

Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems

Von Wulf Niebuhr

Inhalt

A. Ergebnisse der Sinkstoffmessungen	69
1. Mittlerer Sinkstoffgehalt in den Meßprofilen I—VI	69
2. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstoffgehalt und Stromgeschwindigkeit	70
3. Kornzusammensetzungen der Sinkstoffe, getrennt nach Ebbe und Flut	73
4. Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, Kornzusammensetzung	77
B. Geschiebemessungen mit der „Lüderschen“ Sandfalle	80
1. Einige charakteristische Ergebnisse	80
2. Abhängigkeit des Sandtransports auf der Sohle von der Stromgeschwindigkeit, Grenzgeschwindigkeit	82
3. Mittlerer Korndurchmesser und Kornzusammensetzung des Bodensediments im Vergleich zum Sediment der Sandfallen	85
C. Der Sinkstofftransport	87
1. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstofftransport und Stromgeschwindigkeit	87
2. Der Sinkstofftransport in den Meßstellen Y und Z, getrennt nach Korngrößen	88
D. Zusammenfassung der Ergebnisse	91
E. Schriftenverzeichnis	92

Feststellungen über den Sandtransport im Tidegebiet werden dadurch erschwert, daß der Strom infolge der Gezeitenbewegung in regelmäßigem Wechsel einmal stromauf und dann wieder stromab verläuft. Eine Sandablagerung an irgendeiner Stelle des Stroms ist somit stets das resultierende Ergebnis beider Bewegungen. Eine weitere Erschwerung besteht in der mit Annäherung an die Brackwasserzone wachsenden Zunahme von feinsten Sinkstoffen. Werden unter dem Sammelbegriff „Sinkstoffe“ sämtliche im Wasser befindlichen festen Bestandteile verstanden, so umfassen diese die feinsten Bestandteile (Schluff) sowohl als auch die gröberen bis zum Feinsand. Während die Feinsande ($\geq 0,05$ mm) verhältnismäßig schnell zu Boden sinken und jedesmal in den Kenterzeiten bei Hochwasser und Niedrigwasser zum überwiegenden Teil sedimentieren, halten sich die feinsten Sinkstoffe ($\leq 0,02$ mm) längere Zeit schwebend im Wasser. Ihre Sinkgeschwindigkeit ist so klein, daß sie während der Stromkenterung nur, soweit sie sich in Bodennähe befinden, zur Ablagerung kommen können, es sei denn, daß besondere physikalisch-chemische Erscheinungen (Koagulation) das Absinken bewirken. Die dazwischen liegenden Korngrößen ($> 0,02$ mm, $< 0,05$ mm) werden mehr oder weniger zur Ablagerung kommen. Die Grenzen sind hierbei fließend und von den örtlichen Verhältnissen, insbesondere der Dauer der Stillwasserzeiten abhängig.

Abbildung 2 gibt die Fallgeschwindigkeit von kugelförmigen Teilchen ($\gamma = 2,65$) im Wasser bei 15° C in cm/s abhängig vom Durchmesser wieder. Bei einer angenommenen Kenterzeit von im Mittel 30' würde ein Sandkorn mit einem Durchmesser von 0,1 mm: 12,6 m absinken, mit einem Durchmesser von 0,05 mm: 3,5 m und mit einem Durchmesser von 0,02 mm nur noch 0,54 m, das heißt in einem etwa 10 m tiefen Tidestrom wird während der Kenterung nur der Feinsand ($\geq 0,1$ mm) zu 100 % ausfallen, der Mehlsand (0,05—0,1 mm) zu mehr als 80 %, der Schluff ($\leq 0,02$ mm) dagegen etwa nur zu 2,0 %. Um einen Einblick in die Sinkstoffbewegung

