

# KIELER MEERESFORSCHUNGEN

Institut für Meereskunde an der Universität Kiel

Herausgegeben von G. DIETRICH

unter Mitwirkung von

R. SCHUSTER und E. SCHULZ (Zoologisches Institut),  
F. DEFANT, F. GESSNER, G. HEMPEL, W. KRAUSS, J. KREY,  
G. RHEINHEIMER und C. SCHLIEPER (Institut für Meereskunde)

---

---

Band XXIV

1968

Heft 2

---

---

Sonderdruck S. 59—65

## Die Häufigkeitsverteilung von Wasserarten im Ausstrombereich von Meeresstraßen

VON GEROLD SIEDLER

---

---

Kommissionsverlag Walter G. Mühlau, Kiel

## Die Häufigkeitsverteilung von Wasserarten im Ausstrombereich von Meeresstraßen<sup>1)</sup>

VON GEROLD SIEDLER

**Zusammenfassung:** Der Ausstrom von Wasser aus Nebenmeeren des ariden Typs in den angrenzenden Ozean führt zu einem Maximum in der vertikalen Temperatur- und Salzgehaltsverteilung in einem bestimmten Tiefenbereich. Messungen mit der Bathysonde haben gezeigt, daß man häufig eine Struktur mit zwei Hauptmaxima findet.

Für ein einfaches Modell der Ausstromverhältnisse in einer Meeresstraße wird die Häufigkeitsverteilung der ausströmenden Wasservolumina als Funktion des Salzgehalts bestimmt. Numerische Rechnungen mit Werten, die näherungsweise für die Straße von Gibraltar gelten, ergeben Häufigkeitsverteilungen mit zwei ausgeprägten Maxima. Man findet also bevorzugt Wasserarten mit zwei bestimmten Salzgehalten, die sich in etwas verschiedenen Tiefenbereichen im Ozean ausbreiten müssen und damit die beobachtete vertikale Verteilung von Temperatur und Salzgehalt verursachen.

**The frequency distribution of water types in the outflow region of straits (Summary):** Studies have been made of the exchange of water between seas of an arid type and the adjacent ocean. At comparable densities, the water in the sea is usually warmer and more saline than that in the ocean. In the ocean, outside the connecting strait, profiles of temperature and salinity show that part of the water originated in the adjacent sea. Continuous measurements of temperature and electrical conductivity were made with the Bathysonde aboard the R. V. Meteor. The profiles showed two main maxima in temperature and salinity, both in the Red Sea outflow into the Indian Ocean and in the Mediterranean outflow into the Atlantic.

The observed double-maximum structure might be explained by double peaks in the frequency distribution function of both temperature and salinity in the water flowing out of the strait (Bab el Mandeb, Gibraltar). This is equivalent to two preferred densities of the water originating from the basin and spreading in the ocean.

A simple model is used to determine the frequency distribution of volumes of water off the strait as a function of salinity. A sufficient approximation can be obtained by assuming that the outflowing water will be completely vertically mixed in the outflow region of the strait within a time period shorter than the predominant tidal period. In this case, the normalized frequency distribution  $p$  as a function of salinity  $S$  is given by equs. (4) and (5).

This function,  $p(S)$ , is then computed with data approximating the current and salinity structure for the Strait of Gibraltar. The current profiles are described by a linear superposition of three velocity components: A parabolic velocity profile, a surface tide and an internal tidal boundary wave (equs. (6) and (7)). The current profiles and the corresponding computed frequency distribution with no internal boundary wave are shown in figs. 3a and 4a. Figs. 3b and 4b include the effect of an internal boundary wave. In each case,  $p(S)$  has the double maximum expected on the basis of observations. The addition of an internal boundary wave shifts the maximum from low salinities to somewhat higher salinities.

### Die Fragestellung

Messungen der Feinstruktur der Temperatur- und Salzgehaltsschichtung im nordwestlichen Indischen Ozean 1965 (vgl. G. KRAUSE, 1968) und im östlichen Nordatlantik 1967 (noch unveröffentlicht) auf F. S. Meteor haben gezeigt, daß in den mittleren Tiefen dieser Ozeane als Folge des Roten Meer- bzw. Mittelmeerwasserausstroms häufig zwei Hauptmaxima in der Vertikalverteilung von Temperatur und Salzgehalt auftreten.

