

Die Ausbreitung des Mittelmeerwassers im Nordatlantischen Ozean

By A. DEFANT

Summary—The spreading of Mediterranean water flowing out through the Straits of Gibraltar into the open Atlantic is essentially a pure mixing process. This process is significant in the formation of oceanic water masses in the open ocean.

DER AUF das thermo-haline Kräftesystem beruhende Wasseraustausch zwischen den grossen Nebenmeeren und dem freien Ozean durch die sie verbindenden Meeresstrassen hat sich für die Tiefenzirkulation der grossen Ozeane als höchst wirksam erwiesen. Die schweren Wassermassen aus den grossen subtropischen Nebenmeeren, wie es das Europäische Mittelmeer und das Rote Meer sind, ergiessen sich in den Ozean, wenn sie die Mündung der Meeresstrasse in den freien Ozean verlassen haben. Infolge des hohen Salzgehaltes sind sie schwerer als jene Wassermassen, die im freien Ozean in der Mündungstiefe des Unterstromes aus dem Mittelmeer lagern. Dadurch erhalten sie eine sinkende Tendenz und folgen dem Prinzip der stratosphärischen Zirkulation, nämlich absinkend sich jene Tiefenschicht auszusuchen, die ihrer Dichte entspricht. Hier breiten sie sich dann unter ausgedehnten Vermischungsvorgängen auf isopyknischen (isentropen) Flächen, im wesentlichen also horizontal aus. Durch Verfolgung des Salzgehalts-maximums, das den eindringenden Wassermassen eigen ist, lässt sich der Weg angeben, den diese Wassermassen bei ihrer Ausbreitung und Vermischung nehmen. Klarer als durch die Linien gleichen Salzgehaltes in dieser Kernschichte des Mittelmeerwassers vor der Strasse von Gibraltar lässt sich die Ausbreitung des Mittelmeerwassers im Atlantischen Ozean vor der Mündung der Gibraltarstrasse nicht zeigen (Abb. 1). G. WÜST hat im "Meteor"-Werk eine vollständige Bearbeitung der vorhandenen ozeanographischen Reihenmessungen durchgeführt und in zwingender Weise den Nachweis erbracht, dass für das obere nordatlantische Tiefenwasser die durch die Strasse von Gibraltar im Unterstrom in den Atlantischen Ozean eindringenden salzreichen und warmen Mittelmeerwassermassen weitaus die Hauptquelle bilden. In den spanischen Gewässern vor der Meeresstrasse breitet sich das Mittelmeerwasser in etwa 1000 bis 1100 m Tiefe radial nach allen Seiten aus, verliert hierbei seinen hohen Salzgehalt und seine hohe Temperatur durch Vermischung mit den Wassermassen, zwischen denen es sich ausbreitet. WÜST hat gezeigt, dass die Mittelmeerwasserart gegen den Südatlantischen Ozean allmählich auf 2000 m absinkt, aber schon am Äquator ist diese Wasserart nur noch mit 20 bis 10 Prozent im Aufbau der dort lagernden Wassermassen vorhanden. Die Abb. 1 zeigt eindrucksvoll die Reichweite der unmittelbaren mittelmeerischen Beeinflussung nördlich von 15° N und der mittelbaren südlich davon durch den nach Süden gehenden nordatlantischen Tiefenstrom.

Ganz ähnlich sind die Verhältnisse im nördlichen Indischen Ozean, wo der Ausfluss des sehr salzreichen Wassers aus dem Roten Meer durch die Strasse von Bab el Mandeb sich weit in den Arabischen Golf und noch weiter gegen Süden im Indischen Ozean bemerkbar macht. Hier steht allerdings keine solche genaue Untersuchung

der Verhältnisse im Raum, wie bei der Strasse von Gibraltar zur Verfügung, aber die Längsschnitte, die vom Golf von Aden ausgehend durch den Indischen Ozean gelegt sind, zeigen die Zunge hohen Salzgehaltes, die von der Strasse von Bab el Mandeb aus sich weit nach Osten und später nach Südosten ausbreitet.

