

Strombeobachtungen an Langzeit-Meßstationen im Watt

Von Harald Göhren

Inhalt

1. Vorbemerkungen	12
2. Ziel des Meßprogramms	12
3. Methodik und Datenaufbereitung	14
4. Einfluß des Windes auf die Strömungen im Watt	17
4.1 Einfluß auf die Stromgeschwindigkeiten	17
4.2 Einfluß auf die Stromrichtungen	19
4.3 Einbeziehung der Windstatistik	19
5. Zusammenfassung	25
6. Schriftenverzeichnis	26

Summary

Currents in tidal flats are generated by tidal motion and wind shear stress on the water surface. On the higher parts of a tidal flat the influence of tidal currents is comparatively small, and sand transport is mainly caused by wave action and drift currents.

Current measurements over two years have been carried out at three stations in the "Neuwerker Watt", an extended tidal flat in the Elbe Estuary. The results obtained so far indicate that a remarkable wind influence on current directions begins at a wind velocity over 4 Bft. With increasing wind the current direction spectra become smaller and tend to approach to the wind direction. Deviations are caused by local topographic conditions.

Current velocities increase when wind velocities exceed 6 Bft. The wind influence on current velocities is important if coastwards directed winds dominate.

Data have been evaluated together with a long-term wind statistics. As a result series of current direction distributions are obtained, demonstrating that wind-induced drift currents (in connection with wave action) are predominant forces for sand transport in tidal flats.

1. Vorbemerkungen

Zu einem Treffen der „North Sea Coastal Engineering Group“ im Oktober 1972 in Dänemark, über das an anderer Stelle im vorliegenden Heft berichtet wird, wurde vom Verfasser ein Vortrag unter dem Titel „Long-term current observations in a tidal flat“ gehalten. Dieses Vortragsthema wird im folgenden Beitrag mit einigen notwendigen Änderungen und Ergänzungen behandelt.

2. Ziel des Meßprogramms

Die Strömungsverhältnisse im flachen, schelfartigen Wattenmeer der Nordseeküste werden durch die Gezeitenbewegung und durch den Windeinfluß geprägt. Lange Zeit hat man den Gezeiten die wesentliche Bedeutung für den Materialtransport und die morphologische Prägung des Wattreliefs beigemessen, wohl nicht zuletzt deswegen, weil

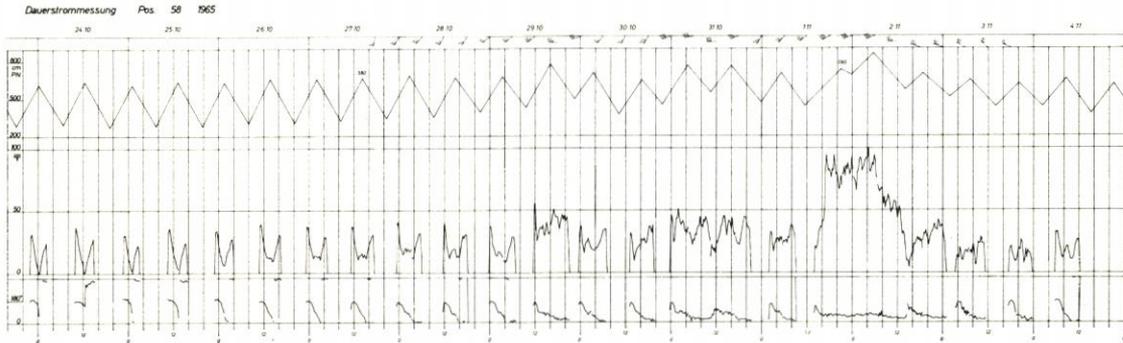


Abb. 1. Ergebnis einer 14tägigen Dauerstrommessung auf dem Neuwerker Watt mit Sturmflut vom 1./2. 11. 1965 (Thw am 2. 11. 1965 in Cuxhaven PN + 876 cm; MThw in Cuxhaven PN + 640 cm)

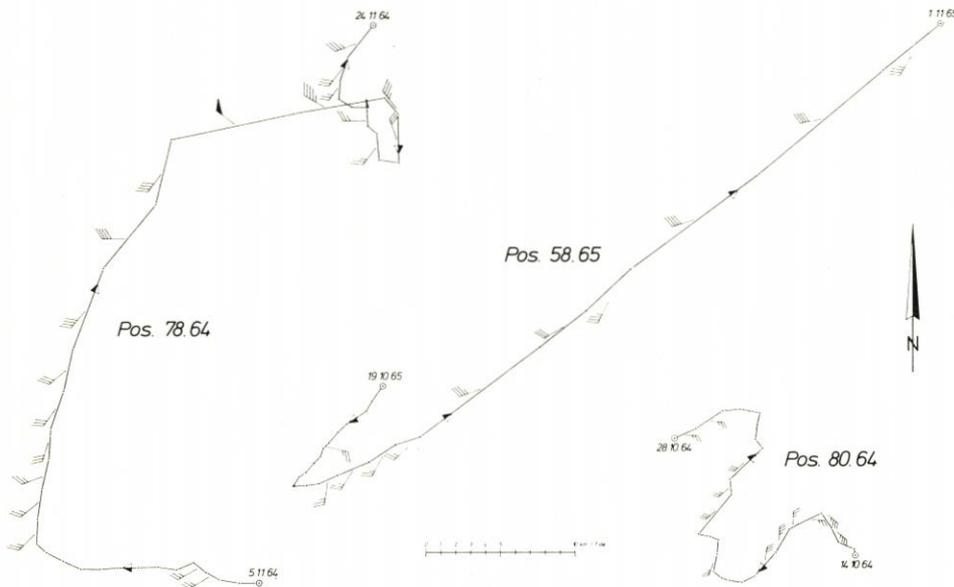


Abb. 2. Vektorenzüge (Reststrom) für 3 Meßstationen auf dem Neuwerker Watt mit Windangaben für die Zeit des Thw (nur für Windstärken > 4 Bft)

über die Gezeitenströmungen Messungen und Beobachtungen vorlagen, während man über die bei stürmischen Wetterlagen auftretenden Strömungen kaum etwas wußte. Dies änderte sich erst, als es gelang, spezielle Strömungsmessgeräte für das Watt zu entwickeln (2, 3, 5, 11). Inzwischen sind im gesamten Wattengürtel zwischen Borkum und Sylt zahlreiche Wattdauerstrommessungen ausgeführt worden, und zwar in der Regel 14tägige Meßserien (14). Die nach und nach veröffentlichten Ergebnisse zeigen, daß auf den hohen prielfernen Wattflächen die Gezeitenstromgeschwindigkeiten nur sehr gering sind – sie erreichen selten mehr als 30 bis 40 cm/s und liegen häufig unterhalb der Grenzgeschwindigkeit des Sandtransportes. Unter Starkwindeinfluß wurden hingegen merkliche Veränderungen in den Strömungen beobachtet, Richtungsänderungen und insbesondere auch Geschwindigkeitszunahmen.

