

# Die Strömungsverhältnisse in drei Langzeit-Meßprofilen im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht

VON WINFRIED SIEFERT, HELMUT FAHSE, JOACHIM GÄRTNER, HANZ DIETER NIEMEYER

## Zusammenfassung

Diese dritte und letzte Veröffentlichung über ein 1974 vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen konzipiertes Strömungsmeßprogramm enthält die Ergebnisse von Langzeitmessungen an 10 Stationen in drei Profilen (Pellworm, Knechtsand, Norderney) im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen werden für ungestörte Tiden und in Abhängigkeit von den Windverhältnissen dargestellt und im großflächigen Zusammenhang diskutiert. Die unterschiedliche Wirkung der meteorologischen Gegebenheiten auf die Strömungen im Watt, in Wattströmen, auf dem Vorstrand und im Seegebiet, zugleich aber auch die Bedeutung der örtlichen Topographie, werden klar.

## Summary

*This third and last publication on a current survey program conceived by the Curatorium for Research in Coastal Engineering in 1974, contains the results of long term measurements at 10 stations along 3 profiles (Pellworm, Knechtsand and Norderney) in the near shore region of the German Bight. The flow velocities and directions are presented for undisturbed tides and for tides influenced by wind. Large scale patterns are discussed in this context. It is clearly demonstrated, that the meteorological conditions affect currents in tidal flats, in the near shore zone and in the open ocean in different ways. The influence of the local topography is also apparent.*

## Inhalt

1. Vorbemerkungen . . . . .	1
2. Bisherige Messungen . . . . .	2
3. Messung und Datenaufbereitung . . . . .	5
4. Ergebnisse . . . . .	7
4.1 Profil Pellworm . . . . .	7
4.2 Profil Knechtsand . . . . .	18
4.3 Profil Norderney . . . . .	29
4.4 Rest- und Triftströmungen in den Profilbereichen . . . . .	37
5. Schlußbemerkung . . . . .	43
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	44

## 1. Vorbemerkungen

Über die Einflüsse von Starkwind- und Sturmweatherlagen auf die Strömungsverhältnisse können bislang aus den Dauerstrom-Meßserien allgemeine, qualitative und tendenzielle Rückschlüsse gezogen werden. Diese Beobachtungen zeigen, daß den aperiodischen Triftströmungen im flachen Küstengewässer große Bedeutung im Hinblick auf Materialtransport und morphologische Formung zukommt. Daher waren in einem KFKI-Projekt Langzeitmessungen an insgesamt 10 Stationen vorgesehen (Abb. 1 a und 1 b). Die Anordnung der drei Profile

entspricht der Gliederung der deutschen Nordseeküste in einen westlichen Abschnitt mit westöstlicher Erstreckung (ostfriesische Küste), einen nördlichen Abschnitt mit nordsüdlicher Erstreckung (nordfriesische Küste) und den buchtartigen Zwischenbereich, das Mündungsgebiet der großen deutschen Tideflüsse. Die ausgewählten Stationen sind so angeordnet, daß in jedem Profil das eigentliche Wattgebiet, der seeseitige Wattthang sowie das anschließende Küstenrandmeer erfaßt werden.

Um ein einigermaßen vollständiges Spektrum der Triftströmungen bei allen Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten zu erfassen, sollten die Messungen über mindestens zwei Jahre (mit Unterbrechungen nur bei Eisgang) durchgeführt werden. Das Datenmaterial sollte im Anschluß an die Messungen nach statistischen Methoden bearbeitet werden.

Die Dauerstrommessungen liefern nur Aufschlüsse über die Strömungsvorgänge in der bodennahen Schicht. Die Beschränkung auf diese Meßebeane war notwendig, um den Aufwand insgesamt in erträglichem Rahmen zu halten.

Im vorliegenden Bericht werden die Strömungsmessergebnisse vorgestellt, die in den Jahren 1978 bis 1980 gewonnen wurden. Sie waren Teil eines umfangreichen Programms, über dessen Resultate bereits zweimal berichtet wurde, nämlich die mittleren Strömungsverhältnisse (SIEFERT et al., 1980) und die Triftströmungen (SIEFERT et al., 1983). Die erste dieser Veröffentlichungen enthält eine ausführliche Darstellung über Zweck, Ziel und Umfang des Gesamtprogramms, das Meßprogramm und die Mitglieder der Projektgruppe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), die diese Arbeiten koordiniert haben. Um Wiederholungen zu vermeiden, darf auf die Veröffentlichung verwiesen werden.

An der Durchführung und Auswertung der Langzeitmessungen waren die Autoren mit ihren Dienststellen (sowie zusätzlich das Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven mit einer Station in der Außenelbe) beteiligt. Die Ergebnisse werden in einer Form präsentiert, die angelehnt ist an diejenige von GÖHREN (1974 a) für das Neuwerker Profil (Abb. 1 b).

Für die Ermittlung der winderzeugten Strömungskomponenten sollten Messungen bei möglichst vielen Windrichtungen, -geschwindigkeiten und -dauern durchgeführt werden. Leider wurde während des Meßzeitraumes aber nur unvollständiges Beobachtungsmaterial für höhere Windgeschwindigkeiten gewonnen; Werte bei Windstärken 7 Bft sind im wesentlichen nur für westliche Winde gemessen worden, Werte für Windstärke 8 Bft sind nur vereinzelt vorhanden. Es konnten daher die von GÖHREN (1974 a) im flachen Wattenmeer angegebenen Abhängigkeiten der Strömungsverteilung (Geschwindigkeit, Richtung) von Windlagen nur in Ansätzen gefunden werden.

## 2. Bisherige Messungen

Langzeitmessungen – zumal in Profilen, also gleichzeitig an mehreren Stationen – lagen bisher nur aus dem Neuwerk/Scharhörner Watt vor (s. o.). Im Zusammenhang mit Untersuchungen des Suspensionsgehaltes mit automatischen Stationen gibt es eine Reihe weiterer Langzeitmessungen, ebenfalls aus diesem Gebiet. Sie wurden jedoch nicht in der hier erstrebten Weise aufbereitet. Lediglich eine Position vor der Küste von Cuxhaven aus dem Jahre 1973 konnte in das Profil Knechtsand ergänzend einbezogen werden (Abb. 1 b).

Meßprogramme mit vergleichbaren Zahlen erfaßter Tiden sind vordem von der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz auf Norderney in zwei Fällen mit kurzen Profilen vorgenommen worden. Zum einen fanden in den Jahren 1957 bis 1973 in den Seegaten zwischen Norderney und Spiekeroog Wiederholungsmessungen zur Untersuchung kurzfristiger hydrologisch-morphologischer Wechselwirkungen in der Wichter Ee mit 260 gemessenen

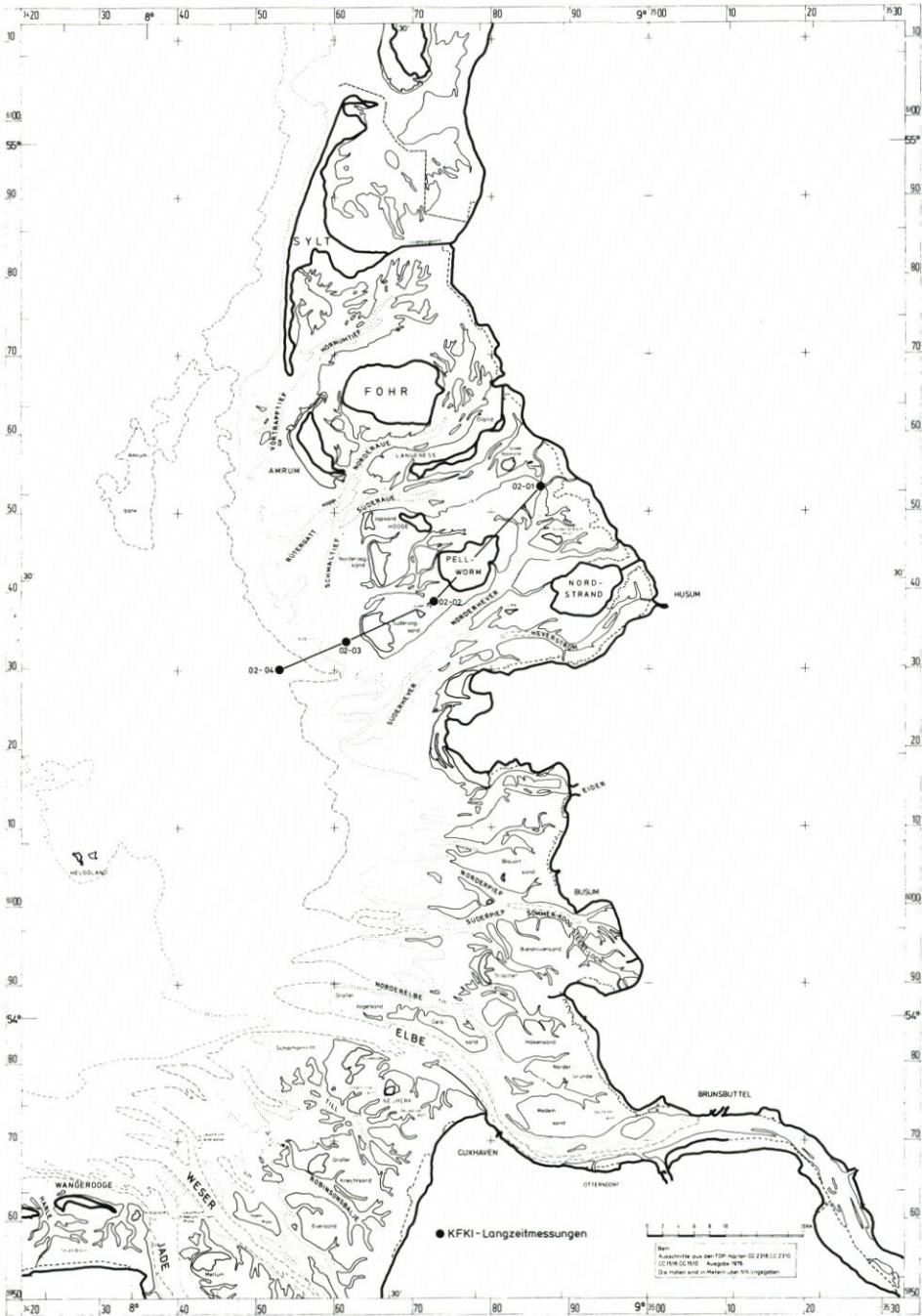


Abb. 1a. Schleswig-holsteinische Westküste mit Profil Pellworm



Tiden, in der Accumer Ee mit 340 und in der Otzumer Balje mit 420 gemessenen Tiden statt. Eine Differenzierung hinsichtlich meteorologischer Randbedingungen ist hierbei nicht erfolgt, da in den Meßzeiträumen keine Sturmweatherlagen auftraten (KOCH und NIEMEYER, 1977).

Zum anderen wurden 1977/78 auf den Wattwasserscheiden von Norderney (3 Stationen; 52 bis 124 Tiden) und Baltrum (4 Stationen; 143 bis 178 Tiden) sowie im Seegat Wichter Ee (2 Stationen; 66 bis 123 Tiden) Dauerstrommessungen mit Berücksichtigung meteorologischer Einwirkungen vorgenommen (KOCH und NIEMEYER, 1980).

### 3. Messung und Datenaufbereitung

Da für die Langzeitmessungen die gleichen Meßgeräte verwendet wurden wie in dem KFKI-Meßprogramm zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins und auch die Meßwertaufbereitung und die ADV-Verarbeitung für die Langzeitmessungen in ihrem 1. Teil die gleiche ist, wird hierzu auf die entsprechende Veröffentlichung (SIEFERT et al., 1980) verwiesen. An dieser Stelle wird lediglich über die zusätzliche ADV-Verarbeitung berichtet.

2903		DAUERSTROMMESSUNG										F5 NORDERNEY				Anzahl der Bereiche : *103													
Profil Nr.:		02-08-03-79										Kartei Nr. 151				Messung vom 14. 8.79 bis 10. 9.79													
Lage :		GK 25 84971										59 69545				Messgerät Nr. 1277													
Pegel :		NORDERNEY RIFFGAT										Wind : NORDERNEY				Gerätehöhe 1.15 m über Sohle = PN -8.00 m													
Datum	THW/THW	HF	HE	DF	DE	Bereich von	bis	Vektor Lg.	Rg.	VM	RM	Vmax	Reax	VMF11 in cm/s				RMC11 in Grd.											
Tide Nr. der Messg.	h min cm	cm	cm	min min	min	h min	h min	ke	Grd	cm/s	Grd	cm/s	Grd	1.Std. v	2.Std. R	3.Std. v	4.Std. R	5.Std. v	6.Std. R	7.Std. v	8.Std. R								
14. 8.79	1 3 50	609				0 00	- 0 00	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
	9 48	366	263	358																									
	2 16	02 638	292	374		10 37	- 16 57	5.35	98	24	100	42	96	7	70	19	93	28	93	36	95	35	94	24	116	0	0		
	17 00	200	438	58		17 07	- 23 07	4.28	259	20	258	30	259	9	288	21	265	27	261	28	260	25	255	12	227	0	0		
15. 8.79	3 4 00	200	0	660		23 17	- 5 27	3.71	87	17	86	30	90	3	45	11	76	20	85	27	90	26	87	17	97	0	0		
	10 00	200	0	360		5 37	- 11 27	3.38	253	16	255	25	250	6	283	16	259	22	255	23	255	19	248	9	227	0	0		
	4 17	00 200	0	420		11 37	- 17 27	4.63	87	22	91	37	84	9	67	23	90	31	86	34	83	23	88	11	132	0	0		
	23 00	200	0	360		17 37	- 0 07	4.20	255	18	267	30	253	2	345	15	261	25	255	27	255	24	255	19	252	0	0		
16. 8.79	5 5 00	200	0	360		0 27	- 6 07	3.08	89	15	84	27	93	3	57	10	74	17	84	24	92	23	93	0	0	0	0		
	17 00	200	0	720		6 17	- 12 47	4.64	255	20	256	32	256	7	275	18	246	27	251	29	260	26	262	19	255	0	0		
	6 17	52 602	402	52		12 57	- 18 27	3.83	92	19	92	30	90	7	74	19	92	27	90	27	90	22	92	0	0	0	0		
17. 8.79	0 11	377	225	379		18 37	- 1 07	4.82	262	20	265	32	262	8	293	18	268	26	258	29	263	28	260	20	259	0	0		
	7 6 12	593	216	361		1 17	- 7 07	3.71	92	18	95	30	90	5	78	16	92	24	91	27	88	22	92	10	128	0	0		
	12 50	391	202	398		7 17	- 13 27	4.34	259	19	263	30	262	5	291	17	264	25	260	28	262	24	259	18	251	0	0		
18. 8.79	8 19	10 591	200	380		13 37	- 19 37	3.05	100	15	103	25	101	7	63	14	86	19	94	22	99	19	105	11	149	0	0		
	1 10	400	191	360		19 47	- 2 17	3.72	265	16	272	25	262	6	334	14	285	19	265	23	260	24	263	17	255	0	0		
	9 7 40	608	208	390		2 37	- 8 37	3.68	91	17	87	25	98	6	52	15	86	21	90	24	91	23	94	15	103	0	0		
	14 20	390	218	400		8 47	- 15 07	4.18	263	18	264	27	259	10	299	17	269	25	262	25	262	22	258	16	254	0	0		
10 20	21 598		208	361		15 17	- 21 07	3.58	91	17	94	27	93	7	78	17	86	22	86	24	89	21	97	10	128	0	0		
19. 8.79	2 30	378	220	369		21 17	- 3 57	4.25	263	17	265	30	262	5	302	17	266	24	266	27	263	24	263	16	257	0	0		
	8 53	605	227	383		4 07	- 9 27	4.08	92	21	93	30	82	8	87	22	91	29	94	29	88	22	95	0	0	0	0		
	15 28	370	235	395		9 37	- 16 27	4.52	261	18	264	27	259	6	296	17	264	24	263	25	260	25	262	19	260	10	243		
	12 21	36 609	239	368		16 37	- 22 27	4.15	90	20	92	30	90	8	80	19	88	24	84	29	90	25	92	13	119	0	0		
20. 8.79	3 54	390	219	378		22 37	- 4 47	3.96	262	17	264	27	262	6	286	18	263	24	263	26	262	22	263	14	252	0	0		
	13 9 51	627	237	357		4 57	- 10 37	4.23	92	20	92	32	90	7	73	20	93	28	89	31	90	25	90	0	0	0	0		

Abb. 2. Datei SRD.SM

Ziel der hier vorgelegten Arbeit ist vor allem eine Zuordnung der gemessenen Strömungen zu den während der Meßzeit herrschenden Windrichtungen und Wasserständen. Dazu wurde zunächst die Datei SRD.SM (Abb. 2) erstellt. Die allgemeinen Angaben über die

Abb. 1b. Südküste der Deutschen Bucht mit den Profilen Neuwerk (GÖHREN, 1974 a), Knechtsand und Norderney

Meßstelle, wie sie im Kopf ausgedruckt sind, wurden der Datei SRD.HD entnommen und die während der Meßzeit eingetretenen Hoch- und Niedrigwasser nach Zeit (Spalte 2) und Höhe (Spalte 3) aus der Datei SRD.Tide. Aus diesen Werten wurden die Steighöhen (HF), Fallhöhen (HE), Flutdauer (DF) und Ebbedauer (DE) ermittelt (Spalten 4 bis 7).

In den Spalten 8 und 9 sind Beginn und Ende der Berechnungsbereiche, wie sie in der Datei SRD.HD abgelegt waren, angegeben, und zwar für die Flut von  $K_e$  bis  $K_f$  und für die Ebbe von  $K_f$  bis  $K_e$ . Weil bei zeitweilig trockenfallenden Meßgeräten kein Zeitpunkt für die Ebbekenterung ermittelt werden konnte, wurden in diesen Fällen der Flutbereich vom Einsetzen des Flutstromes bis  $K_f$  und der Ebbereich von  $K_f$  bis zum Ende des Ebbestromes angegeben. Bei Drehströmungen wurde als Zeitpunkt der Kenterung das Minimum der Geschwindigkeitsganglinie verwendet.

Länge und Richtung der durch vektorielle Addition der Einzelwerte ermittelten Strömungsvektoren für die einzelnen Bereiche sind in Spalte 10 und 11 angegeben. Die in den letzten beiden Zeilen unter „arithmetische Mittel der Messung für die Ebbe bzw. Flut“ stehenden Werte sind für die Spalten 10 und 11 ebenfalls durch vektorielle Addition sämtlicher Flut- und Ebbemeßwerte ermittelt worden.

Die in den Spalten 12 und 13 angeführten Mittelwerte sind die arithmetischen Mittel aller im Bereich vorkommenden Einzelwerte. Da die Einzelwerte nicht gewichtet wurden, gehen alle, auch die mit der Geschwindigkeit Null, in die Mittelwertbildung sowohl für die Geschwindigkeit als auch für die Richtung ein. Das gleiche gilt auch für die stündlichen Mittelwerte in den Spalten 16 bis 29. Die im jeweiligen Bereich gemessene Maximalgeschwindigkeit ist mit der dazugehörenden Richtung in den Spalten 14 und 15 verzeichnet.

