

2. 345

Zum Mechanismus des Wasseraustausches zwischen dem Roten Meer und dem Golf von Aden

Von G. SIEDLER, Kiel¹⁾

Zusammenfassung: Es wird eine Beschreibung einiger Ergebnisse der Untersuchungen gegeben, die mit dem Forschungsschiff „Meteor“ im November und Dezember 1964 am Südausgang des Roten Meeres durchgeführt wurden. Das Auftreten einer Dreischichtung von Temperatur und Salzgehalt sowie einer Zweischichtung der Stromverteilung mit einem besonderen Maximum der Geschwindigkeit in der Unterschicht werden diskutiert. Die Beziehungen zwischen den Tiefenlagen von Dichtegrenzflächen und Stromgrenzflächen werden aufgezeigt. Die Existenz von internen Gezeitenwellen und das wahrscheinliche Auftreten von internen Kanaleigenschwingungen wird festgestellt. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit, dem mittleren Einstrom in das Rote Meer und dem Wasserstand am Pegel Aden diskutiert.

Summary: A description is given of some results that have been received during the investigation in the Strait of Bab el Mandeb in November and December 1964 on R/V METEOR. The following problems are discussed: Three-layer-distribution of temperature and salinity and two-layer-distribution of current velocity with a special maximum in the lower layer, dependence of the depth of the current boundary layer on the depths of density boundary layers, existence of internal tides, probable existence of internal seiches in the channel, dependence of the inflow into the Red Sea and the water level in Aden on the wind velocity distribution.

Die physikalischen Vorgänge in Meeresstraßen haben in der Ozeanographie schon früh besonderes Interesse gefunden, denn sie bieten die Möglichkeit, die Wechselwirkungen von Ozeanen und Nebenmeeren zu untersuchen und die dabei auftretenden turbulenten Vermischungsvorgänge kennenzulernen. Nicht zuletzt stellen sie ausgezeichnete Beispiele für Gebiete mit einem starken Einfluß der Boden- und Küstengestalt auf die Bewegungsvorgänge im Meere dar. Die Meeresstraße von Bab el Mandeb zwischen dem Roten Meer und dem Indischen Ozean nimmt dabei noch insofern eine Sonderstellung ein, als das im Monsunrhythmus schwankende und über viele Monate jeweils sehr konstante Windsystem in der Umgebung dieser Straße leicht übersichtbare Verhältnisse schafft.

Es ist seit den ersten englischen Untersuchungen (H. J. GEDGE 1898) bekannt, daß sich normalerweise bei Bab el Mandeb eine Zweischichtung der Stromverteilung mit einem Einstrom ins Rote Meer nahe der Oberfläche und einem Ausstrom in Bodennähe ergibt. Der Wind kommt in der Umgebung von Bab el Mandeb im Sommer aus

¹⁾ Dr. G. SIEDLER, Institut für Meereskunde der Universität Kiel, 23 Kiel, Niemannsweg 11.

NNW und im Winter aus SSO. Man muß also erwarten, daß winderzeugte Strömungen den Einstrom im Winter verstärken und im Sommer abschwächen. Im Sommer beobachtet man sogar häufig eine Umkehr des mittleren Oberflächenstromes, so daß eine zeitweise Dreischichtung im Strom anzunehmen ist. Diese Annahme ist allerdings bis heute noch nicht durch direkte Strommessungen belegt worden.

Die Expedition von F. S. „Meteor“ in den Indischen Ozean diente unter anderem dem Zweck, in einer speziellen Untersuchung der Meeresstraße von Bab el Mandeb verschiedene Probleme des Wasseraustausches während des Winters zu klären. Es sollen hier einige der Ergebnisse beschrieben werden, die sich auf den Mechanismus des Wasseraustausches in der Meerenge selbst beziehen¹⁾.