Der Verfasser hat aus dem umfangreichen Datenmaterial mehrjähriger Strömungsmessungen im Neuwerker Watt die winderzeugten Strömungen, die nachfolgend als Triftströmungen bezeichnet werden, besonders untersucht (4, 5). Die Untersuchungsergebnisse, aus denen in Abbildung 1 und Abbildung 2 zwei besonders anschauliche Beispiele dargestellt sind, führen zu der Erkenntnis, daß die durch Windschubspannung und Windstaugefälle erzeugten Triftströmungen im Watt für den großräumigen Sandtransport und damit für die Küstenmorphologie einen bedeutenden, wenn nicht den entscheidenden Anteil haben. Hierbei ist die transporterhöhende Wirkung des im flachen Watt bis an die Sohle wirksamen Seegangs mit zu berücksichtigen.

Aus dieser Erkenntnis folgt nun aber, daß bei einem Forschungsprogramm, welches auf eine Erfassung der morphologisch wirksamen Kräfte an unserer Wattenmeerküste gerichtet ist, die traditionelle „14-Tage-Messung“ nicht mehr genügt. Sie liefert zwar ausreichende Daten zur Untersuchung der Gezeitenströmungen, jedoch selten, nur zufällig und niemals vollständig, die maßgebenden winderzeugten Strömungskomponenten. Dies würde Messungen bei allen vorkommenden Windlagen (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Winddauer) erfordern, eine praktisch unlösbare Aufgabe.

Um jedoch einen ersten Schritt zu tun und um insbesondere eine weitere Bestätigung für die vom Verfasser mehrfach vertretene Hypothese zu gewinnen, daß die winderzeugten Strömungen im Watt von entscheidender Bedeutung für den großräumigen Materialtransport sind, wurde im Rahmen der Arbeiten der FORSCHUNGS- UND VORARBEITENSTELLE NEUWERK ein Langzeitmeßprogramm im Neuwerker Watt durchgeführt, dessen Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden.

3. Methodik und Datenaufbereitung

Im Frühjahr 1968 wurden an drei Stationen, die im Lageplan (Abb. 3) angegeben sind, Wattdauerstrommesser aufgestellt (Abb. 4) und – mit einer zwangsläufigen Unterbrechung im Winter 1968/69 – bis Dezember 1969 betrieben. Im Abstand von 14 Tagen mußten die Stationen aufgesucht, die Filme gewechselt und die Geräte vom Bewuchs befreit werden. Einige zeitliche Ausfälle durch Gerätestörungen waren unvermeidlich.

An den ausgewählten Stationen lagen bereits aus dem früheren Meßprogramm (5) mehrere Serien vor, die mit einbezogen wurden. Im Mittel sind an jeder Station 830 Tiden gemessen worden, die Gesamtzahl der Meßdaten beträgt rund 186 000.

Entsprechend der Zielsetzung des Programms mußte eine statistische Auswertung vorbereitet werden. Dazu wurden alle Daten auf Lochstreifen übertragen. Zu jeder Meßtide wurde die maßgebende Windrichtung und Windgeschwindigkeit ermittelt, und zwar das 3-Stunden-Mittel um die Zeit des Thw nach den Aufzeichnungen der Windmeßstation Scharhörn. Diese Winddaten – klassifiziert nach der BEAUFORT-Skala und nach 45°-Sektoren – wurden mit abgelocht. Zur statistischen Bearbeitung wurde ein spezielles Rechenprogramm geschrieben, welches Stromrichtungen und Stromgeschwindigkeiten nach Windstärken- und Windrichtungsklassen ordnete und in Häufigkeitsprozenten berechnete.

Die Berechnung zweidimensionaler Häufigkeiten, die zunächst ins Auge gefaßt war, schied aus, weil dazu auch dieses umfangreiche Datenkollektiv noch nicht ausreichend erschien.

Abbildung 5 zeigt eine vollständige Ergebnisliste für eine Station, welche alle Daten für die statistische Auswertung und graphische Darstellung enthält. Wie zu erwarten war, konnte auch in dem 2jährigen Meßzeitraum für die höheren Windgeschwindigkeiten



