für Jörn

Sonderdruck aus

Jörn Thiede

Meereskunde der Ostsee

Herausgegeben von L. Magaard und G. Rheinheimer

Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork 1974
Printed in Germany Nicht im Handel

Diedrich G. oa

5. Wasserhaushalt und Strömungen

Günter Dietrich und Friedrich Schott

5.1. Die Komponenten des Wasserhaushaltes

Der Wasserhaushalt setzt sich aus fünf Komponenten zusammen: der Wasserzufuhr, die aus Einstrom E aus der Nordsee, festländischem Abfluss Z in die Ostsee, Niederschlag N im Seegebiet der Ostsee besteht sowie dem Wasserentzug, der aus dem Ausstrom A und der Verdunstung V der Ostsee besteht. Es gilt die Beziehung $Z + N - V = A - E$. Alle fünf Grössen sind im Prinzip messbar und lassen sich mit unterschiedlichen Einschränkungen zu einer Gesamtbilanz heranziehen. BROGMUS (1952) hat dies in einer gründlichen Untersuchung getan. Die einzelnen Haushaltsgrössen unterliegen langjährigen Schwankungen, wie WYRTKI (1954) gezeigt hat. So wirkt sich die atmosphärische Zirkulation einerseits auf dem Wege über die Niederschläge auf den festländischen Abfluss aus und andererseits auf den Wasserstand und über den Wasseraustausch an den Ausgängen der Ostsee auf den Salzgehalt.

Die Glieder im Wasserumsatz sind von grosser Bedeutung für die Naturverhältnisse der Ostsee, die Möglichkeiten ihrer Ermittlung sind aber verschieden gut. Am besten weiss man noch über den f e s t l ä n d i s c h e n A b f l u s s Z Bescheid. Er lässt sich aus den Abflussmessungen der hydrologischen Dienste der Anliegerstaaten ermitteln. Für die kleineren Flüsse beruhen die Abflussangaben meist auf Schätzungen. Für die Hauptflüsse sind die monatlichen Abflusszahlen in den Berichten der Hydrologischen Konferenzen der Baltischen Staaten aus der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen veröffentlicht.

Der gesamte festländische Abfluss Z, der in die Ostsee einschliesslich der Beltsee gelangt, beträgt im langjährigen Mittel 479 km^3/Jahr. Das sind 2,2% des Wasserinhaltes der Ostsee, der 22190 km^3 umfasst, und diese Menge ist sechsmal grösser als der Abfluss des Rheins an der Mündung. Im einzelnen empfangen die Teilgebiete der Ostsee sehr unterschiedliche Mengen an festländischem Abfluss. Die Tab. 1, in der die

Tab. 1. Flusswasserzufuhr zur Ostsee (in km^3/Jahr) nach BROGMUS (1952)

Teilgebiet	km^3/Jahr	Wasserreichster Fluss	km^3/Jahr
Bottenwiek	100.0	Kemi-Elf	16.7
Bottensee	89.3	Angermann-Elf	16.7
Schärenmeer und Aalandsee	3.5	-	-
Finnischer Mb.	126.1	Newa	87.2
Rigaischer Mb.	39.5	Düna	23.7
Gotlandsee	82.9	Weichsel	33.6
Arkona- und Bornholmsee	30.7	Oder	16.6
Beltsee	7.1	-	-
Ostsee gesamt	479.1		

festländischen Abflüsse nach Teilgebieten der Ostsee unter Erwähnung des jeweils am stärksten beteiligten Flusses aufgeführt sind, gibt davon einen Eindruck.

Bemerkenswert für die Zufuhr an Flusswasser ist die beherrschende Stellung der Newa, auf die im Jahresmittel allein 18,2% des gesamten festländischen Abflusses in die Ostsee entfallen. Ergänzt sei, dass die Flusswasserzufuhr zur Ostsee einen starken jährlichen Gang enthält. Die Extreme treten im Februar mit 22,7 km^3 und im Mai mit 66,1 km^3 auf. Die Zahlen sind bezogen auf die Ostsee einschliesslich der Beltsee.

