

# 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.

# Über die Beziehungen zwischen Trübung und ozeanographischem Aufbau

(Nach Messungen in der Kieler Bucht)<sup>1)</sup>

Von Klaus WYRTKI

Die Kenntnis der Verteilung der Schwebstoffe im Meer — Plankton, Detritus und aufgewirbeltes Sediment — ist nicht nur von Wichtigkeit für die Beurteilung seiner optischen Verhältnisse, sondern auch für die Kenntnis des Transportes dieser Stoffe und ihrer Sedimentation. Die Bestimmung ihrer Verteilung kann einerseits durch direkte Methoden — Wägen oder Auszählen — geschehen, andererseits indirekt durch Messung optischer Werte, insbesondere des physikalischen Extinktionskoeffizienten. Nachdem PETERSSON (1934) ein geeignetes Gerät zur Messung des physikalischen Extinktionskoeffizienten im Meer entwickelt hat, ist man in der Lage, diese Größe fortlaufend in situ zu messen, was besonders wertvoll ist. WATTENBERG (1938, 44) und JOSEPH (1944, 46, 49) haben diese Methode weiter ausgebaut und bei der Messung des physikalischen Extinktionskoeffizienten starke Unterschiede und Schwankungen in seiner Verteilung festgestellt. Von allen Autoren wird übereinstimmend die Verteilung der Schwebstoffe zur Schichtung in Beziehung gesetzt, doch haben die vorliegenden Messungen noch immer mehr oder weniger den Charakter von Stichproben und die aus ihnen gezogenen Folgerungen bedürfen daher noch weiterer Bestätigung durch eine zeitliche und räumliche Intensivierung der Messungen. Diesem Ziel sollen die vorliegenden Untersuchungen dienen, die im Jahre 1949 an Bord der Feuerschiffe „Fehmarnbelt“ und „Flensburg“ sowie auf verschiedenen Fahrten des Forschungskutters „Südfall“ des Instituts für Meereskunde durchgeführt worden sind.<sup>2)</sup> Im Laufe dieser Untersuchungen hat sich immer mehr bestätigt, daß die Verteilung der trübenden Teilchen in ganz engem Zusammenhang mit dem Aufbau der Wassermassen und hydrographischen Bedingungen steht. Ja, es wird sogar gezeigt werden können, daß umgekehrt aus der Verteilung der Trübung wesentliche Aussagen über hydrographische Vorgänge gemacht werden können, worauf schon KALLE (1937) bei seinen Nährstoffuntersuchungen in der Nordsee hingewiesen hat.

## I. Trübung und Extinktionskoeffizient.

Der physikalische Extinktionskoeffizient (EK) ist gleich der Summe aus Absorptions- und Streukoeffizient und nach dem LAMBERT-BEER'schen Gesetz proportional der Konzentration der optisch wirksamen Stoffe. Allerdings spielt neben den Schwebstoffen auch die Extinktion der gelösten Stoffe — im wesentlichen Gelbstoffe — und des reinen Wassers eine Rolle. Die gelösten Stoffe wirken aber vorwiegend durch Absorption, erwecken also nur den Anschein einer Färbung im Falle selektiver Absorption, während die optische Wirkung

<sup>1)</sup> Gekürzte Fassung der Dissertation des Verfassers (Univ. Kiel Mai 1950 mit dem Titel: „Über die Verteilung der Trübung in den Wassermassen der Beltsee und ihren Zusammenhang mit den hydrographischen Faktoren“).

<sup>2)</sup> An dieser Stelle möchte ich allen danken, die die erforderlichen Geräte und Arbeitsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt haben oder durch ihren Rat zur Klärung der Probleme beigetragen haben, insbesondere Herrn Prof. Dr. G. WUST, dem ich auch die Anregung zu diesen Untersuchungen verdanke, und dem Deutschen Hydrographischen Institut in Hamburg, das mich durch Ueberlassung des Durchsichtigkeitsmeßgeräts (D-Gerät) unterstützte.

der Schwebstoffe hauptsächlich auf ihrer Streuung beruht, sie also wirklich trübend sind. Aus diesem Grunde seien die Schwebstoffe im folgenden kurz als die Trübung bezeichnet.

Wie die Beobachtungen gezeigt haben, geben in der Beltsee ebenso wie in anderen flachen, küstennahen Meeresgebieten in der Regel die Schwebstoffe den Ausschlag für die Größe des EK. Die Gelbstoffe sind hingegen meist wesentlich geringer beteiligt und absorbieren im Blauen und UV, während der EK des reinen Wassers nur im Roten eine Rolle spielt. Abb. 1 zeigt als typisches Beispiel an einer mit dem Pulfrich-Photometer spektral untersuchten Probe diese Verhältnisse. Die Probe ist am 8. 3. 49 bei F.S. „Fehmarnbelt“ dem Oberflächenwasser entnommen und zeigt Ostseewasser relativ starker Gelbfärbung.

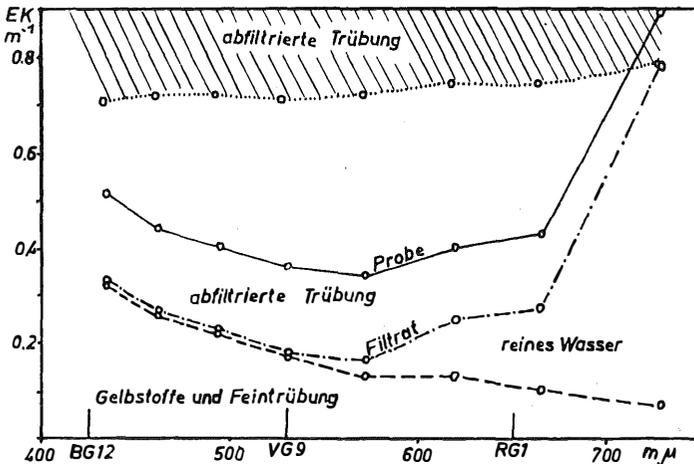


Abb. 1 Spektrale Extinktion einer Wasserprobe und ihrer Komponenten.

Nach Bestimmung der Extinktion der Wasserprobe in 1 m langen Meßrohren ist sie durch harte Filter (Blauband Nr. 589, Porenweite 1—2  $\mu$ ) filtriert und das Filtrat wiederum untersucht worden. Bei allen Messungen hat es sich gezeigt, daß der abfiltrierbare Teil der Trübung leicht selektiv im Blauen ist, was man als Effekt der Abhängigkeit der Streuung von der Wellenlänge deuten kann. Nach Abzug des EK für reines Wasser ergibt sich dann die Extinktion der nicht zurückgehaltenen Komponenten, der Gelbstoffe und der durchgelassenen Feintrübung. Da das Durchsichtigkeitsmeßgerät (Beschreibung des Gerätes siehe JOSEPH [1949]) bei Filter VG 9 seinen größten Meßbereich (EK von 0,0 bis 0,8  $m^{-1}$ ) in Bezug auf die reine Trübung hat, ist mit diesem Filter gemessen worden. Allerdings werden hierbei Gelbstoffanteile mitgemessen. Bestimmt man die Gelbfärbung ganz formal durch Bilden der Differenz EK (BG 12) — EK (RG 1) unter Berücksichtigung der Extinktion reinen Wassers, so liegen die höchsten vom Verfasser gemessenen Werte der Gelbfärbung bei 0,25 EK-Einheiten (F.S. „Fehmarnbelt“ im März). Der Anteil der Gelbfärbung bei Filter VG 9 entspricht etwa 30 % des Wertes bei Filter BG 12, was auch mit den

Messungen von JOSEPH (1949) übereinstimmt. Der durch die Gelbfärbung entstehende Fehler liegt also bei maximal 0,07 EK-Einheiten und dürfte angesichts der bedeutenden Unterschiede des EK in den betrachteten Gebieten (vergl. Abb. 3) in den Hintergrund treten, zumal die Gelbstoffe als gelöste Stoffe wesentlich gleichmäßiger verteilt sind als die Schwebstoffe.

Weiterhin sind Untersuchungen mit dem Utermöhl-Mikroskop an sedimentierten Proben vorgenommen worden, um einen Einblick in Art und Menge der trübenden Teilchen zu erhalten. Die Ergebnisse zweier solcher Untersuchungsreihen sind in Abb. 2 wiedergegeben. Die Proben sind am 19. und 24. 8. 1949

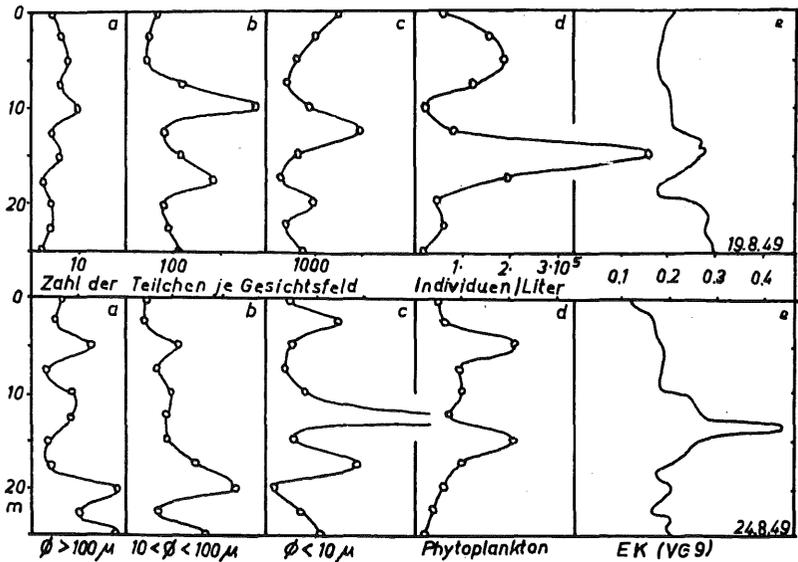


Abb. 2 Zusammenhang zwischen Extinktionskoeffizient und trübenden Teilchen.