Abb. 3. Lageplan – Außenelbe und Neuwerker Watt mit Meßstationen

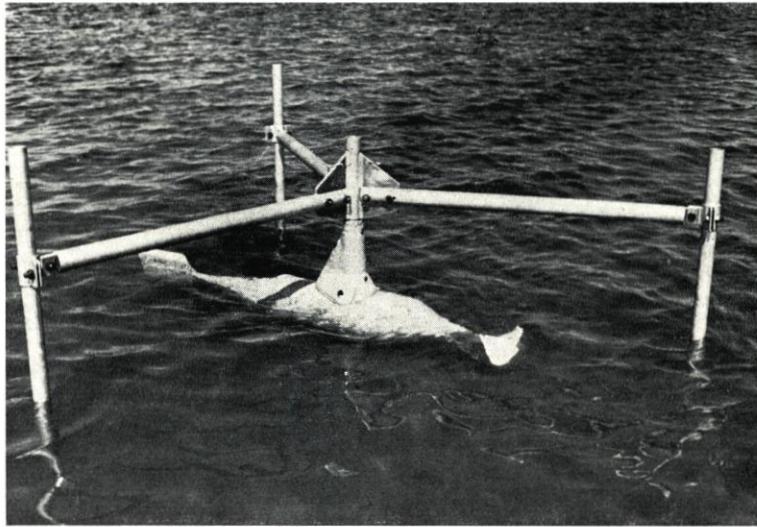


Abb. 4. Meßstation mit Wattdauerstrommeßgerät

Wind		Stromgeschwindigkeit cm/s										Stromrichtung								Tiden		
Richtung	Stärke	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	> 90	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Anzahl der Werte	Anzahl	Dauer
N	3	40,6	39,6	15,8	2,9	0,9	0,2	-	-	-	-	20,1	6,9	1,1	2,9	24,0	24,9	10,0	10,1	1186	16	6 ¹⁰
	4	43,1	34,1	18,2	2,4	0,6	0,6	0,4	0,2	0,1	0,2	23,0	1,9	2,2	3,1	23,6	19,7	15,3	11,1	2543	34	6 ¹⁴
	5	49,3	30,2	15,4	2,1	1,0	0,8	0,4	0,5	0,1	0,2	24,7	4,2	8,6	9,1	13,0	11,5	16,9	11,9	858	11	6 ³⁰
	6	42,8	49,0	5,1	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-	20,4	1,0	2,0	12,2	11,2	5,1	34,7	13,3	98	1	8 ¹⁰
NO	3	37,0	39,1	19,7	3,1	0,7	0,3	0,1	-	-	-	20,5	5,6	0,5	2,1	24,7	24,9	11,1	10,6	2393	32	6 ¹⁴
	4	41,8	33,4	19,0	3,4	1,3	0,5	0,3	0,2	-	0,1	23,6	0,6	-	1,7	24,9	22,8	13,6	12,8	2719	37	6 ⁰⁷
	5	40,2	31,3	16,5	4,4	1,0	1,0	0,6	0,3	0,5	4,1	17,9	0,6	0,3	0,8	11,1	31,0	24,2	14,1	774	10	6 ²⁷
	6	19,5	47,6	15,8	13,4	1,2	2,4	-	-	-	-	2,4	-	-	-	13,4	22,0	28,0	34,1	82	1	6 ⁵⁰
O	3	39,4	41,6	15,6	2,4	0,4	0,2	-	0,2	-	0,2	22,9	4,5	0,1	1,0	28,3	23,7	8,1	11,7	1069	15	6 ⁵⁶
	4	34,4	37,3	21,3	4,8	1,3	0,5	0,2	0,1	-	0,1	24,3	1,0	-	1,1	32,1	18,7	10,3	12,5	3714	51	6 ⁰⁴
	5	33,4	36,9	20,7	6,7	1,2	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	22,6	0,1	-	0,5	23,3	21,2	14,9	17,4	2429	35	6 ⁰⁷
	6	25,9	41,5	17,8	12,1	2,3	0,5	0,1	0,1	-	-	14,1	-	0,1	0,6	16,9	16,9	19,7	31,6	980	16	6 ⁰⁶
	7	33,3	34,5	18,0	10,8	2,7	0,3	-	-	-	0,3	9,6	-	-	0,3	12,6	15,3	15,6	46,6	333	6	4 ³⁷
SO	3	44,4	33,6	19,7	1,8	-	-	-	-	-	0,4	22,9	-	-	6,7	42,1	9,9	5,8	12,6	223	3	6 ¹¹
	4	43,3	35,7	17,1	3,2	0,5	0,1	-	-	-	-	25,2	2,0	0,5	2,3	29,5	20,3	7,2	13,0	3490	50	6 ⁴⁹
	5	38,3	34,4	22,0	3,6	1,1	0,5	-	-	-	-	24,7	2,8	-	0,4	24,6	20,3	10,1	17,1	964	14	6 ⁴⁴
	6	40,3	27,8	16,7	11,1	2,8	1,4	-	-	-	-	11,1	-	-	-	16,7	18,1	19,4	34,7	72	1	6 ⁰⁰
S	3	41,8	38,6	16,0	2,7	0,8	-	-	-	-	-	24,5	-	-	6,4	41,6	9,3	6,7	11,5	593	8	6 ¹⁰
	4	46,6	33,9	14,9	3,5	0,7	0,2	0,1	-	-	-	27,3	4,6	1,7	6,5	28,9	16,6	5,4	9,0	3955	54	6 ⁰⁶
	5	50,0	37,2	8,8	2,1	1,1	0,5	0,2	-	-	-	34,3	12,8	5,8	9,4	23,8	6,5	1,6	5,8	2172	26	6 ²⁷
	6	41,4	35,8	11,5	6,6	2,1	2,3	0,1	-	-	0,1	20,0	35,8	8,8	6,7	12,9	9,5	2,7	3,6	746	9	6 ⁵⁴
	7	26,6	67,1	8,3	-	-	-	-	-	-	-	10,1	64,6	-	-	2,5	21,5	1,3	-	79	1	6 ³⁵
	8	9,9	8,8	25,3	41,7	14,3	-	-	-	-	-	7,7	90,1	1,1	-	-	-	-	-	91	1	7 ³⁵
SW	3	45,0	33,6	17,3	2,3	0,3	0,7	-	0,3	-	0,3	23,1	-	-	6,2	42,0	10,1	7,2	11,4	307	4	6 ²³
	4	47,2	34,2	13,9	2,9	0,9	0,4	0,2	-	-	0,3	24,8	10,8	5,9	6,7	24,3	15,4	5,2	6,7	3631	47	6 ²⁶
	5	40,0	36,4	19,3	1,9	1,1	0,7	0,3	0,1	0,1	0,1	22,9	31,5	14,8	10,8	13,5	5,3	-	1,1	2790	34	6 ⁵⁰
	6	25,1	29,4	29,4	11,3	3,3	1,0	0,3	0,1	-	-	11,3	48,9	18,2	8,5	10,6	2,3	0,1	-	2364	25	7 ⁵²
	7	11,1	21,5	42,7	15,8	2,8	1,2	2,0	2,1	0,2	0,6	5,9	65,7	15,0	4,3	6,6	2,0	0,3	0,2	954	10	7 ⁵⁷
	8	5,5	10,0	21,2	15,8	10,9	12,2	6,7	13,5	2,9	1,3	8,0	74,6	10,9	1,0	4,8	0,3	0,3	-	311	3	8 ³⁸
W	4	50,5	31,0	14,5	2,8	0,7	0,2	0,1	-	-	0,1	20,8	15,2	6,5	6,8	21,2	15,1	7,6	6,8	4843	62	6 ³⁰
	5	38,1	37,8	18,5	3,5	1,0	0,7	0,1	0,1	-	0,1	18,7	32,8	19,3	8,1	14,5	4,0	1,4	1,2	1978	24	6 ⁵²
	6	13,4	32,0	32,6	15,8	4,2	1,1	0,5	0,2	0,1	0,1	9,6	49,0	22,8	7,4	10,9	6,6	0,6	-	1869	20	7 ⁴⁷
	7	10,9	17,8	19,5	17,5	14,8	9,8	5,7	3,0	0,9	0,1	2,2	59,1	23,3	7,0	8,4	-	-	-	746	7	7 ¹⁴
	8	8,5	10,5	11,6	9,5	10,3	9,7	13,8	14,7	7,2	4,2	0,3	67,3	21,4	5,5	3,9	1,6	-	-	621	5	10 ²¹
NW	3	53,2	29,0	12,1	1,3	1,7	1,3	0,4	0,4	0,4	-	23,4	-	-	3,0	22,1	29,0	11,3	11,3	231	3	6 ²⁵
	4	51,7	32,0	11,9	2,4	0,9	0,5	0,2	0,1	-	0,2	24,5	7,8	7,6	5,3	21,7	15,7	10,0	7,4	3365	45	6 ¹³
	5	42,4	28,2	20,3	5,5	1,1	1,1	0,6	0,5	0,1	0,2	23,7	19,2	19,6	10,9	12,4	5,1	4,9	4,3	1496	18	7 ⁵⁰
	6	19,0	43,5	27,6	6,1	2,0	1,0	0,3	0,3	-	0,1	9,0	34,3	28,4	8,1	12,1	3,3	3,4	1,4	1132	12	7 ⁵⁰
	7	10,1	12,4	25,3	26,5	17,2	7,5	0,4	0,4	0,2	-	2,7	41,0	32,7	15,1	7,0	0,6	0,4	0,6	517	5	8 ³⁷

Abb. 5. Liste der im Computer errechneten klassierten Stromgeschwindigkeits- und Stromrichtungsverteilungen für eine Langzeitmeßstation

kein vollständiges Beobachtungsmaterial gewonnen werden. Nur bis zur Windstärke 6 sind alle Windrichtungen vertreten. Messungen bei Windstärke 8 und 9 sind nur noch sporadisch vorhanden.