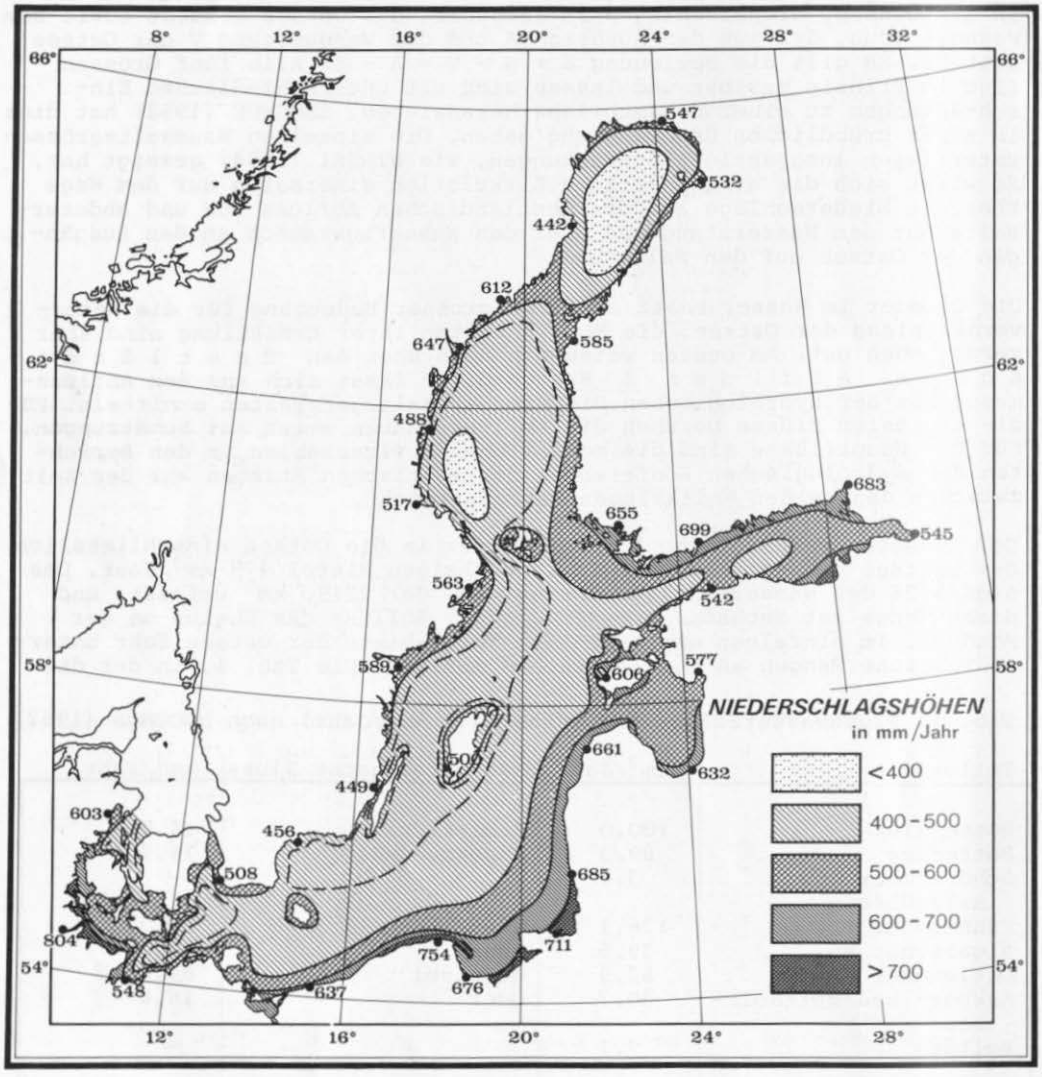


Abb. 1. Jährliche Niederschlagshöhen (mm) über der Ostsee (nach BROGMUS, 1952)

Der N i e d e r s c h l a g sei als zweite wichtige Grösse im Wasserhaushalt der Ostsee betrachtet. Die elementare Schwierigkeit dabei besteht darin, dass es in der Ostsee wie im Weltmeer in der Regel keine Niederschlagsmessungen von der offenen See gibt. Im offenen Ozean liegen immerhin aus den meteorologischen Tagebüchern zahlreicher Schiffe Angaben über die Regenhäufigkeit vor, nämlich die Anzahl der Stunden pro Tag mit Niederschlag. Indem man die beobachteten Verhältniszahlen Häufigkeit/Niederschlagshöhe von Wetterwarten auf Inseln und an den Küsten auf das Seegebiet überträgt, werden über die Häufigkeitsbeobachtungen der Schiffe Angaben der Niederschlagshöhen auf See möglich. Orographische Einflusse der Inseln und Küsten sind dabei nicht völlig ausgeschaltet. In der Ostsee fehlen selbst die Häufigkeitswerte von See. Dafür gibt es etwa 200 küstennahe Festlandstationen, darunter vereinzelte auf flachen, kleinen Inseln. Ihre Niederschläge sind bei grösserem Festlandabstand bis 20% unter den Küstenwerten. Insgesamt liegen die jährlichen Niederschläge in der Ostsee innerhalb der Grenzen von 400 und 800 mm; der erste Wert wird in der Bottenwiek, der zweite in der Flensburger Förde erreicht. Abb. 1 gibt die von BROGMUS (1952) nach komplizierten Reduktionen berechnete Verteilung der jährlichen Niederschläge über der Ostsee an.