Um die Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen von den während der Meßzeit herrschenden Windrichtungen und -stärken zu ermitteln, wurden die in

2903		DAUERSTROMMESSUNG		FS NORDERNEY		Anzahl der Bereiche : W103															
Profil Nr. : 02-08-03-79		Kartei Nr. 151		Messung vom 14. 8.79 bis 10. 9.79		Messgerät Nr. 1277															
Lage : GK 25 84971		59 60565		Messgeräthöhe 1.15 m Über Sohle = PH -8.00 m																	
Pegel : NORDERNEY RIFFGAT		Wind : NORDERNEY																			
Statistik für den Flutteil		(Messwerte aus dem Tidestieg)																			
Wind		Stromgeschwindigkeit in cm/s										Stromrichtung					Anzahl der Werte				
Rechtg.	Stärke	00-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-200	N	NO	O	SO		S	SW	W	NW
N	<3	20.4	25.2	51.9	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	2.9	87.9	4.9	2.4	0.0	0.5	0.0	206
N	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
N	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
N	6	29.7	27.0	27.0	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.2	70.3	8.1	0.0	5.4	0.0	0.0	37
N	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
N	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
NO	<3	25.7	20.0	54.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	88.6	2.9	2.9	0.0	0.0	35
NO	4	25.0	38.9	36.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	91.7	5.6	2.8	0.0	0.0	35
NO	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
NO	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
NO	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
NO	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
O	<3	27.9	29.4	42.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	82.4	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	68
O	4	31.4	37.1	31.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	91.4	5.7	2.9	0.0	0.0	35
O	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
O	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
O	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
O	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SO	<3	31.9	47.8	20.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	91.3	2.9	1.4	0.0	0.0	69
SO	4	28.6	34.3	37.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	85.7	7.1	1.4	0.0	0.0	70
SO	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SO	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SO	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SO	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
S	<3	31.5	40.8	27.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.5	83.2	7.1	2.2	0.5	0.0	0.0	184
S	4	35.1	39.2	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	89.2	1.4	1.4	1.4	0.0	0.0	74
S	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
S	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
S	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
S	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SW	<3	28.4	35.3	33.5	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.0	85.6	7.0	0.5	0.5	0.0	0.0	215
SW	4	25.0	27.7	35.6	8.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.5	85.9	3.8	2.2	1.1	0.0	0.0	184
SW	5	24.7	27.4	35.6	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73
SW	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SW	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
SW	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
W	<3	29.5	44.8	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	92.4	3.8	1.0	0.0	0.0	0.0	105
W	4	19.4	20.8	36.1	23.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	84.7	6.9	1.4	1.4	0.0	0.0	72
W	5	27.4	24.7	35.6	13.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73
W	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
W	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
W	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
NW	<3	30.1	43.7	21.4	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	86.4	3.9	1.9	1.0	1.0	103
NW	4	30.1	32.9	32.9	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.7	89.0	4.1	2.7	0.0	0.0	0.0	73
NW	5	38.9	33.3	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	77.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	36
NW	6	30.0	17.1	44.3	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.1	81.4	1.4	0.0	0.0	0.0	70
NW	7	21.6	18.9	35.1	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	16.2	73.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	37
NW	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

Abb. 3. Datei SRD.SF

Abständen von 10 Minuten während einer Tide gemessenen Einzelwerte jeweils der Windstärke zugeordnet, die zur Hochwasserzeit an der dem Meßort nächstgelegenen Windmeßstation registriert wurde. Die Ebbe- und Flutwerte wurden getrennt behandelt und in den Dateien SF für die Flut und SE für die Ebbe abgelegt. Abb. 3 zeigt ein Muster mit den Ergebnissen einer solchen Auswertung. Alle Windstärken bis zu 3 Bft sind zu einer Gruppe zusammengefaßt, weil hier keine wesentlichen Unterschiede zwischen den bei den einzelnen Windstärken auftretenden Strömungswerten zu erwarten sind. Es wurden alle Meßwerte verwendet, die in dem im Kopf der Abb. 3 angegebenen Meßzeitraum registriert wurden.

#### 4. Ergebnisse

##### 4.1 Profil Pellworm

In Ergänzung zu den kurzzeitigen, 14-tägigen Strömungsmessungen ist für die Langzeitströmungsmessungen im südlichen nordfriesischen Wattenmeer ein etwa küstennormales Meßprofil, im Osten beginnend bei der Hamburger Hallig über Pellworm, Süderoog, Süderoogsand bis zur Tiefenlinie NN - 15 m als seewärtige Begrenzung, ausgewählt worden. Es wurden an vier Stellen des Profils in den Jahren 1978/79 Strömungsmessungen zeitgleich über einen längeren Zeitraum durchgeführt und dabei insgesamt 1039 Tiden erfaßt. Als Meßgeräte sind Watt-Dauerstrommesser der Hydrowerkstätten Kiel in Meßhöhen über Grund von 1,0 m im tiefen Wasser bzw. 0,30 m im Watt eingesetzt worden (Abb. 1 a und Tab. 1).

Das Längsprofil kann als repräsentativ für einen größeren zusammenhängenden Wattenraum, bestehend aus Watrinnen, hochliegenden Watten und dem seeseitigen Hang des Wattsockels, angesehen werden. Die Meßposition 02-01 (Der Strand) lag an einer bis zu 12 m tiefen, Nord-Süd gerichteten Wattenrinne, die die großen Wattenströme Norderhever und Süderau miteinander verbindet, in einer Tiefe von etwa NN - 5 m. In den beiden Meßjahren 1978/79 konnten wegen zahlreicher Geräteausfälle nur insgesamt 119 Tiden erfaßt werden. Für die Auswertung standen daher nur wenige Ereignisse mit Starkwindlagen zur Verfügung.

Das Süderoogwatt (Meßposition 02-02) zwischen der Hallig Süderoog und der Insel Pellworm wird durch die Wattströme Norderhever und Rummelloch West begrenzt. Die

Tabelle 1  
Positionen der Langzeit-Strömungsmessungen

Station	Meßzeitraum	Lage		
		Bez.	Gauß-Krüger-Koord.	
02-01	1978/79	Der Strand	<sup>34</sup> 86 730	<sup>60</sup> 52 770
02-02	1978/79	Süderoogwatt	73 380	38 120
02-03	1978/79	Alt-Schmaltief	60 630	33 820
02-04	1978/79	Schmaltief	53 510	32 180
02-05	1978/79	Spiekaer Barre	<sup>34</sup> 65 500	<sup>59</sup> 64 000
02-06	1978/79	Westertill	49 780	74 680
02-07	1978/79	Außenelbe	42 000	88 500
02-08	1979/80	Seegebiet	<sup>25</sup> 85 000	<sup>59</sup> 60 600
02-09	1979/80	Vorstrand	83 800	57 000
02-10	1979/80	Watt	86 500	52 600
(02-08)	1973	Arensch	<sup>34</sup> 70 100	<sup>59</sup> 67 300

Meßposition befand sich im Bereich der Wattwasserscheide bei einer Watthöhe um NN. Es wurden insgesamt 323 Tiden erfaßt. Bei Winden aus westlichen Richtungen sind Tiden mit Windstärken bis zu 7 Bft und bei Windrichtungen NW auch Tiden mit Windstärken bis 8 Bft gemessen worden.

Die Meßposition 02-03 (Altes Schmalteuf) westlich des Süderoogsandes liegt im Bereich des Vorstrandes. Das nicht durch Stromrinnen durchschnittenen Flachwassergebiet wird im Süden durch die Alte Hever und im Norden durch das Schmalteuf begrenzt. Als seeseitige Begrenzung kann die NN -6 m-Tiefenlinie angesehen werden. Nach GÖHREN (1974 b) gehört dieses Flachwassergebiet zu den Bereichen, die für den seeseitigen Sandtransport von Bedeutung sind. Die Strömungsmessposition lag etwa auf NN -5 m. Während des Meßzeitraumes wurden insgesamt 290 Tiden gemessen. Für westliche Winde und Winde aus Ost sind Tiden bis zu Stärke 7 Bft erfaßt worden.

Der Meßort südlich des Schmalteufs (Meßposition 02-04) gehört bereits zum Seegebiet; das Gerät lag nahe der NN -15 m-Tiefenlinie (seeseitige Begrenzung des KFKI-Strömungsmessprogrammes) in einer Tiefe von NN -12,5 m. Es wurden während des Meßzeitraumes 1978/79 insgesamt 307 Tiden gemessen einschließlich solcher bei westlichen Winden (SW, W, NW) und bei Ostwind bis 7 Bft.

### Meßposition 02-01

Die höchsten mittleren Stromgeschwindigkeiten bei Normaltiden wurden bei Flut mit 90 cm/s und bei Ebbe mit 70 cm/s gemessen (Abb. 4). Die Häufigkeitsverteilung ergibt wie erwartet eine Dominanz des Flutstromes bei höheren Geschwindigkeiten. So setzt der

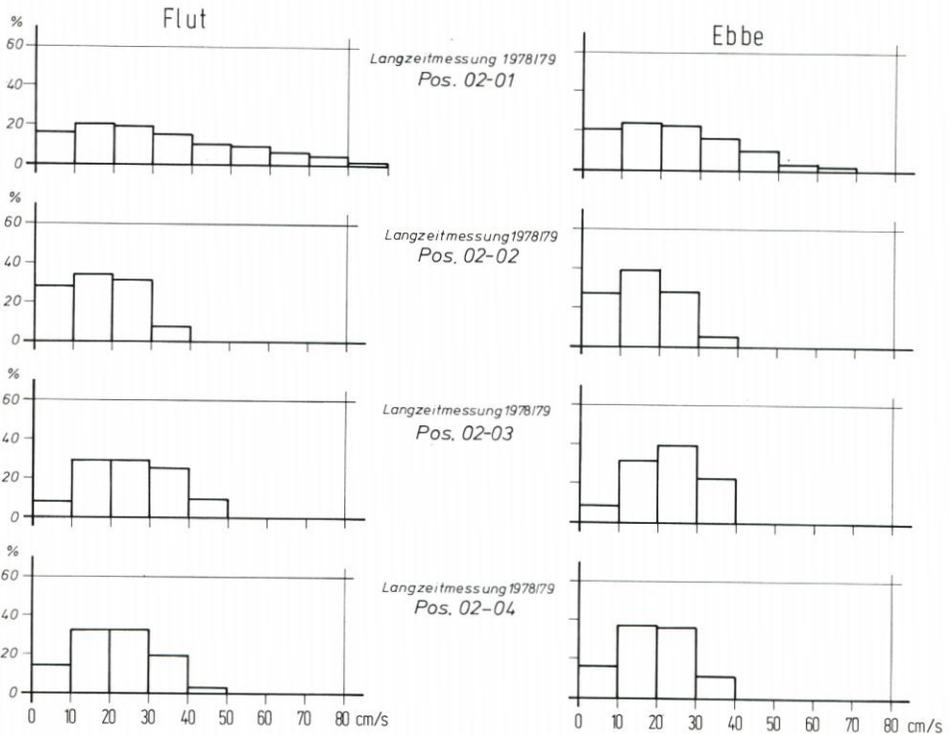
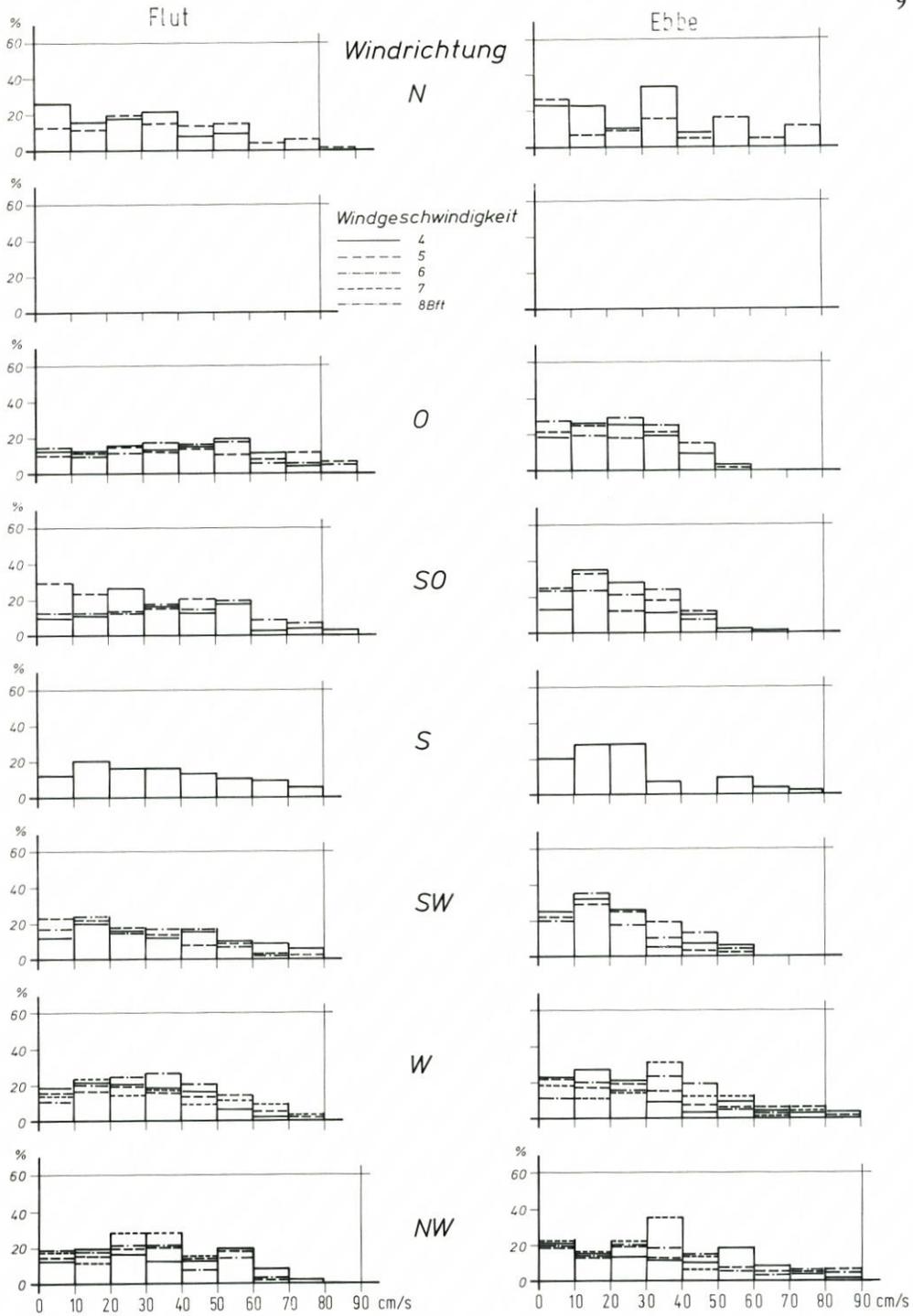
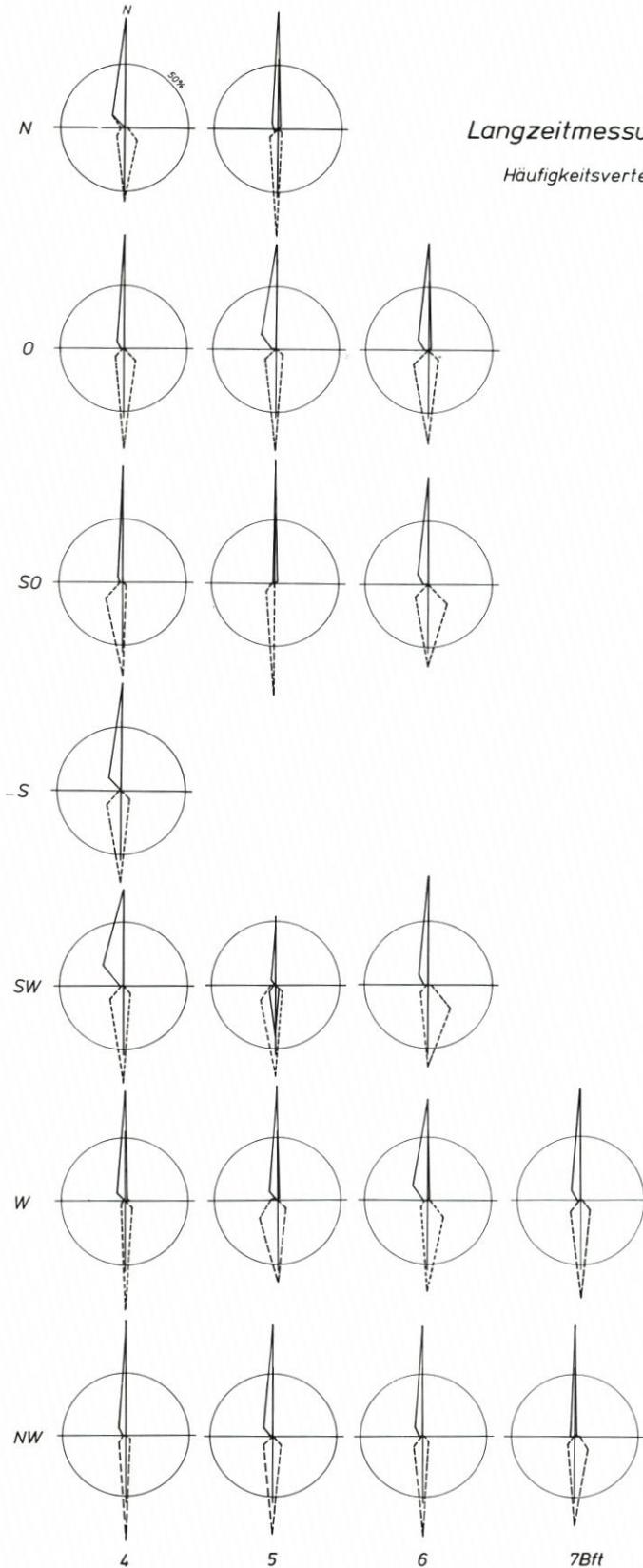


Abb. 4. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Profil Pellworm bei Normaltide



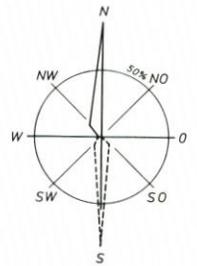
St 973/11  
02. 84

Abb. 5. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-01 (Priel) bei unterschiedlichen Windverhältnissen



Langzeitmessungen 1978/79, Station 02-01

Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen



Normaltide = 3 Bft

--- Ebbe

— Flut

Reststrom mit 3,2 km/Tide nach N. Die Häufigkeitsverteilung der Stromgeschwindigkeiten, geordnet nach Windrichtung und Windstärke, zeigt auf Abb. 5 nur unwesentliche Änderungen gegenüber der reinen Gezeitenströmung. Bei Wind aus O und SO ist bei Flut und Ebbe eine geringe Verschiebung zu höheren Geschwindigkeiten auszumachen. Wind aus W bis N reduziert die hohen Flutstromgeschwindigkeiten, läßt jedoch den Ebbestrom stärker werden, ein Hinweis auf den Triftstrom besonders bei diesen Windrichtungen.

Die Häufigkeitsverteilung der Stromrichtungen bei Normaltiden auf Abb. 6 zeigt einen für eine tiefe Tiderinne charakteristischen alternierenden Tidestrom: hier bei Flut nach N, bei Ebbe nach S. Diese Stromrichtungscharakteristik wird auch nicht durch Starkwindlagen bis 7 Bft verändert. Es bestätigt sich hier erneut, daß der Wind auf den Tidestrom in tiefen Watrinnen wenig Einfluß hat. Er folgt vielmehr auch bei zunehmenden Windstärken dem vorgegebenen Rinnenverlauf und damit den normalen Flut- und Ebbestromrichtungen.

So wird bestätigt, daß bei windunbeeinflussten Tiden und besonders bei ablandigem Wind Wasser von der Norderhever in die Süderau strömt.

Bemerkenswert ist, daß W-Wind einen größeren Einfluß auf den Triftstrom hat als NW-Wind, obwohl dieser in Richtung des Wattstromes weht. Das ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß bei W-Winden verstärkt Wasser in die Süderau gedrückt wird. Das Wasser strömt dann über den Strand in die Norderhever.

#### Meßposition 02-02

Die mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten bei Normaltiden erreichten Werte bis 40 cm/s, lagen überwiegend aber unter 30 cm/s und damit wesentlich niedriger als an der Station 02-01. Der unterschiedliche Einfluß des Windes auf die Stromgeschwindigkeiten ist auf Abb. 7 recht deutlich zu sehen: Wind aus NO bis S führt allenfalls zu einer geringen Verminderung von Flut- und Ebbestromung. SW- und W-Winde dagegen bewirken zunehmend erhöhte Flutströmungen, während die Ebbestromgeschwindigkeiten zwar abnehmen, allerdings auch einige hohe Anteile enthalten.