Vor Beginn der Expedition waren vor allem aus italienischen Messungen der Jahre 1923—1924 (F. VERCELLI 1927, M. PICOTTI 1927) Angaben darüber bekannt, daß ein starker Gezeiteneinfluß auf die Schichtungs- und Strömungsverhältnisse besteht. Eine wichtige Frage bei den Untersuchungen auf F. S. „Meteor“ bestand darin, die Natur und Größe dieser Variationen festzustellen. Dazu waren wiederholte Strom- und Dichtemessungen mittels verankerter Geräte und vom verankerten Schiff aus nötig. Die gerade in den letzten Jahren in der Ozeanographie erheblich weiterentwickelte Meßtechnik gab ferner die Möglichkeit, aus kontinuierlichen Messungen der vertikalen Verteilung von Temperatur, Salzgehalt und Strom Angaben über die Feinstruktur der Wassermassen und ihre kurzzeitigen Änderungen zu erhalten.

Eine Zusammenstellung der Bathysonden-Messungen für einen Längsschnitt vom südlichen Roten Meer zum inneren Golf von Aden ergab das im Prinzip vor allem von der „John Murray“-Expedition (E. F. THOMPSON 1939) bekannte Bild einer bodennahen Schicht salzreichen Wassers, die sich durch die Meerenge hindurch zum Golf von Aden hin verfolgen läßt.

Die für den Wasseraustausch entscheidende Schwelle von ca. 100 m Tiefe liegt in der Nähe der Hanish-Inseln, eine weitere wichtige Schwelle mit ca. 170 m Tiefe liegt etwa 10 sm nördlich der Meerenge.

Die stärkste Konzentration der Stromlinien tritt in der Meerenge bei Perim auf. Das Schwergewicht der Messungen wurde daher auf die Meerenge selbst gelegt. Das Forschungsschiff „Meteor“ war während 2½ Tagen dort auf Station 62 verankert. Im Abstände von 3 bzw. 1,5 Stunden wurden mit der Bathysonde die Vertikalverteilungen von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit und mit einem Savonius-rotorstrommesser die Vertikalverteilungen der Stromgeschwindigkeit gemessen.

Die Messungen ergaben im wesentlichen folgendes: Kennzeichnend sind das Auftreten einer Dreischichtung in der Temperatur- und Salzgehaltsschichtung mit weitgehend homogenen Deck- und Bodenschichten und einer Zwischenschicht, die eine starke Feinstruktur mit raschen zeitlichen Änderungen erkennen läßt. Die Zwischenschicht stellt offenbar den Vermischungsbereich der beiden Ausgangswasserarten aus

¹⁾ Die vollständige Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse ist in den „Meteor“-Forschungsergebnissen, Reihe A vorgesehen.

den mittleren Tiefen des Roten Meeres und dem oberflächennahen Bereich des Golfs von Aden dar. Besonders deutlich wird dieser Umstand, wenn man für eine Reihe von Stationen von der Meerenge aus in den Golf von Aden hinein die TS-Diagramme zusammenstellt.

In der Meerenge liegen alle Werte praktisch auf einer Geraden, kennzeichnen also Mischprodukte der beiden genannten Wasserarten. Beim Eintritt in den Golf von Aden zeigen sich Beimischungen des Golf von Aden — Wassers aus mittleren Tiefen, wobei jetzt eine starke Feinstruktur der TS-Kurven für mittlere Tiefen auftritt. Daraus läßt sich schließen, daß in der Vermischungszone Wasserelemente unterschiedlichen Vermischungsgrades mit beträchtlicher Ausdehnung auftreten. Die Feinstruktur der oben diskutierten Temperaturvertikalverteilungen ist daher als Ergebnis solcher Vermischungserscheinungen anzusehen. Die Messungen zeigen ferner eine deutliche Vertikalverschiebung der internen Dichte-Schichtgrenzen im eintägigen Gezeitenrhythmus.

Die Vertikalverteilungen der Stromgeschwindigkeit in der Meerenge zeigen die erwartete Zweiteilung mit Einstrom ins Rote Meer oben und Ausstrom unten. Die Grenzfläche zwischen einströmenden und ausströmenden Wassermassen ist größeren Vertikalverschiebungen ausgesetzt als die Dichtegrenzflächen.