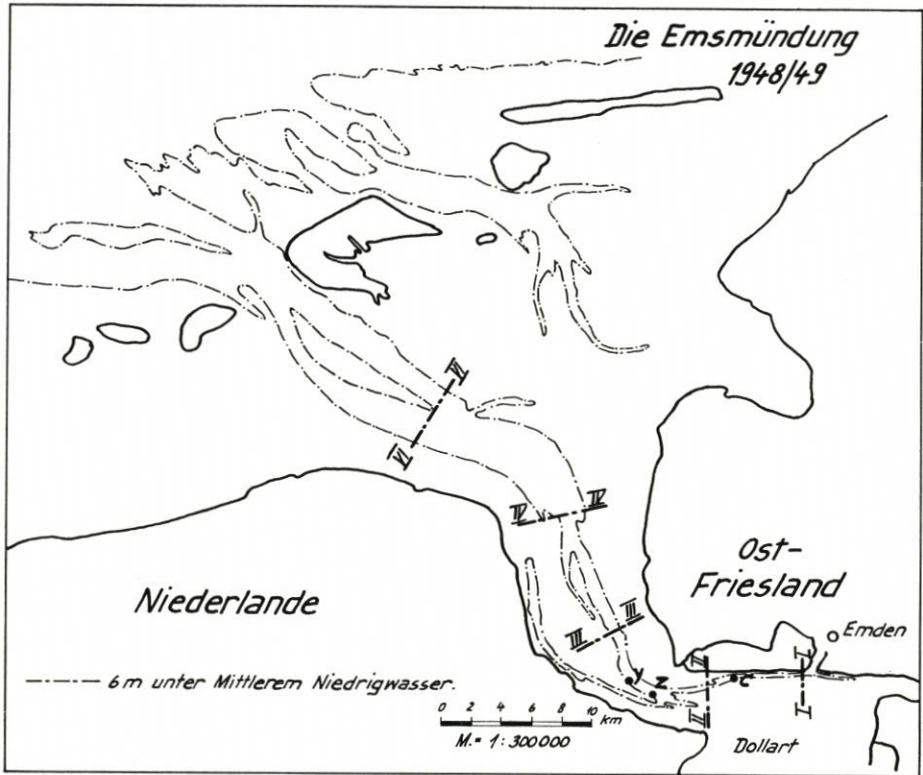


Abb. 1. Das Untersuchungsgebiet

zu gewinnen, genügt es somit nicht, den Sinkstoffgehalt nur der Menge nach zu bestimmen, sondern parallel hiermit müssen auch Kornanalysen der Sinkstoffproben durchgeführt werden.

Die Entnahme der Sinkstoffe erfolgte zum Teil mit einem vertikalen, überwiegend jedoch

mit einem horizontalen Wasserschöpfer [nach WOHLBERG (5)], der einen Inhalt von 1000 ccm besitzt und eine Probenentnahme bis etwa 0,10 m über Sohle bei ruhigem Wetter gestattet. Bei unruhiger See konnte nur bis 0,20 bzw. 0,50 m über Grund gemessen werden. Die Vorgänge unmittelbar über der Sohle konnten mit diesem Gerät daher nicht erfaßt werden. Als Ergänzung wurde deshalb für die Sandbewegung auf der Flußsohle außerdem die „Lüdersche“ Sandfalle eingesetzt (2). Über die Konstruktion und

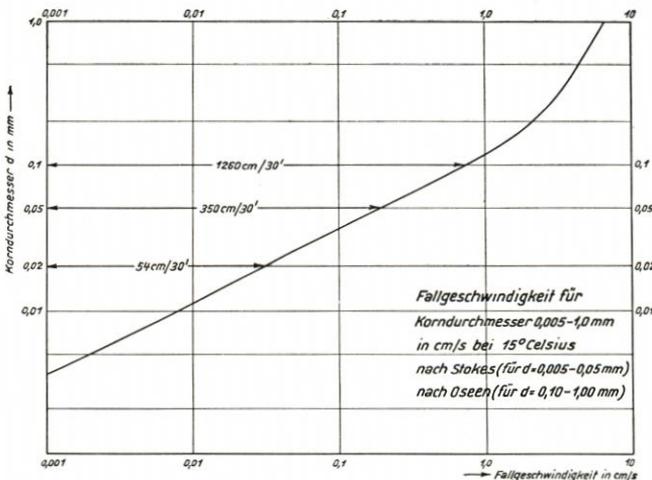


Abb. 2. Diagramm der Fallgeschwindigkeit

die Handhabung der Sandfalle wurde in verschiedenen Veröffentlichungen eingehend geschrieben. Sie darf hier als bekannt vorausgesetzt werden.

