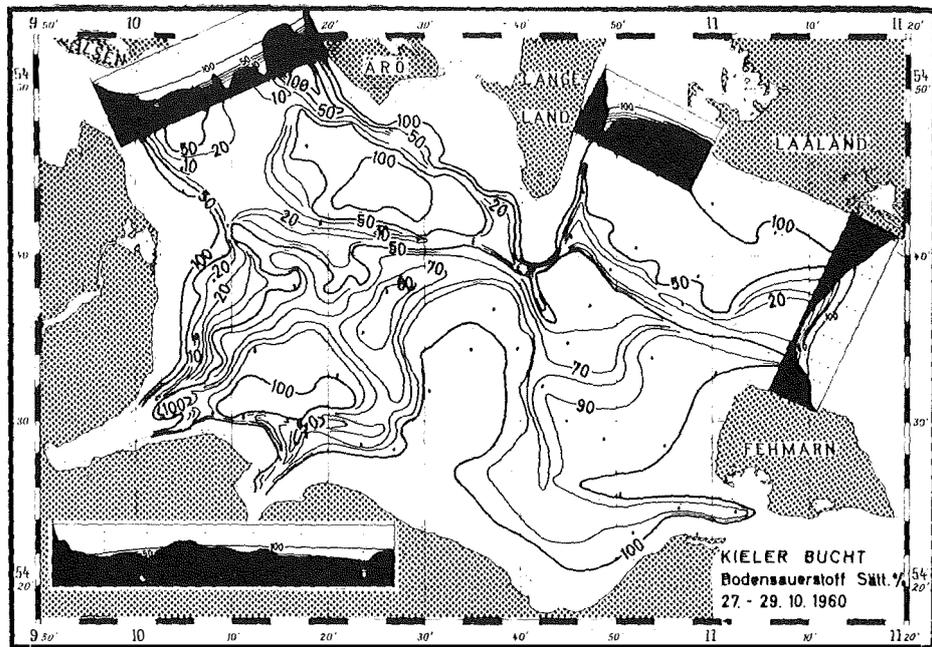


Abb.24

Darßer Schwelle — zu verdanken hat. Dieser „Kälteballen“ bleibt allerdings ohne Einfluß auf das Geschehen innerhalb der Kieler Bucht.

Der Oberflächenausstrom hat durch Ausbildung einer scharfen Trennschicht eine direkte Wassererneuerung innerhalb der Kieler Bucht durch Konvektion unterbunden, wirkt sich aber günstig aus auf die Erneuerung des Bodenwassers durch Zustrom frischen Wassers aus nördlichen Gebieten.

Winter (25.—27. 1. 1961).

Die Messungen erfolgten am Ende einer mehr als sieben Wochen andauernden Ausstromperiode. Der Oberflächenausstrom war während dieser Zeit zwei kurzen jeweils etwa drei Tage dauernden Richtungswechseln unterworfen, die sich auf den Wasserhaushalt jedoch nicht wesentlich ausgewirkt haben. Am Boden ist im Fehmarnbelt während der ganzen Stromperiode ein stetes Absinken des Salzgehaltes mit einer langsamen Temperaturerniedrigung zu beobachten (Abb. 6).

Die oben erwähnten beiden Richtungswechsel des Oberflächenstromes führen gemeinsam mit dem Beginn des Ausstromes zur Bildung dreier „Ausstromfronten“, die in verhältnismäßig kurzen Abständen die Kieler Bucht von Osten nach Westen durchteilen und in Gestalt von Süß- und Salzwassereinschlüssen an der Oberfläche in Erscheinung treten (Abb. 21). Der langandauernde Ausstrom hat zu einer erheblichen Aussüßung der Wasseroberfläche geführt. Im Fehmarnbelt reicht der Ausstrom praktisch homogenen Ostseewassers im Norden bis in eine Tiefe von 20 Meter hinab.