Es mag erstaunlich erscheinen, dass die Wassermassen, die durch die relativ engen Strassen von Gibraltar und Bab el Mandeb hinausfliessen, einen so grossen Einfluss auf die Zusammensetzung und die ozeanische Zirkulation der Wassermassen der freien Ozeane unterhalb 1000 m Tiefe haben sollen. Aber schon eine kleine Ueberschlagsrechnung zeigt, dass dies tatsächlich durchaus möglich ist, ja zu erwarten ist.



Abb. 1. Die Ausbreitung und Tiefenlage der Kernschicht des Mittelmeerwassers im Atlantischen Ozean (intermediäres Salzgehaltsmaximum).

Aus dem Mittelmeer fliessen durch die Strasse von Gibraltar pro Jahr rund 52,000 km³ Mittelmeerwasser in den Atlantischen Ozean. Nimmt man als ungefähre mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit im Ozean etwa 4 cm/sek, dann würde ein Wasserteilchen in sechs Jahren bis auf die Höhe von Buenos-Aires-Kapstadt (etwa 35° S Br.) gelangen. In diesen 6 Jahren liefert die Strasse von Gibraltar 312,000 km³ Mittelmeerwasser, das sich über die ganze Wassermasse bis in diese Breiten verteilt. Nimmt man an, dass die Verteilung *gleichförmig* auf die Schicht von 500 m Mächtigkeit von 45° N bis 35° S Br erfolgt, so ergibt sich immerhin eine mittlere Beimengung von rund 1.2 Prozent Mittelmeerwasser. Die Schichten der Spanischen Bucht werden natürlich viel mehr Prozent aufweisen, jene weiter im Süden viel weniger; aber man erkennt, welch bedeutenden Einfluss auf diese Weise die subtropischen Nebenmeere auf die

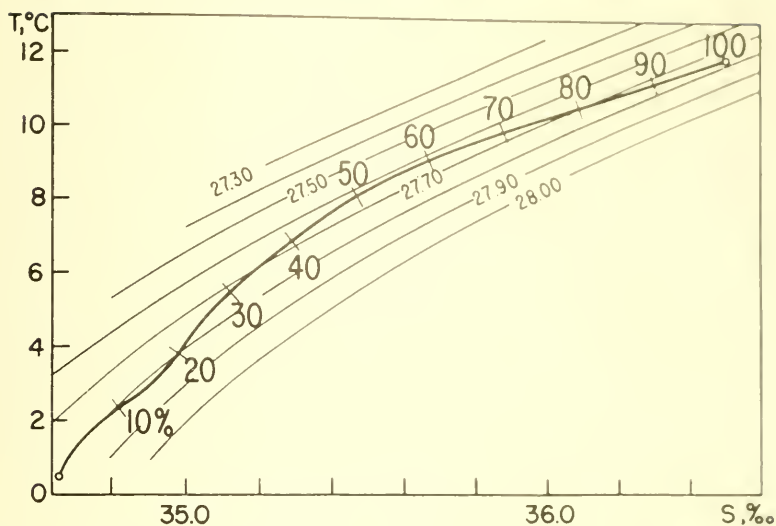


Abb. 2. $S = f(T)$ — Kurve der Beziehung zwischen Temperatur und Salzgehalt in der Kernschicht des Mittelmeerwassers im Atlantischen Ozean (nach Wüst).

ozeanische Zirkulation in den Tiefen der Ozeane gewinnen. Wüst hat mittels der $S = f(T)$ -Methode in eingehender Weise den prozentuellen Anteil des Mittelmeerwassers am Aufbau der Wassermassen des Atlantischen Ozeans ermittelt und in Abb. 2 gezeigt, wie allmählich dieser Anteil von 100 Prozent in der Strasse von Gibraltar auf 20 Prozent in 10° N bis 0° Br. herabgeht, indem durch die Vermischung mit anderen Wasserarten eine allmähliche Herabsetzung der Mittelmeeranteils stattfindet. Die Abb. 1 zeigt in zwingender Weise, dass dieser Vorgang der Vermischung