Dargestellt durch die vertikale Verteilung der Partikel, des Phytoplanktons und des EK an zwei Stationen bei F.S. „Flensburg“. (a) Durchmesser der Teilchen  $> 100 \mu$ , (b) zwischen 100 und  $10 \mu$ , (c)  $< 10 \mu$ , (d) Phytoplankton (Individuen/Liter), (e) EK (VG9).<sup>1)</sup>

bei F.S. „Flensburg“ mit 2,5 m Tiefenintervall entnommen. Die Partikel sind zum Auszählen in drei Gruppen eingeteilt, deren Grenzen bei  $100 \mu$  und  $10 \mu$  liegen. Man bemerkt, daß durchaus ein Zusammenhang zwischen den Kurven der trübenden Teilchen und des Planktons einerseits und dem EK andererseits besteht. Doch ist es ersichtlich, daß man die EK-Werte nicht durch Superposition der vier anderen Kurven erhalten kann, da sowohl die optischen Eigenschaften der Teilchen verschieden sind, als auch Teilchen von Größenordnung der Lichtwellenlänge und darunter nicht erfaßt werden. Allerdings ist zu sehen, daß das Plankton in diesen küstennahen Gewässern im allgemeinen nicht der

<sup>1)</sup> Die Zahlen des Phytoplanktons hat mir dankenswerterweise Herr cand. rer. nat. GILLBRICHT zur Verfügung gestellt.

für den EK bestimmende Faktor sein wird, was daraus hervorgeht, daß in beiden Fällen die Maxima des Planktons in 5 m Tiefe durchaus nicht hervortreten und das sehr kräftige Maximum in 15 m Tiefe am 19. 8. nur einen geringen Zuwachs im EK hervorruft. Das Trübungsmaximum im unteren Beispiel ist verursacht durch eine Ansammlung sehr kleiner Teilchen von weniger als  $10 \mu$  Durchmesser. Das Plankton wird also erst bei ausgesprochenen Planktonblüten oder bei Fehlen anderer Partikel — wie es im freien Ozean meist der Fall ist — der bestimmende Faktor für den EK werden.

## II. Grundzüge der Verteilung der Trübung.

Für die Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Änderung einer skalaren Größe wie der Trübung an einer Station eignen sich vornehmlich Isoplethendarstellungen. In den Tafeln I und II ist in der Vertikalen die Meerestiefe an der Beobachtungsstation und in der Horizontalen die Zeit aufgetragen, an der auch die Lage der Serien markiert ist. Eingetragen sind in diesen Diagrammen die Linien gleichen EK. In einer solchen Darstellung fallen naturgemäß manche Feinheiten der Vertikalkurven weg. Um diesem Nachteil zu begegnen sind in Abb. 3 einzelne Vertikalkurven herausgegriffen, an Hand derer spezielle Vorgänge erläutert werden sollen.

Während der ersten Meßreihe auf F.S. „Fehmarnbelt“ im März 1949 (Tafel I) liegt der Jahreszeit entsprechend nur eine haline Schichtung vor, die sich aus je einer ziemlich homogenen Deck- und Bodenschicht und der zwischen ihnen gelegenen Sprungschicht zusammensetzt. Das Bodenwasser mit seinem Salzgehalt von nur 19 ‰ ist hierbei durchaus dem Mischwasser des Kattegats zuzurechnen, da das Nordseewasser von 30 ‰ in dieser Jahreszeit nicht so weit in die Belte hineinreicht. Die Temperatur besitzt innerhalb der Sprungschicht ein geringes Minimum, ihre Werte liegen zwischen  $1,3^{\circ}$  und  $3^{\circ}$ . Am 11. 3. dehnt sich bei anhaltend starkem Ausstrom das Ostseewasser der Deckschicht fast bis zum Boden aus, während nach darauffolgendem starken Einstrom die Oberkante der Sprungschicht am 16. 3. die Oberfläche erreicht.

Die Grenzschicht zwischen den beiden wesentlichen Wassermassen, dem Ostseewasser und dem Bodenwasser, tritt auch in der Trübung hervor, allerdings je nach der Wetterlage in verschiedener Form. Bei dem vorwiegend stürmischen Wetter des ersten Teiles der Meßreihe (bis etwa 16. 3.) ist sie als Trennschicht zwischen dem trüben Bodenwasser und dem klareren Ostseewasser ausgebildet. Die Vertikalkurven, die einer solchen Verteilung entsprechen, haben das Aussehen der in Abb. 3 b dargestellten. Sie sind gekennzeichnet durch einen ganz scharfen Übergang zwischen den beiden Wasserarten, der meist auf einer Strecke von weniger als 1 m stattfindet. Während des zweiten, vorwiegend durch schwächere, umlaufende Winde gekennzeichneten Teiles der Meßreihe bilden sich innerhalb der Dichtesprungschicht ausgeprägte Trübungsmaxima, auf deren Auftreten schon verschiedene Autoren hingewiesen haben. Beispiele für die dazugehörigen Vertikalkurven sind in Abb. 3, c, d, f gegeben. Diese Trübschichten sind offenbar einer ursprünglichen (punktiert eingetragenen) Vertikalverteilung überlagert und stellen eine Anreicherung der trübenden Stoffe in einer bestimmten Schicht dar. In einzelnen Fällen kommen auch zwei solcher Trübschichten übereinander vor (Abb. 3 c). Das Auftreten dieser Trübschichten ist verbunden mit einem Klarwerden der darüberliegenden Wassermassen bei relativ ruhigem Wetter. Sie bilden sich

an der Oberkante der Dichtesprungschicht und wandern langsam durch sie hindurch, um an ihrer Unterkante von dem darunterliegenden Wasserkörper aufgenommen und zerstört zu werden. Dies ist in der Zeit vom 20. bis 22. 3. und 25. bis 27. 3. zu beobachten. Daneben gibt es noch eine zweite Art von Trübungsmaxima und auch -minima, die durch Verschiebung von Wasserkörpern entstehen. Ein Beispiel für ein solches Trübungsmaximum bietet der 24. 3. (Abb. 3 e), wo in der Bodenschicht ein relativ klarer Wasserkörper hindurchzieht (16<sup>h</sup>), dessen Vertikalerstreckung aber nur gering ist, so daß er die vorher (12<sup>h</sup>) vorhandene Verteilung gewissermaßen abschneidet und ein Trübungsmaximum hinterläßt. Dies verschwindet anschließend wieder (20<sup>h</sup>), als der klare Wasserkörper von einem trüberen abgelöst wird. Abb. 3 a zeigt die entsprechende Entstehung eines Trübungsminimums durch Vorüberziehen eines trüben Wasserkörpers in der Deckschicht, der nur bis 12 m reicht, während darunter noch eine dünne Schicht des vorangegangenen klareren Wasserkörpers verbleibt.

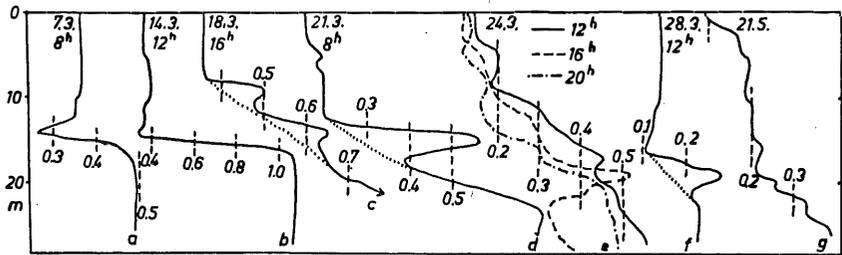
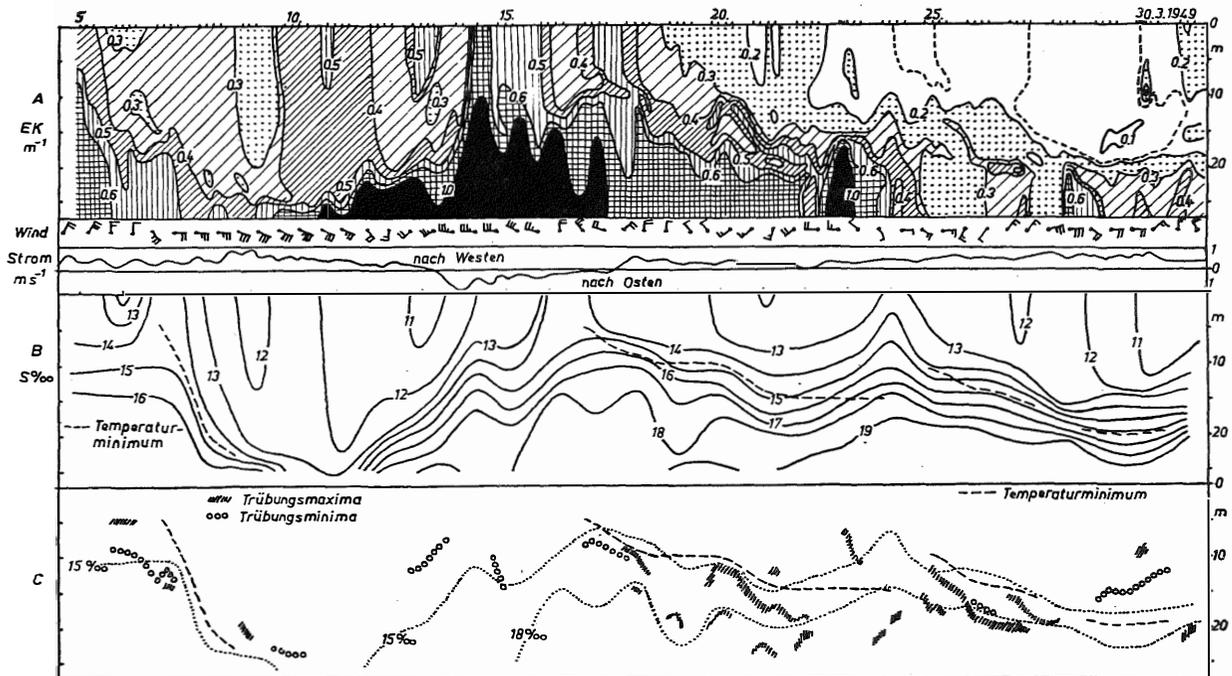