Bei der Betrachtung des Salzgehaltsschnittes durch den Fehmarnbelt (Abb. 22) drängt sich die Annahme auf, daß der Einstrom am Boden zur Zeit der Messungen wesentlich intensiviert wurde; denn die Auslenkung des Einstromes am Boden nach Norden, verbunden mit einem derartig extremen Dichtesprung gegenüber dem Oberflächenwasser (Salzgehaltszunahme von 13 S‰ auf 5—6 m Tiefenintervall!) deutet auf eine erhebliche Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Oberflächen- und Bodenstrom hin. Der Oberflächenstrom nimmt aber zur Zeit der Messungen bereits ab, so daß die Ursache der oben beschriebenen Erscheinung in der Zunahme des Bodeneinstromes zu suchen ist. Das während der beobachteten Ausstromperiode einströmende Bodenwasser ist Mischwasser aus dem Großen Belt und dem südlichen Kattegat mit einer geringeren Dichte als der des zur Zeit im Westen der Kieler Bucht lagernden Bodenwassers (Abb. 22).

Eine Wassererneuerung in Bodennähe findet somit nur in den Gebieten statt, die einen direkten Zugang zum Fehmarnbelt haben, d. h. im Osten der Kieler Bucht und im südlichen Arm der Ost-Westrinne. Die tieferen Regionen des Kleinen Belt und der Eckernförder Bucht bleiben zunächst von einer Erneuerung ausgeschlossen, da sie infolge der starken Dichteschichtung nicht von einer Vertikalkonvektion erfaßt werden. Während der Beobachtungen im März 1961 sind in den genannten Gebieten noch immer Wassermassen der gleichen Konsistenz gefunden worden. Es handelt sich hierbei um Wasser, das mit einem Schub salzreichen Wassers Mitte November 1960 in den Westen der Kieler Bucht gelangt ist (Abb. 6).

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 11)

Abb. 21: Oberflächensalzgehalt in S‰ 25.—27. 1. 1961

Abb. 22: Bodensalzgehalt in S‰ 25.—27. 1. 1961

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 12)

Abb. 23: Bodensauerstoff in Sätt. % 6.—8. 9. 1960

Abb. 24: Bodensauerstoff in Sätt. % 27.—29. 10. 1960

5. Ausbreitung des Bodenwassers

Die Erneuerung des Wassers bodennaher Schichten in der Kieler Bucht ist wegen der fast ständig vorhandenen recht extremen halinen Schichtung und der damit verbundenen verhältnismäßig hohen Stabilität der gesamten Wassersäule vorwiegend auf die Zufuhr frischen Wassers aus den angrenzenden Seegebieten angewiesen.

Auf Grund der topographischen Verhältnisse innerhalb der Kieler Bucht (s. a. Kap. 1 b und Abb. 1), ist ein Zustrom von Bodenwasser nur von Nordosten durch den Großen Belt oder den Fehmarnbelt zu erwarten. Eine direkte Erneuerung des Bodenwassers durch den Kleinen Belt ist nicht möglich, da derart lange Einstromlagen, die einen Zustrom von Kattegatwasser gleicher Dichte, wie der des Bodenwassers der Kieler Bucht durch den Kleinen Belt ermöglichen, nicht vorkommen. Eine thermische Konvektion ist wegen der hier stets herrschenden verhältnismäßig kräftigen Salzgehaltsschichtung ebenfalls nicht zu erwarten; denn um den Dichteunterschied bei einer Salzgehaltszunahme von nur 2 S⁰/₀₀ auszugleichen, wäre bei einem mittleren Salzgehalt von etwa 20 S⁰/₀₀ bereits eine Temperaturabnahme von ca. 10° C erforderlich.

So ist es angebracht, sich Klarheit zu verschaffen über den Weg, auf dem sich das von Nordosten einströmende Bodenwasser über die Kieler Bucht ausbreitet. Am Boden lassen sich ähnlich wie an der Oberfläche „Fronten“ beobachten. Hier handelt es sich jedoch stets um Salzwasserfronten. Dem Fortschreiten dieser Fronten sind durch die Bodenform der Kieler Bucht gewisse Grenzen gesetzt; so wird das durch den Großen Belt in die Kieler Bucht eindringende Wasser sich zunächst in dem verhältnismäßig weitläufigen Ostteil der Kieler Bucht ausbreiten und anschließend durch die Ost—West verlaufende Längsrinne weiter nach Westen vorstoßen in die dem Kleinen Belt vorgelagerten Becken. Sichtbar wird dieser Vorgang an der fortschreitenden Erwärmung des Bodenwassers im Juli—August 1960 (vgl. Abb. 16 und 8 die 12° C-Isotherme).