Dieser Effekt wird wahrscheinlich durch Windstaugefälle bewirkt, das bei diesen Windlagen zusätzliche Tidewassermengen über das Süderoogwatt in das Rummelloch West übertreten läßt.

Die Charakteristik der Stromrichtungen auf Abb. 8 weist bei Normaltiden nach der Häufigkeitsverteilung für den Flutstrom Hauptstromrichtungen N und NO aus und für den Ebbestrom eine Hauptstromrichtung SW sowie Nebenstromrichtungen NO, W und S. Dies bewirkt insgesamt schwachen Reststrom nach NO. Der Einfluß des Windes auf die Häufigkeitsverteilung der Stromrichtungen ist schon bei NO-Winden ab Windstärke 4 mit Hauptstromrichtungen bei Flut nach NO und bei Ebbe nach SW zu erkennen. Bei Winden aus O bis S ab 5 Bft wechseln Flut- und Ebbestromung die Richtung, was dann zu Triftstrom nach SW führt, während bei SW- bis W-Winden die Flut ausgeprägt nach NO strömt und der Ebbestromvektor um S liegt, also rd. 45° gegen die Normaltide verschoben.

Abb. 6. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-01 (Priel) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

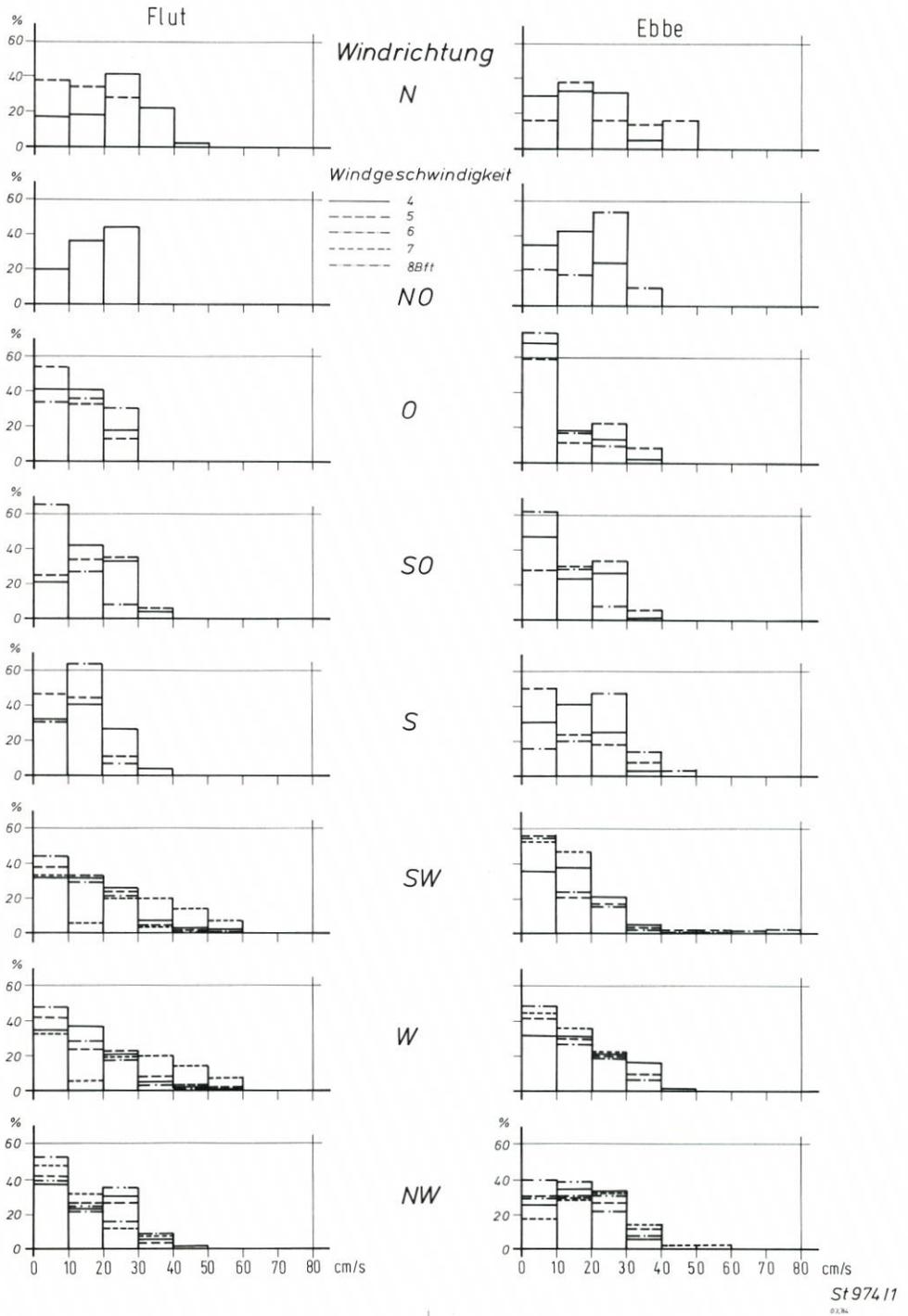
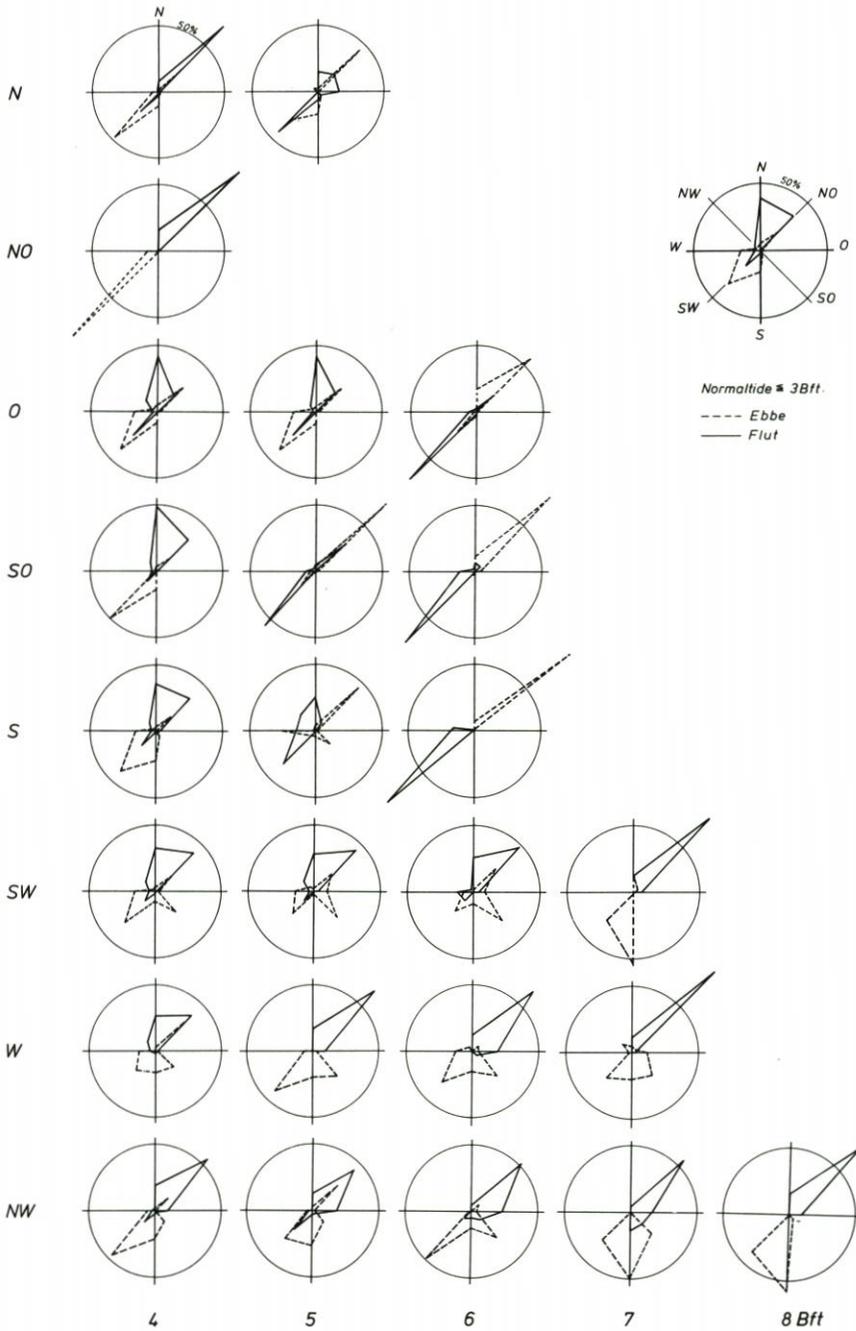


Abb. 7. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-02 (Watt) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 97411  
0.234



S1974

Abb. 8. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-02 (Watt) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

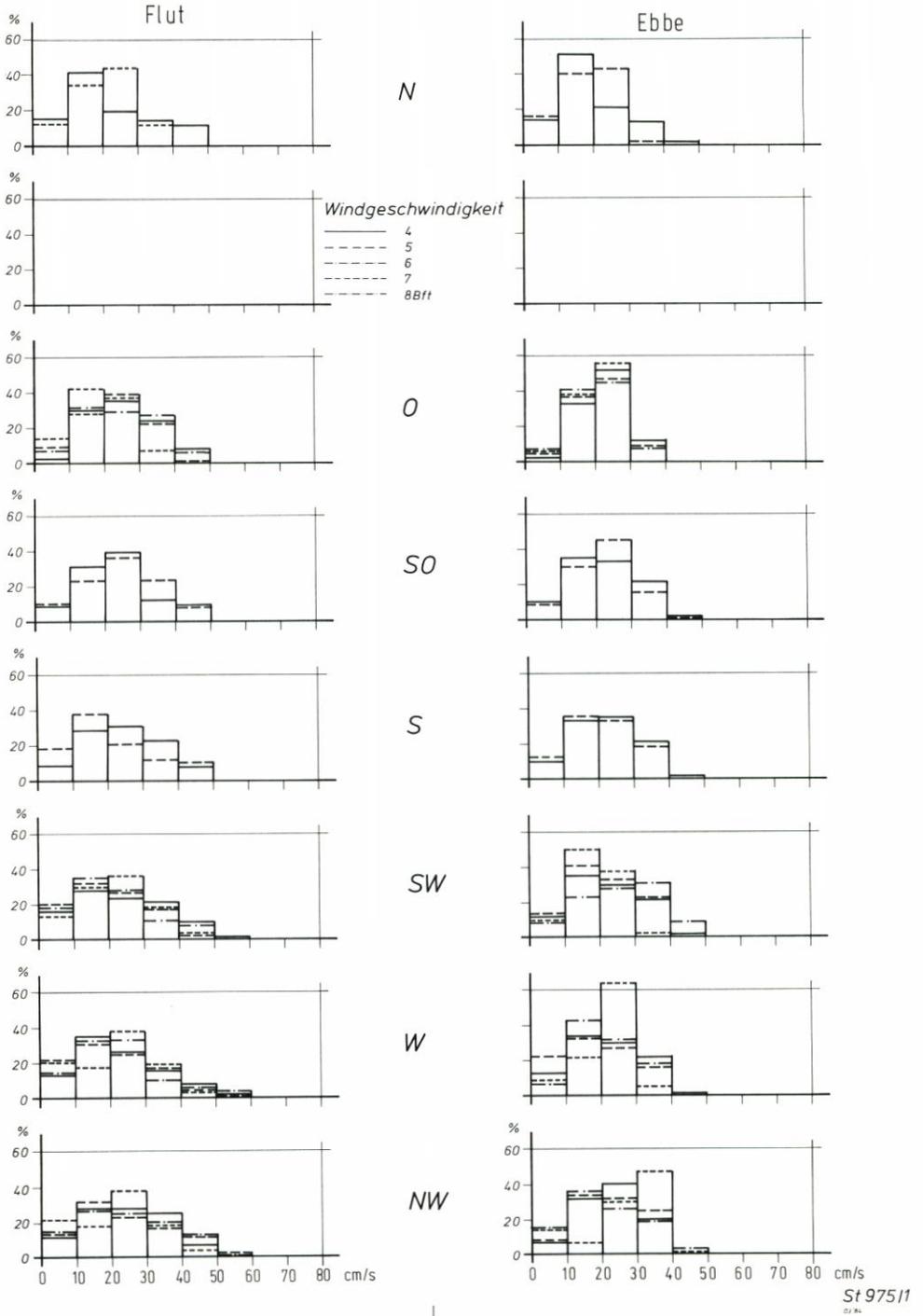


Abb. 9. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-03 (Vorstrand) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 975/1  
01/84

Meßposition 02-03

Bei Normaltiden sind mittlere Tidestromgeschwindigkeiten bei Flut bis 50 cm/s und bei Ebbe bis 40 cm/s ermittelt worden (Abb. 4). Insgesamt treten etwas höhere Flutstromgeschwindigkeiten auf. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen in der von GÖHREN (1974 b) festgestellten Größenordnung, der Reststrom dagegen ist kleiner. Geringer Einfluß des

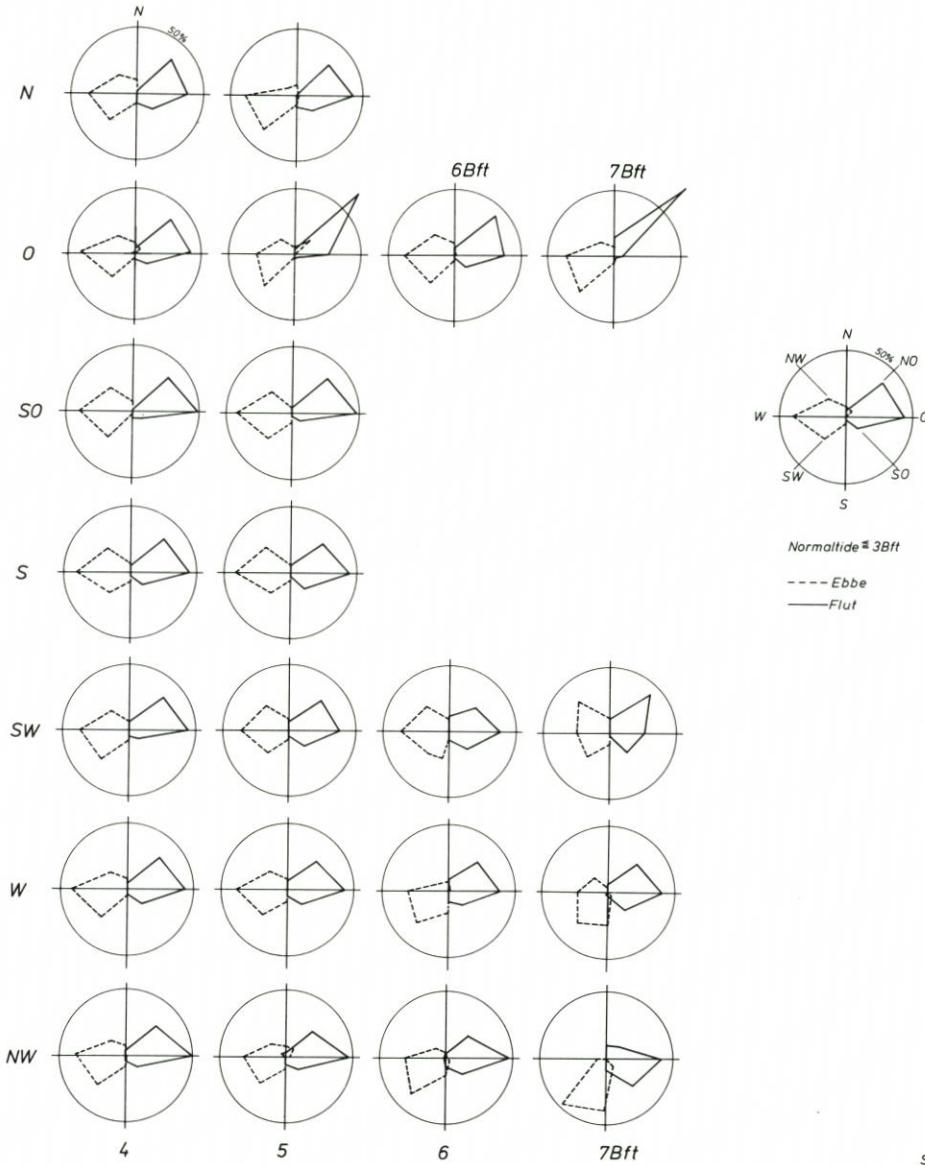


Abb. 10. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-03 (Vorstrand) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 975

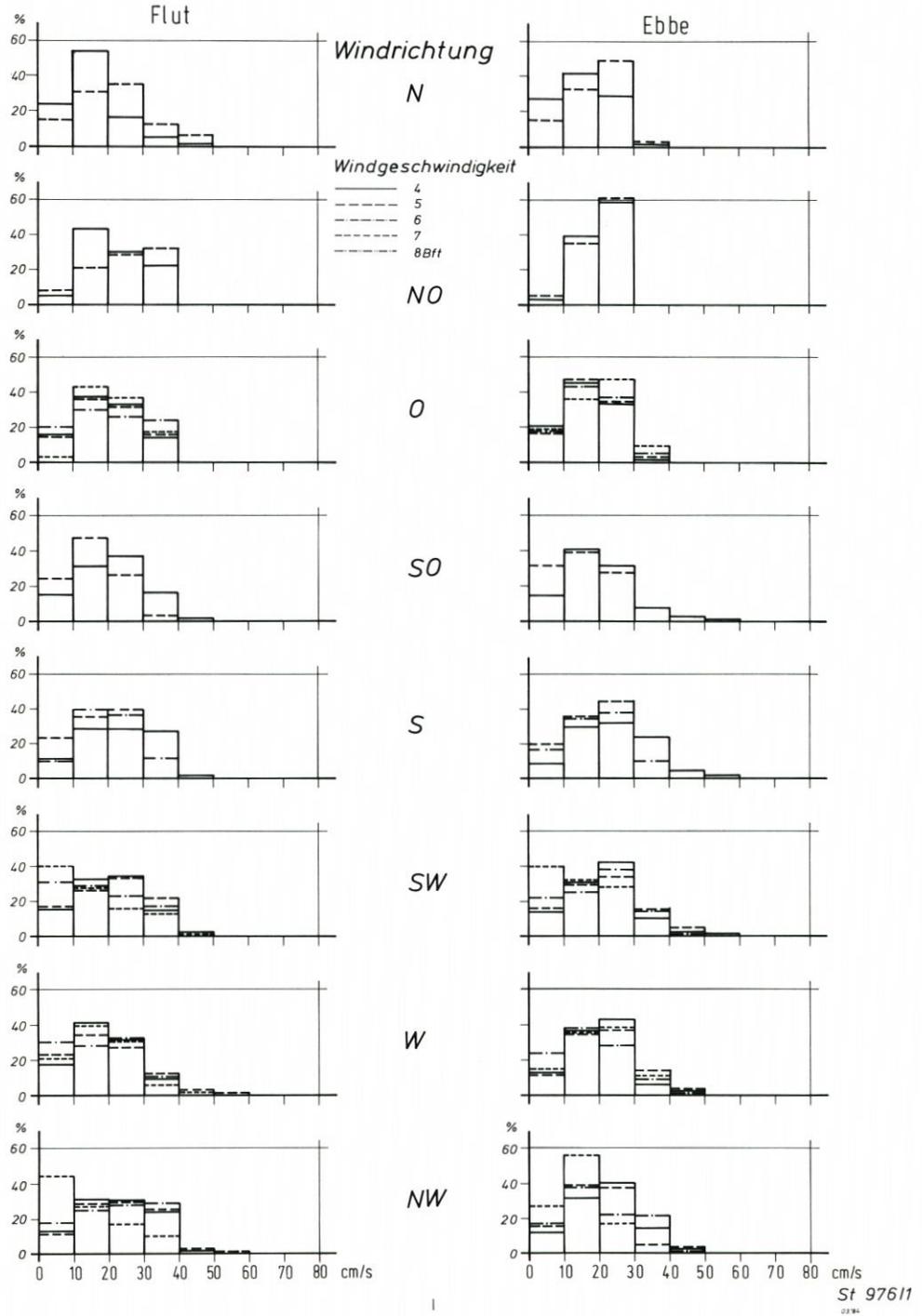


Abb. 11. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-04 (Seegebiet) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