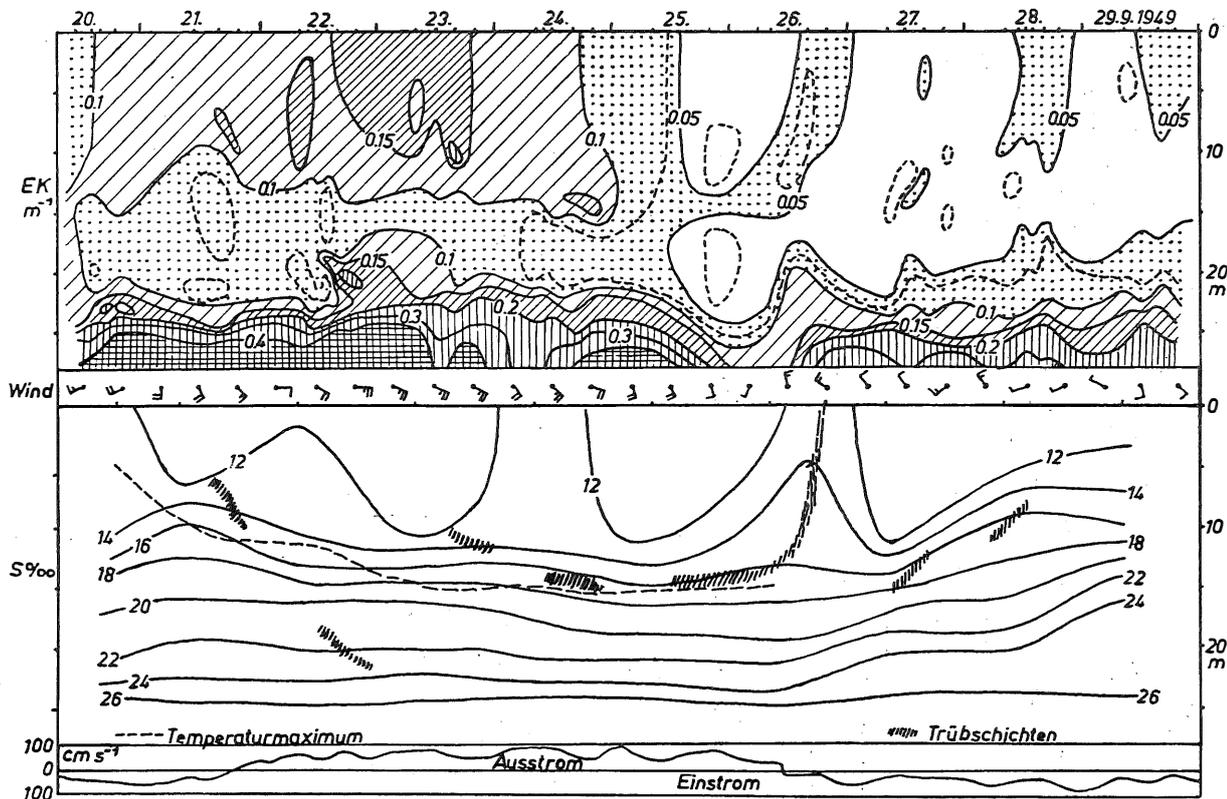
Abb. 3. Spezielle Vertikalkurven des Extinktionskoeffizienten. a—f F.S. „Fehmarnbell“, g Seegebiet vor Schleimünde.

Aus diesen Bemerkungen ist zu erkennen, daß es zwei grundsätzlich verschiedene Ursachen gibt, die die Verteilung der Trübung bewirken. Einerseits sind es die äußerlich einwirkenden Verschiebungen der Wasserkörper, die Unterschiede hervorrufen. Bei ihnen ist die Trübung nur eine Eigenschaft des Wasserkörpers unter anderen. Diese Vorgänge seien als *exogen* bezeichnet. Zum anderen ergibt sich die Trübungsverteilung durch den der Trübung eigenen Absinkprozeß in Verbindung mit den physikalischen Eigenschaften des umgebenden Wassers und den Lebensvorgängen. Hier erst kommen die speziellen Eigenschaften der trübenden Partikel zur Geltung, so daß die dadurch zu begründenden Vorgänge als *endogen* bezeichnet seien. Im allgemeinen wird es aber ein Zusammenwirken beider Vorgänge sein, woraus die Trübungsverteilung resultiert.

Ein anderes charakteristisches Merkmal der Trübungsverteilung ist die Gliederung der Deck- und Bodenschicht in sich. Im Verlauf unserer ersten Meßreihe werden Wasserkörper der verschiedensten Trübung vorbeigeführt. Sie unterscheiden sich im EK sehr deutlich, während sie im Salzgehalt nicht so auffällig in Erscheinung treten. Vor allem aber zeigt das Bodenwasser im zweiten Teil der Meßreihe eine Heterogenität im EK, die im Salzgehalt überhaupt nicht be-



Tafel I. Isoplethen des Extinktionskoeffizienten (A), des Salzgehaltes (B) und zusammenfassende Darstellung dieser Erscheinungen (C), sowie Wind und Oberflächenstrom bei Feuerschiff „Fehmarnbelt“ vom 5. bis 31. 3. 1949.



Tafel II. Isoplethen des Extinktionskoeffizienten ( $EK$ ) und des Salzgehaltes ( $S$ ), sowie Wind und Oberflächenstrom bei Feuerschiff „Fehmarnbelt“ vom 20. bis 29. 9. 1949.

merkbar ist. Doch sollen alle diese mit der Existenz von Wasserkörpern zusammenhängenden Fragen weiter unten ausführlich besprochen werden.

Während der zweiten Meßreihe auf F.S. „Fehmarnbelt“ (Tafel II) im September, besteht sowohl eine haline wie auch eine thermische Schichtung. Der sehr heterogenen Deckschicht (10—14 ‰, 16°) steht das Bodenwasser (Nordseewasser) von 26 ‰ und 12,5° gegenüber. Diese beiden Schichten sind durch die ziemlich weit auseinanderggezogene Sprungschicht, die Beltseefront getrennt, in deren Oberkante ein deutlich ausgeprägtes Temperaturmaximum liegt. Eine auffallende Erscheinung in der Trübungsverteilung während dieser Zeit ist die innerhalb der Sprungschicht gelegene klare Schicht, die sich später bis zur Oberfläche ausdehnt. Weiterhin sind eine Reihe von Trübschichten — allerdings nicht so ausgeprägt wie während der Meßreihe im März — zu beobachten, die sich vornehmlich an die Oberkante der Sprungschicht anlehnen und mit dem Temperaturmaximum zusammenzufallen scheinen. Das Bodenwasser ist mit Ausnahme eines Falles (26. 9.) ziemlich stark getrübt und der EK nimmt zum Boden hin zu, doch zeigt es bei weitem nicht die Heterogenität der ersten Meßreihe. In der Deckschicht sind wiederum eine Reihe von Wasserkörpern zu unterscheiden.

### III. Theoretische Deutung der endogenen Trübungsverteilung.

Die Schwebstoffe sind einerseits den geordneten und ungeordneten Bewegungen im Meer — Strömungen und Turbulenz — unterworfen, andererseits unterliegen sie wegen ihrer von der des Seewassers im allgemeinen verschiedenen Dichte der Schwerkraft. Sie führen also eine Sinkbewegung aus, da ihre Dichte gewöhnlich größer als die des Seewassers ist. Handelt es sich bei diesen Stoffen um Plankton oder Detritus, so kommt noch die sich aus dem Wachstum oder Abbau der Substanz ergebende Veränderung hinzu.