Bleibt der Zustrom frischen Wassers vom Großen Belt her auf die Tiefenlagen über 23 m Wassertiefe beschränkt, dann bleibt auch der Nordarm der als Hauptwasserarm anzusehenden Ost—Westrinne von einem direkten Zustrom frischen Wassers ausgeschlossen. Frisches Wasser kann dann auch hier erst von Westen her aus den dem Kleinen Belt vorgelagerten Becken eindringen. Von hier aus gelangt dann auch die Eckernförder Bucht in den Bereich des zugeströmten frischen Wassers. Allerdings wird sie nur sehr langsam und sehr spät mit solchem Wasser ausgefüllt, da der Zugang zur übrigen Kieler Bucht nur in einem sehr engen Durchlaß vor der Schleimündung besteht. Der hier als Beispiel betrachtete Zustrom frischen und mit Sauerstoff gesättigten Wassers konnte überhaupt nicht merkbar in die Eckernförder Bucht eindringen, da dort bereits Wasser gleicher Dichte lagerte. Eine vollständige Erneuerung des Bodenwassers konnte somit nicht erreicht werden, bestenfalls eine Vermischung. Von hier ausgehend macht sich auch in der Folgezeit eine starke Zehrung des gelösten Sauerstoffes bemerkbar. Man vergleiche hierzu auch die Aufzeichnungen über den Sauerstoffgehalt des Bodenwassers im August und September 1960 (Abb. 7 und 23). Die Kieler Förde wird von solch einem Einstrom, der nur in den tiefsten Regionen auftritt, wegen der sehr flachen Zugänge gar nicht berührt.

Da das Deutsche Hydrographische Institut, Hamburg mit dem 1. 1. 1961 auch beim Feuerschiff Kiel mit hydrographischen Serienbeobachtungen begonnen hatte, bot sich hiermit eine weitere Möglichkeit, über die Ausbreitung des Bodenwassers Aufschlüsse

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 13)

Abb. 25: Salzgehaltsgang bei den Feuerschiffen Kiel, Flensburg und Fehmarnbelt von Januar 1960 bis März 1961 an der Oberfläche.