A. Ergebnisse der Sinkstoffmessungen

1. Mittlerer Sinkstoffgehalt in den Meßprofilen I—VI (Zahlentafel 1)

Sinkstoffproben wurden in den Meßprofilen I bis VI sowie an Zwischenpunkten in den Jahren 1948 und 1949 in großer Zahl entnommen. Die Entnahmen fanden in drei bis acht Tiefenstufen und in Zeitabständen von je 20' statt. Sie wurden grundsätzlich über eine ganze Tide ausgedehnt. In einigen Meßprofilen wurde an ein und derselben Stelle bis zu sieben Tage hintereinander (siebentägige Ungleichheit) gemessen, um Durchschnittswerte zu erhalten. Gleichzeitig wurden jeweils die Stromgeschwindigkeiten in drei bis fünf Tiefenstufen gemessen.

Von dem vorliegenden, umfangreichen Material seien hier nur die wesentlichen Ergebnisse mitgeteilt. Der mittlere Sinkstoffgehalt während der Flut bzw. Ebbe in den einzelnen Meßstellen ist in Zahlentafel 1 wiedergegeben.

Zahlentafel 1
Mittlerer Sinkstoffgehalt¹ in den Meßprofilen I bis VI in mg/l

Messung		oben	Mitte	unten	ve) vf)	in cm/s	Anzahl der Meßtage
I/101 (r)	E	85	143	445	61		4
	F	55	110	420	71		4
II/101 (r)	E	112	235	538	78		6
	F	102	218	440	58		6
II/102 (l)	E	90	147	313	60		7
	F	122	201	420	63		7
III/101 (r)	E	97	. 148	(167)	77		6
	F	57	. 170	202	64		6
III/102 (l)	E	60	. 103	187	62		7
	F	49	. 103	176	58		7
IV/103	E	31	. 123	223	62		2
	F	33	. 71	154	47		2
IV/105	E	30	. 85	128	63		6
	F	19	. 93	118	71		6
IV/102	E	19	. 131	187	49		1
	F	8	. 65	144	35		1
VI/2 : 6	E	(115)?	114	163	66		2
	F	44	65	154	69		2
VI/3 : 7	E	40	110	228	72		2
	F	35	77	120	64		2

¹ Mittel aus 1 bis 7 Tiden.

Bemerkungen:

E = Ebbmessung
F = Flutmessung
. = 1 m über Grund

r = rechte Stromseite
l = linke Stromseite
ve = mittlere Stromgeschwindigkeit bei Ebbe
vf = mittlere Stromgeschwindigkeit bei Flut