Zur mathematischen Beschreibung der Vorgänge, die die endogene Verteilung der Trübung bestimmen, sei hier eine Differentialgleichung abgeleitet, der die Trübung — gegeben durch die skalare Größe  $E$  — gehorcht. Unter  $E$  kann man die Konzentration der trübenden Teilchen verstehen oder am besten unmittelbar den EK unter Abzug des EK für reines Wasser und des EK der gelösten Stoffe. Ist  $v$  die Sinkgeschwindigkeit und  $A$  der vertikale Austausch, so ist der Trübungsstrom  $S$  gegeben durch

$$(1) \quad S = -A \operatorname{grad} E + vE$$

Hierbei ist  $vE$  der aus dem Absinken entstehende Teilchentransport, während  $-A \operatorname{grad} E$  der sich aus der turbulenten Vermischung ergebende Anteil ist. Die zeitliche Änderung der Trübung  $E$  ist dann

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\operatorname{div} S + e,$$

wenn  $e$  etwa vorhandene Quellen oder Senken sind. Aus beiden Gleichungen folgt

$$(2) \quad \frac{\partial E}{\partial t} = \operatorname{div} (A \operatorname{grad} E - vE) + e.$$

Im folgenden sei einschränkend immer nur der Fall betrachtet, daß die Verteilung der Trübung in der Umgebung der betrachteten Stelle dieser sehr ähn-

lich ist, daß also alle Ableitungen in x- und y-Richtung verschwinden. Gleichung (2) erhält dann die Form

$$(3) \quad \frac{\partial E}{\partial t} = A \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - (v - \frac{\partial A}{\partial z}) \cdot \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial z} E + e.$$

Diese sich in Form einer partiellen Differentialgleichung ergebende Beziehung gestattet die Verteilung der Trübung unter gegebenen Verhältnissen (A, v, e, Rand- und Anfangswerten) zu berechnen. Doch seien schon hier einige grundsätzliche Bedenken angebracht. Allein das Vorhandensein einer Differentialgleichung geht über die Tatsache hinweg, daß sich die Turbulenz (repräsentiert durch den Austauschkoeffizienten A) in Form von Verschiebungen kleiner Wasserkörper — Turbulenzballen — abspielt und nicht in differentieller Weise, wie die Diffusion. Die Gültigkeit dieser Gleichung wird daher auf Dimensionen beschränkt bleiben, die groß gegenüber den Turbulenzballen sind. Eine andere Schwierigkeit ergibt sich daraus, daß die Koeffizienten v und A nicht konstant sind. Nach der STOKES'schen Formel ist die Sinkgeschwindigkeit v proportional  $\frac{\rho - \rho_w}{\eta}$  wobei  $\rho$  die Dichte des Teilchens  $\rho_w$  die des Wassers und  $\eta$  seine Zähigkeit ist. v ist also sowohl von der Beschaffenheit der Teilchen, als auch von hydrographischen Bedingungen (der Veränderlichkeit von  $\rho_w$  und  $\eta$ ) abhängig und kann unter Umständen gleich null werden. In jedem Fall tritt bei Temperaturabnahme und Dichtezunahme mit der Tiefe eine Abnahme von v ein. Größenordnungsmäßig liegt v bei  $10^{-2}$  bis  $10^{-3}$  cm s<sup>-1</sup>, dies entspricht einer Fallzeit von mehreren Tagen für 10 Meter. Noch wesentlich stärker variiert der vertikale Austauschkoeffizient. Er ist nicht nur in den einzelnen Schichten verschieden und nimmt in Bodennähe ab, sondern wird durch die Strömungen und vor allem durch den Wind stark beeinflusst. In der Beltsee wird er für die relativ homogenen Schichten mit 10—40, für starkgeschichtetes Wasser bei großer Stabilität mit 0,1 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> angegeben. Die Veränderungen von A umfassen also Werte, die über mehrere Zehnerpotenzen reichen.

Die Frage nach der stationären Verteilung der Trübung in einer homogenen Wassermasse (A, v = konst.) ergibt die Gleichung

$$(4) \quad \text{div } S - e = 0.$$

Durch Integration gewinnt man, da an der Oberfläche (z = 0) der Trübungsstrom verschwinden muß (S<sub>0</sub> = 0)

$$(5) \quad S = v E - A \frac{\partial E}{\partial z} = \int_0^z e \, dz.$$

Liegen innerhalb der Wassermasse keine Quellen, d. h. die Trübung besteht nur aus aufgewirbeltem Sediment, so ist e = 0. Die Lösung von (5) hat dann die

Form  $E = E_0 \exp\left(\frac{v}{A} z\right)$  stellt also eine exponentielle Zunahme der Trübung mit der Tiefe dar. Aus dieser Beziehung ergibt sich die Möglichkeit bei Kenntnis der Sinkgeschwindigkeit v aus Trübungsmessungen den Austausch z zu berechnen. Es ist  $\frac{v}{A} = \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial z}$ .

EK-Verteilungen, die eine langsame, stetig wachsende Zunahme der Trübung zeigen, werden fast immer in der freien Kieler Bucht gemessen. Hier können Verhältnisse angenommen werden, die den gemachten Voraussetzungen recht gut ent-

sprechen. Die Schichtung ist nicht sehr ausgeprägt, so daß zunächst mit gleichem  $A$  in allen Tiefen gerechnet werden kann; die Stationen sind genügend weit vom Land entfernt, so daß dessen störende Einflüsse nicht zum Tragen kommen, und es herrschen keine wesentlichen Strömungen. Ein Beispiel einer solchen Verteilung zeigt Abb. 3 g, die im Seegebiet vor Schleimünde gemessen ist. Berechnet man für diese Kurve die relative Trübungsänderung so ergibt sich  $\frac{A}{v} = 2,7 \cdot 10^3$  cm, und bei Zugrundelegung von  $v = 2 \cdot 10^{-3}$  cm s<sup>-1</sup> für den Austauschkoeffizienten der Wert  $A = 5$ .

Nimmt man die Koeffizienten  $A$  und  $v$  als variabel an, so zeigt sich bei Integration der Gleichung  $vE - A \frac{\delta E}{\delta z} = 0$ , daß Veränderungen von  $v$  nur eine unbedeutende Rolle spielen, solange es nicht null wird, Durchläuft hingegen  $A$  ein Minimum, wie es in der Grenzschicht zweier Wasserkörper meist vorliegen dürfte, so nimmt die Trübung sehr stark zu. Das beweist, daß die in Abb. 3 b beschriebenen scharfen Übergänge zwischen verschiedenen getriebten Wasserkörpern stationäre Grenzen zwischen diesen sind. Es genügt aber schon, die sprunghafte Änderung des Austauschkoeffizienten, um einen Knick in den Vertikalkurven des EK hervorzurufen. Es seien  $A_1$  und  $A_2$  die Austauschkoeffizienten zweier Schichten, die bei  $z = z_0$  übereinander liegen und dort die Trübung  $E_0$  besitzen. Die Trübung der beiden Schichten ( $E_1, E_2$ ) ist dann im stationären Fall gegeben durch

$$E_1 = E_0 \exp \left[ \frac{v}{A_1} (z - z_0) \right], \quad E_2 = E_0 \exp \left[ \frac{v}{A_2} (z - z_0) \right].$$

Die Vertikalkurve der entsprechenden Station hat dann an der Stelle  $z = z_0$  einen Knick, da die Tangente nicht stetig ist. Solche Knicke sind in stark geschichtetem Wasser fast immer zu beobachten. Sie zeichnen die Stellen aus, an denen sich der Austausch stark ändert. Als Beispiele mögen die Vertikalkurven des EK vom 24. und 25. 9. in Abb. 4 dienen, wo in 21 bzw. 23 m die trübe Schicht des Bodengewässers beginnt.

Bei konstanten Koeffizienten  $A$  und  $v$  und der Annahme, daß sich keine Quellen in der Wassermasse befinden ( $e = 0$ ), hat Gleichung (3) die Form

$$(6) \quad \frac{\delta E}{\delta t} = A \frac{\delta^2 E}{\delta z^2} - v \frac{\delta E}{\delta z}$$

Ihre Hauptlösung  $U(z, t)$  ist in Analogie zur Wärmeleitungsgleichung

$$(7) \quad U(z, t) = (4 \pi A t)^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{(z - vt - \zeta)^2}{4 A t} \right\}$$

wie man durch Einsetzen in (6) bestätigen kann. Als allgemeine Lösung ergibt sich durch Superposition

$$(8) \quad E(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\zeta) U(z, t, \zeta) d\zeta$$

wobei  $f(z)$  die Anfangsverteilung darstellt. Diese ist allerdings nur für  $z \geq 0$  vorgegeben und muß für  $z < 0$  so ergänzt werden, daß an der Wasseroberfläche ( $z = 0$ ) der Trübungsstrom  $S = A \frac{\delta E}{\delta z} - vE$  verschwindet. Diese Lösung gestattet aus einem gegebenen Anfangszustand den Ablauf der Trübungsverteilung unter den gemachten Voraussetzungen zu berechnen und damit weitere Aussagen zu machen.

Bei Betrachtung von Erscheinungen, die von der Oberfläche genügend weit entfernt sind, kann man auf die Bedingung  $S = 0$  für  $z = 0$  verzichten. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn die Vorgänge des Sedimentierens und Aufwirbelns in Bodennähe betrachtet werden. Man kann dann annehmen, daß der gesamte Trübungsstrom von einer darüberliegenden Schicht aufgenommen oder erzeugt wird, an deren Oberkante die Bedingung gilt. Es sei angenommen, daß zur Zeit  $t = 0$  eine stationäre Verteilung  $f(\zeta) = \exp\left(\frac{v}{A_0}\zeta\right)$  vorliege. In der darauf folgenden Zeit soll der Austauschkoeffizient den Wert  $A \neq A_0$  haben, was etwa durch Anwachsen oder Abflauen des Windes geschehen mag. Aus (8) ergibt sich dann

$$(9) \quad E(z, t) = E_0 \exp\left\{\frac{v}{A_0}\left[z - v\left(1 - \frac{A}{A_0}\right)t\right]\right\}$$

Der Trübungsstrom hat den Wert  $S = vE\left(1 - \frac{A}{A_0}\right)$ , ist also positiv, d. h. trübende Teilchen werden am Boden sedimentiert, wenn  $A < A_0$  ist. Im anderen Fall findet ein Aufwirbeln des Bodensediments statt. Wir erkennen hieraus die Bedeutung des Bodensediments für die Verteilung der Trübung in flachen Gewässern wie der Beltsee, wo die winderzeugte Turbulenz bis in die Tiefen einzudringen vermag. Daraus ergibt sich die bemerkenswerte Folgerung, daß der jahreszeitliche Gang der Trübung, sofern sie aus aufgewirbeltem Sediment besteht und nicht durch Strömungen beeinflusst wird, dem jahreszeitlichen Gang des Windes entsprechen muß. Das verbindende Glied ist der Austausch. Wie auch durch die Beobachtung bestätigt ist, besitzt die Trübung ihre schwächste Ausbildung im Sommer und ihr Maximum im Winter. Als Beispiel sei angeführt, daß während der ersten Meßreihe auf F.S. „Fehmarnbelt“ (Tafel I) in der Zeit der kräftigen Winde (9.—15. 3.) die Wassermassen insgesamt stärker getrübt sind, als während der folgenden ruhigen Periode. Die Eintrübung erreicht dabei erst nach der stärksten Windwirkung ihren Höhepunkt. Das dürfte damit zusammenhängen, daß die Aufwirbelung des Sediments wegen der beträchtlichen Dichteschichtung nicht im Fehmarnbelt selbst erfolgt, sondern über den flacheren Gewässern der Kieler und Mecklenburger Bucht. Erst die Strömungen verfrachten dann die mit Trübung angereicherten Wassermassen durch den Fehmarnbelt. Nach Nachlassen der Windwirkung (16. 3.) und damit geringerem Austausch tritt aber ziemlich bald und in allen Tiefen eine Verminderung der Trübung ein, was an dem fallenden Verlauf der Linien  $EK = \text{konst.}$  zu sehen ist.