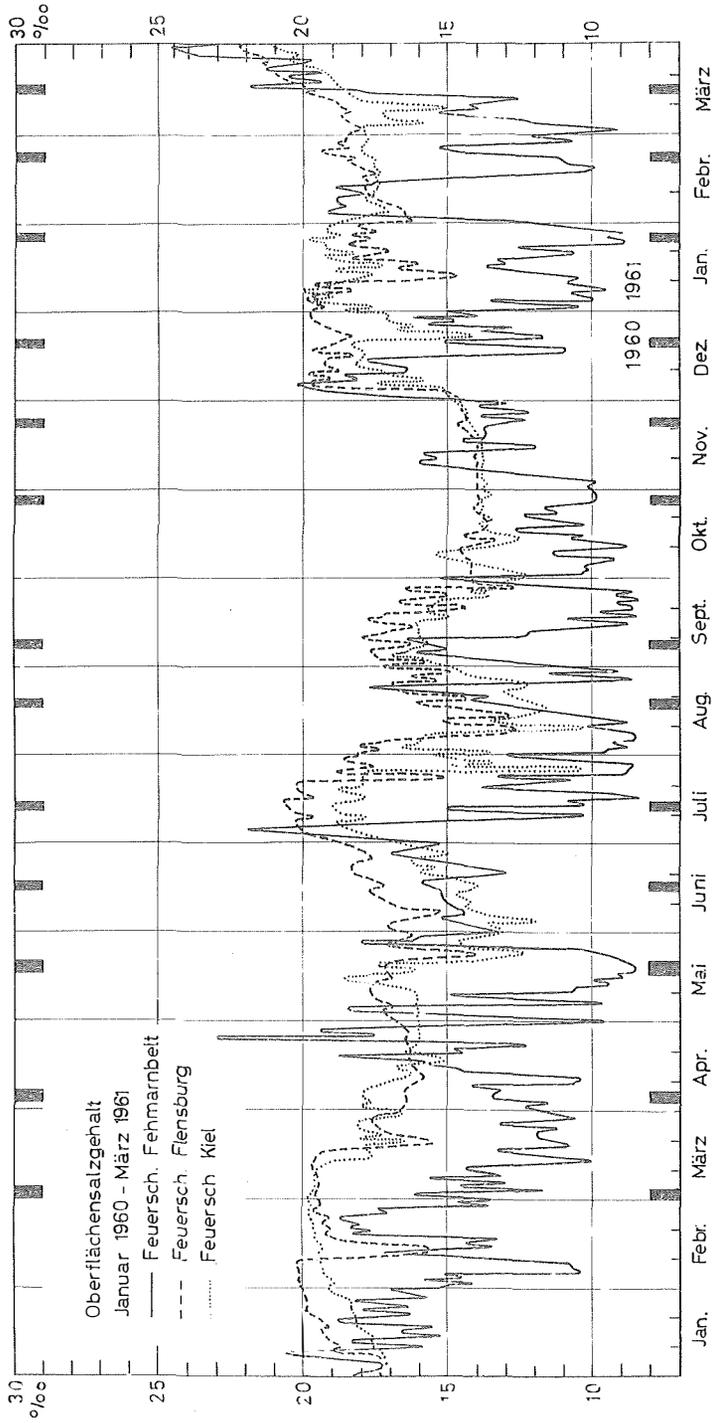


Abb. 25

Tafel 13 (zu J. Krug)