Mittlere Geschwindigkeitsdiagramme
in den Meßstellen II/101, 102 u. III/101, 102

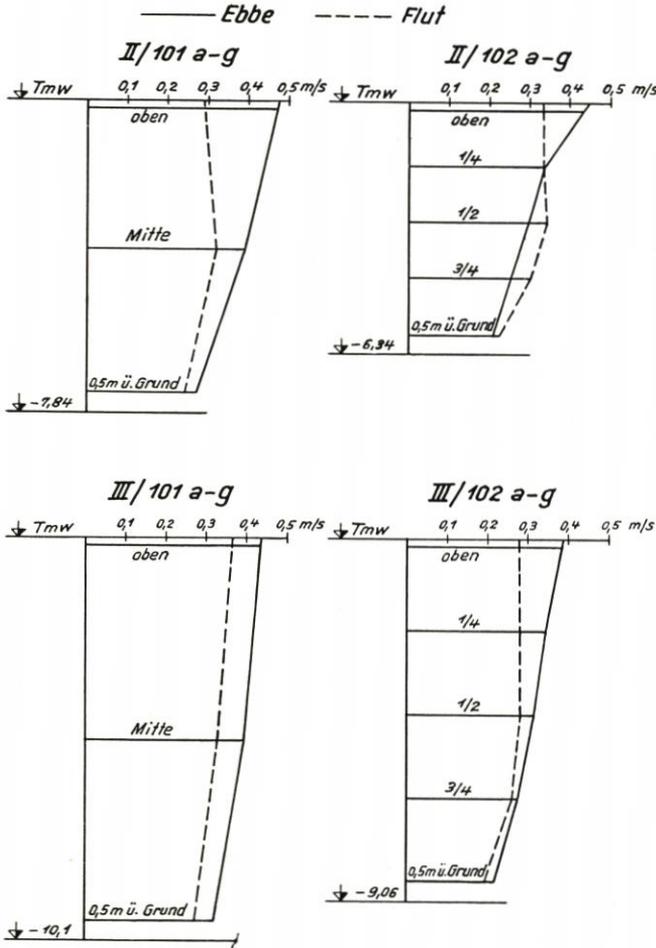


Abb. 3

Die Aufstellung zeigt eine bedeutende Zunahme des Sinkstoffgehalts von oben nach unten, eine Erscheinung, die auch im Sylter Wattenmeer festgestellt wurde [WOHLENBERG (6)]. Aber auch mit der Annäherung an die Brackwasserzone (Profil I und II) steigt der Sinkstoffgehalt an. Unten (etwa 0,20 m über Grund) nimmt der Sinkstoffgehalt von im Mittel 166 mg/l in VI bis auf 430 mg/l in II zu, oben von im Mittel 40 mg/l in VI bis auf 107 mg/l in II. Das Verhältnis vom mittleren Sinkstoffgehalt bei Ebbe zum mittleren Sinkstoffgehalt bei Flut ist unterschiedlich. Im allgemeinen zeigt sich in der Aufstellung dort der höhere Sinkstoffgehalt, wo auch die höhere mittlere Stromgeschwindigkeit gemessen wurde. Das heißt je nachdem ob Flutstrom oder Ebbstrom überwiegt, ergibt sich auch für den Flutstrom bzw. Ebbstrom der höhere Sinkstoffgehalt. Eine gewisse Abhängigkeit zwischen Sinkstoffgehalt und Stromgeschwindigkeit scheint hiernach zu bestehen. Eine eindeutige Beziehung läßt sich jedoch, jedenfalls aus der vorliegenden Aufstellung, nicht ableiten.

2. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstoffgehalt und Stromgeschwindigkeit (Zahlentafel 2)

Zahlentafel 2 enthält die Ergebnisse von Sinkstoffmessungen im Jahre 1948 an verschiedenen Tagen in Meßprofil II getrennt nach Ebbe und Flut, sowie nach rechter und linker Stromseite. Der Sinkstoffgehalt an Grunde an den verschiedenen Meßtagen steht mit der Stromgeschwindigkeit in einem gewissen Zusammenhang. Einer höheren Stromgeschwindigkeit entspricht im allgemeinen auch ein höherer Sinkstoffgehalt. Es ergibt sich weiter, daß auf der rechten Stromseite der Ebbstrom überwiegt ($v_e > v_f$), während auf der linken Seite der Flutstrom vorherrscht ($v_f > v_e$). Auffällig ist hierbei, daß unten bei etwa gleicher mittlerer Geschwindigkeit der Sinkstoffgehalt bei Flut im allgemeinen höher ist als derjenige bei Ebbe. Hieraus ist zu entnehmen, daß der Flutstrom bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit eine höhere Sohlengeschwin-

digkeit und damit auch größere Schleppkraft entwickelt als der Ebbstrom. Die Formen der Geschwindigkeitsdiagramme in der Lotrechten (vgl. Abbildung 3) bestätigen dies.