Der Landeffekt, der in einer Steigerung der Niederschläge gegenüber der See besteht, kommt dabei deutlich zum Ausdruck. Er beruht auf der erzwungenen Vertikalbewegung der Luft durch die Bodentopographie, durch die Bodenreibung und durch die thermische Konvektion. Die Gesamtniederschläge der Ostsee belaufen sich nach diesen Berechnungen auf 474 mm pro Jahr oder umgerechnet 183 km^3. Der Jahresgang für die Niederschlagsmengen der Ostsee insgesamt weist im übrigen ein Minimum im März auf, dagegen ein Maximum im Urlaubsmonat August.

Die V e r d u n s t u n g wird als dritter Posten in der Bilanz des Wasserumsatzes der Ostsee betrachtet. Ihre Bestimmung ist mit mehreren grundsätzlichen Schwierigkeiten verknüpft. Da es direkte Messungen der Verdunstung auf See nicht gibt - die gelegentlich erzielten Werte mit Verdunstungsgefässen bieten nur einen rohen Anhalt - bilden halbempirische Verfahren die Grundlage, die auf der Windgeschwindigkeit über dem Wasser sowie der Dampfdruckdifferenz Luft - Wasseroberfläche basieren. Zunächst sind schon diese halbempirischen Formeln zweifelhaft, aber auch die benötigten Ausgangsdaten liegen nicht systematisch als Messgrössen vor, sondern man ist auf Schiffsaufzeichnungen angewiesen. Die Fehlermöglichkeiten der Handelsschiffsmessungen diskutierte DIETRICH (1950).

Andere grundsätzliche Schwierigkeiten bei den Berechnungen der Verdunstung macht das Eis im Winter. Bei Eisbedeckung ist die Verdunstung nahezu Null. BROGMUS (1952) hat diese Einschränkungen soweit wie möglich berücksichtigt. Für die Ostsee insgesamt ergab seine Berechnung der Verdunstung exakt gleiche Mengen wie für den Niederschlag, nämlich 474 mm/Jahr oder umgerechnet 183 km^3. Jetzt kann man schon folgendes überlegen: Da der Gesamtwasserinhalt der Ostsee konstant ist und Verdunstung und Niederschlag sich gegenseitig im Mittel aufheben, muss der Nettotransport durch die Ostseeausgänge genau gleich der Flusswasserzufuhr sein, nämlich 479 km^3/Jahr als Ausstrom. Dies muss also die Differenz zwischen A u s s t r o m und E i n s t r o m sein, den beiden letzten noch zu betrachtenden Haushaltsgrössen im Wasserhaushalt der Ostsee.

Man sollte denken, die engen Meeresstrassen zwischen Schweden und Jütland hätten es den Meeresforschern leicht gemacht, diese Transporte zu messen. Dem ist nicht so. Zwar werden seit Jahrzehnten Messungen des Oberflächenstromes von den Feuerschiffen in den Ausgängen der Ost-

see durchgeführt, z. B. von "Gedser", "Fehmarnbelt", "Halskov-Rev", "Lappe-Grund". Strommessungen über die ganze Wassersäule sind aber nur vereinzelt vorgenommen worden. Eine Bilanzrechnung, die auf Strommessungen fusst, ist deshalb nicht möglich. Man kann aber trotzdem den Transport berechnen durch Anwendung eines indirekten Verfahrens. Es strömt in der Unterschicht der Meeresstrassen salzreiches Wasser aus Skagerrak/Kattegat in die Ostsee, in der Oberschicht strömt salzärmeres Wasser aus. Unter der begründeten Annahme, dass im Mittel von stationären Verhältnissen ausgegangen werden kann, d.h. dass sich weder die Wasserfüllung der Ostsee noch die in ihr enthaltene Salzmenge ändern, lässt sich der sogenannte Hydrographische Satz von KNUDSEN anwenden.