<sup>1)</sup> Contribution No. 2104 from the Woods Hole Oceanographic Institution

Abb. 1 zeigt je ein typisches Temperatur- und Salzgehaltsprofil aus dem Indischen und aus dem Atlantischen Ozean. G. KRAUSE (1968) hat zwei mögliche Erklärungen für die Entstehung dieser Struktur im Arabischen Meer zur Diskussion gestellt. In jedem Falle wurde angenommen, daß Wasserarten etwas unterschiedlicher Dichte durch die Vermischungsvorgänge im Bereich der Straße von Bab el Mandeb entstehen, die sich dann bevorzugt in zwei Tiefenbereichen des Indischen Ozeans ausbreiten. Einmal wurde die Möglichkeit angedeutet, daß die Vermischung als Folge der Gezeitenströme in der Straße eine solche Wasserartenverteilung verursachen könnte, zum anderen wurde die Aufteilung des ausströmenden Roten Meer-Wassers in zwei zeitweise getrennte Ströme als Folge der speziellen Bodentopographie am Ausgang der Straße von Bab el Mandeb zur Erklärung herangezogen. Nachdem eine ähnliche Feinstruktur in der vertikalen Verteilung von Temperatur und Salzgehalt westlich der Straße von Gibraltar beobachtet werden konnte, liegt es nahe, die Ursache nicht im Einfluß der speziellen Bodentopographie, sondern bei Vorgängen zu suchen, die allen Meeresstraßen zwischen den Ozeanen und Nebenmeeren des ariden Typs gemeinsam sein können. Es soll daher im folgenden untersucht werden, welche Häufigkeitsverteilung der aus einer Meeresstraße ausströmenden Wasserarten man als Folge der periodischen Variationen der Schichtungs- und Strömungsverteilung in der Straße zu erwarten hat. Dazu wird die Häufigkeitsverteilung der ausfließenden Wasservolumina in Abhängigkeit vom Salzgehalt bzw. von der Temperatur bestimmt werden, die als Folge der unterschiedlichen Tiefenlage der Strom- und der Dichtergrenzfläche in der Straße und der starken Vertikalvermischung im Ausstrombereich entsteht. An einem Beispiel, das näherungsweise die Verhältnisse in der Straße von Gibraltar beschreibt, soll gezeigt werden, daß eine Häufigkeitsverteilung mit zwei Hauptmaxima entsteht. Den Salzgehalten bzw. Temperaturen für diese Maxima entsprechen verschiedene Dichten. Die zugehörigen Wasservolumina müssen sich daher in etwas verschiedenen Tiefenhorizonten im offenen Ozean ausbreiten und werden zu entsprechenden Maxima in der Vertikalverteilung des Salzgehaltes bzw. der Temperatur führen.

In starker Vereinfachung soll angenommen werden, daß sich das während eines Bruchteils einer Gezeitenperiode ausströmende Wasser bis zum Erreichen der Tiefe horizontaler Ausbreitung vollständig in der Vertikalen vermischt hat. Diese Annahme liegt wegen der geringen Scherungsstabilität, wie sie die Berechnung von Richardson-Zahlen für Meeresstraßen zeigt, nahe. Zum Beispiel erhält man aus der über mehrere Tage gemittelten Vertikalverteilung von Strom und Dichte in mittleren Tiefen der Straße von Bab el Mandeb (G. SIEDLER, 1968) folgende Werte:

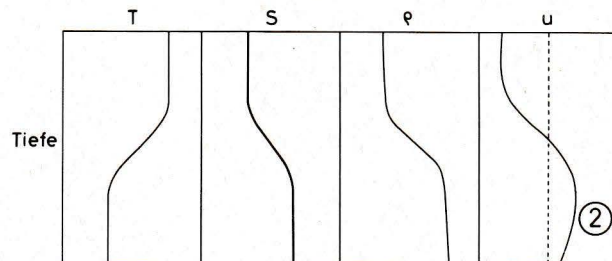
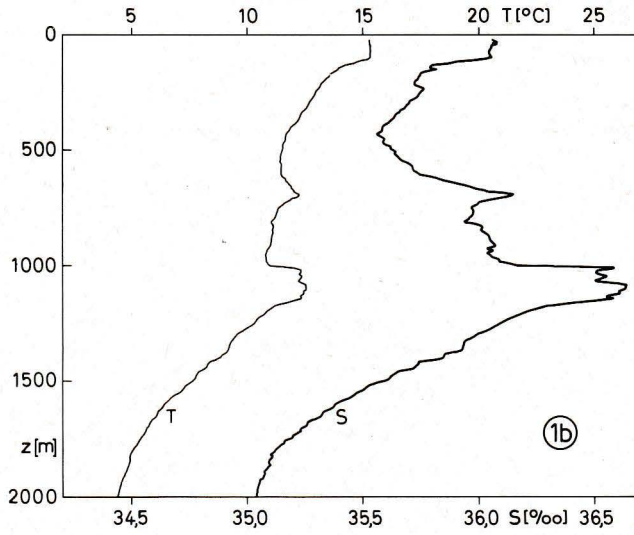
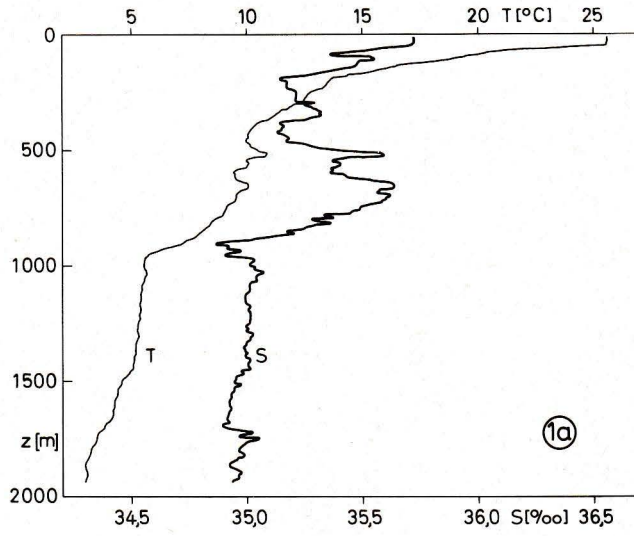
$$\frac{du}{dz} \approx -2,5 \cdot 10^{-2} \text{ sec}^{-1} \quad \frac{d\rho}{dz} \approx -10^{-7} \text{ g cm}^{-4}$$