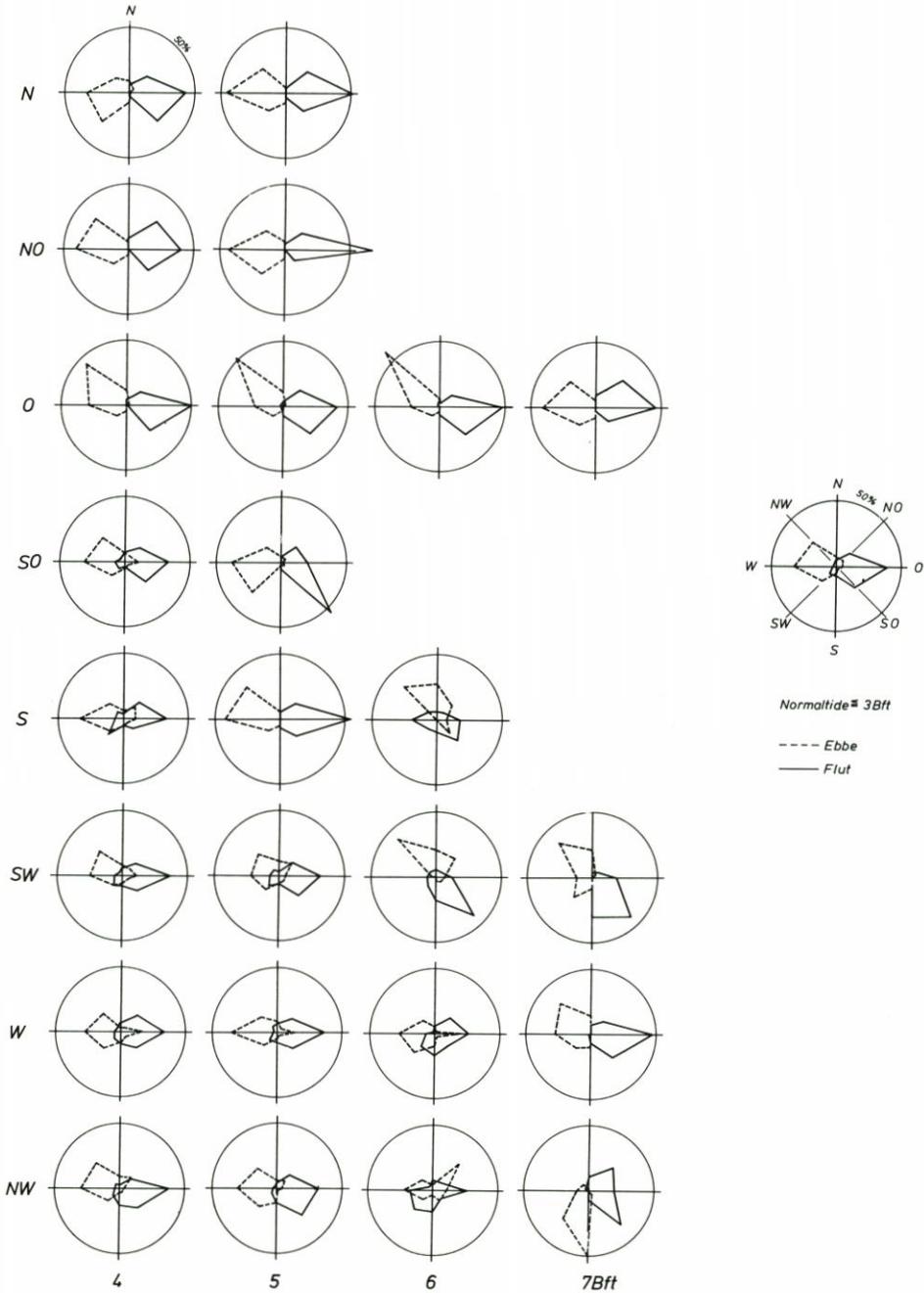


Abb. 12. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-04 (Seegebiet) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 976

Windes auf die Verteilung und die Größe der Strömungsgeschwindigkeiten ist wegen der bereits größeren Wassertiefen erst ab 6 Bft erkennbar (Abb. 9).

Die Hauptstromrichtungen sind bei Normaltiden für den Flutstrom O und NO, für den Ebbestrom W mit Nebenstromrichtungen NW und SW (Abb. 10). Der Einfluß des Windes auf die Verteilung der Stromrichtungen beginnt bei aufländigem Wind bei Windstärken ab 6 Bft, bei Nordwind schon bei 5 Bft. Dabei wird dann im wesentlichen die Ebbestromrichtung verändert, und zwar wird sie durch W-, NW- und N-Winde nach Süden in Richtung Heverstrom abgedrängt. Bei Ostwind sind ab Windstärke 7 Bft Veränderungen bei der Verteilung der Flutstromrichtungen festzustellen. Dann setzt der Strom vornehmlich nach N.

Bei stärkerem Wind aus westlichen Richtungen wird das Richtungsspektrum immer kleiner, so daß bei Bft 7 eine gleichmäßige Stromrichtung nach SSO erreicht ist. Begünstigt wird diese Entwicklung vermutlich durch die topographischen Verhältnisse vor Süderoog-sand, welche eine natürliche Stromablenkung nach SSO bewirken.

#### Meßposition 02-04

Die mittleren Tidestromgeschwindigkeiten erreichen bei Flut 50 cm/s und bei Ebbe 40 cm/s; die Häufigkeitsverteilung weist eine Dominanz des stärkeren Flutstromes aus (Abb. 4). Bei allen Windrichtungen werden die häufigsten Flutstromgeschwindigkeiten kleiner, was eine Folge des Ausgleichs zum Triftstrom in Oberflächennähe sein wird. Die Ebbestromgeschwindigkeiten erreichen bei Wind um S Höchstwerte bis 60 cm/s, ohne daß eine ausgeprägte Zunahme mit der Windstärke auszumachen ist (Abb. 11).

Als Hauptstromrichtungen bei Normaltiden wurden für Flutstrom O mit Nebenstromrichtungen NO und SO, für Ebbestrom W mit Nebenstromrichtungen NW und SW ermittelt (Abb. 12). Die Richtungsverteilung läßt auf eine für dieses Gebiet typische Drehstromellipse schließen (GÖHREN, 1974 b). Bei Winden ab 5 Bft werden die Richtungsverteilungen beeinflusst. Bei S- und N-Wind konzentrieren sie sich auf O und W, bei aufländigen Winden wird die Richtungsvielfalt größer: Bei Wind aus S und SW setzen die Flut nach SO und die Ebbe nach NW; NW-Wind 7 Bft führt während der gesamten Tide zu südlichen Stromrichtungen und damit zu einer Triftstromrichtung, die GÖHREN (1974 b) auch vor Amrum und Eiderstedt fand (siehe seine Abb. 47).

#### 4.2 Profil Knechtsand

Die mittleren Strömungsverhältnisse im Knechtsandgebiet und in der Außenelbe sind recht gut bekannt (siehe dazu GÖHREN, 1968 und 1969; KOCH und LUCK, 1973, oder SIEFERT et al., 1980, auf Abb. 24 mit Angabe der Primärliteratur).

#### Meßstationen 02-05 und 02-08-73

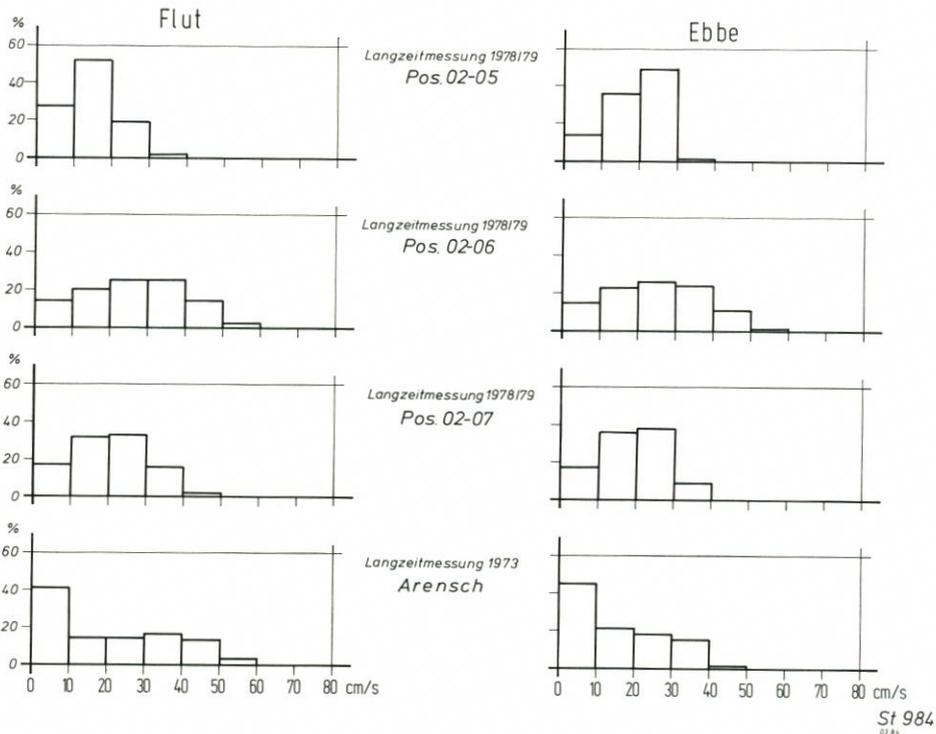
Die Positionen Spiekaer Barre (02-05) und Arensch (02-08-73) im hohen, küstennahen Watt zeigen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten bis 30 cm/s bzw. 50 cm/s (Abb. 13); die Richtungsverteilungen bestätigen bisherige Erkenntnisse hinsichtlich alternierender Ströme, die durch die Lage naher Prielausläufer bestimmt werden (Abb. 15 und 17). Dabei wird deutlich, daß die Position 02-05 nördlich der (fiktiven) Wattwasserscheide, also im Bereich

der Till, liegt, weil der Flutstrom nach Süden weist (Abb. 15). Die etwas größeren Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe passen jedoch zu dem Bild eines nach Norden setzenden Reststromes.

Die erfaßten Starkwindlagen zeigen bei Station 02-05 (Abb. 14) kaum Verschiebungen hin zu stärkeren Strömungsgeschwindigkeiten, wie GÖHREN (1974 a) dies etwa an seiner Meßstelle südöstlich von Neuwerk (Abb. 1) feststellte. Allenfalls bei NW-Wind nehmen die Flutstromgeschwindigkeiten zu, bei W- und SW-Wind nehmen sie dagegen sogar ab. Letzteres wird durch den von SW zu erwartenden Triftstrom über das Watt hervorgerufen, auch angedeutet durch die Deformation der sonst sehr stabilen Richtungsverteilung auf Abb. 15 bei SW-Wind ab 5 Bft. Bei NW-Wind streuen dagegen die Ebbestromrichtungen stärker, was – bei gleichzeitiger Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeit – auf Triftstrom aus NW hinweist. Abb. 15 gestattet also eine gewisse Abgrenzung: Im Bereich der Spiekaer Barre setzt ab 5 Bft aus SW Triftstrom nach N, ab 6 Bft aus W nach S und ab 5 bis 6 Bft aus NW ebenfalls nach S.

Die hier aus Dokumentationsgründen mit aufgenommene Station vor Arensch (02-08-73) zeigt bei westlichen Winden eine interessante, schon von GÖHREN (1968) beschriebene Entwicklung: Der Ebbestrom entfällt hier bereits bei SW-Wind 4 Bft, W-Wind 5 Bft und NW-Wind 6 Bft (Abb. 17), eine Folge des bei Sturmfluten konstant von SW über das Watt nach NO ziehenden Triftstromes, verbunden mit leicht zunehmenden Strömungsgeschwindigkeiten. Diese bleiben jedoch wiederum deutlich unter den von GÖHREN (1974 a) im Watt südöstlich von Neuwerk gemessenen und wachsen kaum mit der Windstärke (Abb. 16).

N-Wind 5 Bft drängt hier Flut- und Ebberichtungen nach SW, östliche bis südliche Winde ab 5 Bft die Flutrichtung nach NO.



St 984  
07.84

Abb. 13. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Profil Knechtsand und vor Arensch bei Normaltide

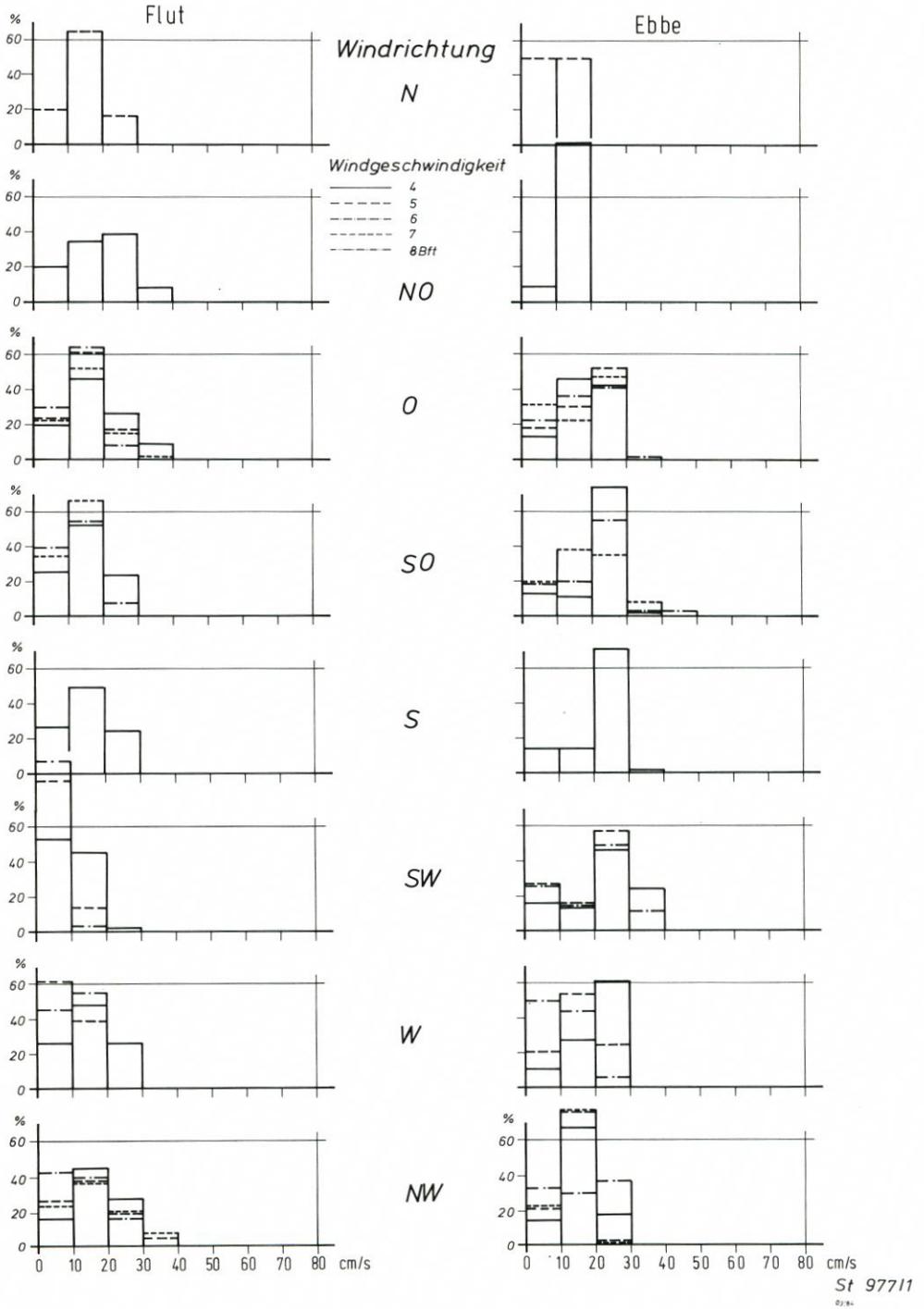


Abb. 14. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-05 (Watt) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 97711  
02/86

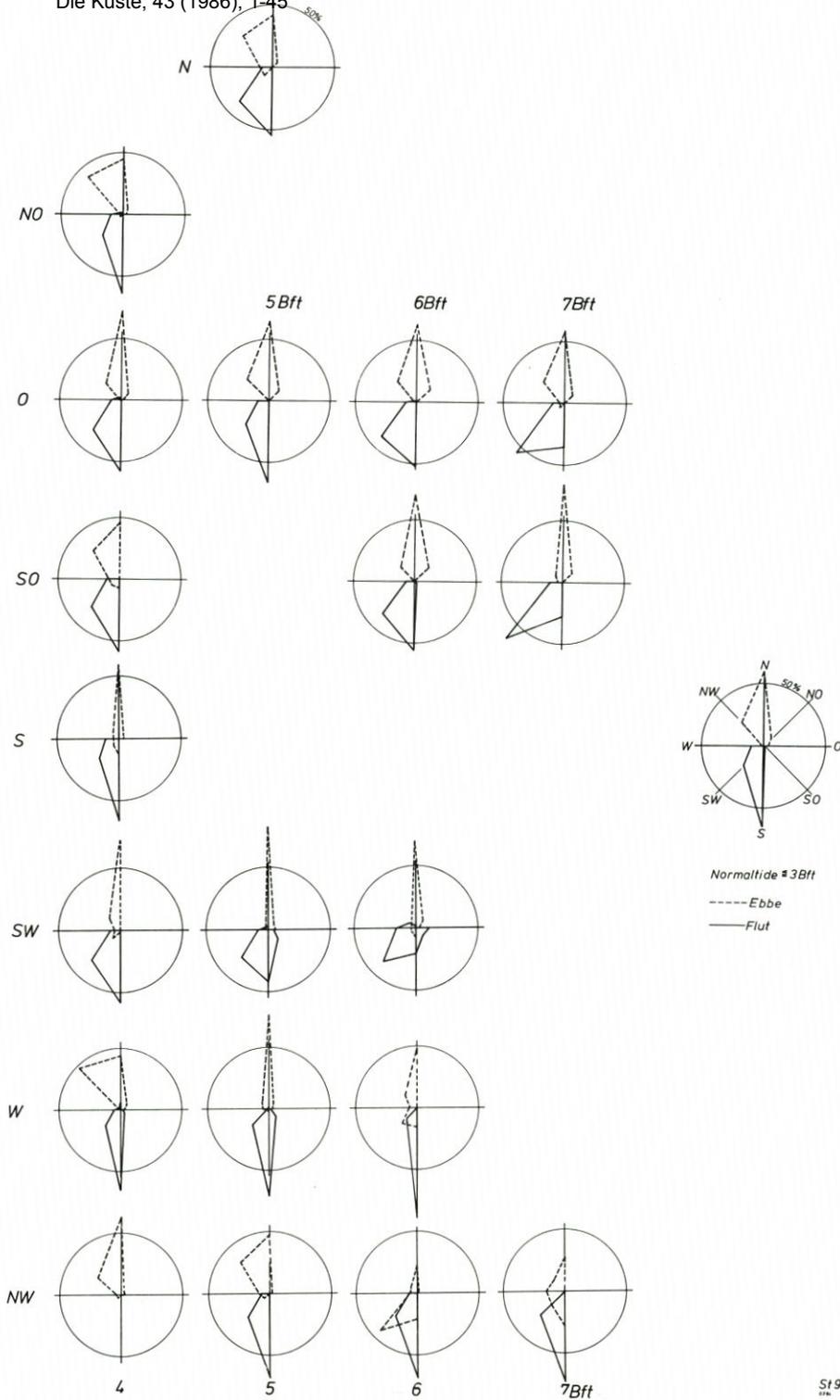
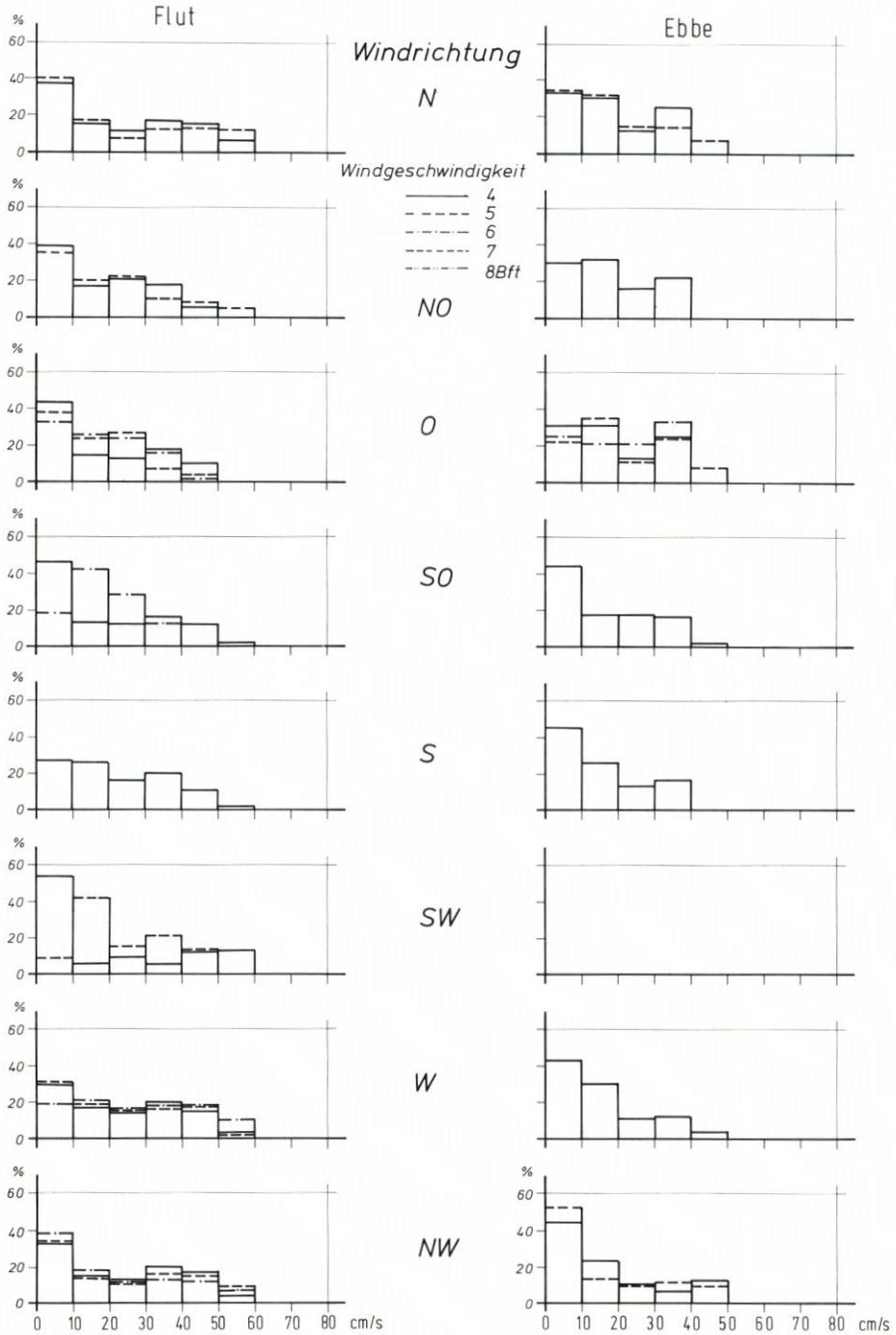