Das bedeutet, wenn E, S_E Einstrom und Salzgehalt des einströmenden Wassers sind, A, S_A die entsprechenden Grössen des ausströmenden Wassers sowie Z die Flusswasserzufuhr, für die Erhaltung des Wasserinhaltes der Ostsee $A - E = Z$ und für die Erhaltung der Gesamtmenge des Salzes in der Ostsee $S_E \cdot E = S_A \cdot A$.

Mit $Z = 479\ km^3/Jahr$, $S_E = 33‰$, $S_A = 20‰$ lassen sich daraus leicht

$$E = 1216\ km^3/Jahr$$

und

$$A = 737\ km^3/Jahr$$

ausrechnen.

Tab. 2. WASSERHAUSHALT DER OSTSEE nach BROGMUS (1952)

	Zufluss Z	Nieder-schlag N	Verdun-stung V	Ausstrom A	Einstrom E	A-E=N-Z-V
km^3/J	479	183	183	1216	737	479
mm/J	1240	474	474			1240

Es ist ein Zufall, dass N = V ist. Vom Gesamtverlust an Wasser A + V kommen 87% auf den Ausstrom, vom Gesamtgewinn E + Z + N entfallen 53% auf den Einstrom, 34% auf die Flusswasserzufuhr und der Rest von 13% auf den Niederschlag. Würde die Ostsee abgeriegelt, so würde ihr Wasserspiegel jährlich um 124 cm steigen; sie ist ein typisches Beispiel für Nebenmeere in humiden Klimaten; ein Gegenstück im ariden Klima ist das Mittelmeer, dessen Wasserspiegel nach einer Abriegelung jährlich um 96,5 cm sinken würde, wie WÜST (1952) nachgewiesen hat.

Der Wasserhaushalt der Ostsee äussert sich auch in der Lage des Meeresspiegels, bezogen auf ein physikalisch ebenes Meeresniveau. In Abb. 2 sind es insgesamt 35 cm, die der Meeresspiegel der Ostsee von aussen nach innen - von Skagen bis Lulea - im Mittel ansteigt.

Dieses Oberflächengefälle wird vom Wasserhaushalt der Ostsee aufrechterhalten. Die Lage des Meeresspiegels in Abb. 2 ist von LISITZIN (1965) aus der Dichteschichtung des Ostseewassers errechnet worden. Die Absolutwerte sind in diesem Zusammenhang unwesentlich; sie ergeben sich aus dem Anschluss an den Meeresspiegel des Weltmeeres.

Die Wasserstände besitzen auch einen deutlichen Jahresgang, der im 19-jährigen Mittel - diese Mittelbildung ist notwendig, um alle Gezeitenschwankungen zu eliminieren - noch ca. 20 cm beträgt und in engem Zu-