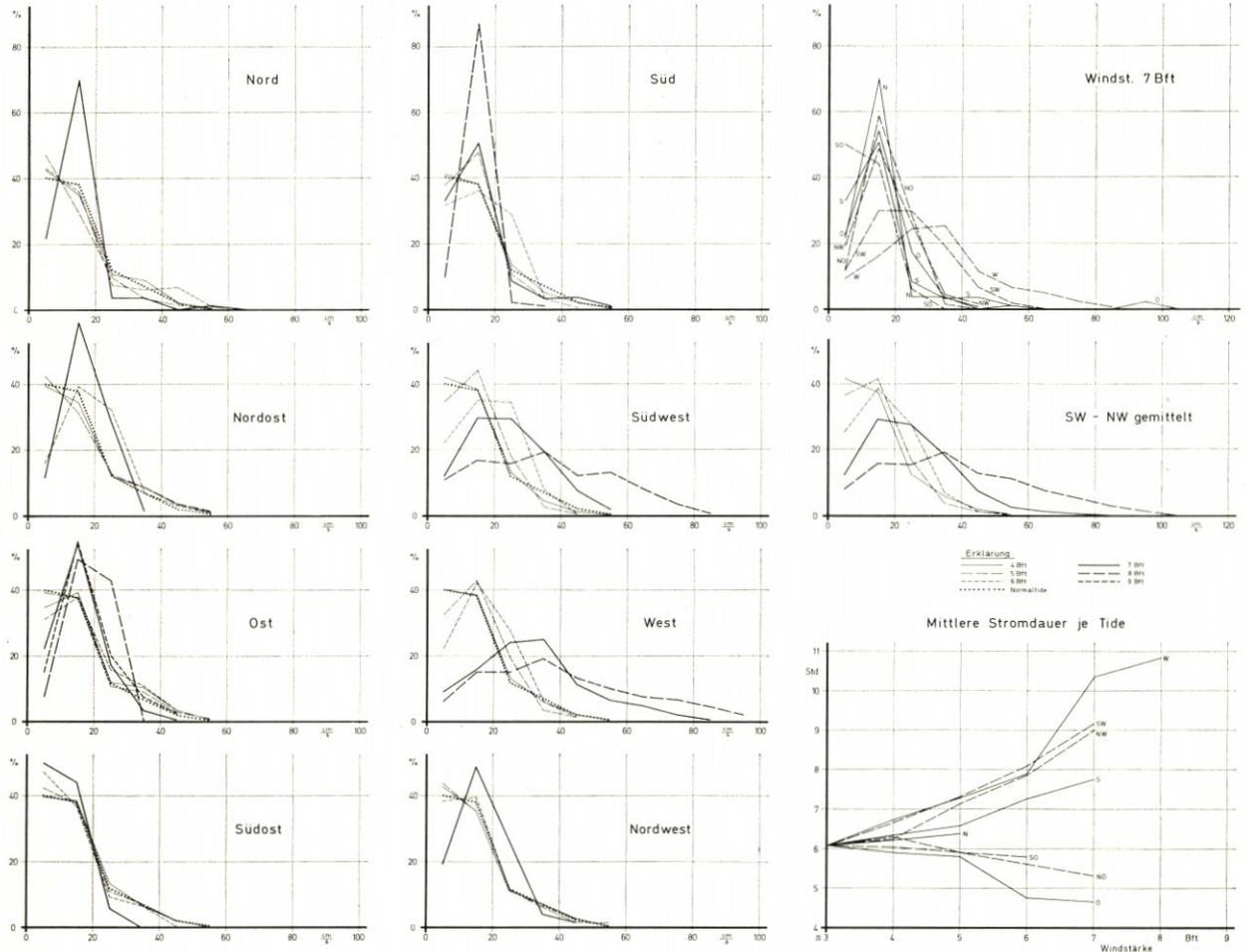


Abb. 6. Häufigkeitsverteilung der Stromgeschwindigkeiten für Station 3, geordnet nach Windrichtungen und Windstärken

4. Einfluß des Windes auf die Strömungen im Watt

4.1 Einfluß auf die Stromgeschwindigkeiten

Abbildung 6 zeigt – beispielhaft – eine Darstellung der nach Windrichtungen und Windstärken klassierten Stromgeschwindigkeitsverteilungen für Station 3. Dazu ist zu bemerken, daß die punktierte Verteilungskurve, die mit „Normaltide“ bezeichnet ist, alle Tiden bis zur Windstärke 3 zusammenfaßt. Diese Kurve, die als Geschwindigkeitscharakteristik des Meßpunktes für die reine Gezeitenströmung gelten

kann, bestätigt die obige Aussage von der geringen Intensität der Gezeitenbewegung im flachen Watt. Geschwindigkeiten über 40 cm/sec treten hier z. B. kaum noch auf.

Der Vergleich der in Abbildung 6 dargestellten klassierten Verteilungskurven zeigt im wesentlichen folgendes:

- Eine merkliche Zunahme der Stromgeschwindigkeiten (35 cm über Sohle), die an einer Verschiebung des Maximums oder einer Abflachung der Häufigkeitskurve zu erkennen ist, setzt erst bei Windstärke 6 ein.
- Ein Einfluß des Windes auf die Strömungen ist besonders bei aufländigem Wind – Südwest bis Nordwest – ausgeprägt, während die anderen Sektoren keine so eindeutige Gesetzmäßigkeit erkennen lassen.

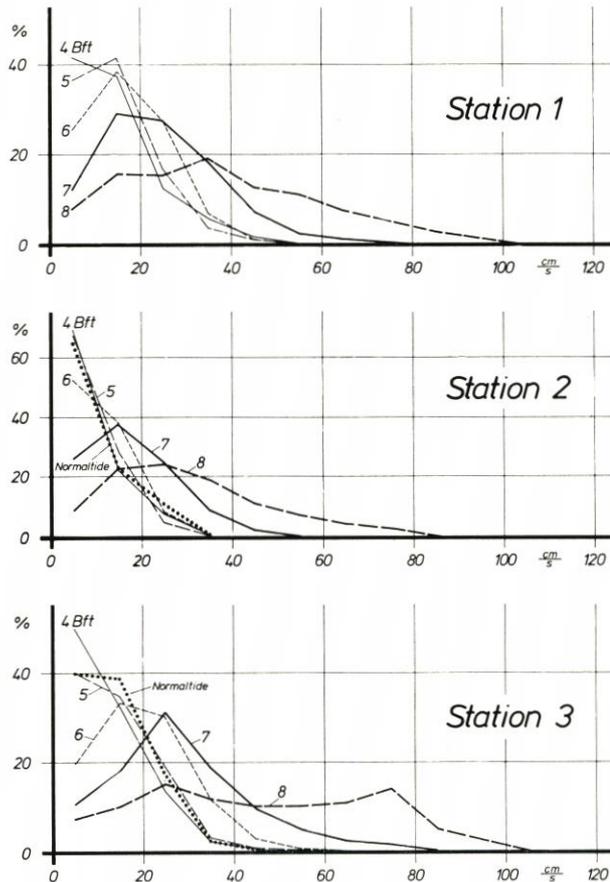


Abb. 7. Häufigkeitsverteilung der Stromgeschwindigkeiten für den Windsektor Südwest bis Nordwest, geordnet nach Windstärken

Diese Ergebnisse gelten ähnlich für die beiden anderen Stationen.

Die hier erkennbare Abhängigkeit der Triftstromgeschwindigkeit von der Windrichtung ist bemerkenswert und schon in (4) herausgestellt worden. Sie hängt mit den unterschiedlichen Wasserständen zusammen (niedrigere Wasserstände bei ablandigem Wind, höhere Wasserstände bei aufländigem Wind), ist insbesondere aber auf das neben dem Windschub maßgebende Windstaugefälle zurückzuführen, welches sich bei aufländigem Wind zwischen dem Watt und der tiefen Stromrinne der Außenelbe einstellt.