---

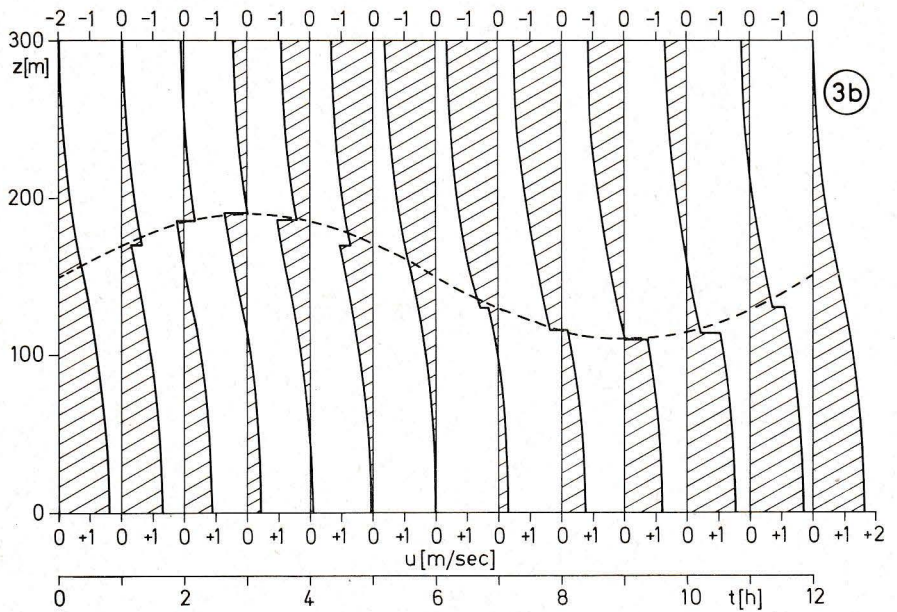
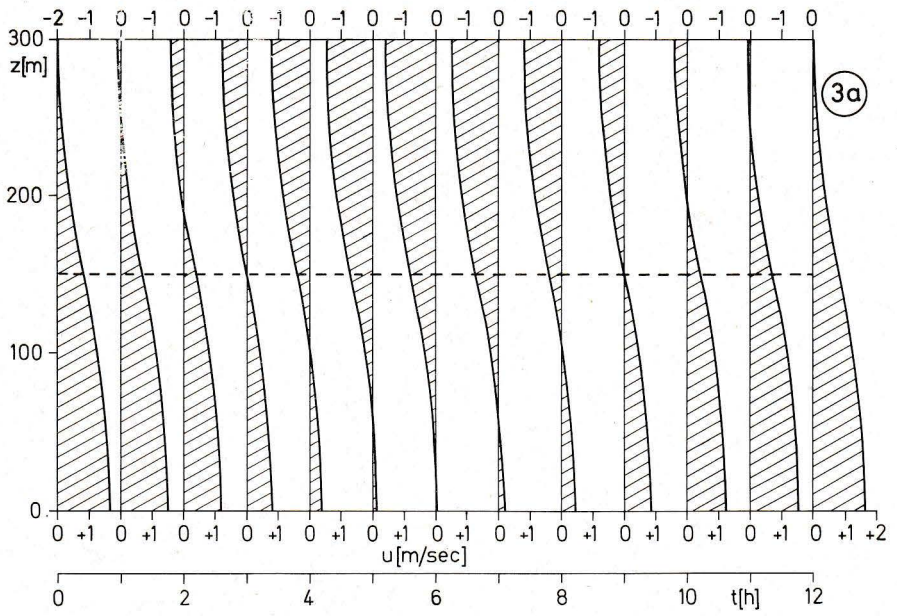
Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 1)

Abb. 1: Vertikale Verteilungen der Temperatur nach Bathysondenmessungen: (a) Indischer Ozean ( $\varphi = 5^{\circ}16'N$ ,  $\lambda = 50^{\circ}15'E$ , vgl. G. KRAUSE 1968), (b) Atlantischer Ozean ( $\varphi = 36^{\circ}53'N$ ,  $\lambda = 9^{\circ}50'W$ ).

Abb. 2: Typische mittlere Vertikalverteilungen von Temperatur  $T$ , Salzgehalt  $S$ , Dicht  $\rho$  und Strom  $u$  in einer Meeresstraße zwischen einem Nebenmeer des ariden Typs und dem angrenzenden Ozean.



Tafel 1 (zu G. Siedler)



Tafel 2 (zu G. Siedler)

Damit erhält man eine Richardson-Zahl  $R_i$ :

$$R_i = - \frac{g \frac{d\rho}{dz}}{\rho \left( \frac{du}{dz} \right)^2} \approx 0,15$$

Dabei sind:  $u$  = Horizontaler Strom in Ausstromrichtung  
 $z$  = Abstand vom Boden  
 $g$  = Schwerebeschleunigung  
 $\rho$  = Dichte

Es werde ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung am Boden der Meeresstraße mit der  $z$ -Achse nach oben und der  $x$ -Achse horizontal in Richtung zum Ozean verwendet. Die Richardson-Zahlen aus über wenige Stunden gemittelten Daten ergeben noch kleinere Werte, eine starke Vertikalvermischung findet also sicher statt.

### Die Häufigkeitsverteilung der ausströmenden Wasservolumina in Abhängigkeit vom Salzgehalt

Typische mittlere Vertikalprofile der Dichte, der Temperatur, des Salzgehalts und des Stromes über der Schwelle einer Meeresstraße zwischen einem ariden Nebenmeer und dem Ozean sind in Abb. 2 angegeben. Man findet im Mittel einen Ausstrom aus dem Nebenmeer in Bodennähe und einen Einstrom nahe der Oberfläche mit nahezu homogenem leichtem Wasser in der Deckschicht und nahezu homogenem schwerem Wasser in der bodennahen Schicht. Vernachlässigt man Variationen der Schichtung quer zur Meeresstraße und nimmt eine konstante Breite des Kanals an, so läßt sich die Schichtung durch das Stromprofil  $u^*(z, t)$  und die Profile von Salzgehalt und Temperatur  $S^*(z, t)$  bzw.  $T^*(z, t)$  darstellen. Im folgenden soll angenommen werden, daß sich Temperatur und Dichte in hinreichender Näherung jeweils als lineare Funktionen des Salzgehalts darstellen lassen. Im weiteren soll von diesen drei Größen daher nur der Salzgehalt betrachtet werden, für Temperatur und Dichte gelten analoge Überlegungen.