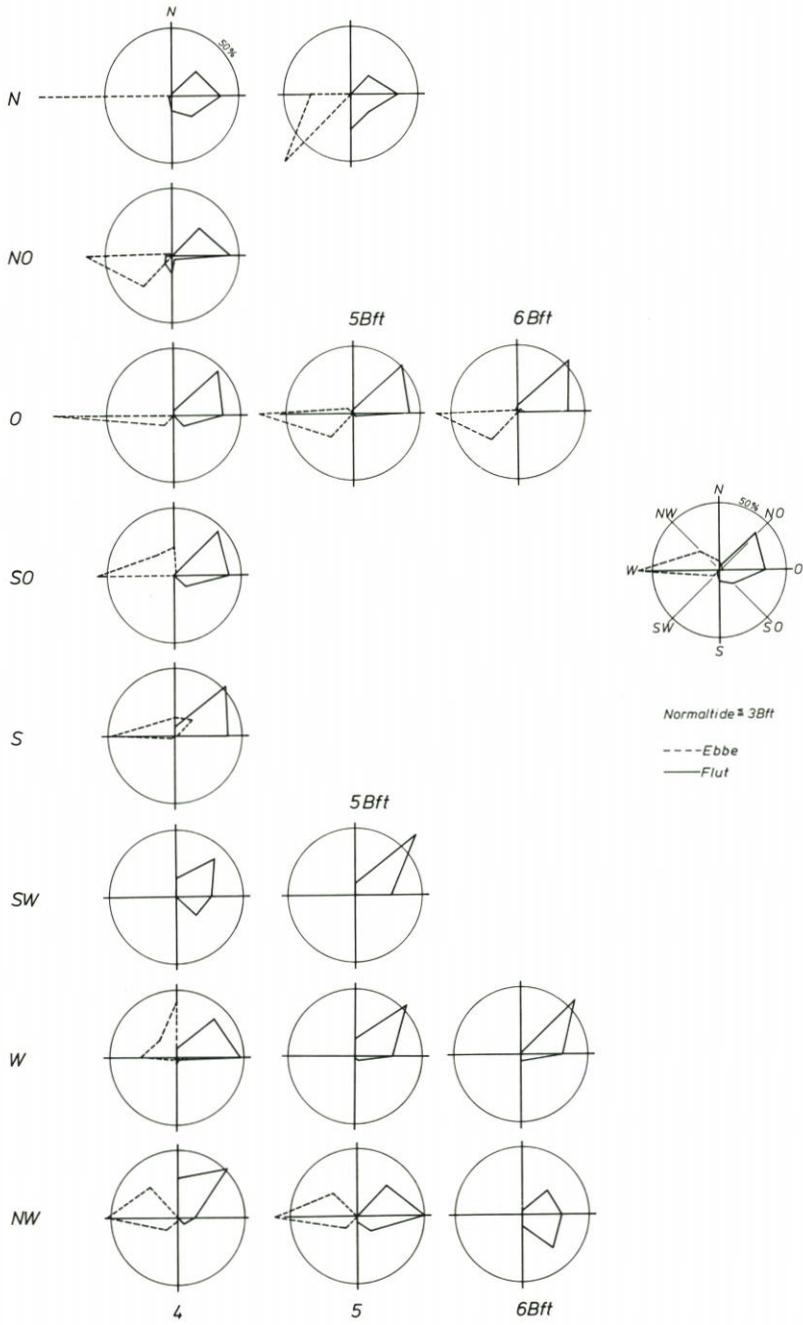
Abb. 15. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-05 (Watt) für die Normal-  
 tide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 977



St 97211  
03.91

Abb. 16. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-08-73 (Watt) bei unterschiedlichen Windverhältnissen



St 972

Abb. 17. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-08-73 (Watt) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

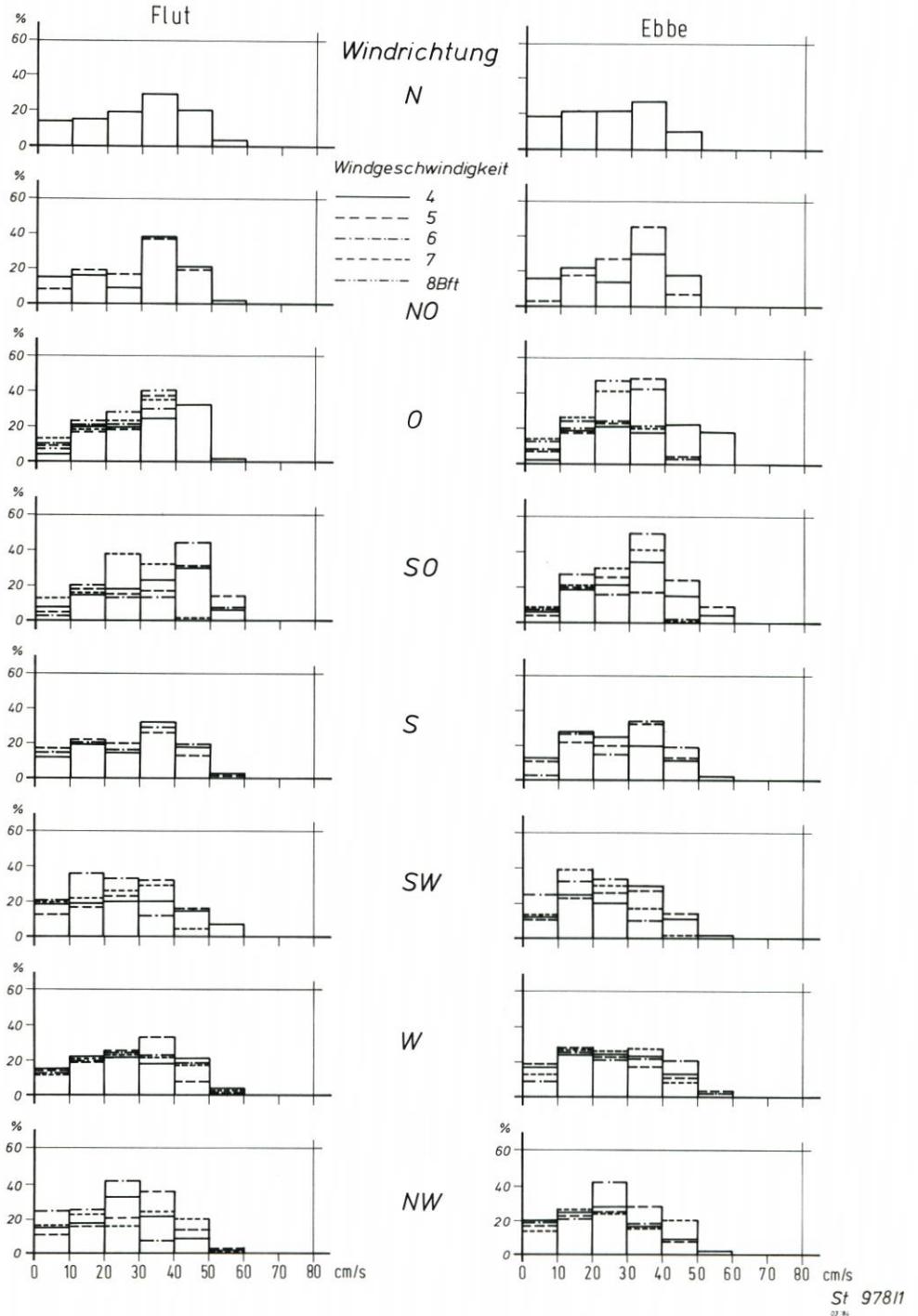


Abb. 18. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-06 (Wattstrom) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 978/11  
07.81

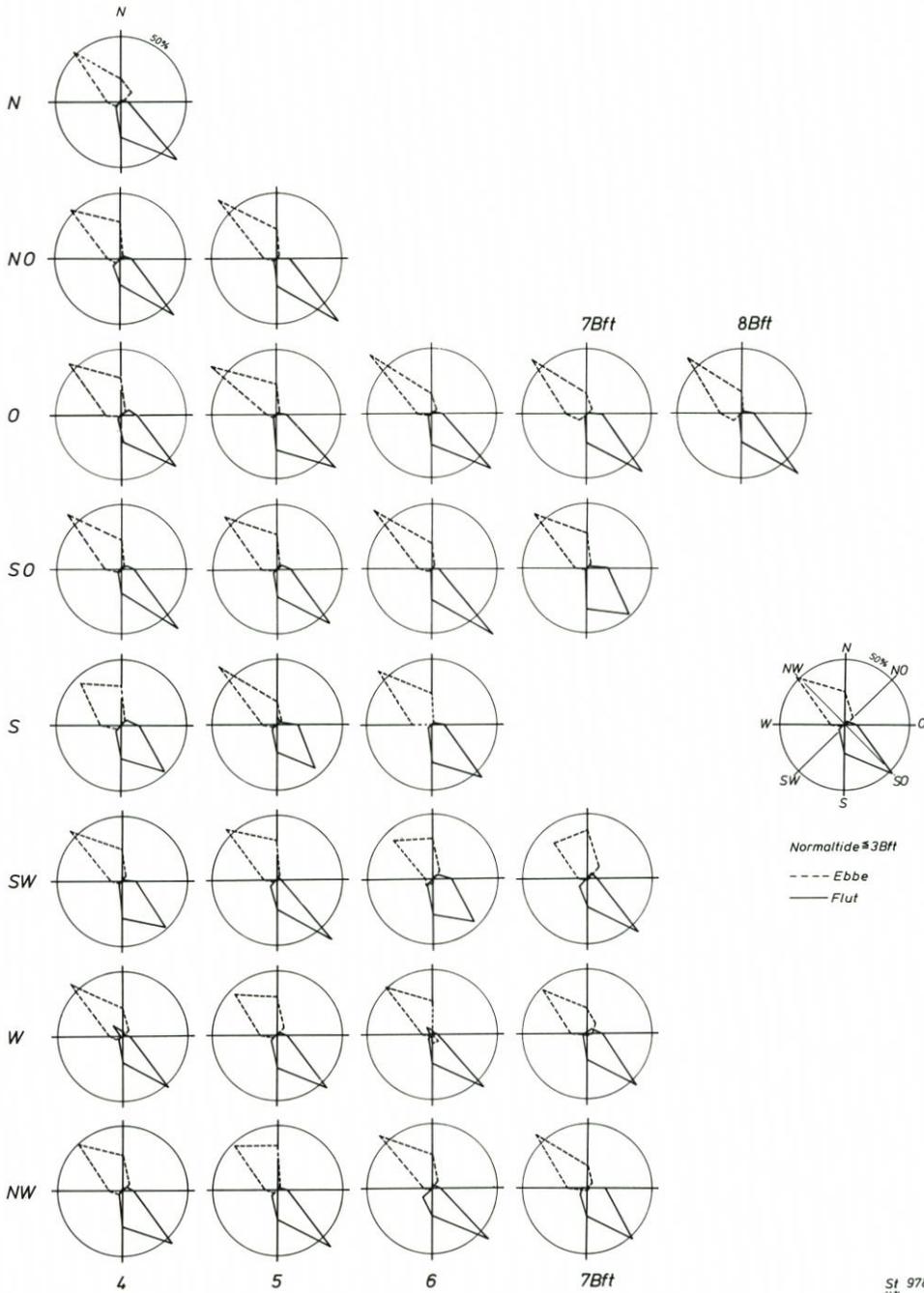


Abb. 19. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-06 (Wattstrom) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

St 978

## Meßstation 02-06

Die Position in der Westertill, etwa 7,5 m unter NN, liegt in einem Gebiet mit gegenläufigen Restströmungen zwischen den Robbenplatten im Norden und den kleinen Knechtsänden im Süden. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten verteilen sich bei Flut und bei Ebbe fast gleichmäßig auf Werte zwischen 0 und 50 cm/s (Abb. 13), die Stromrichtungen sind alternierend (SO bzw. NW, Abb. 19).

Das Phänomen gegenläufiger Restströmung hat GÖHREN (1971) erstmals aufgezeigt und nachgewiesen, und zwar zunächst im Flachwassergebiet westlich von Scharhörn, später dann auch westlich von Trischen und dem Großen Knechtsand. Der Reststrom setzt dabei im äußeren Abschnitt nach Nordosten, auf den Sandbänken und im Randwatt in entgegengesetzter Richtung. GÖHREN erklärt dies mit einer zunehmenden Störung der Drehschwingung mit abnehmender Wassertiefe.

Bei östlichen Winden verstärkt sich der Ebbestrom (Abb. 18), ohne daß sich die Richtungen verändern (Abb. 19). Entsprechendes trifft auch für Westwindlagen zu, wobei dann die Geschwindigkeiten etwa ab Windstärke 6 Bft leicht zunehmen. Da die Meßstation schon in tieferem Wasser liegt und 1 m über der Sohle gemessen wurde, entspricht dies etwa den bisherigen Erkenntnissen. Geschwindigkeiten von 60 cm/s werden bis Windstärke 7 nicht überschritten.

## Meßstation 02-07

An der Position westlich des Großen Vogelsandes bei einer Wassertiefe von rd. 21 m unter NN wurden 1 m über der Sohle bei normalen Tideverhältnissen Strömungsgeschwindigkeiten bis 40 cm/s (Abb. 13) bei W-O-alternierendem Strom (Abb. 21) gemessen. Südliche wie östliche Winde führen nur bei Flut zu geringen Strömungserhöhungen (Abb. 20).

Bei westlichen Winden nehmen die Geschwindigkeiten bei Flut leicht ab, bei Ebbe leicht zu. Ersteres ist wohl wiederum Ergebnis des Ausgleichsstromes, der auch im Profil Pellworm im äußeren Bereich bemerkbar ist. Das Alternieren des Stromes bleibt bis Windstärke 5 Bft unverändert, sieht man von einer Betonung bei südlichen Winden einmal ab. Nordöstliche Winde ab 6 Bft und westliche ab 7 Bft führen zu anderen Richtungsverteilungen, die auf gewissen Triftstromeinfluß schließen lassen. (Abb. 21).

## Profil

Die Langzeitmessungen an den Stationen im küstennahen Watt (02-05), in einem Wattstrom (02-06) und im äußeren Elbeästuar (02-07) zeigen

- alternierenden Strom (S-N bzw. NW-SO bzw. O-W),
- ungestörte Strömungsgeschwindigkeiten bis rd. 40 cm/s bei Flut und bei Ebbe (bei 02-06 rd. 10 cm/s mehr),
- Einflüsse durch Wind auf die Geschwindigkeiten etwa ab 6 Bft, wobei Triftstromeffekte an den küstennahen Stationen schon ab 4 Bft nachgewiesen werden können,
- Windeinflüsse auf die Richtungen meist ab 5 Bft, teilweise erst bei größeren Stärken.