Da Wind aus Südwest bis Nordwest in der südlichen Nordsee sowohl nach Häufigkeit als auch nach Intensität überwiegt, ist dieses ein sehr wichtiges Ergebnis, welches in Abbildung 7 nochmals herausgestellt ist. Wenn man diese „auflandigen Sektoren“ mittelt, erhält man eine sehr ausgeprägte und für alle Stationen auch sehr ähnliche Abstufung der Häufigkeitsverteilungen nach der Windstärke, welche den Nachweis liefert, daß bei auflandigen Starkwind- und Sturmlagen im Neuwerker Watt (und mit Sicherheit auch in anderen Wattgebieten) wesentlich höhere Strömungen über der Sohle auftreten als bei normaler Gezeitenbewegung.

Dieses Ergebnis ist zunächst nur von empirischer Bedeutung; es ist nicht möglich, es mit theoretischen Ansätzen oder Modellen der Triftstrombewegung zu vergleichen, weil es sich um instationäre, der Gezeitenbewegung überlagerte Strömungen handelt und außerdem die Küstenkonfiguration von ganz wesentlichem Einfluß zu sein scheint.

4.2 Einfluß auf die Stromrichtungen

Die Auswertung der Stromrichtungsverteilungen ergab wesentlich aussagekräftigere Ergebnisse als die der Stromgeschwindigkeiten. Die Verteilungskurven wurden in polarer Darstellung aufgetragen, so wie es in der Windstatistik üblich ist. In den Abbildungen 8 bis 10 sind die Ergebnisse aller Stationen dargestellt.

In größerem Maßstab herausgezeichnet ist jeweils die Verteilung für alle Tiden mit Windstärke ≤ 3 Bft, die man als Stromrichtungscharakteristik der reinen Gezeitenströmung bezeichnen kann. Sie sagt aus, daß z. B. an Station 3 vorwiegend die Stromrichtungen S und SW auftreten (Hauptflutstrom), daneben N (Hauptebbestrom) sowie NW und W. Zur Erläuterung sei bemerkt, daß alternierende Strömungen, wie sie in Prielen und Tideflüssen beobachtet werden, auf freien Wattflächen selten auftreten.

Die Analyse der in den Abbildungen 8 bis 10 dargestellten Häufigkeitsverteilungen ergibt folgendes:

- a) Ein signifikanter Einfluß des Windes auf die Strömungsrichtung im Watt setzt etwa bei Windstärke 5 ein. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird das Richtungsspektrum schmaler und windorientiert. Bei den erfaßten Sturmtiden mit 8 Bft ist praktisch nur noch eine Stromrichtung vorhanden.
- b) Die Triftstromrichtungen entsprechen nur in erster Näherung der Windrichtung. Es zeigen sich charakteristische Abweichungen, die wieder nur als lokale Effekte gedeutet werden können. Bei auflandigem Starkwind aus Nordwest bis Süd tritt z. B. vorwiegend eine nordöstlich gerichtete Strömung auf. Es ist dies die Richtung, die durch das schon oben erwähnte Windstaugefälle bei auflandigem Wind und durch die Randbedingungen (Küstenverlauf) vorgegeben wird.

Auch diese Auswertung der Stromrichtungsverteilung in Abhängigkeit von den Windlagen bestätigt generell die Aussage über den vorherrschenden Windeinfluß auf die Strömungen im flachen Wattenmeer.

4.3 Einbeziehung der Windstatistik

Der starke Einfluß des Windes auf die Strömungen im Watt ist durch die vorliegenden Meßserien erneut nachgewiesen. Die Beurteilung der Transportwirksamkeit wind-erzeugter Strömungssysteme und ihres Anteils an der morphologischen Prägung des Küstenraumes ist jedoch auch an Hand dieser Ergebnisse nach wie vor schwierig. Daß

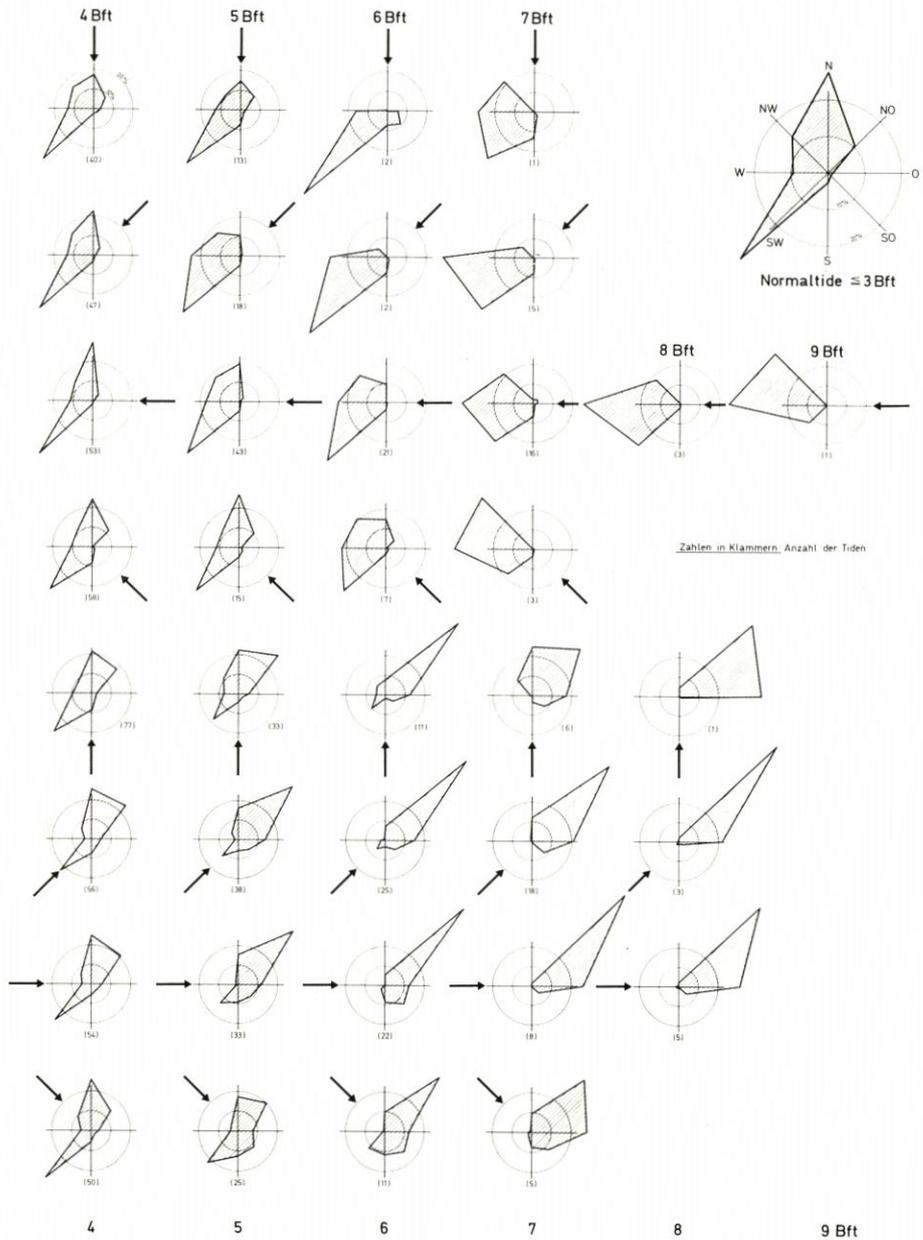


Abb. 8. Häufigkeitsverteilungen der Stromrichtungen für Station 1, geordnet nach Windrichtungen und Windstärken