#### IV. Die Trübschichten und ihre Ursachen.

Sehen wir von den durch Verschiebung von Wasserkörpern entstehenden exogenen Trübungsmaxima ab (vgl. Abb. 3), so ist die einfachste Art der Erklärung von Trübschichten — also von Ansammlungen der Schwebstoffe in bestimmter Tiefe — die, daß dort die Dichte der Teilchen mit der des Wassers übereinstimmt. In diesen statischen Trübschichten liegt dann tatsächlich ein nur noch durch die Turbulenz gestörtes Schweben vor. Solche Trübschichten dürften unter natürlichen Verhältnissen doch anzutreffen sein, vor allem dort, wo eine sehr starke Dichteschichtung entsteht, wie im inneren Teil mancher Fjorde.

Bei Betrachtung nicht stationärer Zustände und geschichtetem Wasser ( $A, v$  variabel) muß man von Gleichung (3) ausgehen. Man sieht daraus, daß das Ab-

sinken mit der scheinbaren Geschwindigkeit ( $v - \frac{\delta A}{\delta z}$ ) erfolgt, die sogar negativ werden kann, wenn  $\frac{\delta A}{\delta z} > v$  wird, und damit zur Anreicherung der Trübung in dieser Zone führt. Das Glied  $-\frac{\delta v}{\delta z}$  E wirkt wiederum dahin, daß die Trübung in der Schicht der Abnahme der Sinkgeschwindigkeit, die mit der Temperatur- und Dichtesprungschicht zusammenfällt, angereichert wird. Dieses Glied bewirkt auch die erste Störung, die bei vorgegebener Anfangsverteilung beim Absinken der Teilchen zur Ausbildung von Trübschichten führt. Diese entstehen im Anschluß an starke Anreicherungen der Wassermassen mit Trübstoffen dadurch, daß der aus der Deckschicht kommende Trübungsstrom an der Sprungschicht der Sinkgeschwindigkeit angestaut wird. Die dort gebildeten Trübschichten sinken dann unter allmählicher Verflachung ab, bis sie an der Unterkante der Dichtesprungschicht vom Bodenwasser aufgenommen und zerstört werden. Auf diese Vorgänge ist bei Besprechung der Isoplethen der Tafel I hingewiesen worden, wo sich bei Beruhigung der Wetterlage und Klarwerden der Deckschicht in der Sprungschicht Trübschichten ausbilden.

Auch eine weitere Art von Trübschichten, die während des Sommers bei F.S. „Fehmarnbelt“ angetroffen wurde, scheint dynamischer Natur zu sein. In Abb. 4 wird an Hand von Vertikalkurven des EK, des Salzgehaltes und der Temperatur in Verbindung mit Strommessungen gezeigt, in welchem Zusammenhang das Auftreten dieser Trübschichten mit dem Strombild und den Grenzen der Wasserkörper steht. Am 24. 9., wo in allen Tiefen Ausstrom — wenn auch nicht einheitlicher Richtung — besteht, sind im EK deutlich drei Wasserkörper zu unterscheiden. Die Grenzschicht der beiden oberen in 14 m Tiefe fällt zusammen mit dem Temperaturmaximum und der Schicht der starken Geschwindigkeitsabnahme. Sie stellt also die dynamische Grenzschicht dar. Zwischen diesen beiden in verschiedener Richtung bewegten Wasserkörpern bildet sich anschließend (12<sup>h</sup>) eine Trübschicht aus. Der mittlere Wasserkörper ist sehr klares Mischwasser, das nur gering in südwestlicher Richtung bewegt wird, die wieder stärker bewegte Bodenschicht reicht bis 21 m hinauf, ihre starke Trübung ist offenbar durch Aufwirbeln von Sediment bedingt. Am 25. 9. hat sich die Stromrichtung im Tiefenwasser geändert und ist der des Oberflächenwassers entgegengesetzt. Im Temperaturmaximum, in dem Stromlosigkeit gemessen wurde, liegt eine Trübschicht zwischen den beiden sehr klaren Wasserkörpern, die die Deckschicht und das Tiefenwasser bilden. Das Bodenwasser, das bei 23 m beginnt, zeigt wieder eine erhebliche Trübungszunahme zum Boden hin. Die dritte Darstellung vom 29. 9. zeigt Einstrom in allen Tiefen. Die Bodenschicht reicht bis 15 m hinauf, sie ist in Salzgehalt und Temperatur recht einheitlich, während der EK zum Boden hin ständig zunimmt. Wegen der gleichen Richtung des Stromes in allen Tiefen entsteht anscheinend keine Trübschicht. Die am 24. und 25. 9. beobachtete Trübschicht erreicht am 26. 9. bei Durchzug einer Front die Oberfläche und verschwindet gleichzeitig mit dem Temperaturmaximum (vgl. Tafel II). Die Grenzschicht in verschiedener Richtung bewegter Wasserkörper scheint also Anlaß zu einer Anreicherung von Schwebstoffen zu geben, die in ihr zurückgehalten werden. Inwieweit diese Anreicherung von Schwebstoffen mit den Austauschvorgängen in dieser Grenzschicht zusammenhängt, müßte noch genauer untersucht werden. Es ist zu vermuten, daß in ihr Aufwärtskomponenten der Wasserbewegung vor-

handen sind, die größer als die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen sind, so daß es zu deren Anreicherung kommt.

An einer anderen sehr stationären Trübschicht, die bei F.S. „Flensburg“ über längere Zeit beobachtet wurde, soll die Methode der quellenmäßigen Darstellung

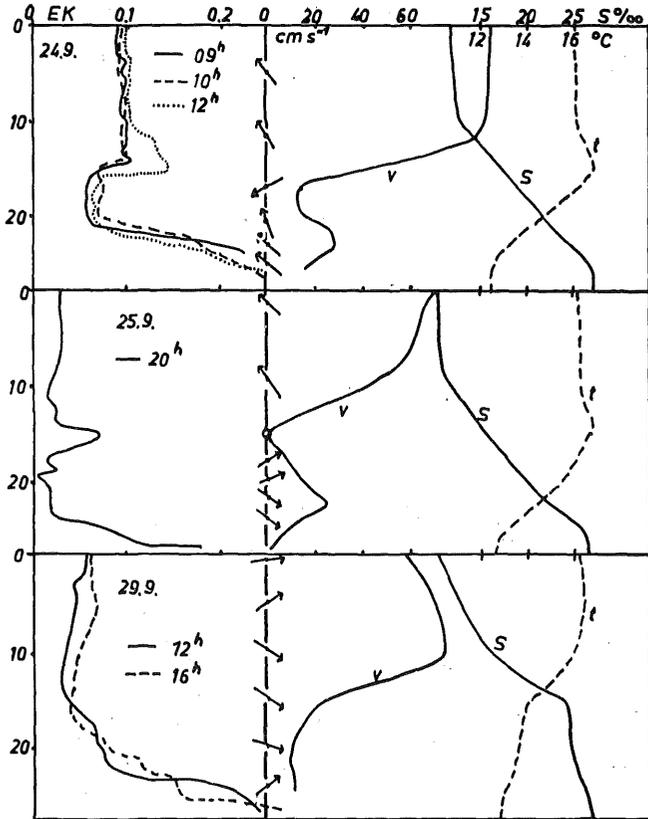


Abb.4 Vertikalkurven des EK in Verbindung mit Strommessungen Salzgehalt (S) und Temperatur (t). F.S. Fehmarnbelt. Pfeile bedeuten Stromrichtung im Sinn der Kompassrose.

der Trübungsverteilung erläutert werden. Im stationären Fall ergibt sich die oben entwickelte Gleichung

$$(5) \quad S = v E - A \frac{\delta E}{\delta z} = \int_0^z e \, dz.$$

Einerseits kann man durch Vorgabe der Quellen und Senken  $e$  die Verteilung der Eigenschaft  $E$  berechnen, wie es RILEY, STOMMEL und BUMPUS (1949) zur Er-

mittlung der Verteilung des Planktons im westlichen Atlantischen Ozean getan haben. Andererseits kann man bei Kenntnis der vertikalen Trübungsverteilung ( $E, \frac{\delta E}{\delta z}$ ) die Verteilung der Quellen und Senken durch einen Differentiationsprozeß eindeutig bestimmen, sofern A und v bekannt sind.