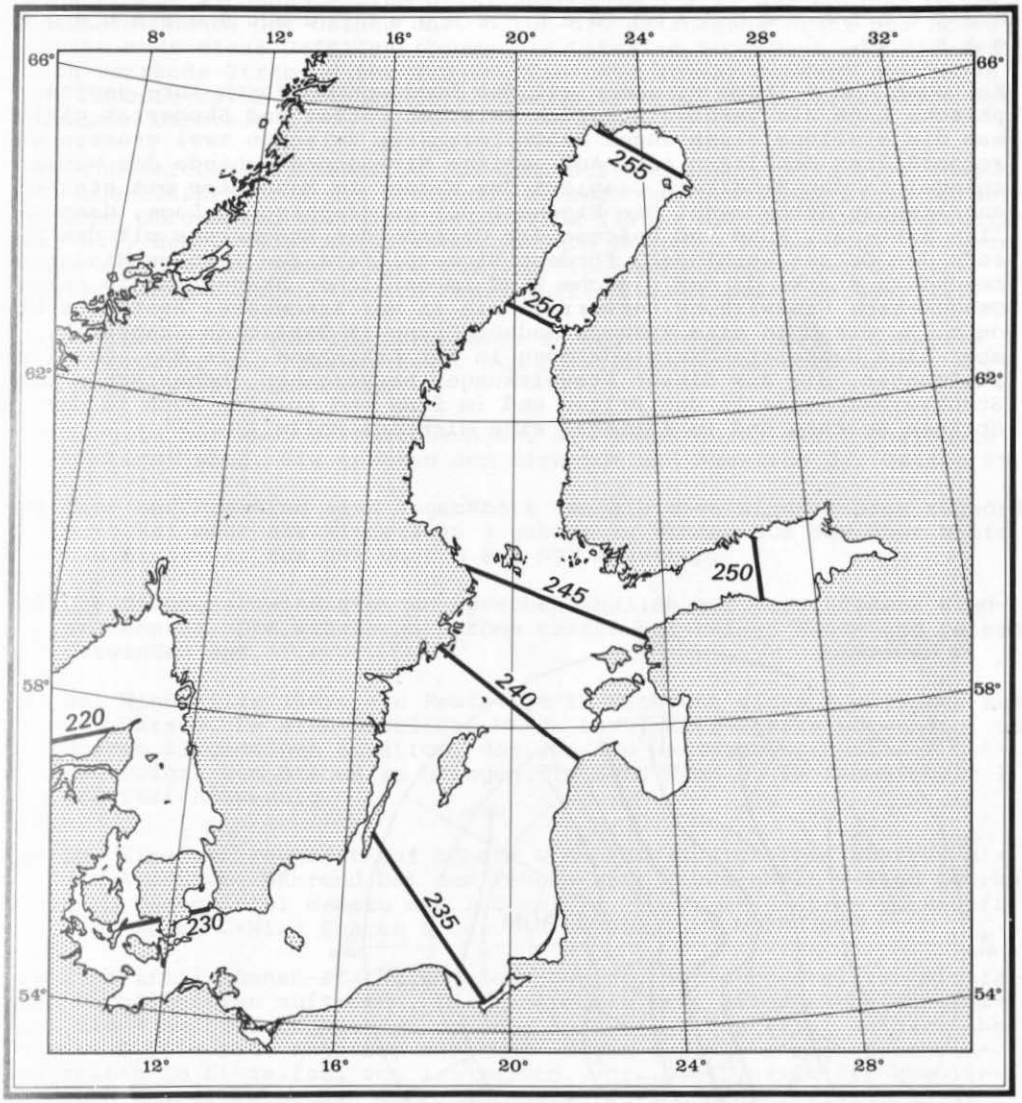


Abb. 2. Lage des Meeresspiegels der Ostsee, bezogen auf eine Niveaufläche (nach LISITZIN, 1965)

sammenhang mit dem Wasserhaushalt der Ostsee steht. Das Minimum der Wasserstände wird im März erreicht, gleichzeitig mit dem Minimum des festländischen Abflusses.

5.2. Strömungen

Die mittleren Strömungen der Ostsee stehen ebenfalls in engem Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt der Ostsee. Diesem Einflussfaktor überlagern sich Schwankungen, die hauptsächlich durch Wind- und Luftdruckschwankungen bedingt sind. Wenden wir uns zunächst den S t r o m v e r-

hältnissen in den engen Ostseeausgängen zu.

Kattegat und Beltsee zusammen mit dem Sund nehmen durch ihre geographische Lage als Verbindungsstück zwischen Ostsee und Skagerrak gleichsam die Stellung eines engen Manometerrohres zwischen zwei grossen wassergefüllten Behältern ein. Auf geringe Niveauunterschiede der Wasserspiegel in den Behältern reagiert das Wasser im Manometer mit starken anhaltenden Strömungen. Die Eigenart der geographischen Lage, dass nämlich Kattegat, Sund und Beltsee das Ostende des Skagerraks mit dem Westende der Ostsee verbinden, fördert Niveaudifferenzen infolge Windstau besonders stark, da der gleiche Wind im östlichen Skagerrak die entgegengesetzte Stauwirkung hervorruft wie in der Arkonasee. Westliche Winde z. B. erzeugen eine Wasserstandserhöhung im östlichen Skagerrak, aber eine Wasserstandserniedrigung in der Arkonasee. Die sog. Gefällsströmungen, die aus diesen Stauwirkungen hervorgehen, beherrschen die Stromverhältnisse in den Belten und im Sund und spielen auch in der übrigen Beltsee und im Kattegat eine wichtige Rolle.