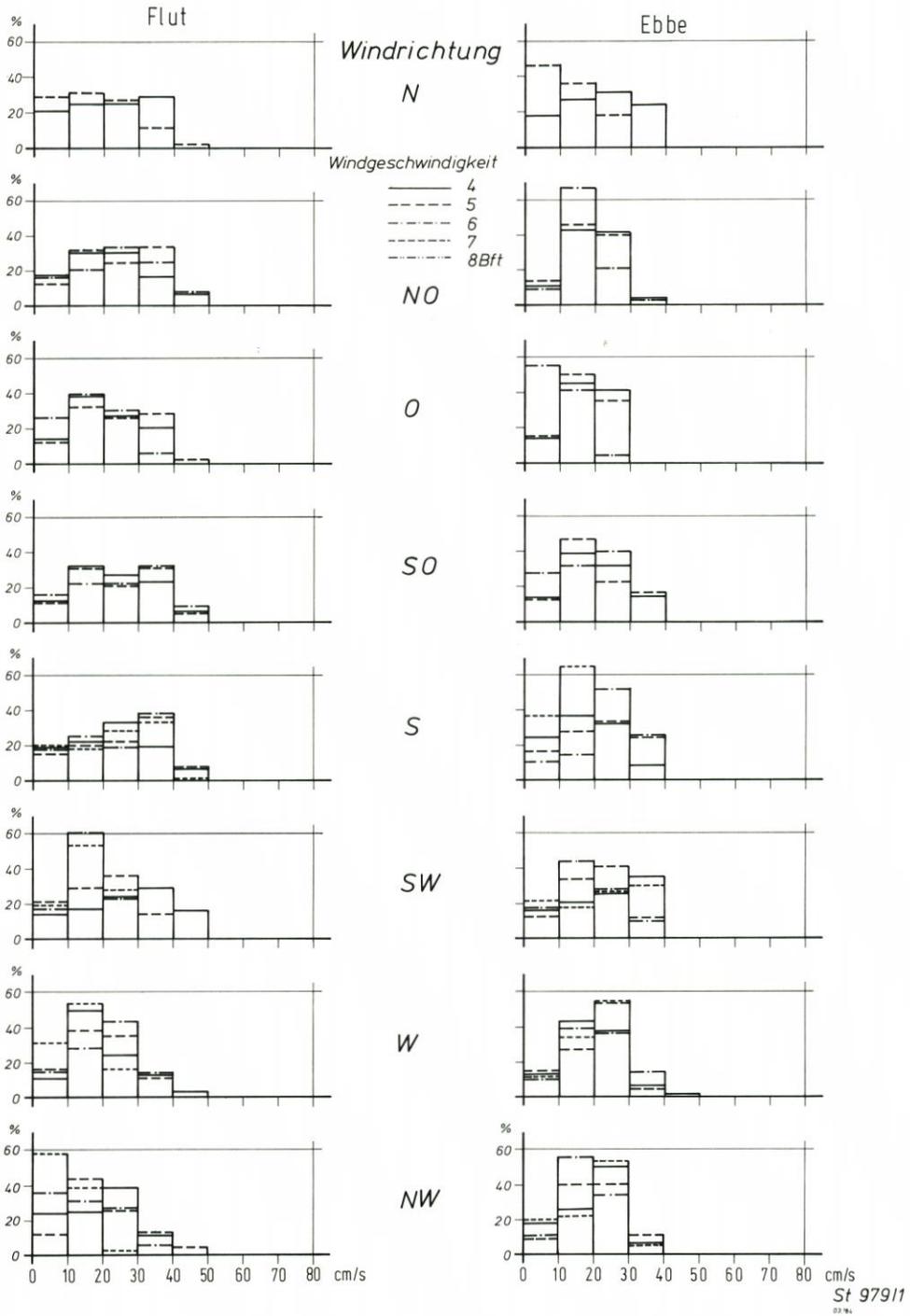


Abb. 20. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-07 (Seegebiet) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

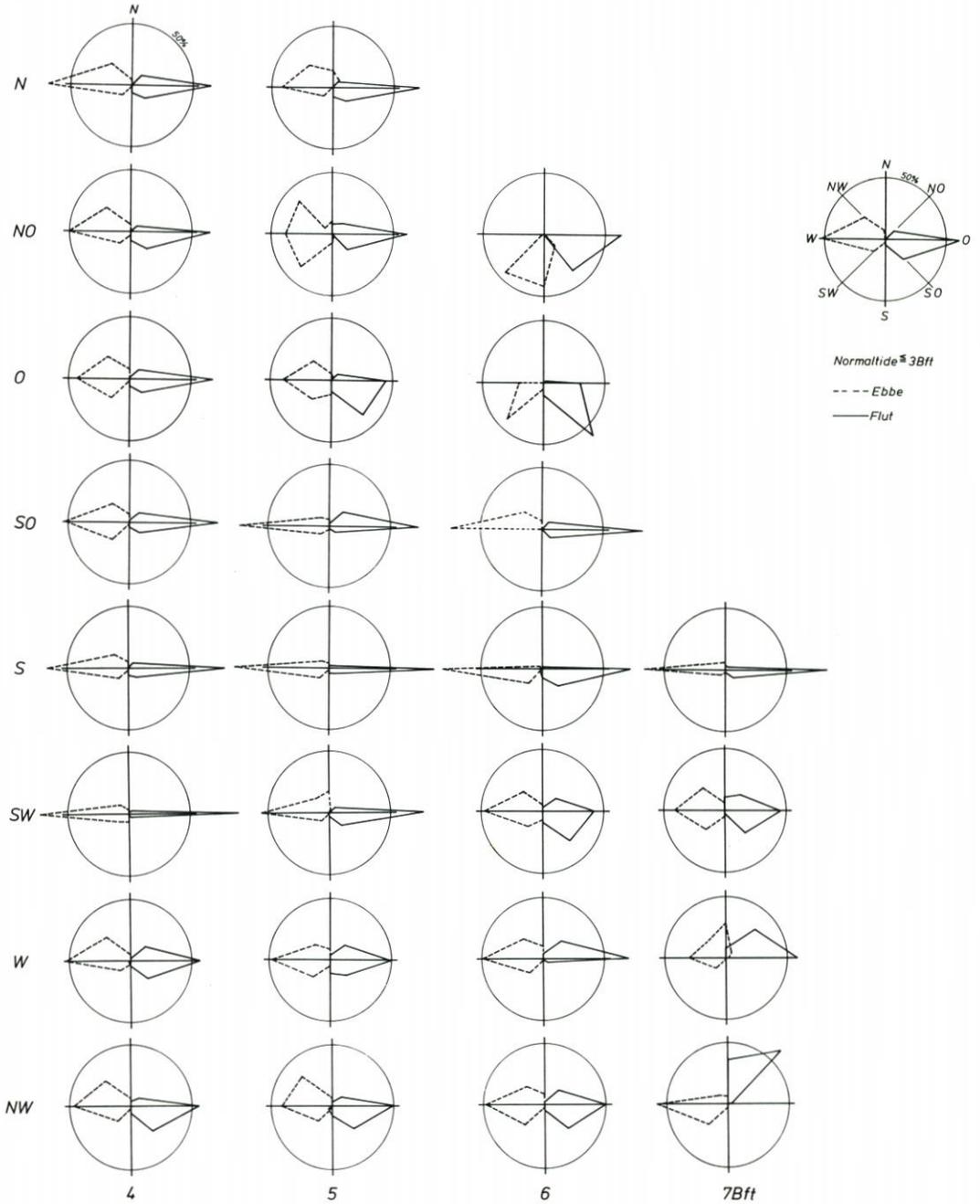


Abb. 21. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-07 (Seegebiet) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

### 4.3 Profil Norderney

Im See- und Wattengebiet von Norderney wurden 1979/80 mit Unterbrechungen Strommessungen ausgeführt, und zwar an drei Stationen (im Seegebiet, auf dem Vorstrand und im Watt) mit Wassertiefen von NN -14,6 m, -6,1 m und -0,7 m (Abb. 1 b). Es wurden jeweils 181, 54 und 193 Tiden erfaßt.

#### Meßstationen 02-08 und 02-09

Die Gezeitenströmungen sind im Seegebiet (Station 02-08) und auf dem Vorstrand (Station 02-09) bei Flut ostwärts und bei Ebbe westwärts gerichtet (Abb. 24 und 26). Sie entsprechen dem großräumigen Ablauf der Gezeitenbewegung in der Deutschen Bucht (DEUTSCHES HYDROGR. INST., 1983). Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Meßorten sind nur während der Kenterung festzustellen. Im Seegebiet treten bei Kenterung nach Flut kaum und bei derjenigen nach Ebbe nur kurze Stauwasserzeiten auf. Die Stromrichtungsverteilung für den Vorstrand läßt für die Stromkenterung nach Ebbe ebenfalls auf kurze Stauwasserzeiten schließen, die Flutkenterung ist dagegen mit langen Stauwasserzeiten verbunden.

Die gezeitenbedingten Stromgeschwindigkeiten im Seegebiet (Abb. 22) weisen für Ebbe und Flut eine etwa gleichartige Häufigkeitsverteilung auf. Auf dem Vorstrand überwiegt dagegen der Anteil höherer Geschwindigkeiten bei Flut. In beiden Bereichen werden 40 cm/s nicht überschritten. Eine Tendenz mit dem Wind zu- oder abnehmender Geschwindigkeiten ist kaum erkennbar (Abb. 23 und 25). Hierbei treten insbesondere im Seegebiet auch keine signifikanten Unterschiede für gleich- oder entgegengerichteten und seitlich einwirkenden Wind auf, wenn man von einer gewissen Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeiten bei Wind aus W bis N absieht. Die bei Normaltiden gemessenen Maximalgeschwindigkeiten (Abb. 22) werden nur in einigen Fällen überschritten; Geschwindigkeiten über 50 cm/s treten aber nicht

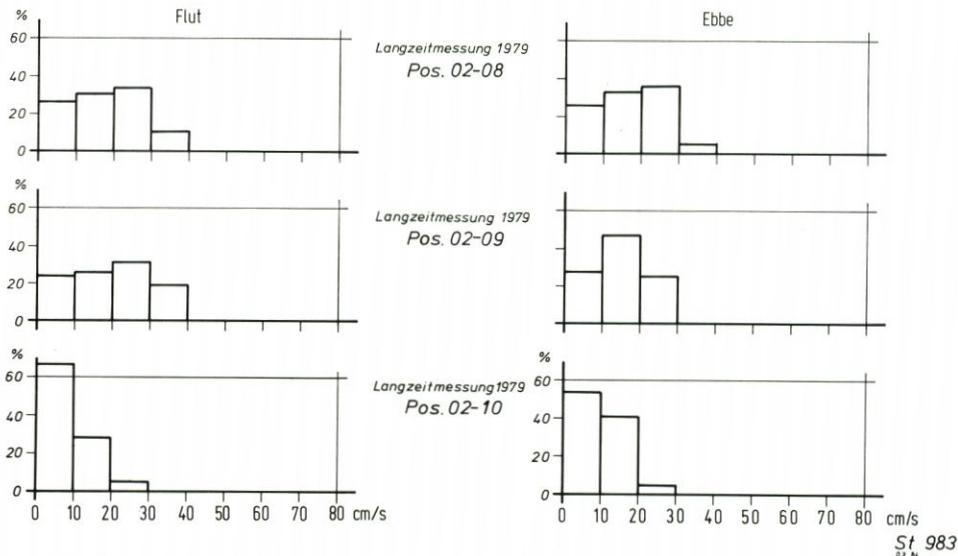
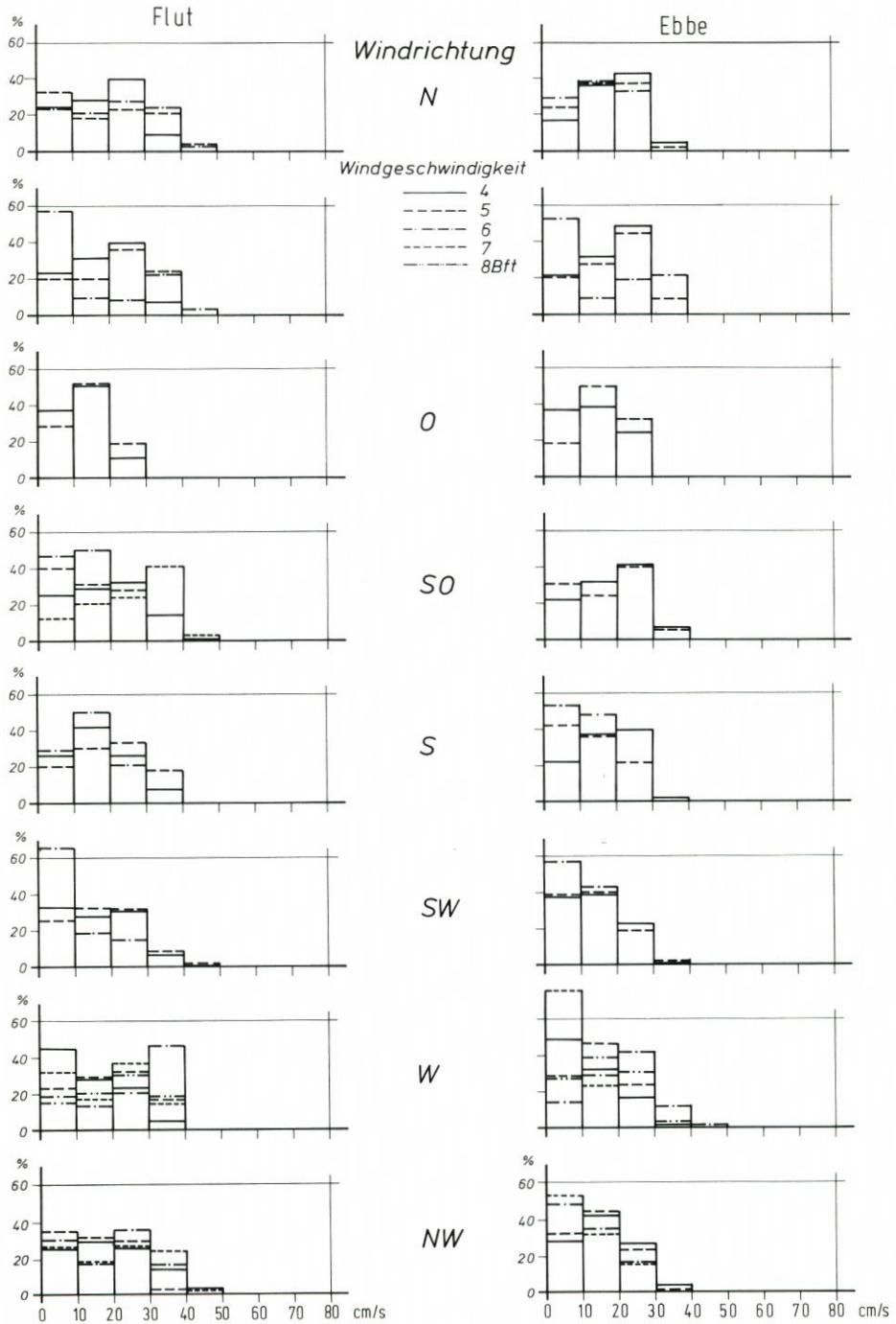
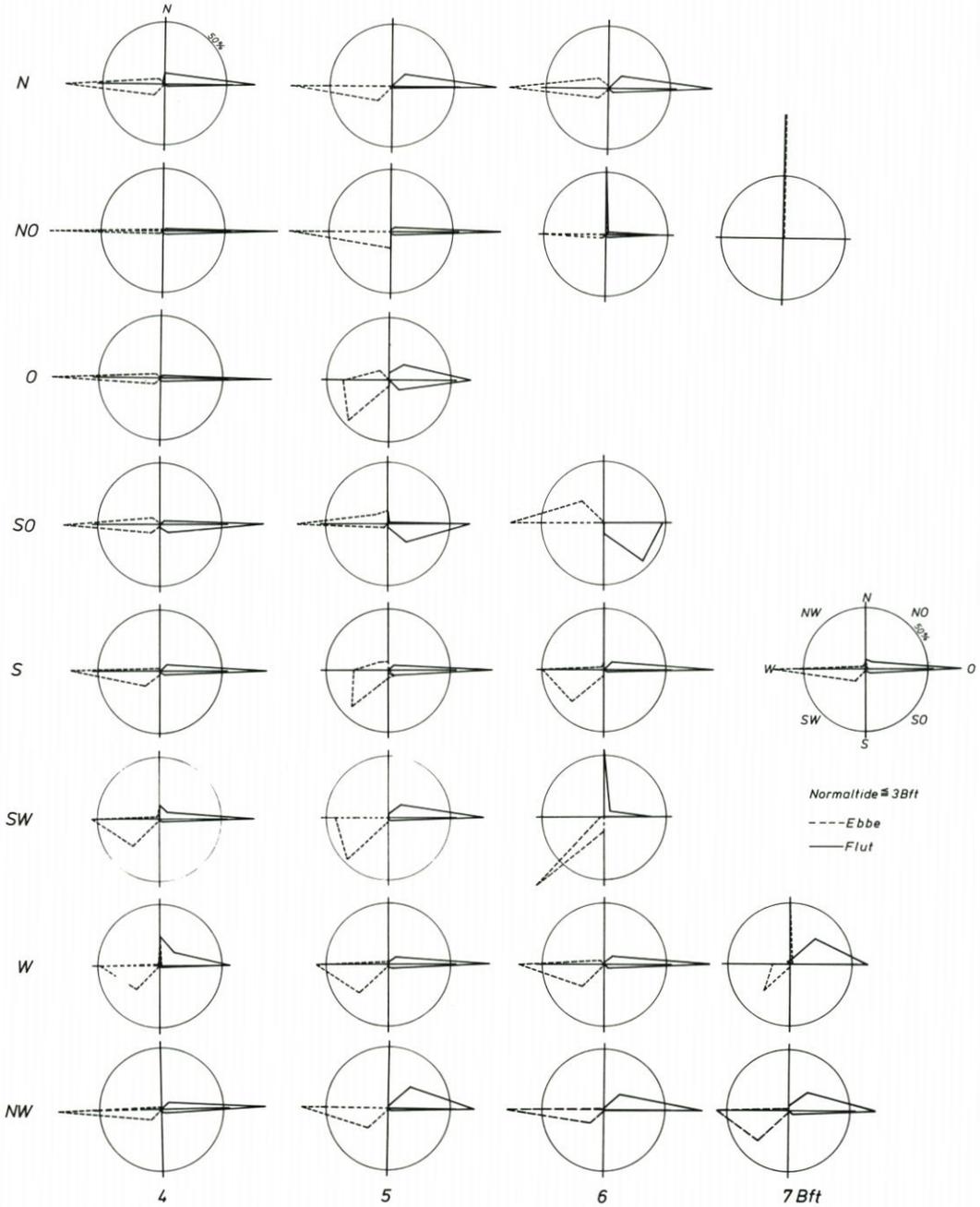


Abb. 22. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Profil Norderney bei Normaltide



St 98011

Abb. 23. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-08 (Seegebiet) bei unterschiedlichen Windverhältnissen



St 980

Abb. 24. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-08 (Seegebiet) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

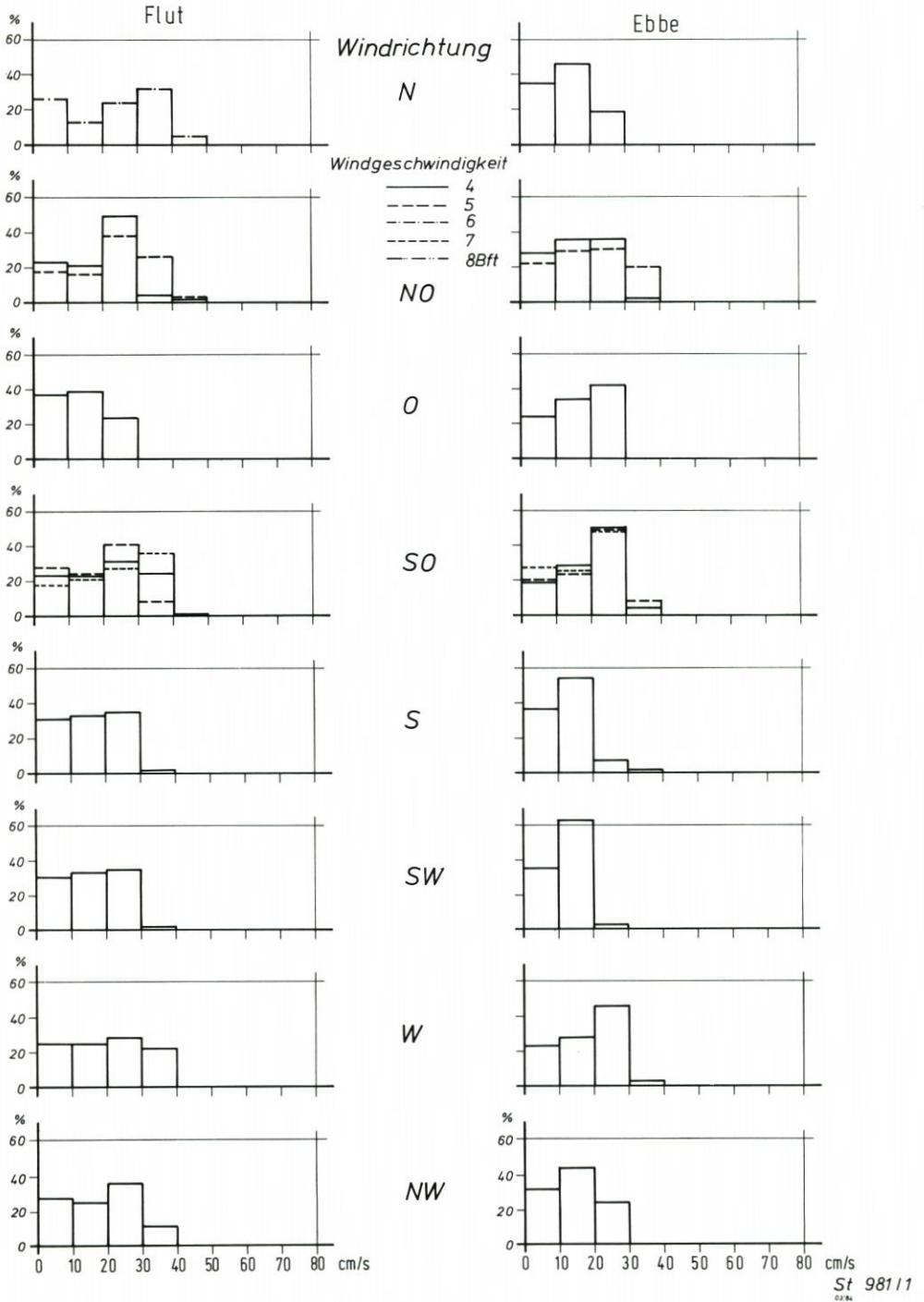


Abb. 25. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-09 (Vorstrand) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