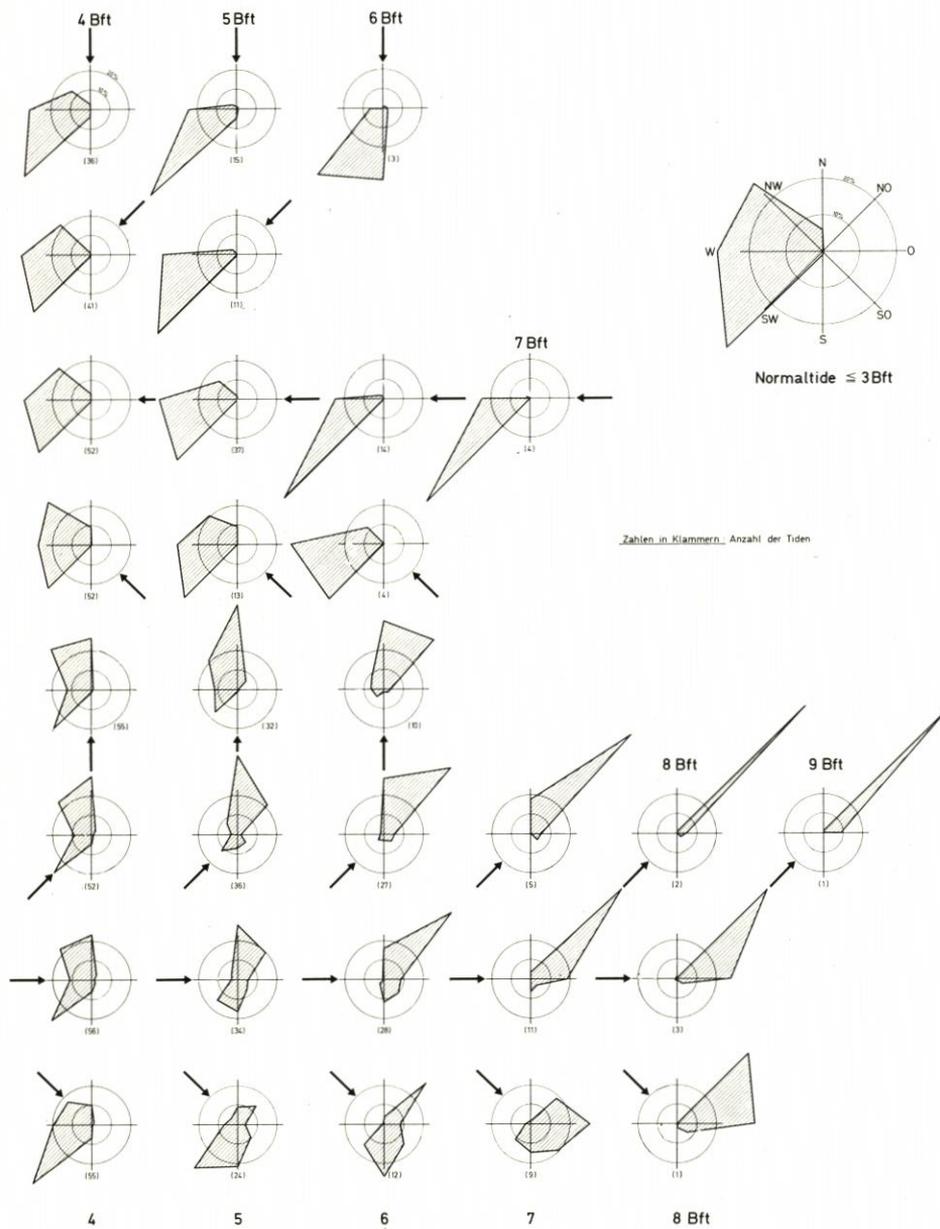


Abb. 9. Häufigkeitsverteilungen der Stromrichtungen für Station 2, geordnet nach Windrichtungen und Windstärken

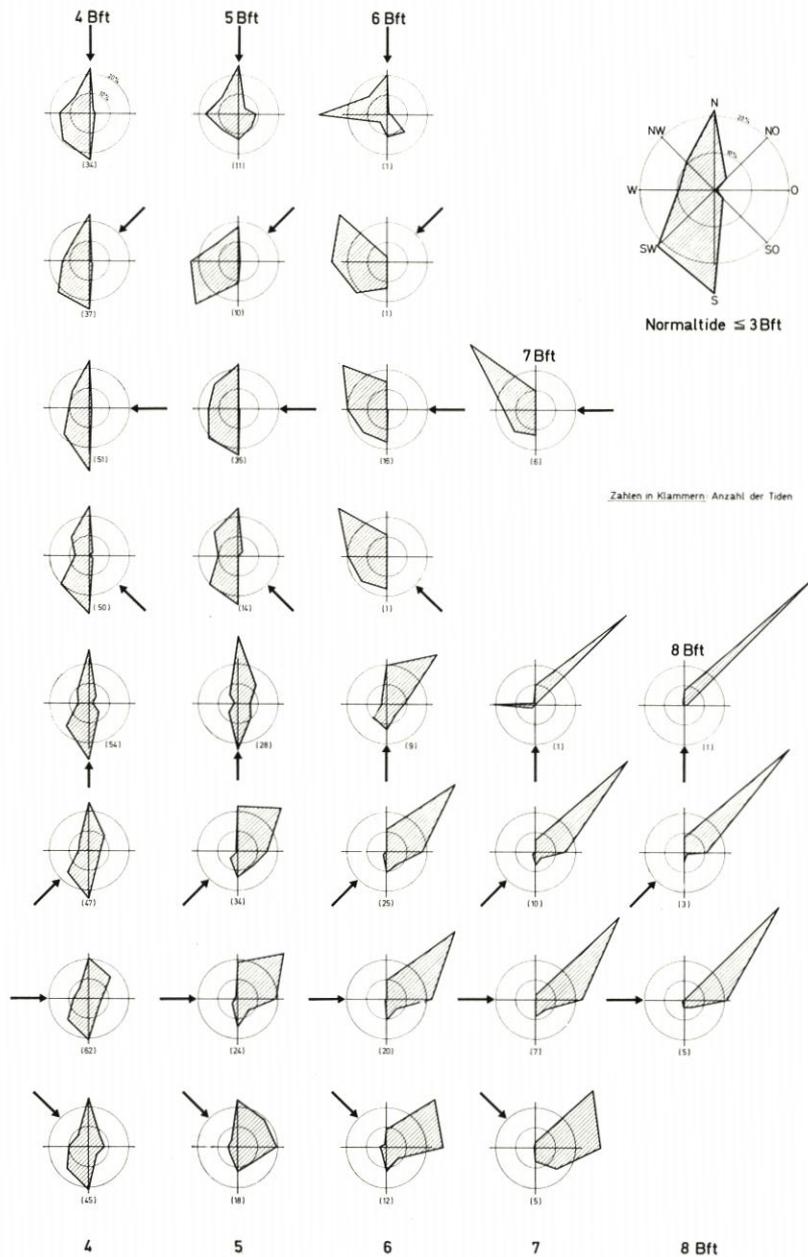


Abb. 10. Häufigkeitsverteilungen der Stromrichtungen für Station 3, geordnet nach Windrichtungen und Windstärken

Strömungsmessungen allein nicht ausreichen, den Materialtransport quantitativ zu errechnen, ist bekannt und bedarf hier keiner weiteren Erläuterung. Bei dem gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse über die Sandbewegung im Bereich der Nordseeküste mit ihren in weitem Bereich variierenden Strömungen ist es schon ein Fortschritt, wenn es gelingt, vorherrschende Transportrichtungen (den resultierenden Transport) anzugeben.