Die Verteilung der Trübung bei F.S. „Flensburg“ in der Zeit vom 18. bis 25. 8. ist ausgesprochen stationär, was aus dem in Abb. 5 dargestellten Diagramm der vertikalen EK-Verteilung zu erkennen ist. Der Rechnung ist die mittlere Vertikal-kurve des EK zugrunde gelegt, dazu ist  $v = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  und  $A = 5$  für die Deckschicht oberhalb 8 m und  $A = 1$  für die darunterliegenden Wassermassen

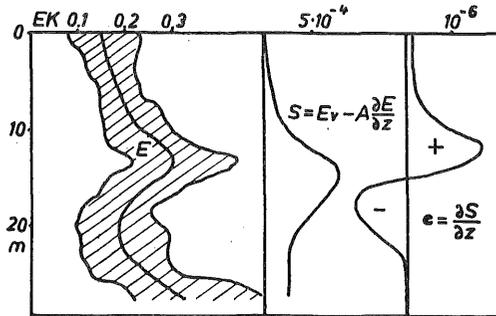


Abb. 5. Schwankungsdiagramm der vertikalen Verteilung des Extinktionskoeffizienten bei F.S. „Flensburg“ vom 18. bis 25. 8. 1949. Daraus berechnet: mittlere Vertikal-kurve des EK, Trübungsstrom S und Verteilung der Quellen e.

angenommen. Die Wahl von A ist damit zu begründen, daß an der Oberfläche  $S = 0$  sein muß, außerdem ist A aus dem Eindringen der täglichen Temperaturwelle ermittelt worden. Aus S läßt sich dann durch Differenzieren die Verteilung der Quellen bestimmen. Man kann sie einerseits als Zonen des Wachstums oder des Abbaues von Plankton betrachten. Es ist interessant, die Verteilung des Planktons während dieser Zeit zu vergleichen, wie sie in Abb. 2 dargestellt ist. Im Zusammenhang mit der dort gemachten Bemerkung, daß das Plankton in diesen Gewässern nur eine geringe Rolle für den EK spielt, und aus der Tatsache, daß das Assimilationsmaximum der Planktonverteilung in 5 m in der Kurve der Quellen nicht zum Ausdruck kommt, ist man gezwungen, diese Quellen als einen Effekt der Verschiebung der Wasserkörper zu deuten. Für die Zirkulation innerhalb der Förde ergibt sich aus den Bestimmungen des Salzgehaltes folgendes Bild: Während am 12. 6. erstmalig am Boden 19 ‰ gemessen werden, hat sich bis zum August die Förde mit salzreichem Wasser bis zu 25 ‰ aufgefüllt und die 19 ‰ Isohaline liegt an der Oberkante der Sprungschicht in etwa 10 m. Das bedeutet im Mittel einen Einstrom klaren Wassers in der Tiefe und einen Ausstrom mit Trübstoffen angereicherten Wassers an der Oberfläche. Diese beiden Bewegungen halten die Trübschicht aufrecht, indem sie diese an ihrer Oberkante ständig erneuern und an ihrer Unterkante abbauen. Diese Trübschicht ist also, obwohl eine endogene, letzten Endes auf die Verschiebung von Wassermassen zurückzuführen.

## V. Die Trübung als Indikator von Wasserkörpern.

Die Abgrenzung und Verfolgung von Wasserkörpern ist in einem Gebiet wie der Beltsee mit ihren rasch wechselnden hydrographischen Lagen besonders wichtig. Diese Wasserkörper verschiedener Herkunft und verschiedener physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften sind die Träger des Wasseraustausches zwischen Ost- und Nordsee durch dieses Übergangsgebiet. Im vorangegangenen Abschnitt ist gezeigt, in welchem engem Zusammenhang die Trübungsverteilung mit dem hydrographischen Aufbau der Wassermassen steht, was uns die Möglichkeit in die Hand gibt, aus EK-Messungen Rückschlüsse auf diesen zu ziehen. EK-Messungen haben hierbei den Vorzug, Messungen *in situ* zu sein und außerdem sogleich bei ihrer Gewinnung einen Überblick über die Lage zu geben.

Die Wasserkörper unterscheiden sich zunächst durch ihren verschiedenen EK. Dieser ist nur eine Eigenschaft des Wasserkörpers unter anderen. Doch treten die Grenzen zwischen übereinander liegenden Wasserkörpern im allgemeinen recht deutlich hervor. Auf wichtige Grenzerscheinungen ist bei Besprechung der endogenen Trübungsverteilung hingewiesen worden. So rufen Minima des Austausches scharfe Übergänge im EK hervor, verschiedener Austausch in beiden Wasserkörpern einen Knick in der Vertikalkurve des EK, und an der Grenze in verschiedener Richtung bewegter Wasserkörper bilden sich oft Trübschichten. Zu diesen kommen noch die sich aus der Verschiebung von Wasserkörpern ergebende Erscheinung — exogene Trübungsmaxima und -minima — hinzu. Die erwähnten Möglichkeiten Grenzen von Wasserkörpern festzulegen gehen einerseits

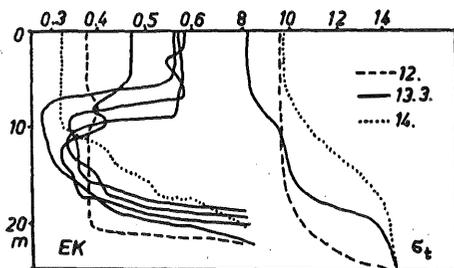


Abb. 6. Trüber Wasserkörper in der Deckschicht bei F.S. „Fehmarnbelt“. 12. bis 14. 3. 1949. Vertikalkurven des EK und der Dichte.

vom Grad der Trübung, andererseits im wesentlichen von ihrer Beziehung zum Austausch aus, womit die Wasserkörper in Bezug auf ihr dynamisches Verhalten unterschieden werden. EK-Messungen werden also ein wertvolles Hilfsmittel zur Ergänzung dynamischer Untersuchungen in engen Meeresgebieten sein, da sie die Wasserkörper als Elemente im dynamischen Geschehen festlegen.

Einen typischen Fall eines Wasserkörpers, der zur Ausbildung einer klaren Zwischenschicht führt zeigt Abb. 6. Am 12. 3. reicht das relativ klare Ostseewasser ( $EK = 0,4$ ) bis 21 m, während das Bodenwasser sehr stark getrübt ist ( $EK > 1,0$ ). Der Übergang ist im EK sprunghaft, in der Dichte nicht so kraß. Am 13. 3. tritt ein Wasserkörper geringerer Dichte und stärkerer Trübung ( $EK = 0,57$ )

auf, dessen Vertikalerstreckung zunächst bis 10 m reicht und dann langsam auf 7 m abnimmt. Während dieser Zeit wechselt der Strom und der Wasserkörper wird nach Osten zurückgedrängt. Am folgenden Tag ist die vorherige Trübungsverteilung wieder hergestellt, wenn man davon absieht, daß die Sprungschicht sich während dieser Zeit gehoben hat und die Grenze zwischen Ostsee- und Bodensee jetzt bei 10 m liegt, was auch an den Vertikalkurven der Dichte zu erkennen ist. Das Trübungsminimum des 13. 3., das hier als klare Schicht hervortritt, ist etwa 8 m mächtig, im Gegensatz zu dem in Abb. 3 a dargestellten, das nur als eine ganz dünne Lamelle ausgebildet ist.

In der folgenden Tabelle sind die Ausdehnungen und die Eigenschaften der Wasserkörper, die während der beiden Meßreihen auf F.S. „Fehmarnbelt“ im März und September in der Deckschicht beobachtet worden sind, zusammengestellt. Während sich die Grenzen der Wasserkörper auf Grund des Meßverfahrens bezüglich ihrer Tiefenlage sehr genau festlegen lassen, entsteht bei der Ermittlung

Tabelle 1. Ausdehnung und Eigenschaften von Wasserkörpern der Deckschicht im Fehmarnbelt.

Datum	horiz. Ausdehnung sm	vertik. Ausdehnung m	EK -1 m	S ‰	mittl. Strom cm/s	E = Einstrom A = Ausstrom
6. 3. 1949	21	5	0,27	13	50	A
9. 3.	34	18	0,26	11	90	A
15. 3.	26	10	0,55	12,5	50	E
16. 3.	15	11	0,38	14	50	E
24.—25. 3.	15	7	0,13	13	30	A
25.—27. 3.	50	12	0,17	12	50	A
27.—30. 3.	75	15—19	0,13	12—16	60	A
22.—23. 9.	37	12	0,15	11	60	A
24.—25. 9.	50	15	0,10	12	90	A
25.—26. 9.	22	13	0,03	11	50	A
27.—28. 9.	32	13	0,04	11	60	E
28. 9.	16	10	0,065	12—16	70	E

s. Tafel I

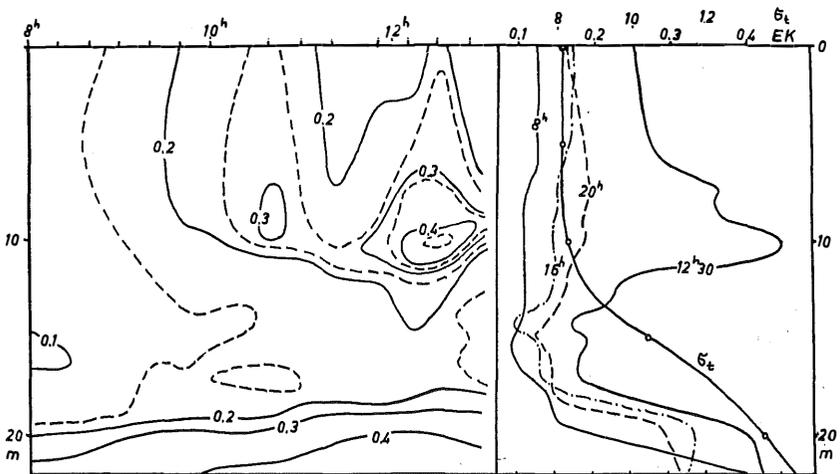
s. Tafel II

ihrer horizontalen Ausdehnung von einer festen Beobachtungsstation aus (horizontale Ausdehnung = Zeitdauer des Vorüberziehens  $\times$  mittlerer Strom) eine Unsicherheit der Größe des Produktes aus Stromgeschwindigkeit und zeitlichem Abstand der Serien. Diese dürfte bei den gemachten Angaben 2 bis 5 Seemeilen betragen.