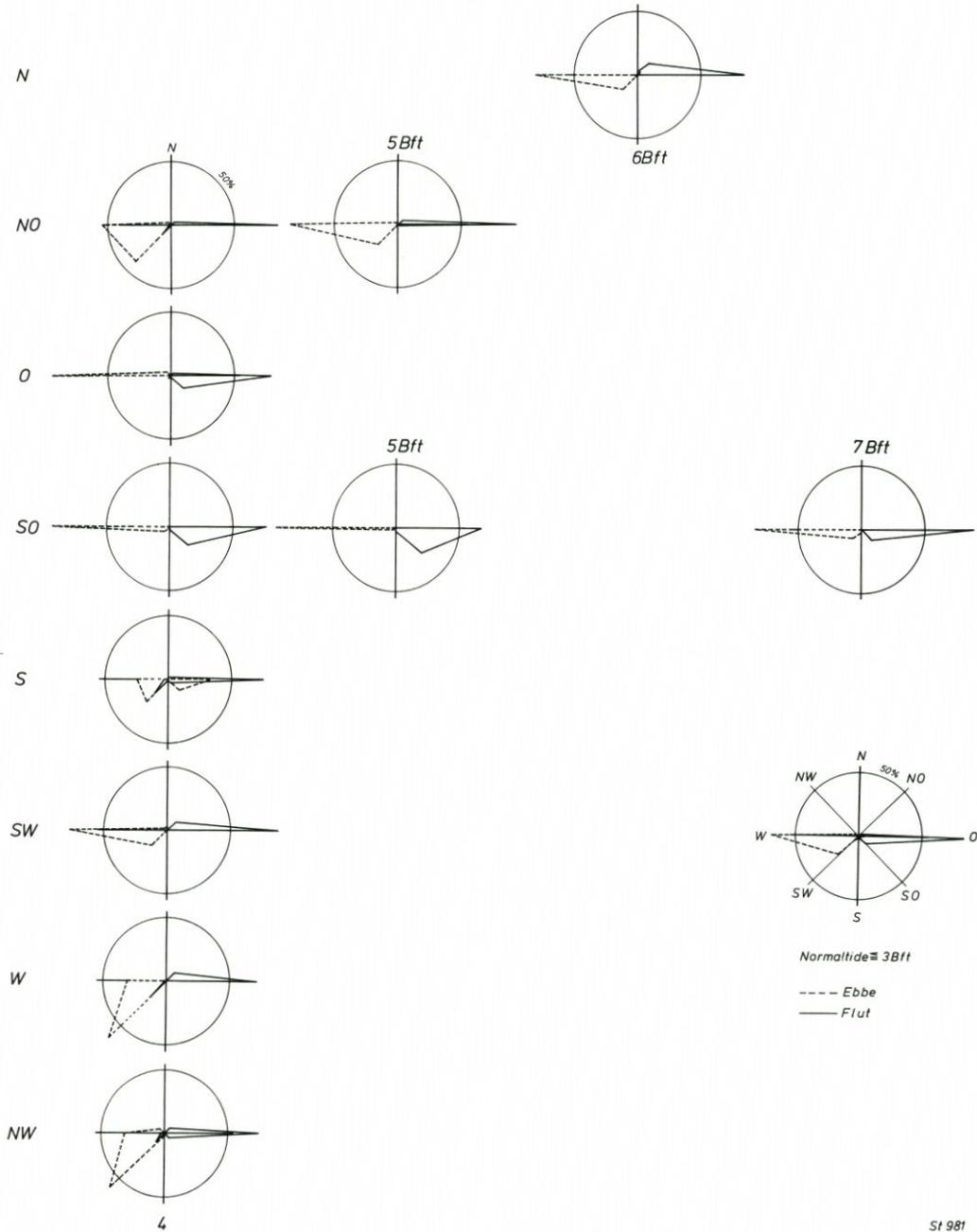


Abb. 26. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-09 (Vorstrand) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

auf. Auch hinsichtlich dieser Veränderungen sind keine einheitlichen Zusammenhänge mit Windstärken und -richtungen erkennbar.

Die Stromrichtungen im Seegebiet (02-08) werden in Abhängigkeit von der Windrichtung bereits bei Windstärken von 4 Bft beeinflusst, insbesondere bei Südwest- und Westwind. Dagegen treten bei Nordwest- und Nordwinden sogar bei Stärke 6 keine erheblichen Änderungen gegenüber Normaltiden auf. Es ist aber mit der Zunahme der Windstärke aus anderen Richtungen eine wachsende Einwirkung auf die Stromrichtungen verbunden (Abb. 24): Ebbestromablenkung nach SW bei Wind aus O über S bis W ab 5 Bft, Änderung der Flutstromrichtung bei 6 Bft aus SO und SW sowie 7 Bft aus W.

Die geringe Anzahl der Messungen auf dem Vorstrand erlaubt zwar keine so weitgehende Differenzierung wie im Seegebiet. Es ist aber erkennbar, daß für diesen Bereich Zusammenhänge zwischen Windentwicklung und Abweichungen der Ebbestromrichtungen bestehen (Abb. 26): Bereits bei 4 Bft aus W bis NO wird der Strom nach SW abgelenkt. Bei Südwind gibt es auf dem Vorstrand keine richtungsstabilen Ebbeströmungen.

Die Strömungen erfahren, wie wegen der großen Wassertiefen zu erwarten war, keine unmittelbare Beeinflussung durch den Wind. Vielmehr sind hier offensichtlich dessen indirekte Einwirkungen in Form sohnaher Ausgleichsströmungen erfaßt worden, die als Folge der Trift im oberen Bereich des Wasserkörpers anzusehen sind.

#### Meßstation 02-10

Auf dem Watt führen die Wechselwirkungen von Strömungen und den stark gegliederten topographischen Formen zu einer stärkeren Richtungsstreuung als im Seegebiet: Der Flutstrom dreht bei südwestlicher Hauptrichtung zwischen Südost und West, der Ebbestrom zwischen Nordost und Ost (Abb. 28). Die Geschwindigkeiten sind auf dem Watt insgesamt niedriger als im Seegebiet und überschreiten den Wert von 30 cm/s in keinem Fall (Abb. 22).

Die Strömungsgeschwindigkeiten im Watt lassen hier deutlicher als die -richtungen die Einwirkungen des Windes erkennen (Abb. 27). Im Gegensatz zum Seegebiet ist im allgemeinen auch ein plausibler Zusammenhang erkennbar: Zunahme der Geschwindigkeit mit wachsender Windstärke, Abnahme bei Gegenläufigkeit von Strömung und Wind. Es wird auch deutlich, daß die Triftströmungen im Watt erheblich höhere Geschwindigkeiten aufweisen als bei Normaltiden, analog zu der Profilmessung von GÖHREN (1974 a) auf Abb. 1 b. Die hier erfaßten Maximalwerte bis 80 cm/s (ausgeprägtes Maximum bei Westwind 7 Bft) werden bei Normaltiden nur in tiefen Wattrinnen erreicht.

Das Stromrichtungsverhalten im Watt wird bereits bei Windstärke 4 Bft aus O und SO beeinflusst, was zu deutlichen Änderungen gegenüber Normaltiden führt (Abb. 28). Es ist auch erkennbar, daß die Modifikation des Stromrichtungsverhaltens mit der Windstärke für jede Windrichtung zunimmt. Die Veränderungen bleiben aber bei gleicher Windrichtung nicht gleichsinnig, sondern es treten hierfür mit wechselnden Stärken auch verschiedenartige Änderungen der Strömungen auf. Das vorliegende Datenmaterial bestätigt, daß die Triftströmungen im Watt unmittelbar bis in Sohnähe wirken. Dem Wind entgegengerichtete Ausgleichsströmungen im sohnahen Bereich, wie im Seegebiet, sind hier nicht vorhanden. In Fällen besonders starker Windeinwirkung tritt sogar eine fast völlige Umkehr des Flut- oder Ebbestroms durch den entgegengerichteten Wind ein. So gibt es bei Ostwind 7 Bft nur Strom nach SW, bei SW-Wind ab 4 Bft, W-Wind ab 5 Bft und SW-Wind ab 6 Bft fast nur Strom nach S bis NW. Hier handelt es sich quasi um „klassischen“ Triftstrom im Watt.

Vergleichbare Trifteffekte waren für Westwindlagen bereits früh in qualitativer Form

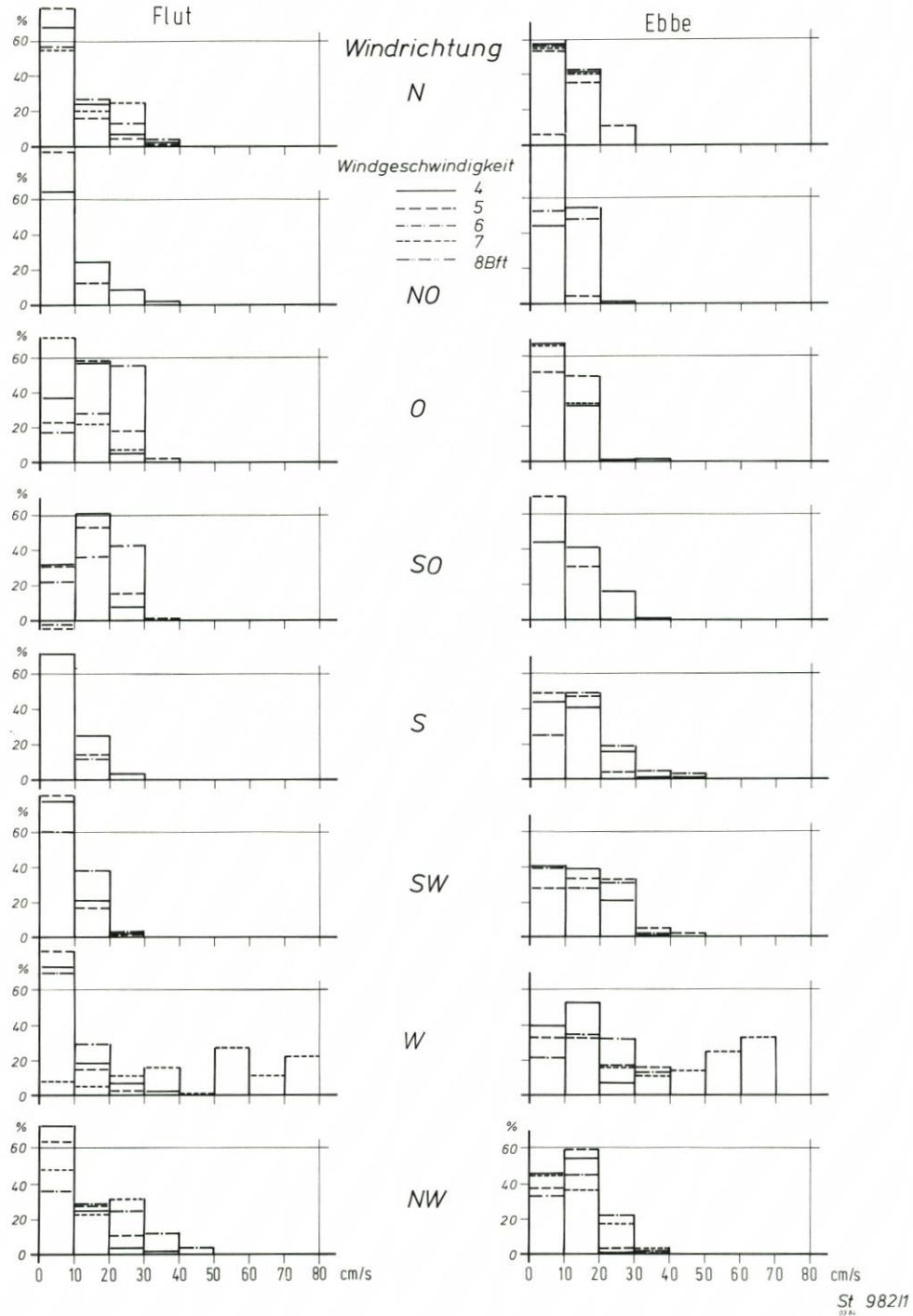


Abb. 27. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsgeschwindigkeiten an der Station 02-10 (Watt) bei unterschiedlichen Windverhältnissen

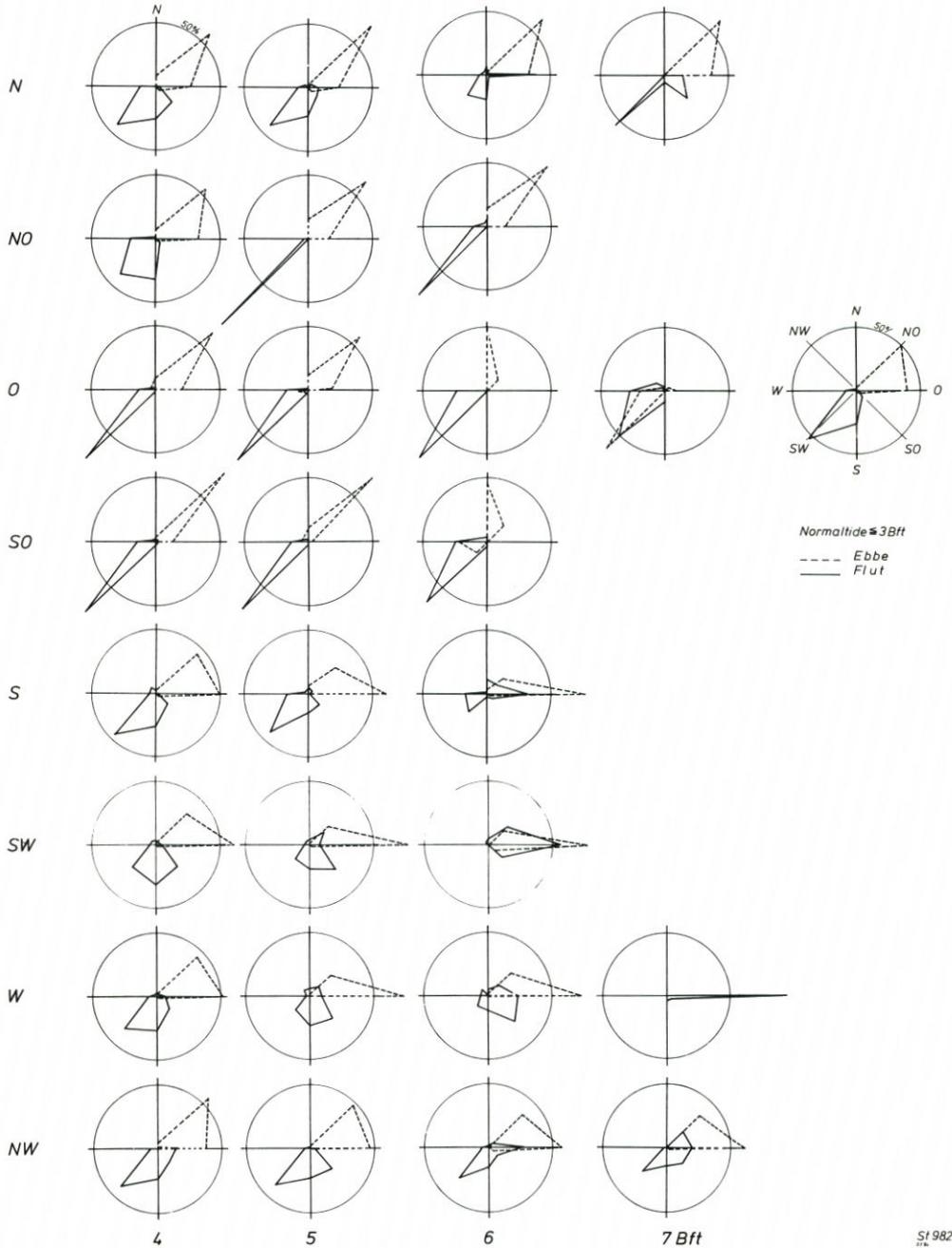


Abb. 28. Häufigkeitsverteilungen der Strömungsrichtungen an der Station 02-10 (Watt) für die Normaltide und bei unterschiedlichen Windverhältnissen

festgestellt und später durch KÖRITZ (1955) in quantitativer für das Juister Watt nachgewiesen worden. Die Entlastungsfunktion des Norderneyer Seegats, die in derartigen Fällen zu durchgehenden Ebbeströmungen von bis zu 23 Stunden führt (KOCH und NIEMEYER, 1978), ließ eine durchgehende Vertriftung über die östlich anschließenden Gebiete nicht als sicher erscheinen. Inzwischen ist aber durch synchrone Messungen auf den Wattwasserscheiden von Norderney und Baltrum sowie im Seegat Wichter Ee nachgewiesen worden, daß sich bei westlichen Starkwindlagen auch auf den östlich vom Norderneyer Seegat gelegenen Watten eine Triftströmung ausbildet, die in Einklang mit dem von Westen nach Osten ansteigenden Gesamtstau im Bereich der Ostfriesischen Inseln (NIEMEYER, 1976) bis zur Jade erfolgt (KOCH und NIEMEYER, 1980).

### Profil

Die Strömungen haben bei Normaltiden Geschwindigkeiten von maximal 40 cm/s im Seegebiet und auf dem Vorstrand sowie von maximal 30 cm/s im Watt. Die Richtungsstabilität nimmt hierbei entsprechend den stärkeren Wechselwirkungen mit der Sohle bei geringer werdenden Wassertiefen ab. Ebenso ist eine Zunahme der Stauwasserzeiten bei Flutstromkenterung mit abnehmender Wassertiefe festzustellen.

Die Trifteffekte sind im Seegebiet und auf dem Vorstrand wesentlich schwächer als im Watt und treten wegen der großen Wassertiefen hier häufig in Form gegenläufiger Ausgleichsströmungen auf.

Im Watt sind in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen im ostfriesischen Wattenmeer ähnlich ausgeprägte Triftströmungen wie für das Wurster Watt ermittelt worden.