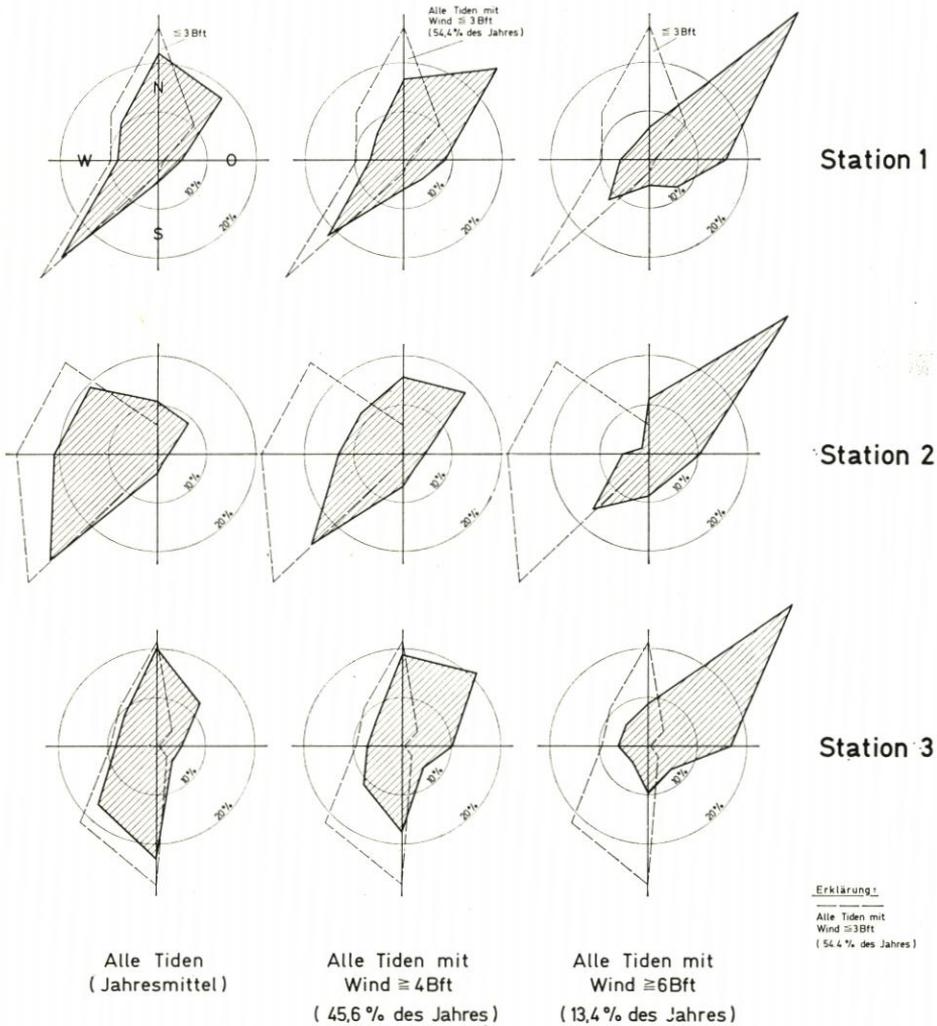


Abb. 11. Häufigkeitsverteilungen der Stromrichtungen unter Einbeziehung der Windstatistik (Richtungscharakteristiken)

Wenn man die in Abbildung 1 dargestellten Meßergebnisse betrachtet, ist man zunächst geneigt, den Einfluß derartiger bei Sturmfluten auftretender Strömungen überzubewerten. Es muß aber beachtet werden, daß die normale Gezeitenströmung ständig wirksam ist, während Extremwetterlagen, welche zu so hohen Stromgeschwindigkeiten über dem Wattgrund führen, relativ selten auftreten.

Zur Klärung dieser Frage erschien es sinnvoll, die Ergebnisse der Langzeitstationen mit der Windstatistik zu verarbeiten. Dazu stand eine sehr exakte, nach Windrichtungen und Windstärken klassierte Häufigkeitsberechnung der Windbeobachtungen am Feuerschiff Elbe 1 von 1924 bis 1961 zur Verfügung (1).

Es wurde in einfacher Weise so vorgegangen, daß jede einzelne Häufigkeitsverteilung der Stromrichtungen (Abb. 5) mit der prozentualen Häufigkeit der zugehörigen Windlage multipliziert wurde. Die Beobachtungslücken im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten wurden durch Interpolation und Extrapolation geschlossen. (Dies war bei den relativ klaren Gesetzmäßigkeiten der Stromrichtungsverteilungen möglich. Bei den Stromgeschwindigkeitsverteilungen erschien dagegen eine Einbeziehung der Windstatistik wegen der Unvollständigkeit des Materials noch nicht zulässig.) Aus dieser Berechnung ergaben sich die in Abbildung 11 dargestellten Diagramme. Sie zeigen – jeweils im Vergleich mit der normalen Richtungscharakteristik der unbeeinflussten Gezeitenströmung – folgendes:

Die linke Spalte enthält die Stromrichtungsverteilungen für alle Tiden eines Jahres bei einer Windverteilung, die dem langjährigen Mittelwert entspricht. Dies ist also die in der Natur auftretende Stromrichtungsverteilung, welche bereits von der „Normaltidencharakteristik“ abweicht. Die Abweichung ist allerdings noch nicht erheblich.

In der mittleren Spalte sind die Verteilungen für alle Tiden mit Windstärken über 3 Bft aufgetragen, welche fast 50 % der Jahreszeit ausmachen. Hier zeigt sich bereits eine starke Abweichung zur „Normaltidencharakteristik“, und zwar – wie zu erwarten – eine Zunahme der nach Nordosten gerichteten Strömungen. Bei Station 1 und Station 3 ist dieser Sektor bereits dominierend.

Dieses Ergebnis ist bedeutsam, denn wenn sich bei allen windbeeinflussten Tiden eines Jahres – und das sind rund 50 % – eine eindeutige Richtungsdominanz der Strömungen ergibt, kann man wegen der besonderen Verhältnisse im Watt davon ausgehen, daß damit auch die Richtung des resultierenden Materialtransportes vorgezeichnet ist. Die Strömungen sind ohne Windeinfluß und ohne die transporterhöhende Orbitalbewegung auf den hohen Wattflächen so gering, daß sowohl an der Sohle als auch im Suspensionstransport keine nennenswerten Materialumlagerungen auftreten können. Dafür gibt es zahlreiche Hinweise, auf die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

Die rechte Spalte in Abbildung 11 zeigt die Richtungscharakteristik aller Starkwind- und Sturmtiden, welche immerhin im langjährigen Mittel noch mit rund 13 % vertreten sind. Hier ergibt sich nun an allen Stationen eine ganz eindeutige Dominanz der nord-östlich gerichteten Triftströmung und damit eine weitere Bestätigung für die oben gemachten Aussagen.