Die Obergrenze  $h(t)$  der dem Boden benachbarten Ausstromschicht ist, wenn eine interne Stromgrenzfläche existiert, gegeben durch:

$$u^*(z, t) = 0 \text{ für } z = h \text{ und } z \neq 0, H \quad (1)$$

Ist  $u^*(z, t)$  stets positiv zur Zeit  $t$ , so gilt  $h = H$ , ist  $u^*(z, t)$  stets negativ, so gilt  $h = 0$ .  $H$  ist der Abstand der Oberfläche vom Boden.

Zur Berechnung des momentanen Transports im Ausstrom werde die vertikal gemittelte Geschwindigkeit  $u(t)$  bestimmt:

$$u(t) = \frac{1}{h(t)} \int_0^{h(t)} u^*(z, t) dz \quad (2)$$

### Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2)

Abb. 3a: Vertikale Verteilung des Stromes für alle vollen Stunden bei Überlagerung des mittleren Stromes mit der Komponente der Oberflächengezeit (gestrichelt: Salzgehaltsgrenzfläche).

Abb. 3b: Vertikale Verteilung des Stromes für alle vollen Stunden bei Überlagerung des mittleren Stromprofils mit den Komponenten der Oberflächengezeit und der internen Grenzflächenwelle (gestrichelt: Salzgehaltsgrenzfläche).

Der mittlere Salzgehalt  $S(t)$  ist gegeben durch:

$$S(t) = \frac{1}{h(t)} \int_0^{h(t)} S^*(z, t) dz \quad (3)$$

Das Volumen der ausströmenden Wassermenge mit einem Salzgehalt in einem bestimmten Intervall ist proportional der mittleren Geschwindigkeit, der Höhe der Ausstromschicht und der Zeit, während der der Ausstrom mit Wasser dieses Salzgehalts erfolgt. Damit läßt sich das Volumen der ausströmenden Wassermenge mit einem mittleren Salzgehalt zwischen  $S - \frac{1}{2} \delta S$  und  $S + \frac{1}{2} \delta S$  bis auf einen Proportionalitätsfaktor angeben als Produkt der Häufigkeitsverteilung  $p^*(S)$  mit dem Intervall  $\delta S$ . Dabei ist  $p^*(S)$  gegeben durch:

$$\begin{aligned} p^*(S) &= \sum_{i=1}^N h(t_i(S)) \cdot u(t_i(S)) \cdot \frac{\delta t_i(S)}{\delta S} \\ &= \sum_{i=1}^N h(t_i(S)) \cdot u(t_i(S)) \cdot \left( \frac{\delta S(t)}{\delta t} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Zeit in Abhängigkeit vom Salzgehalt ist eine mehrdeutige Funktion.  $N$  ist die Gesamtzahl der Abschnitte der Funktion  $S(t)$  zwischen je zwei Extremwerten,  $t_i(S)$  kennzeichnet die Zeit im  $i$ -ten Abschnitt als Funktion des Salzgehalts.

Die normierte Häufigkeitsverteilung  $p(S)$  erhält man mit dem maximalen und minimalen mittleren Salzgehalten  $S_{\min}$  bzw.  $S_{\max}$  zu:

$$p(S) = \frac{1}{Q} p^*(S) \quad \text{mit } Q = \int_{S_{\min}}^{S_{\max}} p^*(S) dS \quad (5)$$

Da die Menge des ausströmenden Wassers endlich ist, ist auch  $Q$  trotz der Pole der Funktion  $p^*(S)$  stets endlich.