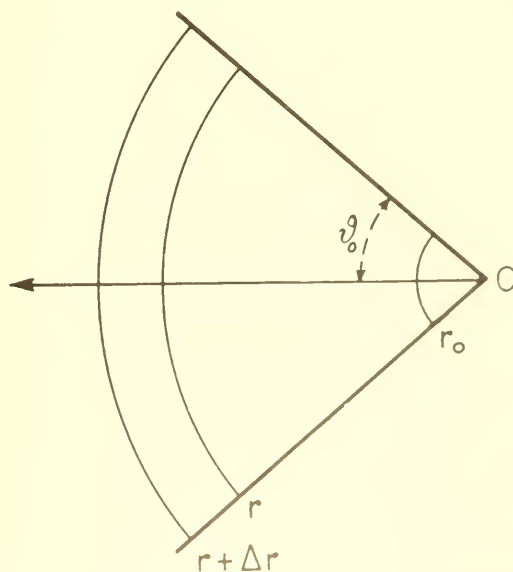


Abb. 3. Modell zur Erfassung der Ausbreitung eines Einschubes salzreichen Wassers bei C

vor der Strasse von Gibraltar ein *Austauschproblem* ist. Es kann in einfacher Weise in einem Modell etwa folgenderweise beschrieben werden.

Die Mündung eines Nebenmeeres in den freien Ozean kann als eine Salzquelle angesehen werden, deren Ergiebigkeit vom Wasseraustausch zwischen den beiden Meeren abhängt. Die aus der Mündungsstrasse ausfliessenden Wassermassen breiten sich auf Isentropenflächen im freien Ozean aus, wobei eine ständige Vermischung mit den Wassermassen der Umgebung stattfindet. Die Salzquelle befindet sich im Punkte C und die anschliessenden Küsten bilden dort den Winkel $2\theta_0$ (siehe Abb. 3). Die Entfernung eines Punktes auf einer Isentropenfläche von C sei r ; die ausschliesslich *radiale* Grundgeschwindigkeit ist dann $v = dr/dt$. Die Strombahnen der Wasserausbreitung divergieren also vom Punkte C aus. Betrachtet man ein Volumenelement des ringförmigen Sektors r und $r + \Delta r$, dann müssen sich in ihm bei *stationären* Verhältnissen die Advektion der Salzmenge und die Ausbreitung durch turbulente Vermischung das Gleichgewicht halten. Dies führt in bekannter Weise zur Beziehung

$$\frac{A}{\rho} \frac{\partial^2 S}{r^2 \partial r^2} - \frac{\partial(vrS)}{r \partial r} = 0 \quad (1)$$

wenn nur die seitliche Vermischung mit dem Austauschkoefizienten A Berücksichtigung findet. Die Kontinuitätsgleichung verlangt, dass

$$\frac{\partial vr}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

ist, oder $vr = \text{const.} = r_0 v_0$, wenn v_0 und r_0 sich auf einen beliebigen Anfangssektor in der Nähe von C beziehen. Setzt man $r = a\xi$ und $r_0 = a\xi_0$, so hat mit der Beziehung (2) die Differentialgleichung (1) eine Lösung in der Form

$$S = f(\theta). \quad F(\xi), \quad (3)$$

wobei man auf die Grenzbedingung $f(\theta) = 0$ für $\theta = \pm \theta_0$ zu achten hat. Ausserdem soll $S = S_0 + \delta_0$ für $\xi = \xi_0$ und $\theta = 0$ sein. Dann wird aus (3):

$$S = S_0 + \delta_0 \left(\frac{\xi_0}{\xi} \right)^\beta \cos \frac{\pi}{2\theta_0}. \quad (4)$$

worin

$$\beta = \frac{\pi^2}{4\theta_0^2} \cdot \frac{A}{\rho v a \xi_0} \quad (5)$$

ist.