Diese Wasserkörper entstehen wahrscheinlich bei der Verschiebung der Fronten dadurch, daß einzelne Teile der Wassermassen in den stark gegliederten Meeresteilen der Beltsee abgetrennt werden, worauf auch WATTENBERG (1949) hingewiesen hat. Diese machen dann als relativ selbständige und isolierte Wasserkörper die Bewegungen der Fronten mit, bis sie im Laufe der Zeit aufgelöst werden. Diese Vermutung wird durch die horizontalen Abmessungen der Wasserkörper nahegelegt, die in Größenordnung der Meeresstraßen und Meeresengen liegen. Ihre vertikale Ausdehnung ist durch die Mächtigkeit der Deckschicht begrenzt. Eine Erklärung dafür, daß die Wasserkörper im Fehmarnbelt bei Ausstrom im Mittel größer als bei Einstrom sind, ist darin zu suchen, daß die Beltseefront im allgemeinen westlich des Fehmarnbelt und dieser damit im Bereich des Ostseewassers liegt. Die Wasserkörper des Ostseewassers wandern zunächst bei

Ausstrom durch den Fehmarnbelt, werden dann teilweise abgebaut oder zerspalten und erreichen ihn zum zweiten Male bei Einstrom nach Umschlagen der Stromrichtung.

Bei Durchführung von kurzfristigen Wiederholungsmessungen wurde am 30. 3. bei F.S. „Fehmarnbelt“ das Vorüberziehen einer Trübungswolke — eines wesentlich kleineren Wasserkörpers — beobachtet (Abb. 7). Die Übergangsschicht zwischen dem klaren Wasser der Deckschicht ( $EK = 0,12$ ), das auch den größten Teil der Dichtesprungschicht einnimmt, und dem trüben Bodenwasser ( $EK > 0,3$ ) liegt während der ganzen Zeit bei etwa 20 m. In der Wassersäule von 0 bis 10 m beginnt in der Zeit zwischen 8<sup>h</sup> und 10<sup>h</sup> ziemlich gleichzeitig und gleichmäßig eine Eintrübung. Um 10<sup>h</sup>30 zieht eine erste kleinere Trübungswolke hindurch, der zwischen 12<sup>h</sup> und 13<sup>h</sup> eine größere folgt, deren Kern einen  $EK > 0,45$  aufweist. Die Unterkante dieses Gebildes deckt sich ziemlich genau mit der in etwa 10 m



Isoplethen des Extinktionskoeffizienten, Vertikalkurven des EK und der Dichte.  
Abb.7 Vorüberziehen einer Trübungswolke bei Feuerschiff Fehmarnbelt am 30.3.1949.

beginnenden Dichtesprungschicht, was bedeutet, daß die Trübungswolke gleichsam auf der Dichtesprungschicht „schwimmt“. Nach Durchwandern der Trübungswolke ist die vorhergehende Verteilung im wesentlichen wiederhergestellt, was aus den Vertikalkurven um 16<sup>h</sup> und 20<sup>h</sup> zu erkennen ist. Vergleicht man hierzu die Isoplethen der Tafel I, so sieht man, daß diese Trübungswolke der Beginn eines trüberen Wasserkörpers ist, der in der Folgezeit die Schicht oberhalb 10 m einnimmt und auch im Salzgehalt (10,1 ‰) hervortritt. Unter Zugrundelegung eines Stromes von  $65 \text{ cm s}^{-1}$  an der Oberfläche ist den beiden Kernen der Trübungswolke ( $EK > 0,3$ ) eine Ausdehnung von 0,4 bzw. 2 m zuzumessen, ihre Höhe beträgt 3 bzw. 5 m. Die Gesamtausdehnung der Erscheinung ist mit 6 m anzugeben. Wesentlich jedoch ist die Beobachtung, daß es Wasserkörper dieser Größenordnung gibt, die sich in ihren Eigenschaften dermaßen stark von der Wassermasse unterscheiden, in der sie eingebettet sind. Ähnliche sich in ihrer Temperatur von der um-

gebenden Wassermasse unterscheidende Gebilde hat WEIDEMANN (1948) im Fehmarnbelt beobachtet und als Kälteballen bezeichnet. Diese Kälteballen treten im Gefolge kräftiger Ostwinde (etwa 2 Tage danach) im Fehmarnbelt an der Oberkante der Dichtesprungschicht auf. Als Ursprungsgebiet der nur im Sommer beobachteten (jedoch auch im Winter vermutlich vorhandenen) Erscheinung wird das Arkonabecken angegeben. Die hier beschriebene Trübungswolke scheint mit diesen Kälteballen identisch zu sein. Auch ihr geht eine merkliche Windspitze (Ost 6) zwei Tage voraus. Die Eintrübung könnte der Wasserkörper bei Überqueren der Darsser Schwelle durch Aufwirbeln von Sediment erfahren haben. Wenn auch WEIDEMANN keine Abmessungen für die beschriebenen Wasserballen angegeben hat, lassen seine Darstellungen auf die gleiche Größenordnung schließen.

Die auffallendste Erscheinung während der sommerlichen Meßreihe (Tafel II) sind die die Sprungschicht einnehmenden klaren Wassermassen. Diese klare Schicht scheint aus Wassermassen der Kieler Bucht gebildet zu sein, die im Sommer zu meist gleichmäßig klar sind. Eine Annahme, die auch noch dadurch nahegelegt wird, daß nach Vorüberziehen einer Front am 26. 9., die von SE nach NW verläuft und ostwärts wandert, sich das klare Wasser bei gleichzeitigem Verschwinden des Temperaturmaximums bis zur Oberfläche ausdehnt. Dieser Ausläufer klaren Wassers der Kieler Bucht im Fehmarnbelt stellt also den Einfluß dar, den die Wassermassen der Kieler Bucht auf den Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee auf der Linie Fehmarnbelt — Großer Belt nehmen. Gleichzeitig zeigt er, daß die Sprungschicht im Fehmarnbelt nicht eine Stätte der Vermischung ist, die vielmehr in der Kieler Bucht stattfindet, sondern eine in sich geschlossene Wassermasse über die sich die Wasserkörper des Ostseewassers und unter die sich die des Nordseewassers schieben. Das Entstehungsgebiet dieser Wassermasse ist die Kieler Bucht, in deren relativ weitem Raum sie sich durch Vermischung bildet.

## VI. Die regionale Verteilung der Trübung.

In den vorangegangenen Abschnitten ist auf Grund von Messungen an einer Station über längere Zeiträume der Ablauf der Trübungsverteilung beschrieben und gedeutet worden. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollen jetzt auf Messungen, die räumlich auseinander liegen, angewandt und durch sie ergänzt werden. Da es sich gezeigt hat, daß die Verteilung der Trübung in engem Zusammenhang mit dem Aufbau der Wassermassen steht, soll versucht werden aus EK-Messungen weitere Schlüsse auf diesen zu ziehen.

Angeregt durch die bei F.S. „Fehmarnbelt“ während der winterlichen Meßreihe festgestellte extreme Eintrübung des Bodenwassers und durch die Beobachtung, daß das Bodenwasser im Großen Belt bei allen Untersuchungsfahrten klarer als das im Fehmarnbelt war, ist am 26. 7. 1949 eine Fahrt in das Gebiet zwischen Großen Belt und Fehmarnbelt mit Forschungskutter „Südfall“ durchgeführt worden. Die Lage der 40 Stationen mit Vertikalserien des EK (16 davon auch mit hydrographischen Serien), die innerhalb 14 Stunden gewonnen sind, geht aus Abb. 8 a hervor. Diese Abbildung gibt auch einen Eindruck von der hydrographischen Situation. Nach einer längeren Ausstromperiode herrscht Einstrom in allen Tiefen. Die Wassermassen der Deckschicht (13,5—14 ‰) bewegen sich vom Großen Belt weit ausholend zum Fehmarnbelt und schneiden dabei die Wassermassen der Kieler Bucht ab. Es bildet sich eine Front (Salzgehaltssprung 12,2

bis 13,5 ‰), die sich von Langeland westlich und südlich des Stationsnetzes nach Fehmarn hinzieht. Das Bodenwasser besitzt einen Salzgehalt von über 25 ‰. Die Lage des in Abb. 9 wiedergegebenen Schnittes ist in Abb. 8 a eingetragen. Er liegt entlang der tiefsten Rinne, die Großen Belt und Fehmarnbelt verbindet. Dieser EK-Schnitt zeigt eine relativ homogene, wenig gegliederte Deckschicht. In der darunter gelegenen Dichtesprungschicht liegt eine Trübschicht. Sie tritt über dem