Eine typische Häufigkeitsverteilung  $p(S)$  für die Straße von Gibraltar

Das folgende Beispiel geht von Funktionen  $u^*(z, t)$  und  $S^*(z, t)$  aus, die sich bei starker Vereinfachung aus Meßdaten über der Schwelle der Straße von Gibraltar (H. LACOMBE et al., 1964) erhalten lassen. Es werde vorausgesetzt, daß sich die Verteilungen  $u^*(z, t)$  und  $S^*(z, t)$  in hinreichender Näherung durch lineare Überlagerung der im folgenden angegebenen Funktionen beschreiben lassen:

$$u^*(z, t) = u_a(z) + u_b(t) + u_c(z, t) \quad (6)$$

Dabei sind:

$u_a(z)$  = mittlerer Strom als Folge des mittleren Druckfeldes in Ozean und Nebenmeer

$$\begin{aligned}
u_b(t) &= \text{Stromkomponente der Oberflächengezeiten} \\
u_c(z, t) &= \text{Stromkomponente der internen Gezeiten} \\
S^*(z, t) &= S_a(z) + S_c(z, t) \quad (7)
\end{aligned}$$

Dabei sind:

$$\begin{aligned}
S_a(z) &= \text{mittlere Salzgehaltsverteilung} \\
S_c(z, t) &= \text{Änderungen der Salzgehaltsverteilung als Folge interner Gezeitenwellen}
\end{aligned}$$

Die Funktion  $u_a(z)$  gebe ein parabolisches Profil (vgl. A. DEFANT, 1930) an, das durch folgende Gleichungen bestimmt sei:

$$u_a(z) = \begin{cases} \frac{B}{A} \cdot 10^{-4} (z - H)^2 - B & \text{für } G \leq z \leq H \\ -\frac{B}{A} \cdot 10^{-4} z^2 + B & \text{für } 0 \leq z \leq G \end{cases} \quad (8)$$

Dabei ist  $G$  der mittlere Bodenabstand der Stromgrenzfläche,  $A$  und  $B$  sind Konstanten. Die Stromkomponente der Oberflächengezeit sei gegeben durch:

$$u_b(t) = C \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} t \quad (9)$$

Die Salzgehaltsverteilung werde durch zwei übereinanderliegende, jeweils homogene Schichten angenähert, deren Grenzfläche durch eine interne Grenzflächenwelle vertikal verlagert wird. Bei gleicher Tiefenlage der mittleren Strom- und Salzgehaltsgrenzfläche gilt dann:

$$S_a(z) = \begin{cases} S_o & \text{für } G < z \leq H \\ S_u & \text{für } 0 \leq z \leq G \end{cases} \quad (10)$$

Die Amplitude der internen Grenzflächenwelle sei  $Z$ . Mit einer Phasenverschiebung der Vertikalbewegung der Salzgehaltsgrenzfläche von  $-\pi/4$  gegenüber dem durch die Oberflächengezeit gegebenen Strom gilt für den momentanen Bodenabstand  $Z_g$  der Salzgehaltsgrenzfläche:

$$Z_g(t) = G + Z \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \frac{\pi}{4}\right) = G + Z \sin \frac{2\pi}{\tau} t \quad (11)$$

Damit folgt für  $S_c(z, t)$ :

$$S_c(z, t) = \begin{cases} S_o - S_u & \text{für } G < z \leq Z_g \\ -(S_o - S_u) & \text{für } Z_g \leq z \leq G \\ 0 & \text{für } z > Z_g > G \\ 0 & \text{für } z < Z_g \leq G \end{cases} \quad (12)$$

Die Amplitude  $u'$  der Stromkomponente der internen Grenzflächenwelle wird durch folgende Näherung beschrieben (vgl. A. DEFANT, 1961):

$$u' = Z \left( \frac{\rho_u - \rho_o}{\rho_u} \cdot g \cdot \frac{G}{(H - G) H} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$\rho_u$  und  $\rho_o$  bezeichnen die Dichte in der Unter- bzw. Oberschicht. Die Phase dieser Stromkomponente springt beim Überschreiten der Dichte- bzw. Salzgehaltsgrenze um  $\pi$ .