Abbildung 11 bestätigt für die drei Langzeitmeßstationen – und damit praktisch für ein rund 18 km langes küstennormales Profil über das Neuwerker Watt (Abb. 3) –, daß hier im Jahresdurchschnitt der Materialtransport von Südwesten nach Nordosten überwiegt, ein Ergebnis, welches mit zahlreichen früheren Forschungsarbeiten in Einklang steht (6, 7, 8, 9, 12, 13, 15, 16).

Die Einbeziehung der Windstatistik in die Häufigkeitsverteilung der Stromrichtungen entsprechend Abbildung 11 gibt noch einen weiteren interessanten Hinweis. Während jede der drei Stationen eine individuelle Richtungscharakteristik für Normaltiden aufweist, gleichen sich die Verteilungsdiagramme der windbeeinflussten Tiden zunehmend an. Dies ist in Abbildung 12 noch einmal besonders herausgestellt. Die Verteilungsdiagramme der Starkwindtiden aller drei Stationen sind untereinander sehr ähnlich. Daraus können Folgerungen für die Aufstellung sinnvoller Meßprogramme gezogen werden. Bereits im ersten Abschnitt wurde bemerkt, daß bei der Erforschung der hydrodynamischen Vor-

gänge im Wattenmeer der Nordseeküste die traditionelle 14-Tage-Messung nicht ausreicht. Wenn der maßgebende Windeinfluß erfaßt werden soll, sind Langzeitmessungen erforderlich. Dabei genügt es allerdings, wie Abbildung 12 bestätigt, solche Messungen nur an wenigen Punkten durchzuführen, die dann als repräsentativ für einen größeren zusammenhängenden Wattenraum angesehen werden können.

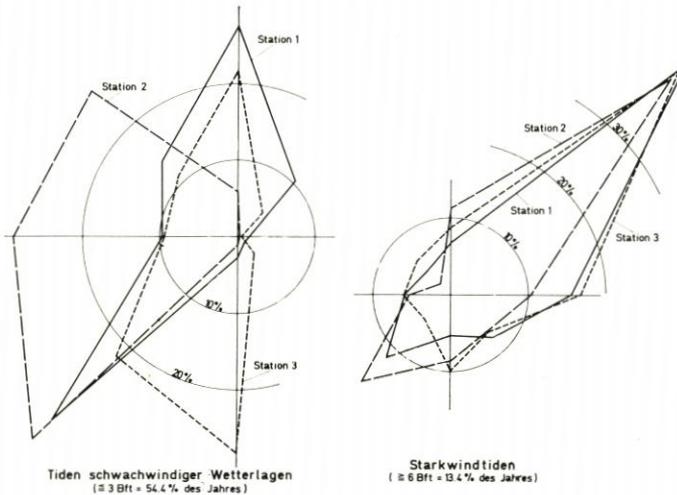


Abb. 12. Vergleich der Richtungscharakteristiken der 3 Langzeitmeßstationen für normale Tidenverhältnisse und Starkwindtiden

5. Zusammenfassung

Die Strömungen im flachen Wattenmeer werden durch die Gezeitenbewegung und durch den Windeinfluß geprägt. Auf hohen, prielfernen Wattflächen sind die Gezeitenstromintensitäten nur gering und damit unter „Schönwetterbedingungen“ auch der Materialtransport. Die unter Windeinwirkung entstehenden Triftströmungen sind wegen der stets gleichzeitig auftretenden Orbitalströmungen des Seegangs, die bis an die Sohle wirksam sind, für den resultierenden Materialtransport von erheblicher Bedeutung.

An drei Stationen im Neuwerker Watt wurden Strömungsmessungen über zwei Jahre ausgeführt und statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, daß bereits ab Windstärke 5 die Strömungsrichtungen merklich beeinflußt werden. Die Strömungen orientieren sich mit zunehmender Windstärke nach der Windrichtung, wobei jedoch lokale Rand- und Zwangsbedingungen von Einfluß sind. Ab Windstärke 6 setzt auch eine merkliche Zunahme der Stromgeschwindigkeiten ein, insbesondere bei auflandigem Wind, das heißt bei Windrichtungen aus Südwest bis Nordwest.

Die aus den Meßdaten abgeleiteten klassierten Stromrichtungsverteilungen wurden mit einer langjährigen Windstatistik verarbeitet. Als Ergebnis wurden Richtungscharakteristiken erhalten, welche im Vergleich mit der Richtungshäufigkeit der unbeeinflussten Gezeitenströmung die Windabhängigkeit der Strömungen im Watt klar herausstellen.

Für das durch die drei Meßstationen repräsentierte Küstenprofil über das Neuwerker Watt läßt sich aus den Beobachtungen ableiten, daß im langjährigen Mittel ein resultierender Materialtransport von Südwesten nach Nordosten über den Wattrücken setzt.

Schriftenverzeichnis

1. ANTFANG, H.: Die Wind- und Nebelverhältnisse im Elbmündungsgebiet. *Hamburger Küstenforschung*, H. 9, 1969.
2. DEHARDE, W.: Der Wattstrommesser „Juist“. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1954, Bd. VI (1955).
3. GÖHREN, H.: Ein neues Dauerstrommeßgerät für den Einsatz im Flachwasserbereich. *Die Wasserwirtschaft*, H. 8, 1964.
4. GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover*, H. 30, 1968.
5. GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. *Hamburger Küstenforschung*, H. 6, 1969.
6. GÖHREN, H.: Untersuchungen mit fluoreszierenden Leitstoffen im südlichen Außenelbegebiet. *Hamburger Küstenforschung*, H. 10, 1969.
7. GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. *Hamburger Küstenforschung*, H. 14, 1970.
8. HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe. *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft*, Bd. 18, 1939/40.
9. LUCHT, F.: Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Bd. 6, 1953.
10. LUCHT, F.: Die Strömungsgeschwindigkeiten bei Sturmfluten. *Die Wasserwirtschaft*, H. 8, 1958.
11. LUCK, G.: Zielsetzung und Verfahren der Watthydrographie. *Wasser und Boden*, Jg. 16, H. 4, 1964.
12. NEWTON, R. S., WERNER, F.: Luftbildanalyse und Sedimentgefüge als Hilfsmittel für das Sandtransportproblem im Wattgebiet vor Cuxhaven. *Hamburger Küstenforschung*, H. 8, 1969.
13. NEWTON, R. S., WERNER, F.: Form und Schichtungsgefüge periodischer Sandkörper im Strömungsfeld des Außenelbewatts. *Geologische Rundschau*, Bd. 60, 1970.
14. ROHDE, H.: Strömungsmessungen im Bereich der deutschen Nordseeküste 1948 bis 1968. Unveröff. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Nov. 1969.
15. SIMON, W. G.: Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Außenelbe und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung, 1949/50. *Mitteilungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg*, Nr. 4, 1952.
16. SIMON, W. G.: Sedimentpetrographische Kartierung des Neuwerker Watts im Sommer 1952. *Die Küste*, Jg. 6, H. 2, 1957.