#### 4.4 Rest- und Triftströmungen in den Profilbereichen

Die vorstehenden Ausführungen enthalten kaum Angaben über Rest- und Triftströme in der von GÖHREN (1968) definierten Form. Das war auch nicht Sinn der Arbeit. Vielmehr können diese bereits aus Kurzzeitmessungen (über mindestens 14 Tage) gewonnen werden. Bisherige Darstellungen für die Bereiche der ersten beiden Langzeitprofile zeigen Abb. 29 bis 33. Die Profile durchschneiden das Küstenvorfeld mit seiner typischen Gliederung: flaches Watt – Vorstrand – Seegebiet. Die Wattstationen liegen jeweils in Gebieten mit ausgeprägtem Reststrom, setzend nach N, NO bzw. O. Der Vorstrandbereich der drei Profile liegt in Zonen mit gegenläufiger Restströmung und Drehstromellipsen, auf die aus der Verteilung der Strömungsrichtungen unschwer zu schließen ist (siehe dazu Abb. 29 und 30 sowie die Ausführungen bei GÖHREN [1971 und 1974 b]). Die äußeren Stationen in 10 bis 20 m tiefem Wasser zeigen dagegen unterschiedliche Merkmale: Vor Norderney ausgeprägt alternierende Strömung (O bei Flut, W bei Ebbe, Stat. 02–08), vor dem Großen Vogelsand ebenfalls O–W gerichtet, jedoch mit der Andeutung einer flachen Drehstromellipse (Stat. 02–07) und schließlich vor Süderoogsand mit ausgeprägter Drehströmung, aber auch hier der Hauptachsrichtung O–W (Stat. 02–04). Hierbei handelt es sich um eine Position in seeseitiger Verlängerung eines Meßprofils von GÖHREN (1974 b), in dem er im flachen Wasser vor Süderoogsand Hauptachsrichtungen ONO–WSW fand (siehe Abb. 16), die also im tieferen Wasser fast unverändert bleiben.

Die Triftströmungen wurden in die Diskussion der Einzelergebnisse bereits einbezogen. GÖHREN (1974 a) schreibt dazu bei seinen Langzeitmessungen:

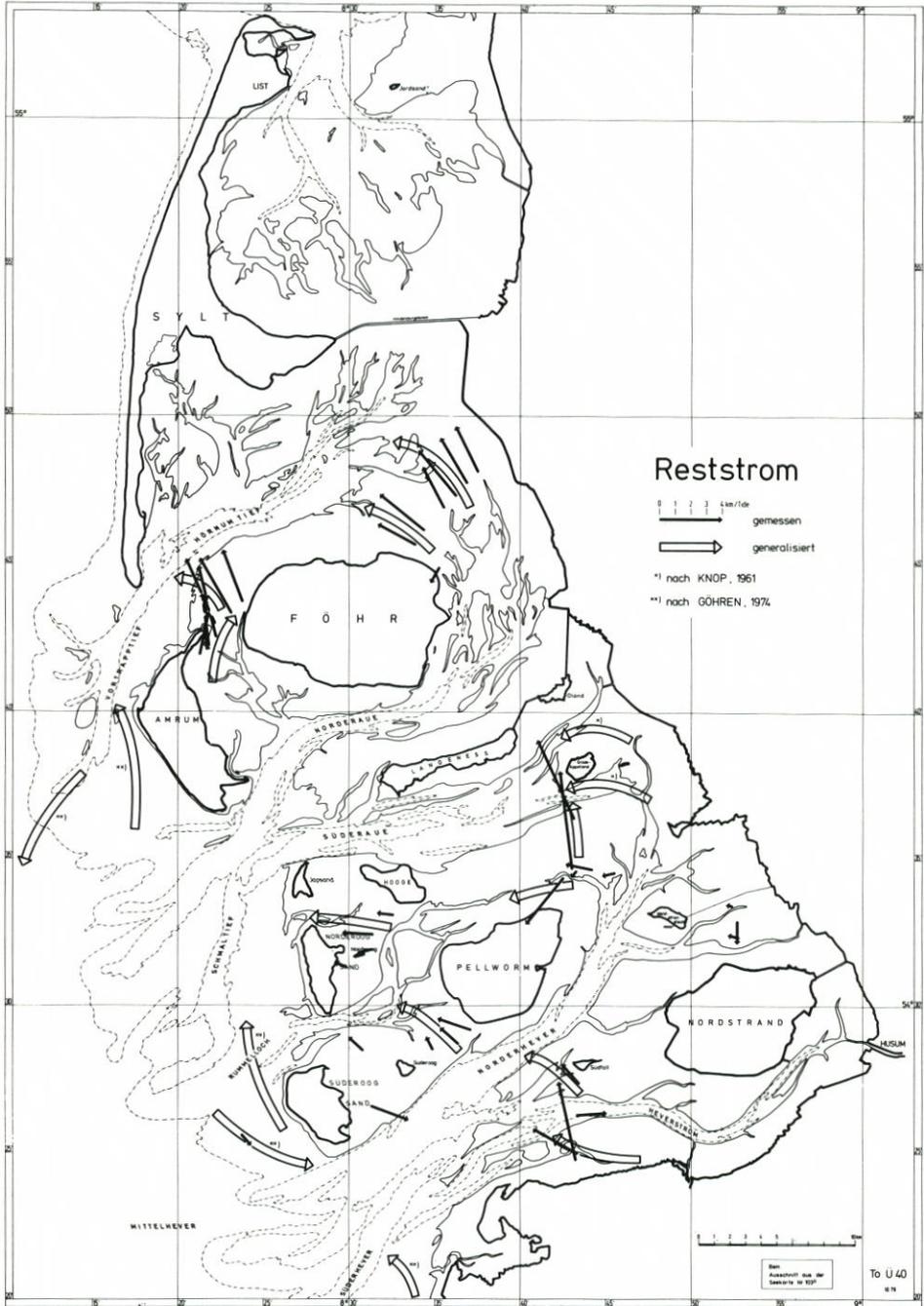


Abb. 29. Reststrom vor der nordfriesischen Küste (SIEFERT et al., 1980, leicht ergänzt)

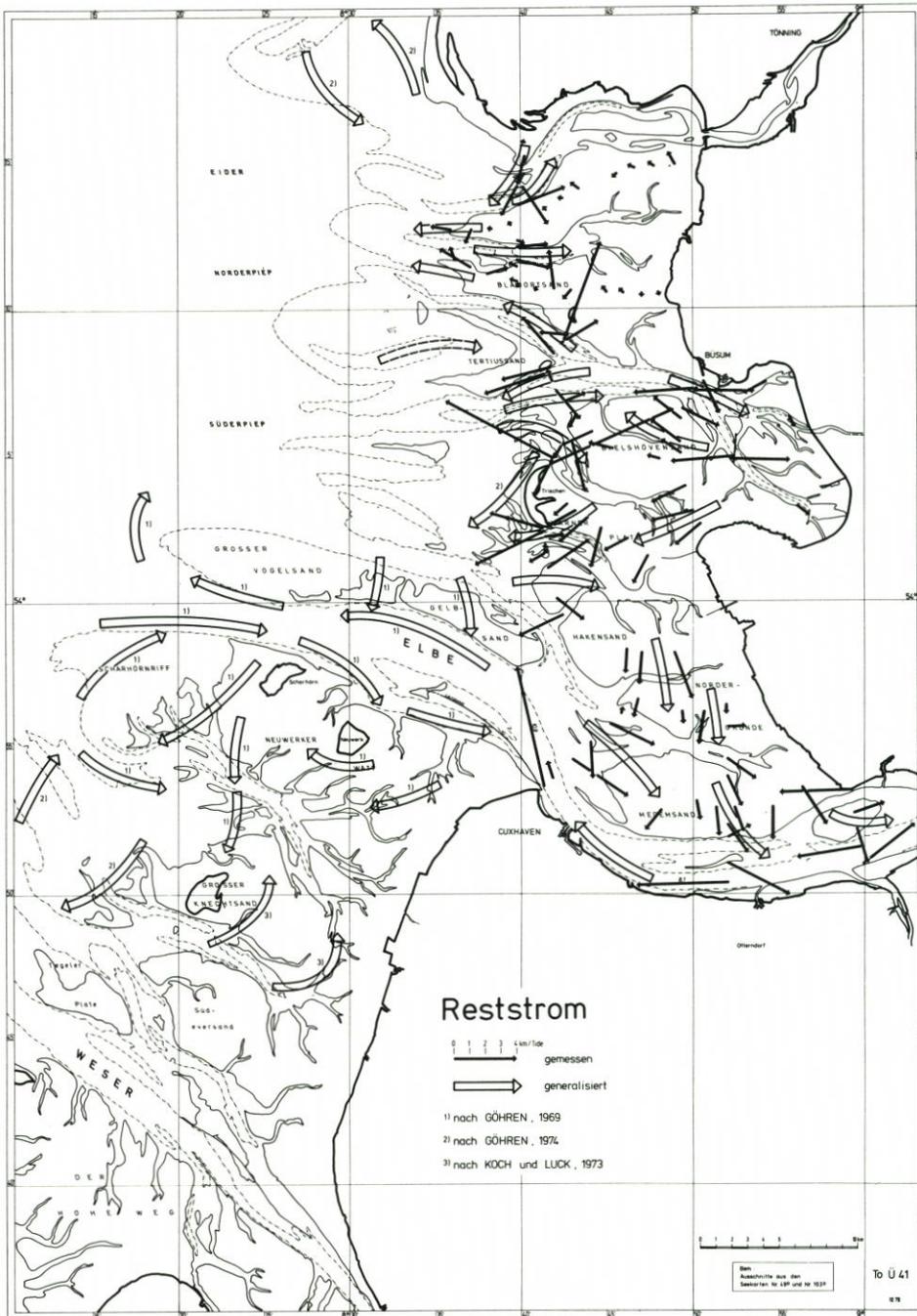


Abb. 30. Reststrom zwischen Außenweser und Eiderstedt (STIEFERT et al., 1980)

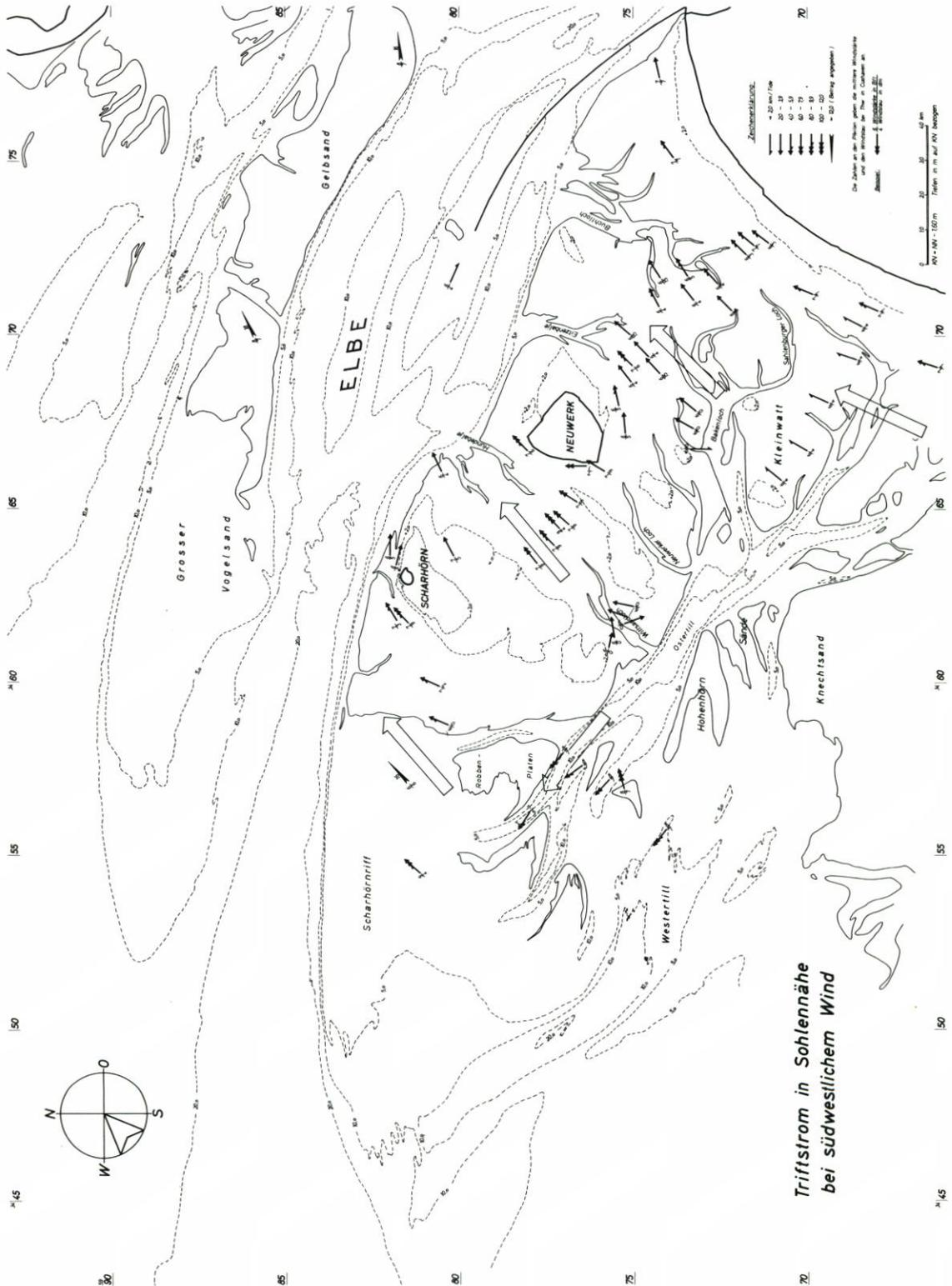


Abb. 31. Tritfstrom in Sohlennähe zwischen Knechtsand und Außenelbe bei südwestlichem Wind (GÖHREN, 1969, mit Ergänzungen)





- 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 auflandigem Wind – Südwest bis Nordwest – ausgeprägt, während die anderen Sektoren keine so eindeutige Gesetzmäßigkeit erkennen lassen.
- 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 Sturmzeiten mit 8 Bft ist praktisch nur noch eine Stromrichtung vorhanden.
- 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 Windstaugefälle bei auflandigem Wind und durch die Randbedingungen (Küstenverlauf) vorgegeben wird. Die Resultate der drei Profile bestätigen dies grundsätzlich. Die „Schwellen“ liegen jedoch unterschiedlich:
  - Eine ausgeprägte Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit im Watt wird nur im Profil Norderney deutlich, dann aber schon ab Stärke 4 Bft; die übrigen Wattstationen zeigen geringe Zunahme etwa ab 4 bis 6 Bft.
  - Der Windeinfluß auf die Stromrichtungen beginnt etwa bei 5 Bft, im Profil Norderney aber wiederum bei 4 Bft.

Die Profilmessungen ergänzen das bisherige Triftstrombild, das ausführlich dargestellt bisher nur für das Elbmündungsgebiet vorlag (Abb. 31 bis 33), wobei Rest- und Triftströme allerdings in km/Tide angegeben sind und die vorliegende Arbeit nur die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen mit ihrer Abhängigkeit von den Windverhältnissen analysiert.

Die Umsetzung dieser Erkenntnisse auf das morphologische Geschehen in unserem Küstenvorfeld wäre der nächste Schritt. Zwar wurde verschiedentlich mit dem Reststrom etwa gleichgerichtete Sandbewegung nachgewiesen, aber es sollte in Zukunft den Versuch lohnen, die Strömungsverhältnisse bei morphologischen Analysen auch quantitativ zu verknüpfen.

## 5. S c h l u ß b e m e r k u n g

Diese Abhandlung bildet den Abschluß des KFKI-Forschungsvorhabens „Strömungsmessungen“, das im Jahre 1974 konzipiert wurde. Die Ergebnisse zeigen, daß innerhalb und außerhalb des Forschungsvorhabens seither in erheblichem Umfang weitergehende Erkenntnisse hinsichtlich des Strömungsgeschehens in den Küstengewässern der Deutschen Bucht gewonnen worden sind. Dieser Wissensstand ist durch die Langzeitstrommessungen erhärtet und auch erweitert worden.

Hieraus ergibt sich der Anlaß, über die Diskussion der Ergebnisse hinaus grundsätzliche Überlegungen für zukünftige Strömungsuntersuchungen anzustellen. Dazu ist festzuhalten, daß mittlerweile über die allgemeinen Strömungsverhältnisse im deutschen Nordseeküstengebiet ein schlüssiges Gesamtbild vorliegt, das allerdings stets hinsichtlich regionaler Besonderheiten weiterer Ergänzungen bedarf.

Großräumige Strömungsmessungen, wie sie in diesem KFKI-Forschungsvorhaben betrieben wurden, können in Zukunft im gleichen Maße wie bisher erforderlich sein. Sofern sich die Tideverhältnisse weiter so entwickeln, wie es die Scheitelwasserstände in den letzten

Jahrzehnten andeuten, werden solche Untersuchungen zu den Strömungsverhältnissen im deutschen Nordseeküstenbereich hinsichtlich großräumiger Tideveränderungen durchzuführen sein, um Schlüsse auf morphologische Veränderungen zu ermöglichen. Denn mit den Wasserständen ändern sich die Strömungen und das Seegangsklima und damit auch die Topographie.

In diesem Zusammenhang sei auf neuere Untersuchungen zur amphidromischen Bewegung in der südöstlichen Nordsee hingewiesen, die allein auf der Basis von Wasserstandsanalysen vorgenommen wurden (SIEFERT und LASSEN, 1985). Die dort gegebenen Schlussfolgerungen über die Wirkung der Amphidromie in Küstennähe sollten durch detaillierte Strömungsanalysen ergänzt werden. Dabei stellt sich generell die Frage, ob die Amphidromie eigentlich ausreichend untersucht ist und ob mögliche Änderungen erkannt werden können.

Aufbauend und eingebettet in das Gesamtbild des Strömungsgeschehens sind zukünftig auch weiterhin konventionelle, zweidimensional ausgelegte Strommessungen, insbesondere noch für folgende Gegebenheiten, sinnvoll und nutzbringend:

- in morphologisch instabilen Gebieten,
- für die Planung baulicher Eingriffe,
- zur Erfassung der Strömungsverhältnisse bei Sturmfluten in begrenzten Gebieten und
- zur Schaffung verbesserter Grundlagen und Kontrollmöglichkeiten für hydraulische und mathematische Modelle.

Eine weitere Fragestellung, die in Zukunft stärker als bisher durch Messungen in der Natur zu ergründen sein wird, ist die der Vertikalstruktur von Strömungen. Diese Problematik stellt sich insbesondere dort, wo Wasserkörper mit unterschiedlichen Salzgehalten aufeinander treffen: in Ästuaren und in Wattgebieten mit erheblichem Süß- oder Brackwasserzutritt. Mit Hilfe derartiger Untersuchungen wird es zudem möglich sein, vertiefte Einblicke in das gesamte Ausbreitungsverhalten von Nährstoffen und Schadstoffen zu gewinnen. Zugleich ist auch auf diesem Gebiet angezeigt, mögliche großräumige Tideänderungen mit ihrem Einfluß auf die Dichteströmungen zu erfassen.

## 6. Schriftenverzeichnis

- DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT: Die Strömungen in der Deutschen Bucht. Hamburg, 1983.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Gegenläufige Restströmung an flachen Gezeitenmeerküsten. Die Küste, H. 21, 1971.
- GÖHREN, H.: Strombeobachtungen an Langzeit-Meßstationen. Die Küste, H. 25, 1974 a.
- GÖHREN, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamb. Küstenf., H. 29, 1974 b.
- KOCH, M. u. LUCK, G.: Untersuchungen zur Erfassung der Strömungsverhältnisse auf den östlichen Weserwatten. Jber. 1972 der FSIK Norderney, Bd. 24, 1973.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Untersuchung kurzfristiger morphologisch-hydrologischer Wechselwirkungen in den Seegaten zwischen Norderney und Spiekeroog. Arbeiten aus der Forschungsstelle Norderney, Nr. 7, 1977.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, D. H.: Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. Jber. 1977 der FSIK Norderney, Bd. 29, 1978.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Strömungsmessungen im Bereich der Wattwasserscheiden von Norderney und Baltrum sowie im Seegat Wichter Ee. Jber. 1979 der FSIK Norderney, Bd. 31, 1980.

- KÖRITZ, D.: Quantitative Untersuchung der Wasservertriftung über das Juister Watt. Jber. 1954 der FSIK Norderney, Bd. 6, 1955.
- NIEMEYER, H. D.: Der Verlauf der Sturmzeiten vom Januar 1976 im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Jber. 1975 der FSIK Norderney, Bd. 27, 1976.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. Die Küste, H. 35, 1980.
- SIEFERT, W., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H. u. WIELAND, P.: Triftströmungen vor der Küste zwischen Eider und Elbe. Die Küste, H. 38, 1983.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.