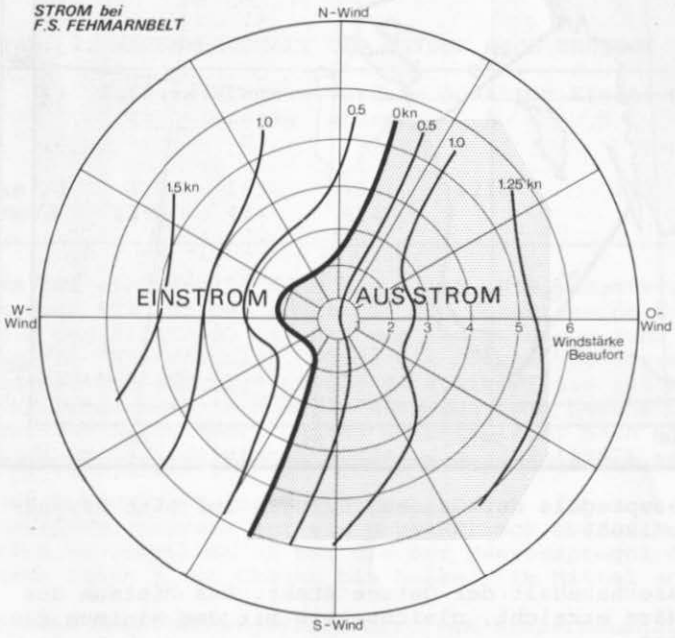


Abb. 3. Beziehung zwischen den Tagesmittelwerten von Wind- und Oberflächenströmung bei Feuerschiff Fehmarnbelt. Windstärke auf den Kreisen in Beaufort, Stromstärke in Knoten (2 kn≈1 m/sec). Für SSW-O-NNO-Wind Ausstrom (gerastert) in NNW-Richtung, für NNO-W-SSW-Wind Einstrom durch den Fehmarnbelt. Bei Windstille (Bildmitte) Ausstrom (nach DIETRICH, 1951)

Eine eigene windunabhängige Gefällsströmung stellt der Abfluss des Wasserüberschusses der Ostsee dar. Durch die ablenkende Kraft der Erdrotation muss diese Gefällsströmung die Ostseite Schwedens als südwestlich setzende Strömung bevorzugen. Sie unterstützt demnach die gegen den Uhrzeigersinn verlaufende windbedingte Oberflächenzirkulation der gesamten Ostsee.

Bei zahlreichen Feuerschiffen in den Ostseeausgängen wird seit langem der Oberflächenstrom mit einfachen Meßmethoden gemessen. Diese umfangreichen Stromdaten korrelierte DIETRICH (1951) mit den Windverhältnissen bzw. dem Luftdruckgradienten im Raum Skagen - Kopenhagen - Fehmarn-Blaavandshuk. In Abb. 3 sind die Oberflächenströmungen bei den verschiedenen Windlagen für das Feuerschiff "Fehmarnbelt" dargestellt.

Sie sind typisch für die Durchlässe in der Beltsee: Darßer Schwelle, Sund, Grosser und Kleiner Belt. Den Oberflächenströmungen dieser Meeresstrassen ist gemeinsam:

a) Es gibt nur zwei Stromrichtungen, die lokal durch die Topographie bestimmt sind. Sie gehören dem Einstrom und Ausstrom der Ostsee an.

b) Ein- und Ausstrom sind angenähert den gleichen Windsektoren zugeordnet: Bei mehr als Windstärke 3 gehört zu Winden aus SSW über W bis NNW Einstrom, aus NNW über O bis SSW Ausstrom.

c) Die Stromgeschwindigkeiten sprechen ähnlich auf verschiedene Windstärken an. Die stärksten Ströme treten bei reinen West- und reinen Ostwinden auf.

d) Bei Windstille läuft ein Reststrom in Richtung eines Ausstromes aus der Ostsee. Es sind westliche Winde bestimmter Stärke notwendig, um diesen allgemeinen Ausstrom, der aus dem Wasserüberschuss der Ostsee folgt, zum Stehen zu bringen. Im Sund sind 3, im Fehmarnbelt 2 Beaufort notwendig.

e) Der Einstrom reagiert auf höhere Windgeschwindigkeiten stärker als der Ausstrom. Während bei dem Feuerschiff Fehmarnbelt W-Wind Stärke 6 im Tagesmittel nahezu mit 2,0 sm/Std. Oberflächenstrom verknüpft ist, weist O-Wind Stärke 6 nur 1,3 sm/Std. auf.