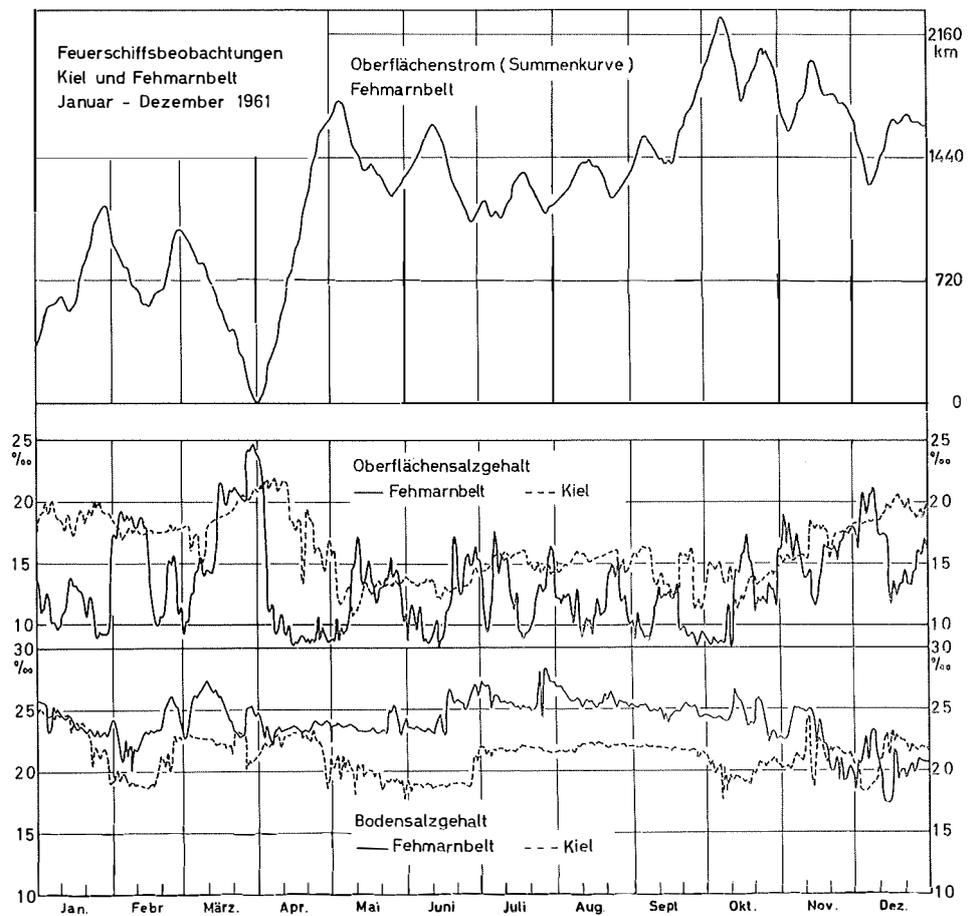


Abb.26

zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden der Salzgehaltsgang an Boden und Oberfläche für die beiden Feuerschiffe Kiel und Fehmarnbelt über das ganze Jahr 1961 graphisch aufgetragen und einer Stromsummenkurve des derzeitigen Oberflächenstromes im Fehmarnbelt gegenübergestellt.

In den Darstellungen über den Salzgehaltsgang bei den genannten Feuerschiffen (Abb. 26) ist Mitte Juni 1961 eine Salzwasserfront am Boden des Fehmarnbeltes zu erkennen, die zuerst mit einem kleinen Zacken, kurz darauf mit einem steilen Salzgehaltsanstieg in Erscheinung tritt. Diese Front ist etwa 15 Tage später beim Feuerschiff Kiel ebenfalls zu bemerken. Eine ähnliche Front tritt Ende Juli noch einmal auf und macht sich ebenfalls 15 Tage später mit einem allerdings nur sehr schwachen Salzgehaltsanstieg bei Feuerschiff Kiel bemerkbar.

Während der Bodensalzgehalt im Fehmarnbelt starken strömungsbedingten Schwankungen unterworfen ist, treten Salzgehaltsänderungen bei Kiel im Sommerhalbjahr nur stoßweise und als Folge einer am Boden fortschreitenden Einstromfront auf. Im Herbst und Winter, wenn keine temperaturbedingte Stabilität der Wassersäule mehr vorhanden ist, gerät der Meeresboden der Kieler Förde aufgrund seiner verhältnismäßig geringen Tiefe (maximal 20 m) in den Bereich der Deckschicht und ist damit Salzgehaltsschwankungen unabhängig von den Vorgängen im Fehmarnbelt unterworfen.

Ein starker Bodeneinstrom durch den Fehmarnbelt kann natürlich auch jetzt zu einem plötzlichen Zustrom von Bodenwasser vom Fehmarnbelt her führen (Februar 1961). Dieser Zustrom wirkt aber nicht über längere Zeit bestimmend für die hydrographischen Verhältnisse der Kieler Förde. So konnte ein Ende April 1961 auftretender langandauernder Oberflächenausstrom die ganze Kieler Förde erheblich aussüßen, ohne daß er sich auf die Hydrographie tiefer gelegener Regionen ausgewirkt hätte. Die hydrographischen Verhältnisse am Boden der verhältnismäßig flachen, bis zu 23 m tiefen Kieler Förde, werden je nach Jahreszeit von verschiedenen Wassermassen beeinflusst. Im Sommerhalbjahr während einer ausgeprägten thermohalinen Schichtung berührt die Bodenschicht die tieferen Lagen der Kieler Förde, im Winterhalbjahr während einer rein halinen Schichtung innerhalb der Kieler Bucht reicht die Deckschicht bis zum Boden der Kieler Förde.

6. Einfluß der Dichteschichtung auf die Wassererneuerung

Eine Erneuerung des Wassers bodennaher Schichten sowie des Wassers unterhalb der eigentlichen Deckschicht ist einestils durch Vertikalkonvektion, andernteils durch Zufuhr frischen Wassers aus angrenzenden Seegebieten mittels Strömungen möglich.

Eine Vertikalkonvektion tritt nur dann ein, wenn das Wasser der Oberschicht eine höhere Dichte besitzt als das Wasser der Unterschicht. Eine bis zum Boden reichende Vertikalkonvektion ist in der Kieler Bucht wegen der fast ständig anzutreffenden starken halinen Schichtung nur sehr selten und auch dann nicht überall möglich.