Die Stromkomponente  $u_c(z, t)$  läßt sich damit darstellen durch:

$$u_c(u, t) = \begin{cases} Z \left| \left( \frac{\rho_u - \rho_o}{\rho_u} \cdot g \cdot \frac{G}{(H - G) H} \right)^{\frac{1}{2}} \right| \sin \frac{2\rho}{\tau} t & \text{für } Z_g < z \leq H \\ -Z \left| \left( \frac{\rho_u - \rho_o}{\rho_o} \cdot g \cdot \frac{G}{(H - G) H} \right)^{\frac{1}{2}} \right| \sin \frac{2\rho}{\tau} t & \text{für } 0 \leq z \leq Z_g \end{cases} \quad (14)$$

Damit sind  $u^*(z, t)$  durch die Gln. (6), (8), (9) und (14) und  $S^*(z, t)$  durch die Gln. (7), (10) und (12) gegeben. Um die Verhältnisse über der Schwelle der Straße von Gibraltar anzunähern, sollen die folgende Konstanten gewählt werden:

$$H = 300 \text{ m}, G = 150 \text{ m}, A = 2,25 \text{ m}^2, B = 0,8 \text{ m sec}^{-1}, C = 0,6 \text{ m sec}^{-1}, \tau = 12 \text{ h}, \\ S_o = 36,2\text{‰}, S_u = 38,2 \text{‰}, Z = 0 \text{ bzw. } 40 \text{ m}, \frac{\rho_u - \rho_o}{\rho_u} = 2,5 \cdot 10^{-3}.$$

Um die resultierenden vertikalen Verteilungen von  $u^*$  and  $S^*$  anschaulich zu machen, sind die entsprechenden Profile für alle vollen Stunden in den Abb. 3a und 3b dargestellt. Abb. 3a zeigt den Fall ohne interne Grenzschichtwelle, Abb. 3b für eine Grenzschichtwelle mit der Amplitude  $Z = 40 \text{ m}$ .

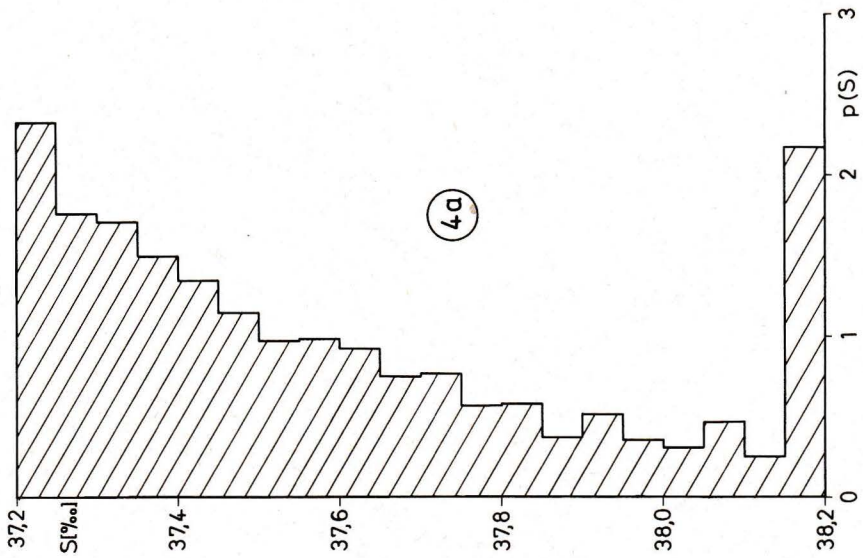
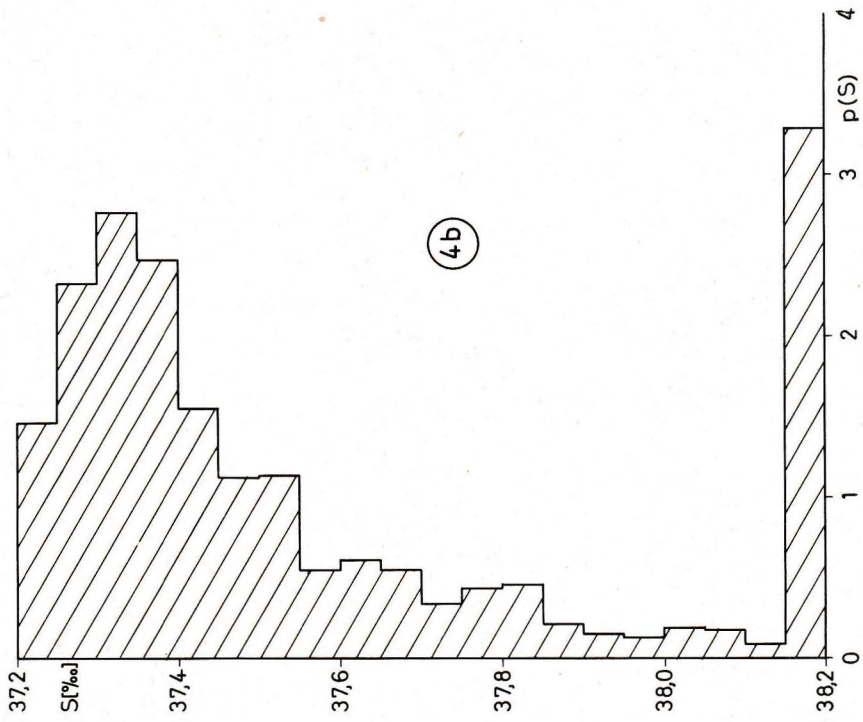
Um die Häufigkeitsverteilung  $p(S)$  zu erhalten, wurden die Größen  $h$ ,  $u$  und  $S$  für alle 0,1 h bei einer Schrittweite  $\Delta z = 2 \text{ m}$  bestimmt und  $p(S)$  aus den Mittelwerten dieser Größen für eine Intervallbreite von je  $\delta S = 0,05\text{‰}$  berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 4 gezeigt. In beiden Fällen ergeben sich zwei ausgeprägte Hauptmaxima bei hohen und niedrigen Salzgehalten. Der Einfluß der internen Grenzflächenwelle äußert sich in der Verschiebung des Maximums für niedrigen Salzgehalt in Richtung zu höheren Salzgehalten. Es zeigt sich, daß die aus einer Meeresstraße ausströmenden Wassermassen tatsächlich zwei bevorzugte Salzgehalts- bzw. Dichtewerte annehmen und damit zwei Hauptmaxima in der vertikalen Salzgehaltsverteilung außerhalb der Meeresstraße bewirken können.