Die Lösung lässt sich durch eine Fourier'sche Entwicklung des Anfangszustandes auf den Ausgangssektor r_0 beliebig verallgemeinern.

Die Anwendung dieser theoretischen Ableitungen auf den vorliegenden Fall vor der Strasse von Gibraltar und der Ausbreitung des Mittelmeerwassers vor dieser im freien Ozean ergibt folgende Berechnungen. S_0 ist gemäss der Beziehung (4) der Salzgehalt in grosser Entfernung von C und man hat, wenn man der Einfachheit halber nur die Verhältnisse bei $\theta = 0$ betrachtet:

$$Sr_0 = S_0 + \delta_0 \quad \text{und} \quad Sr = S_0 + \delta_0 \left(\frac{\xi_0}{\xi} \right)^\beta \quad (6)$$

Daraus folgt:

$$\frac{S_r - S_0}{S_{r_0} - S_0} = \left(\frac{\xi_0}{\xi} \right)^\beta \quad (7)$$

Die Grössen auf der linken Seite lassen sich aus den Beobachtungstatsachen als Funktion von ξ ableiten, sodass die Möglichkeit besteht, Beobachtungen und Theorie miteinander zu vergleichen. Den Anfangssektor wollen wir in $r_0 = a\xi_0 = 320$ km vom Querschnitt Trafalgar—Tanger am Westrand der Gibraltarstrasse setzen. Aus einer grösseren Zahl von strahlenförmig von der Mitte dieses Querschnittes ausgehenden Kurven wurde aus der Abb. 1 die Entfernungen der in ihr eingetragenen Isohalinen vom Ausgangsquerschnitt bestimmt und aus allen diesen Werten auf graphischen Wege eine mittlere Verteilung von S in Abhängigkeit von r abgeleitet. Die folgende Tabelle gibt diese Werte von S für die einzelnen $\Delta r = r - r_0$. Die Grösse S_0 lässt sich zu 34.95‰ ansetzen, sodass

$$S_{r_0} - S = 1.50$$

Tabelle I

Δr km	S	$\frac{S_r - S_0}{S_{r_0} - S_0}$ %	$\frac{\xi_0}{\xi}$	$\left(\frac{\xi_0}{\xi} \right)^{0.65}$ %
0	36.45	99	1	100
200	36.20	82	0.615	74
400	35.90	62	0.444	59
600	35.80	56	0.348	51
800	35.68	48	0.286	45
1000	35.58	41	0.242	40
1200	35.54	39	0.210	37
1400	35.48	35	0.186	34
1600	35.45	33	0.167	32
1800	35.43	32	0.151	30
2000	35.38	28	0.138	28
2200	35.30	23	0.127	27
2400	35.29	22	0.118	25
2600	35.29	22	0.110	24
2800	—	—	0.102	23
3000	35.30	23	0.096	22
3200	—	—	0.091	22
3400	—	—	0.086	21
3600	35.25	20	0.082	20
3800	—	—	0.078	20
4000	35.20	17	0.076	19

wird. Damit können die in der Tabelle stehenden Werte von $\frac{S_r - S_0}{S_{r_0} - S_0}$, ausgedrückt

in Prozenten des Anfangswertes, ermittelt werden. Die Werte $\frac{\xi_0}{\xi}$ ergeben sich aus

$\frac{r_0}{r_0 + \Delta r}$; auch sie stehen in obiger Tabelle. Bildet man $\left(\frac{\xi_0}{\xi} \right)^\beta$ mit $\beta = 0.65$, so

findet man, wie die Tabelle zeigt, eine sehr befriedigende Uebereinstimmung mit den aus den Beobachtungen abgeleiteten Werten. Abb. 4 gibt diesen Vergleich zwischen Beobachtung und Theorie und zeigt, dass die theoretischen Grundlagen durch die Beobachtungen völlig bestätigt werden. Eine bessere Uebereinstimmung hätte sich bei anderer Wahl des Zahlenwertes von β nicht erzielen lassen.