Eine dritte Möglichkeit wäre ein turbulenter Austausch des Wassers, der auch bei stabiler Schichtung des Wassers stattfinden kann; dazu sind aber Turbulenzerreger notwendig, die stark genug sind, die Grenzschicht zwischen zwei aneinandergrenzenden Wasserkörpern zu durchbrechen. Der Seegang reicht nicht bis in den Grenzbereich hinab. Strömungen scheiden als Turbulenzerreger ebenfalls aus, da derart hohe Strom-

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 14)

Abb. 26: Stromsummenkurve an der Oberfläche bei Feuerschiff Fehmarnbelt sowie Salzgehaltsgang an Boden und Oberfläche bei den Feuerschiffen Kiel und Fehmarnbelt im Jahre 1961.

geschwindigkeiten, wie sie hierzu erforderlich wären, in dem hier behandelten Gebiet nicht auftreten. Nach der von Richardsonschen Grenzschichtbedingung

$$Ri = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dz} \left/ \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right) \right. \approx 0,5;$$

müßte nämlich bei einer in der Kieler Bucht normalerweise auftretenden Salzgehaltssprungschicht von $5 S^0_{/00} / 10 \text{ m}$ mit einer durchschnittlichen Dichte von $\bar{\rho} = 1,015$ die Geschwindigkeitsdifferenz der Strömungen zwischen Ober- und Unterschicht etwa $7,7 \text{ m/sec}$, das sind etwa 16 kn , betragen. Derartige Strömungen treten hier jedoch nicht auf. Abgesehen davon führen Ausstromlagen, die wegen der gegenläufigen Strömungen in Ober- und Unterschicht eine Erhöhung der Geschwindigkeitsdifferenz bewirken, gleichzeitig zu einer Verstärkung der Schichtung, da sie der Deckschicht leichteres Wasser zuführen. So bewirken Ausstromlagen selbst im Winter eine Verstärkung der Dichteschichtung und unterbinden damit einen konvektiven Wasseraustausch mit der Bodenschicht. Extreme Einstromlagen, besonders im Winter können dagegen jede haline Schichtung auflösen und damit ideale Bedingungen für eine thermische Konvektion schaffen. Diese Möglichkeit ist aber wie schon unter 4a beschrieben, örtlich begrenzt.

Denkbar wäre außerdem eine stufenweise Konvektion derart, daß im Winter eine gut durchmischte Deckschicht durch Darüberlagern leichteren Ausstromwassers zur Zwischenschicht wird. Diese Zwischenschicht sinkt dann zu einem späteren Zeitpunkt ab zum Boden. Solch ein Absinken ist dann möglich, wenn der Bodenstrom im Fehmarnbelt leichteres, d. h. salzärmeres Wasser führt, als zur Zeit in der Kieler Bucht lagert, so daß das derzeitige Bodenwasser der Kieler Bucht in den Fehmarnbelt abfließt und die darüber liegende Zwischenschicht zum Boden absinken kann.

Eine ähnliche Situation lag im Herbst 1960 vor. Der Salzgehalt am Boden des Fehmarnbelt nahm stetig ab (Abb. 6), so daß das schwerere Bodenwasser der Kieler Bucht nachfließen konnte. Außerdem führte ein im September beginnender Ausstrom ständig salzärmeres Wasser aus der Ostsee mit sich, so daß die ganze Dichteschichtung zwar vorhanden blieb, sich aber allmählich in tiefere Regionen verlagerte (Abb. 5b). Allerdings handelt es sich hier nicht um gut durchmischtes und erneuertes Wasser einer bisherigen Deckschicht, sondern um verbrauchtes Wasser, das schon seit August als Zwischenschicht lagerte, ohne Zugang zu einer Regenerationsmöglichkeit zu haben.