Für die Tiefenstufen Mitte und Oben läßt sich dagegen eine entsprechende Beziehung zwischen Stromgeschwindigkeit und Sinkstoffgehalt nicht feststellen. Der Sinkstoffgehalt ist mit Ausnahme von II/6 sowohl auf der rechten als auch auf der linken Stromseite bei Flut zum Teil beträchtlich höher als bei Ebbe, unabhängig von der jeweils vorherrschenden Stromgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Sinkstoffmessungen in Profil I wurden auf Abbildung 4 in Abhängigkeit von der mittleren Stromgeschwindigkeit graphisch aufgetragen. Die Darstellung zeigt wieder unten ($\approx 0,20$ über Grund) eine gewisse Abhängigkeit zwischen Sinkstoffgehalt und Geschwindigkeit, während diese für die Tiefenstufen Mitte und Oben allenfalls für die Flutmessungen noch erkennbar ist. Offenbar wird hier der Einfluß der Stromgeschwindigkeit auf den Sinkstoffgehalt von anderen örtlich bedingten Einflüssen überlagert.

Die Abbildungen 5 bis 7 enthalten weitere Darstellungen des mittleren Sinkstoffgehalts in den Meßprofilen II bis IV aus dem Jahre 1949 in Beziehung zur mittleren Stromgeschwindigkeit. Abbildung 5 gibt die Sinkstoffmessungen in II/101 (= rechte Stromseite) und in II/102 (= linke Stromseite) wieder. Während in II/101 unten und in der Mitte der Sinkstoffgehalt bei Ebbe im Mittel größer ist als bei Flut bei gleichzeitig größerer Geschwindigkeit bei Ebbe, ist oben der Sinkstoffgehalt ausgeglichen. Auf der linken Stromseite (II/102) ist dagegen bei annähernd gleicher mittlerer Geschwindigkeit der Sinkstoffgehalt bei Ebbe im Mittel kleiner als bei Flut.

In den Meßprofilen III und IV (Abbildung 6) ist ein Unterschied im Sinkstoffgehalt Ebbe zu Flut in gleichem Maße nicht mehr erkennbar.

Abbildung 7 zeigt den Sinkstoffgehalt in der Meßstelle C a) abhängig von der mittleren

Beziehung zwischen mittl. Sinkstoffgehalt und mittl. Stromgeschwindigkeit [v]