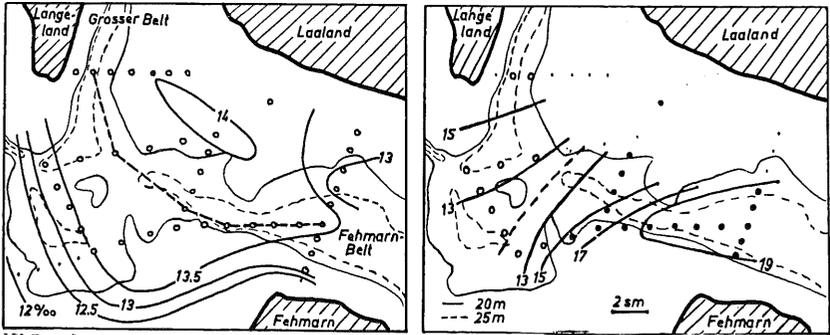


Abb. 8 a. Salzgehalt an der Oberfläche am 26. 7. 1949. — — — Lage des Schnittes der Abb. 9.  
 Abb. 8 b. Tiefenlage der dynamischen Grenzschicht, ermittelt aus der Verteilung des EK.  
 ○ klares, ● trübes Bodenwasser.

klaren Bodenwasser des Großen Belt stärker in Erscheinung als über dem trüben Bodenwasser im Fehmarnbelt und verläuft zwischen 15 und 20 m in starker Annäherung an das Bodenprofil. Eine Karte der Tiefenlage der dynamischen Grenzschicht, wie sie sich aus den Vertikalkurven des EK ergibt, ist in Abb. 8 b gegeben. Sie steigt über der Schwelle an und sinkt im Fehmarnbelt, wo die Deckschicht eine immer größere Mächtigkeit erreicht, langsam ab.

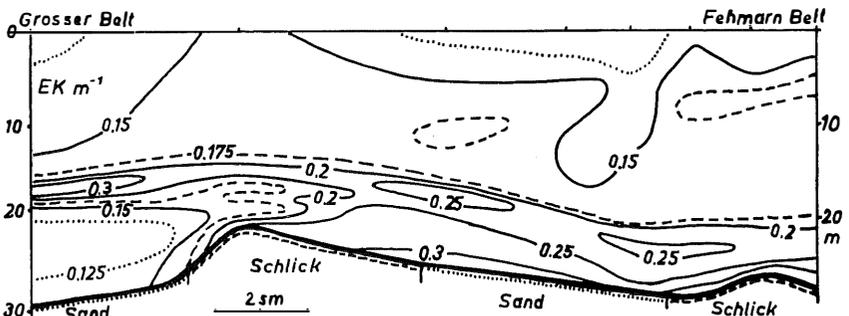


Abb. 9 Längsschnitt des Extinktionskoeffizienten vom Großen Belt zum Fehmarnbelt. 26.7.1949.

Das Bodenwasser, das nicht nur im Großen Belt, sondern im ganzen Gebiet vor der erwähnten Schwelle sehr klar ist, ist nach Überströmen derselben erheblich stärker getrübt. Zieht man den Atlas der Bodenbeschaffenheit der Deutschen Seewarte zum Vergleich heran, so sieht man, daß der Boden auf dieser Schwelle aus

Schlack besteht, während im Großen Belt sandiger und kiesiger Boden ist. Da die Stromgeschwindigkeit des Bodenstromes über der Schwelle eine Zunahme erfahren muß, was zu einer größeren Turbulenz führt, wird anscheinend Sediment aufgewirbelt und das Bodenwasser mit Trübstoffen angereichert. Die Bodenbeschaffenheit ist in dem Schnitt der Abb. 9 eingetragen. Eine andere Erklärungsmöglichkeit wäre, daß zufällig die Grenze zwischen einem trüben und einem klaren Wasserkörper über der Schwelle liegt. Doch ist dies weniger wahrscheinlich, da, wie anfangs bemerkt, im Großen Belt in allen Fällen klareres Bodenwasser als im Fehmarnbelt beobachtet worden ist.

Im Anschluß an eine Meßreihe auf F.S. „Flensburg“ ist am 19. 6. 1949 ein Längsschnitt durch die Flensburger Förde mit Forschungskutter „Südfall“ gelegt worden (Abb. 10). Auf der 34 Seemeilen langen Strecke von Flensburg bis zur Breitgrund-Ansteuerungstonne liegen 22 Stationen mit EK-Messungen, 9 davon auch mit hydrographischen Serien. In den vorangegangenen Tagen haben kräftige westliche Winde das leichte Oberflächenwasser aus der Förde herausgetrieben. Dies führt zu einem Einstrom salzreicheren Wassers (23 ‰) durch den Breitgrund und zu einem Auffüllen der Innenförde mit Wasser von 18 ‰. Dieses Wasser,

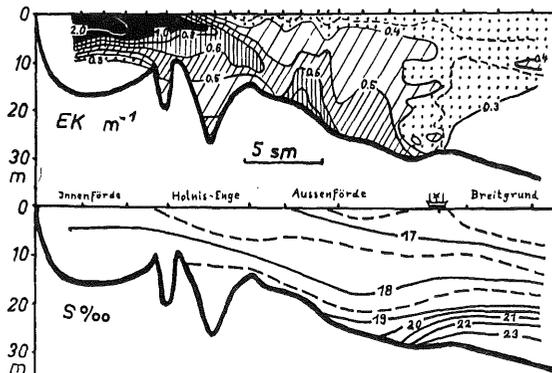


Abb. 10. Längsschnitt des Extinktionskoeffizienten und des Salzgehaltes durch die Flensburger Förde am 19. 6. 49.

das während der vorangegangenen Untersuchungen auf F.S. „Flensburg“ als relativ nährstoffreich festgestellt worden ist, was durch Abwässer der Innenförde noch verstärkt sein dürfte, gibt offenbar bei seinem Aufsteigen Anlaß zu einer Planktonblüte in der Innenförde. Dadurch wird dieser Wasserkörper dermaßen stark getrübt, daß das D-Gerät keine Anzeige mehr liefert. Das Wasser ist dunkelgrün, die Sichttiefe beträgt nur 0,5 m. Andererseits ist unterhalb 10 m das Wasser bemerkenswert klar, woraus man schließen muß, daß es nicht erneuert worden ist. Hierauf deutet auch seine Temperatur von nur 9,5° gegenüber 16° der Deckschicht und sein geringer Sauerstoffgehalt hin. Diese Erscheinung stimmt mit der Tatsache überein, daß die Satteltiefe der Holnis-Enge nur 9 m beträgt. Nach Abflauen des Windes muß sich diese nicht im Gleichgewicht befindliche Dichteschichtung wieder ausgleichen, was zu einem Eindringen leichteren Wassers an der Oberfläche in die Innenförde führt. Dieser Vorgang ist im EK-Schnitt recht gut zu beobachten,

da das eindringende Wasser relativ klar ist. Die Dicke dieser eindringenden Schicht ist in der Holnis-Enge bei ganz glatter Wasseroberfläche zu 40 cm festgestellt worden, eine Seemeile davon entfernt war sie bereits 2 m stark. Im EK-Schnitt erstreckt sich eine Zunge trüben Wassers entlang der 18 ‰ Isohaline durch die Holnis-Enge in die Außenförde, woraus zu schließen ist, daß in der Tiefe gleichzeitig trübe Wassermassen die Innenförde verlassen. Von dieser Zunge hat sich anscheinend bereits ein Wasserballen abgelöst. Eine weitere bemerkenswerte Erscheinung ist die auf der Höhe von F.S. „Flensburg“ beim Eindringen des salzreichen Bodenwassers erfolgende Verwirbelung. Doch liegen hier die hydrographischen Beobachtungen nicht genügend eng, um spezielle Aussagen machen zu können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Messungen der Verteilung des Extinktionskoeffizienten nicht nur für die Kenntnis der Verteilung der Schwebstoffe von Bedeutung sind, sondern uns die Möglichkeit in die Hand geben, in den feineren ozeanographischen Aufbau der Wassermassen einzudringen. Damit werden sie ein wichtiges Hilfsmittel zur Ergänzung dynamischer Untersuchungen in engen Meeresgebieten.

#### Literaturverzeichnis.

- JOSEPH, J., 1946: Über die Extinktion des Lichtes im Meerwasser und ihre Messung. Dissertation, Kiel 1946.
- JOSEPH, J., 1946: Meereskundliche Meßgeräte. In Naturforschung und Medizin in Deutschland (FIAT-Berichte) Bd. 18, II.
- JOSEPH, J., 1949: Durchsichtigkeitsmessungen im Meere im ultravioletten Spektralbereich. Dt. Hydrogr. Z. 2, 5.
- JOSEPH, J. und WATTENBERG, H., 1944: Untersuchungen über die optischen Verhältnisse im Meer. Mitt. Chef Hydrogr. Dienst 1944.
- KALLE, K., 1937: Nährstoff-Untersuchungen als hydrographisches Hilfsmittel zur Unterscheidung von Wasserkörpern. Ann. d. Hydr. 1937, 1.
- PETTERSSON, H., 1934: A Transparency-Meter for Sea-Water. Medd. Göteborgs Högskolas Ocean. Inst. No. 7.
- RILEY, G. A., STOMMEL, H., BUMPUS, F., 1949: Quantitative Ecology of the Plankton of the Western North Atlantic. Bull. Bingham Ocean. Coll. XII, 3.
- WATTENBERG, H., 1938: Untersuchungen über Durchsichtigkeit und Farbe des Seewassers. Kieler Meeresforschungen, II, 2.
- WATTENBERG, H., 1949: Die Salzgehaltsverteilung in der Kieler Bucht und ihre Abhängigkeit von Strom- und Wetterlage. Kieler Meeresforschungen, VI.
- WEIDEMANN, H., 1948: Über unperiodische und periodische Vorgänge beim Wasseraustausch der Beltsee. Dissertation, Kiel 1948.