Oberflächenausstrom verhindert eine direkte Wassererneuerung durch Vertikalkonvektion vollkommen, da er stets leichteres Wasser als das in der Beltsee bereits vorhandene Oberflächenwasser mit sich führt. Aus dem gleichen Grund begünstigt er jedoch eine indirekte Wassererneuerung mittels Zustrom frischen Wassers aus dem Großen Belt. Das salzarme Ausstromwasser lagert sich im Großen Belt und im südlichen Kattegat über das bisherige Oberflächenwasser und drückt dieses hinab in die Zone des vorwiegenden Einstromes am Boden. Ist nun eine Front schweren Kattegatwassers durch vorhergegangenen Gefällstrom weit genug in die Beltsee eingedrungen, so daß ein durch lokalen Windstau über der Ostsee erzeugter Ausstrom an der Oberfläche diese Front quasi überrollen kann, gelangt schweres Kattegatwasser an die Pforten der Kieler Bucht.

Ist der Salzgehalt des neu hinzugeführten Wassers nun höher als der des am Boden der Kieler Bucht lagernden Wassers, verteilt es sich über den Boden der Kieler Bucht und sorgt somit für die Erneuerung des Wassers bodennaher Schichten. Eine solche Front salzreichen Wassers hat im Juli 1960 den Fehmarnbelt passiert (Abb. 6) und die Kieler Bucht in ihren tiefsten Regionen mit frischem Wasser ausgefüllt (s. a. Kap. 4a). Ein ähnlicher Zustrom salz- und sauerstoffreichen Wassers konnte im Mai 1960 beobachtet werden (Abb. 6). In den beiden genannten Fällen war der Zustrom des salzreichen Wassers mit einer Wassererneuerung verbunden. In beiden Fällen ging dem Durchgang

der Salzwasserfront ein kurzer steiler Salzgehaltsabfall voraus verbunden mit einer kräftigen Temperaturerhöhung. In jedem Fall trat der Salzgehaltsanstieg drei bis dreieinhalb Wochen nach Beginn des Oberflächenausstromes auf. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, daß sich der Oberflächenausstrom im Großen Belt und später am Nordausgang des Großen Beltes über oberflächennahe Wasserschichten schiebt und diese damit in die Tiefe drückt, wo sie mit dem von J. P. JACOBSEN (1913) beschriebenen Bodeneinstrom in die Kieler Bucht gelangen.

Ein ähnlicher Frontdurchgang kann noch einmal Mitte November 1960 beobachtet werden, nur daß der beobachtete Salzgehaltsabfall diesmal nicht mit einer Temperaturerhöhung, sondern sinngemäß mit einer Erniedrigung verbunden ist. Auch hier verbindet sich mit dem Zustrom salzreichen Wassers auch eine Sauerstoffzunahme am Boden. Es fällt jedoch auf, daß diese Front den Fehmarnbelt erst dreieinhalb Wochen nach Beginn des „dritten Abschnittes“ der Ausstromperiode passiert, dem dann ein Einstrom nachfolgt, wie es auch bei den beiden zuvor genannten Situationen der Fall war. Es ist anzunehmen, daß einer Ausstromfront an der Meeresoberfläche ein Anstau salzreicheren Wassers im Norden gegenüberstehen muß, um die Deckschicht von Kattegatwasser in der Kieler Bucht als Bodenwasser erscheinen zu lassen.

Im Winter kann man ähnliche Situationen, allerdings nicht so ausgeprägt, beobachten. In diesen Fällen läßt sich jedoch keine Aussage darüber machen, ob hier eine strömungsbedingte Verlagerung der einzelnen Schichten vorliegt. Wahrscheinlicher ist es, daß es sich hierbei um Salzgehaltsschwankungen der gesamten Wassersäule im Kattegat und damit auch innerhalb des einströmenden Bodenwassers handelt, da diese nördlicheren Seegebiete aufgrund ihrer geringeren halinen Schichtung einer weitergehenden winterlichen Konvektion zugänglich sind, als es gerade die extrem stark geschichtete engere Beltsee und damit auch die Kieler Bucht ist.