Im Einzelfall können starke Abweichungen von den dargestellten mittleren Verhältnissen auftreten. Im Fehmarnbelt sind Stromgeschwindigkeiten bis 4 sm/Std. beobachtet worden. Auch bei Windstille, wo nach Abb. 3 etwa 0,5 sm/Std. Ausstrom nach NNW laufen sollte, kommen Geschwindigkeiten im Einzelfall von 1,5 sm/Std. vor. Die Dynamik der komplizierten Wasserbewegungen im Fehmarnbelt ist von WYRTKI (1953, 1954) aufgeklärt worden. In den Ostseeausgängen machen sich auch Gezeitenbewegungen noch etwas bemerkbar, während sie in der Ostsee selbst nicht messbar sind.

Im Inneren der Ostsee entstehen die Strömungen hauptsächlich direkt oder indirekt durch die Einwirkung des Windes. Die Direktwirkung entsteht dadurch, dass der Wind durch Reibung an der Meeresoberfläche den sog. Triftstrom in Gang setzt, einen nach der Tiefe zu abnehmenden Strom, der an der Oberfläche infolge der nach rechts ablenkenden Corioliskraft nicht direkt in Windrichtung fliesst, sondern im stationären Fall in eine Richtung rechts von der Windrichtung. Trifft nun der durch den Wind erzeugte Strom auf Flachwassergebiete bzw. die Küste, dann entsteht ein Stau. Dieser Stau wiederum hat eine Gefällsströmung zur Folge, in der das Wasser wieder aus den Staugebieten abfliesst als indirekte Wirkung des Windes.

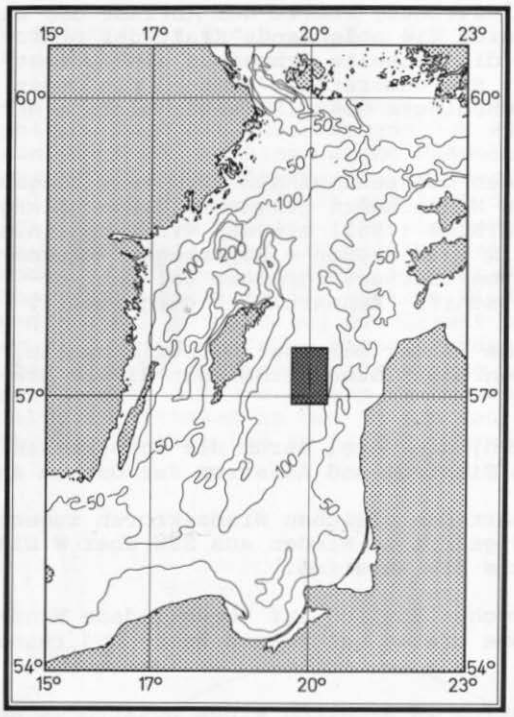
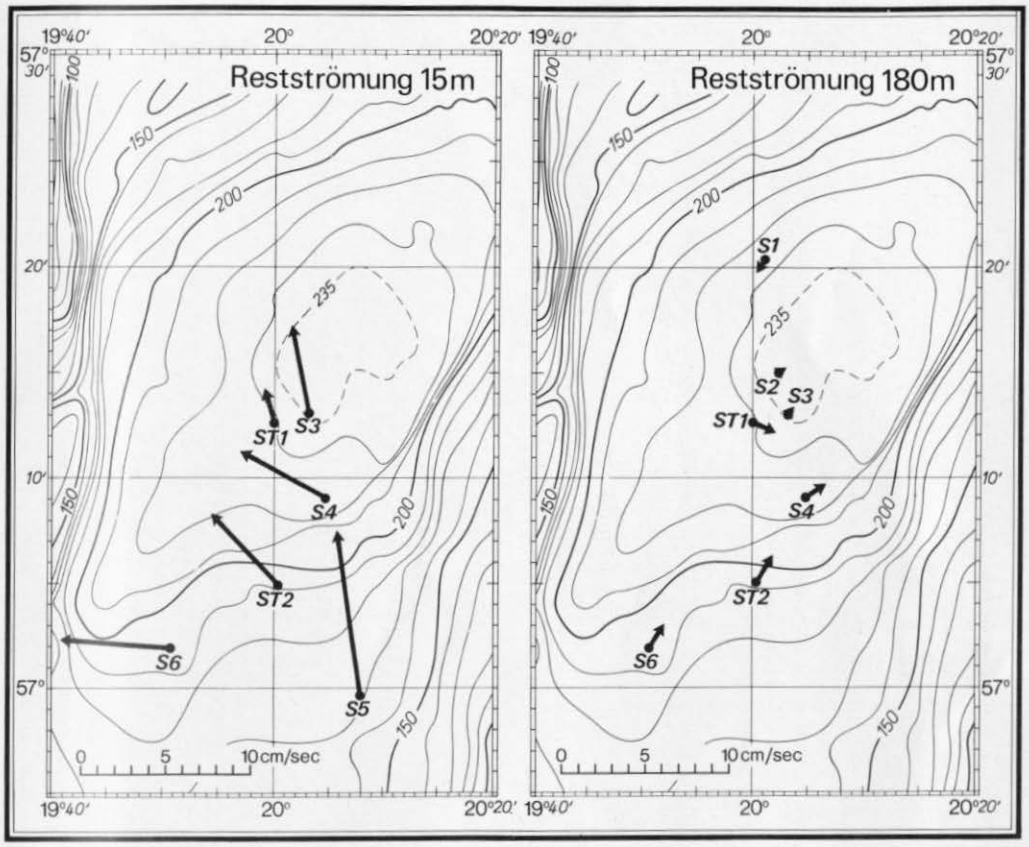