Es ist zu erwarten, daß die wahre Häufigkeitsverteilung wegen unvollständiger vertikaler Vermischung innerhalb der ausströmenden Wassermassen und wegen zusätzlicher Vermischung mit dem umgebenden ozeanischen Wasser nach Verlassen der Meeresstraße quantitative Unterschiede aufweist. Vor allem ist anzunehmen, daß die Vermischung im Bereich der großen Scherungskräfte in der Nähe der Stromgrenze stärker ist als in Bodennähe. Das muß zu einer Verstärkung des Maximums bei hohen Salzgehalten auf Kosten des Maximums bei niedrigen Salzgehalten führen.

---

#### Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

Abb. 4: Häufigkeitsverteilungen  $p(S)$  für die Volumina der aus der Meeresstraße ausströmenden Wassermassen als Funktion des Salzgehalts ohne (a) und mit (b) interner Grenzflächenwelle.



Tafel 3 (zu G. Siedler)

Die vorliegende Untersuchung wurde jeweils teilweise unterstützt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und vom U. S. Office of Naval Research unter Contract N000 14-66-CO241, NR 083-004.

#### Literaturverzeichnis

DEFANT, A. (1930): Die Bewegungen und der thermohaline Aufbau der Wassermassen in Meeresstraßen. Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Phys-Math. Klasse. **XIV**. — DEFANT, A. (1961): *Physical Oceanography*, **2**, 523—528, New York. — KRAUSE, G. (1968): Struktur und Verteilung des Wassers aus dem Roten Meer vor der ostafrikanischen Küste, Meteor-Forschungsergebnisse, Reihe **A**, Nr. 4, 77—100. — LACOMBE, H., P. TCHERNIA, C. RICHEZ, L. GAMBERONI (1964): Deuxième contribution à l'étude du régime du détroit de Gibraltar. *Cahiers Océanographiques*, **XVI**e année, no 4, 283—327. — SIEDLER, G. (1968): Schichtungs- und Bewegungsverhältnisse am Südausgang des Roten Meeres. Meteor-Forschungsergebnisse, Reihe **A**, Nr. 4, 1—76.