Die wiederholten Messungen gestatten es nun, die mittleren Vertikalverteilungen für die verschiedenen Größen, bezogen auf den Zeitraum der Verankerung des Schiffes, anzugeben. Nach Modellrechnungen von A. DEFANT (1930) sind für Ober- und Unterstrom je ein etwa parabolisches Profil zu erwarten. Die mittlere Stromverteilung bestätigt das für die Oberschicht, zeigt aber ein Zwischenmaximum im oberen Teil der Unterschicht. Eine Erklärung für diese Erscheinung findet man bei der Betrachtung der Bodengestalt in der Nähe der Meerenge. Die Ankerstation lag ca. 10 m südlich des Abfalls der 170 m tiefen Schwelle. Offenbar breitet sich der Unterstrom hier zunächst mehr oder weniger als Freistrahle aus und bedingt damit ein Maximum der Stromstärke im oberen Teil des Ausstrombereichs.

Die Messungen der Dichte- und Stromverteilung waren auch im Hinblick auf eine spezielle Fragestellung durchgeführt worden. Es ist von verschiedenen Meeresstraßen bekannt, daß die Tiefenlage der Wasserartgrenzen nicht mit derjenigen der Stromgrenzen übereinstimmt. Für den Fall ausschließlich durch das Druckfeld bestimmter Strömungen lassen sich die relativen Tiefenlagen dieser Grenzflächen bei Annahme eines ebenen Dreischichtenmodells und konstantem virtuellem Zähigkeitskoeffizienten berechnen, wobei eine ebene Oberfläche und entgegengesetzt geneigte, ebene und parallele interne Grenzflächen vorausgesetzt werden.

Die Dichte wird in Ober- und Unterschicht konstant, in der Zwischenschicht nach einer e -Funktion ansteigend angesetzt. Folgende Voraussetzungen sollen gelten: Stationäre Verhältnisse, vernachlässigbare Corioliskraft, vernachlässigbare Vertikalgeschwindigkeit, vernachlässigbare Horizontalbeschleunigung, konstanter Oberflächendruck, keine äußeren Kräfte, vernachlässigbare Kompressibilität des Meerwassers.

Berechnet man nun für die angenäherte spezielle Dichteverteilung in der Meerenge von Bab el Mandeb nach diesem Modell die Tiefenlage Z der Stromgrenze für den Fall des Gleitens bzw. Haftens am Boden, so erhält man:

$$Z_G = 158 \text{ m} \quad Z_H = 135 \text{ m}$$

Der gemessene Wert liegt jedoch bei $Z = 77 \text{ m}$, also erheblich höher. Das Ergebnis zeigt, daß in der Meerenge noch kein Ausgleich der Stromverteilung in der Form stattgefunden hat, wie sie als Folge einer ausschließlichen Wirkung des Druckfeldes auf die Tiefenlage der Stromgrenze bei konstanter Bodentiefe zu erwarten wäre. Das stützt die anfangs geäußerte Annahme, daß in diesem Gebiet mit einem Feinstrahlverhalten des ausströmenden Rot-Meer-Wassers zu rechnen ist.

Es wurde zu Beginn gesagt, daß periodische Variationen der Schichtung und Strömung im Gezeitenrhythmus in der Meeresstraße auftreten. Ein Teil der Untersuchungen befaßte sich damit, diese periodischen Variationen mit Hilfe verankerter, automatisch registrierender Strommesser zu erfassen und im Hinblick darauf zu analysieren, welche Gezeitenperioden eine Rolle spielen und ob neben den normalen Gezeitenwellen und internen Gezeitenwellen auch interne Querschwingungen der Meeresstraße auftreten.

W. KRAUSS (1966) hat für rechteckige Becken mit einer Dreischichtung der Dichte nach Art des vorhin beschriebenen Modells eine allgemeine Lösung der Bewegungsgleichungen bzw. eine Bedingungsgleichung für die Perioden interner Eigenschwingungen angegeben. Die Kanalquerschnitte in der Meerenge und über der nördlich gelegenen 170-m-Schwelle wurden durch Rechteckprofile angenähert, wobei als Kanalbreite die mittlere Breite der für die Entstehung interner Querschwingungen entscheidenden inhomogenen Zwischenschicht angesetzt wurde. Die berechneten Amplitudenspektren konnten mit den so vorausberechneten Perioden verglichen werden.