Abb. 4. Strömungen in zwei Niveaus im Gotlandtief (Mittel über 17 Tage), gemessen mit verankerten Strömungsmessern
◀ a) Lage des Messgebietes
b) Strömungen in 15 m Tiefe ▶
und 180 m Tiefe (Tiefenkarte nach HOLLAN, 1973).

Die im vorigen Abschnitt behandelte Flusswasserzufuhr ist Ursache einer weiteren Art von Strömung. Durch das Flusswasser und die entsprechende Aussüssung ist das Küstenwasser in den östlichen Teilen der Ostsee im Mittel von geringerer Dichte als das in grösserer Küstenentfernung. Die Folge ist eine Druckkraft, die wiederum infolge der Corioliskraft eine Strömung entgegen dem Uhrzeigersinn entlang den Küsten bewirken muss. Diese Strömungen betragen aber auch nur einige cm/sec und sind daher nur für die mittlere Zirkulation der Ostsee von Belang.

Ein Beispiel für die geringen Strömungen im Inneren der Ostsee zeigt Abb. 4b). Dargestellt sind die mittleren Strömungen über 17 Tage in 15 m Tiefe und 180 m Tiefe an mehreren Punkten im Gotlandbecken, die 1970 in einem grossen Experiment mit verankerten Meßgeräten gemessen worden sind (Abb. 4a)). Während in 15 m Tiefe durch Einwirkung des Windes noch Strömungen von bis zu 8 cm/sec vorkamen, waren die Werte in 180 m Tiefe kleiner als 1 cm/sec. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Stromgeschwindigkeiten in den Stromschwankungen - besonders den sog. Trägheitsschwingungen (s. Kapitel 9) - um ein Vielfaches grösser sind.



Literatur

BROGMUS, W.: Eine Revision des Wasserhaushaltes der Ostsee. Kieler Meeresforsch. 9, 15-42, 1952.

DIETRICH, G.: Über systematische Fehler in den beobachteten Wasser- und Lufttemperaturen auf dem Meere und über ihre Auswirkung auf die Bestimmung des Wärmeumsatzes zwischen Ozean und Atmosphäre. Dt. hydrogr. Z. 3, 314-324, 1950.

DIETRICH, G.: Oberflächenströmungen im Kattegat, im Sund und in der Beltsee. Dt. hydrogr. Z. 4, 129-150, 1951.

HOLLAN, E.: Tiefenkarte vom zentralen Teil des östlichen Gotlandbeckens. Dt. hydrogr. Z. 26, 114-118, 1973.

LISITZIN, E.: The mean sea level of the world ocean. Comm. Sci. Fenn., Comm. Phys. Math. 30, Helsinki, 1965.

WÜST, G.: Der Wasserhaushalt des Mittelländischen Meeres und der Ostsee in vergleichender Betrachtung. Geofis. pura e appl. 21, 3-14, 1952.

WYRTKI, K.: Die Dynamik der Wasserbewegungen im Fehmarnbelt. Teil 1 und 2. Kieler Meeresforsch. 9, 155-170, 10, 162-181, 1953, 1954.

WYRTKI, K.: Schwankungen im Wasserhaushalt der Ostsee. Dt. hydrogr. Z. 7, 91-129, 1954.