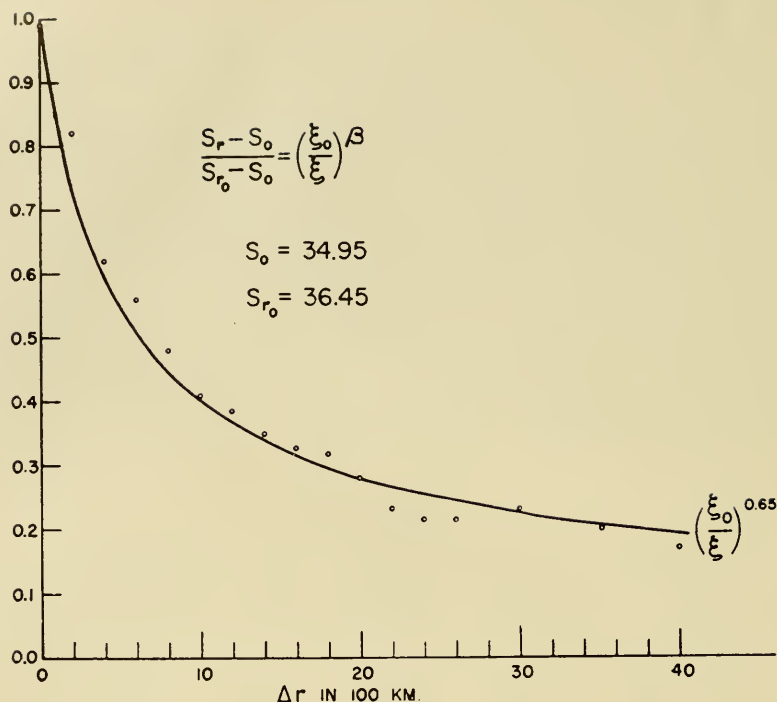


Abb. 4. Die Ausbreitung des Mittelmeerwassers im Atlantischen Ozean vor der Strasse von Gibraltar. — nach der Theorie, ° ° ° nach den Beobachtungen.

Nun zeigt die geographische Karte des Gebietes vor der Strasse von Gibraltar, dass $2\theta_0$ zu ungefähr 130° anzusetzen ist; dies ergibt $\left(\frac{\pi}{2\theta_0}\right)^2 = 1.9$ und mit

$r_0 = a\xi_0 = 3.2 \times 10^7$ cm wird aus der Definitionsgleichung für $\beta : \frac{A}{\rho v} = 1.1 \times 10^7$ cm.

Man erhält also auch hier, wie es sonst bei ähnlichen Berechnungen der Fall ist, nur das Verhältnis des Austauschgrösse zur Grundgeschwindigkeit. Nimmt man letztere zu etwa $v_0 = 5$ cm/sek an, so wird $A/\rho = 5.5 \times 10^7$ cm²/sek. Dieser Wert für den seitlichen Austauschkoeffizienten fügt sich in bester Weise in die Reihe der Bestimmungen dieser Grösse aus ganz anderen Strombedingungen (siehe SVERDRUP, JOHNSON and FLEMING, 1942, p. 485; oder PROUDMAN, 1953, p. 120 u.f.).

Die Vorgänge der Ausbreitung des aus der Strasse von Gibraltar ausfliessenden Mittelmeerwassers in den freien Atlantischen Ozean sind somit im wesentlichen ein reiner Vermischungsvorgang und man erkennt, welche Bedeutung diesen Prozessen für den Aufbau der ozeanischen Wassermassen im freien Ozean zukommt.

Innsbruck, April 1955.

LITERATUR

- PROUDMAN, J. (1953), *Dynamical Oceanography*. London, Methuen & Co., Ltd., 409 pp.
 SVERDRUP, H. U., JOHNSON, M. W. and FLEMING, R. H. (1942), *The Oceans: their Physics, Chemistry, and general Biology*. New York, Prentice-Hall, Inc., 1087 pp.