Literaturverzeichnis

- BROGMUS, W. (1952): Eine Revision des Wasserhaushaltes in der Ostsee. Kieler Meeresforsch. 9. — Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg (1952), (1962): Meereskundliche Beobachtungen und Ergebnisse: Beobachtungen auf den deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee 1951—1961, Hamburg. — Deutscher Wetterdienst (1960/1961): Täglicher Wetterbericht. Offenbach/Main 1960/61. — DIETRICH, G. (1951): Oberflächenströmungen im Kattegat, im Sund und in den Belten. Dt. hydrogr. Z. 4 Hamburg. — DIETRICH, G. (1953): Elemente des jährlichen Ganges der Oberflächentemperatur der Nord- und Ostsee und ihren angrenzenden Gewässern. Dt. hydrogr. Z. 6, Hamburg. — DIETRICH, G. (1956): Hydrography of the Western Baltic. Ann. Biol. 11, Kopenhagen. — DIETRICH, G., KALLE, K. (1957): Allgemeine Meereskunde, Einführung in die Ozeanographie, Berlin. — GRASSHOFF, K. (1962): Untersuchungen über die Sauerstoffbestimmung im Meer. Kieler Meeresforsch. 18. JACOBSEN, J. P. (1913): Strommessungen in den Tiefen der dänischen Gewässer 1909, 1910, 1911. Medd. Komm. Havunders. Ser. Hydr. 2, Nr. 3 Kopenhagen. — JACOBSEN, J. P. (1913): Die Wasserumsetzung durch den Öresund, den Großen und den Kleinen Belt. Medd. Komm. Havunders. Ser. Hydr. 2, Nr. 9 Kopenhagen. — KALLE, K., THORADE, H. (1940): Tabellen und Tafeln für die Dichte des Seewassers. Arch. Dt. Seewarte 60, Hamburg. — KALLE, K. (1953): Fluchtentafeln zur Bestimmung der Temperaturkorrekturwerte beim Arbeiten mit Kippthermometern. Dt. hydrogr. Z. 6, Hamburg. — KÄNDLER, R. (1951): Der Einfluß der Wetterlage auf die Salzgehaltsschichtung im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee. Dt. hydrogr. Z. 4, Hamburg. — KRÜMMEL, O. (1911): Handbuch der Ozeanographie. Bd. 1 u. 2 — Stuttgart. — MANEGOLD, W. (1935/36): Die Wetterabhängigkeit der Oberflächenströmungen an den Pforten der Ostsee. Arch. Dt. Seewarte, 54, Hamburg. — NEUMANN, G. (1940): Mittelwerte längerer und kürzerer Beobachtungsreihen bei den Feuerschiffen im Kattegat und in der Beltsee. Ann. d. Hydrogr. 68, Hamburg. — SCHUBERT, O. v. (1938): Die Frage des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee. VI. Hydrol. Konf. d. balt. Staaten, Berlin. — SCHULZ, B. (1923): Hydrographische Untersuchungen, besonders über den Durchlüftungszustand der Ostsee 1922. Arch. Dt. Seewarte, 41, Hamburg. — SPETHMANN,

H. (1911): Tiefenkarte der Beltsee und des Sundes. Petermanns Mitteil. 57II. — THIEL, G. (1943): Einiges über die Ergebnisse von Strombeobachtungen in der westlichen Ostsee. Ann. d. Hydrogr. 71. — THORADE, H. (1943): Über den Gezeitenstrom im Fehmarnbelt. Ann. d. Hydrogr. 71. — TRUESDALE, G. A., DOWNEN, A. L., LOWDEN, G. F. (1955): The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea Water. J. appl. chem. 5. — WATTENBERG, H. (1941): Grenzen zwischen Nord- und Ostseewasser. Ann. d. Hydrogr. 9, Hamburg. — WATTENBERG, H. (1949): Salzgehaltsverteilung in der Kieler Bucht und ihre Abhängigkeit von Strom- und Wetterlage. Kieler Meeresforsch. 6. — WEIDEMANN, H. (1948): Periodische und unperiodische Vorgänge im Fehmarnbelt. Dissertation — Kiel. — WITTIG, H. (1940): Der mittlere jährliche Gang des Salzgehaltes in der Kieler und Mecklenburger Bucht. Kieler Meeresforsch. 3. — WYRTKI, K. (1952): Die Dynamik der Wasserbewegungen im Fehmarnbelt. Kieler Meeresforsch. 8.