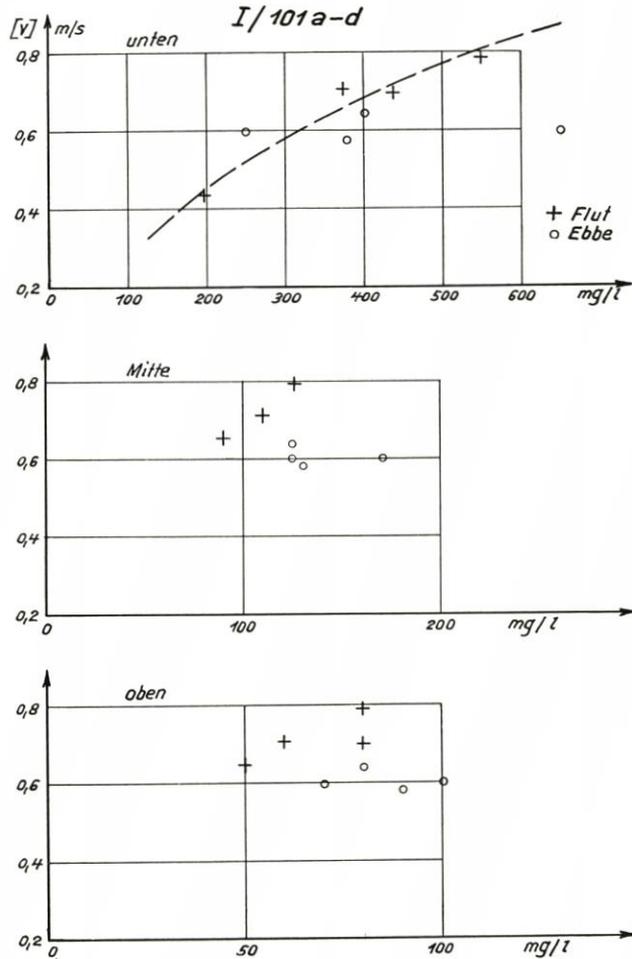


Abb. 4

Zahlentafel 2
Mittlerer Sinkstoffgehalt¹ an verschiedenen Meßtagen in II in mg/l

Messung		oben	Mitte	unten	ve vf	in cm/s	
II/ 2	E	83	172	555		85	
	F	117	178	504		73	
II/ 6	E	75	220	347		68	
	F	65	175	314		49	rechte Stromseite
II/10	E	80	199	606		79	
	F	183	262	488		62	
II/17	E	96	242	707		82	
	F	235	319	629		64	
II/ 3	E	59	91	134		60	
	F	163	282	606		71	
II/14	E	67	127	272		73	linke Stromseite
	F	96	199	477		93	
II/18	E	67	126	294		67	
	F	101	224	609		75	

¹ Mittelwert einer Tide.

Bemerkungen: E = Ebbmessung F = Flutmessung

Zahlentafel 3
Kornzusammensetzung der Sinkstoffe
Tide-Mittel aus 3 bis 7 Tiefenstufen getrennt nach Flut und Ebbe in %

Messung		Korndurchmesser m/m				ve vf/cm/s	Bemerkung
		< 0,02	0,02—0,05	0,05—0,1	> 0,1		
I/101 d ¹	F	51,9	21,8	21,0	5,3	65	rechte Stromseite
	E	48,7	30,6	11,1	9,6	60	
II/101 ¹	F	48,9	23,7	20,7	6,7	58	rechte Stromseite
	E	45,5	21,9	23,8	8,8	75	Mittel aus 101 a, c, e
II/102 ¹	F	46,6	21,4	12,9	19,1	62	linke Stromseite
	E	61,6	17,2	4,3	16,9	61	Mittel aus b, d, f,
III/101 ¹	F	41,9	24,0	11,1	23,0	62	rechte Stromseite
	E	47,4	23,1	12,0	17,5	80	Mittel aus 101 b, d
III/102 ²	F	31,6	15,2	11,3	41,9	67	linke Stromseite
	E	36,3	18,3	10,5	34,9	65	Mittel aus e und f
IV/103 d ²	F	21,3	9,7	6,3	62,7	48	rechte Stromseite
	E	17,3	15,7	7,7	59,3	58	
IV/105 c ²	F	16,6	11,7	9,8	61,9	65	linke Stromseite
	E	14,2	24,0	11,9	43,9	63	
VI/101 b ²	F	21,0	12,6	4,8	61,6	51	rechte Stromseite
	E	19,8	9,6	3,5	67,1	49	
VI/102 b ³	F	9,4	6,3	4,2	80,1	62	linke Stromseite
	E	13,7	13,4	4,1	68,8	50	

¹ 3 Stufen: 0,20; Mitte; oben.

² 4 Stufen: 0,20; 0,50; 1,0 m; oben.

³ 7 Stufen: 0,10; 0,20; 0,30; 0,50; 1,0 m; Mitte; oben.