Die Amplitudenspektren z. B. der Strommessungen über der 170-m-Schwelle lassen die eintägige und halbtägige Gezeitenperiode erkennen, ferner Flachwassergezeiten mit Perioden bei 8 und 6 Stunden. Ein deutliches Maximum erscheint bei 5 Stunden, einer Periode, die sich aus den obengenannten Berechnungen hier als Lösung 1. Ordnung des berechneten Modells ergibt. Es ist allerdings nicht völlig sicher, ob es sich hier tatsächlich um eine Eigenschwingung des Kanals oder um die 4. Oberwelle der eintägigen Gezeit handelt. Da dies Maximum aber so eindeutig nur dort auftritt, wo eine interne Eigenschwingung dieser Periode berechnet wurde, ist eine interne Querschwingung des Kanals wahrscheinlich.

Die besonderen Windverhältnisse zur Zeit der „Meteor“-Untersuchungen gestatten die zumindest qualitative Beantwortung der Frage nach dem Windeinfluß auf die Stärke des Einstroms in das Rote Meer. Während des zweiten Teils der Messungen, also zu einem Zeitpunkt, an dem bereits verankerte Strommesser seit längerer Zeit registrierten, trat ein erheblicher Anstieg der Windstärke auf. Während etwa 10 Tagen lagen die Windstärken um 1–2 Bft über den mittleren Werten dieser Jahreszeit. Um festzustellen, ob zwischen den Reststromdaten und der Windstärke eine Korrelation

besteht, wurden die 25stündig übergreifenden Mittel der Stromkomponenten in Kanalrichtung berechnet und mit den auf „Meteor“ gemessenen Windstärken, außerdem aber auch mit den ebenso gemittelten Pegelwerten von Aden verglichen.

Als Ergebnis erhält man einen mit den erhöhten Windstärken verknüpften erheblich verstärkten Einstrom in das Rote Meer bei gleichzeitiger Abnahme des Wasserstandes am Pegel Aden. Offenbar wirken dabei direkter Windschub in der Meeresstraße und Windstau im westlichen Golf von Aden zusammen.

Die Ergebnisse der Messungen zum Wasseraustausch in der Meerenge von Bab el Mandeb lassen sich also in folgender Weise zusammenfassen:

1. Es besteht eine Dreischichtung der Dichte mit einer rasch veränderlichen, stark strukturierten Vermischungszone.
2. Es besteht, zumindest während des Winters, eine Zweischichtung der Strömung mit einem relativ hoch liegenden Maximum der Ausstromgeschwindigkeit als Folge der der Schwellenüberströmung.
3. Es existieren interne Gezeitenwellen ein- und halbtägiger Periode, aber auch mit Flachwassergezeitenperioden. Auch interne Querschwingungen im Kanal treten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf.
4. Erhöhte Windstärken im Winter verursachen durch Windschub in der Meeresstraße, vor allem aber durch Windstau und eine resultierende Niveaueverschiebung der Dichteflächen eine Zunahme des Einstroms in das Rote Meer.

Die beschriebenen Untersuchungen wurden mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

Literatur

- DEFANT, A.: Die Bewegungen und der thermohaline Aufbau der Wassermassen in Meeresstraßen. Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Phys.-Math. Klasse, XIV, 1930.
- GEDGE, H. J.: Report on the undercurrents in the Straits of Ba-el-Mandeb from observations by Lieutenant and Commander H. J. GEDGE, R. N. H. M. S. STORK. London, 1898.
- KRAUSS, W.: Methoden und Ergebnisse der Theoretischen Ozeanographie, Bd. II. Interne Wellen. Berlin, 1966.
- PICOTTI, M.: Campagna idrografica nel mar rosso della R. N. „Ammiraglio Magnaghi“ 1923—23, Ricerche di oceanografia chimica. Annali Idrografici 11, Genova, Istituto Idrografico della Regia Marina, 1927.
- THOMPSON, E. F.: Chemical and physical investigations. The exchange of water between the Red Sea and the Gulf of Aden over the „Sill“. John Murray Expedition 1933—34, Scientific Reports, 2 (4), 105—119, 1939.
- VERCELLI, F.: Campagna idrografica della R. N. „Ammiraglio Magnaghi“ 1923—24, Ricerche di oceanografia fisica. Annali Idrografici 11, Genova, Istituto Idrografico della Regia Marina, 1927.