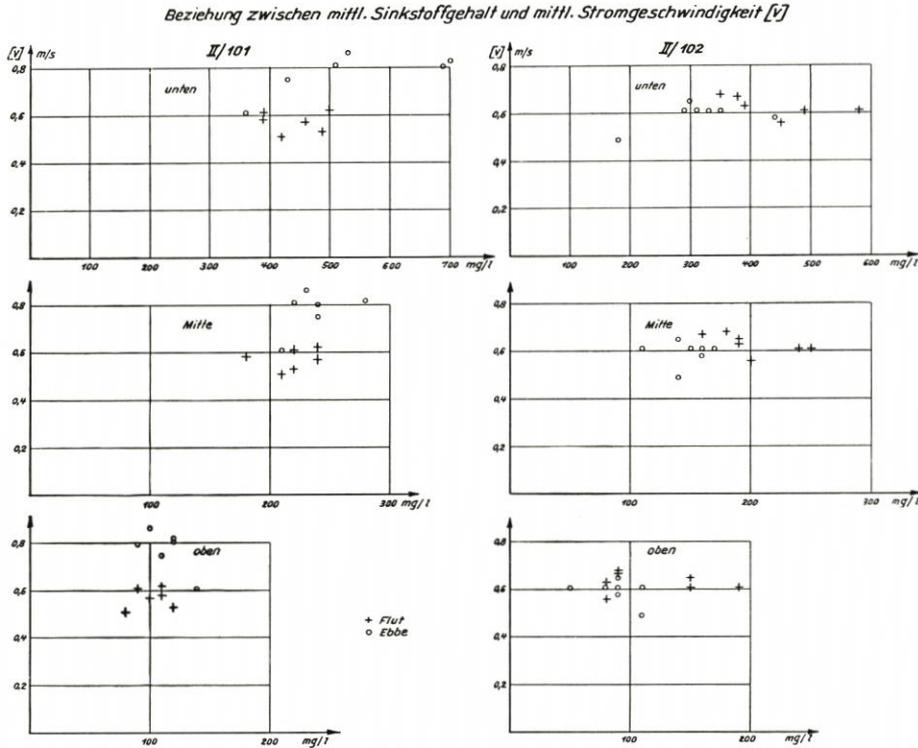


Abb. 5

Grundgeschwindigkeit [vg], b) abhängig von der mittleren Profilgeschwindigkeit [v]. Die Darstellung zeigt in Grundnähe (0,20—0,50 m über Grund) eine eindeutige Beziehung zwischen Sinkstoffgehalt und Geschwindigkeit.

3. Kornzusammensetzungen der Sinkstoffe, getrennt nach Ebbe und Flut (Zahlentafel 3)

Eingangs wurde bereits auf den maßgeblichen Einfluß des Korndurchmessers auf das Verhalten des Sinkstoffs im Verlauf der Tide hingewiesen. Für verschiedene Meßstellen wurde deshalb die Kornzusammensetzung der entnommenen Sinkstoffe getrennt nach Ebbe und Flut ermittelt. Die Zahlentafel 3 gibt das Ergebnis der Kornanalysen getrennt nach vier Fraktionen in Prozent der Gesamtmenge (Mittelwerte) wieder. Die Aufstellung zeigt überwiegend einen prozentual höheren Gehalt an Fein- und Mehlsand ($\geq 0,05$ mm) bei Flut als bei Ebbe, obwohl die mittlere Geschwindigkeit bei Ebbe zum Teil höher liegt als bei Flut (vgl. Messung III/101 und IV/103 d). Nur die Messung II/101 (rechte Stromseite) mit einer stark überwiegender Ebbe- geschwindigkeit $v_e = 75$ cm/s gegenüber $v_f = 58$ cm/s ergibt einen höheren Sandgehalt bei Ebbe, desgleichen die Messung VI/101b. Bei der letzten Messung sind die Geschwindigkeiten v_e und v_f nur wenig voneinander verschieden, aber auch der Unterschied im Sandgehalt ist relativ gering. Die bereits gemachte Feststellung, daß der Flutstrom eine relativ stärkere Räumkraft zu besitzen scheint als die Ebbe, wird auch hier wieder bestätigt. Ferner erkennt man, daß seewärts der Sandgehalt prozentual bedeutend zunimmt. Vergleichbar sind hierbei die Messungen mit den gleichen Tiefenstufen, so die Messungen I/101 bis III/101 und die Messungen III/102 bis

Beziehung zwischen mittl. Sinkstoffgehalt
und mittl. Stromgeschwindigkeit [v]

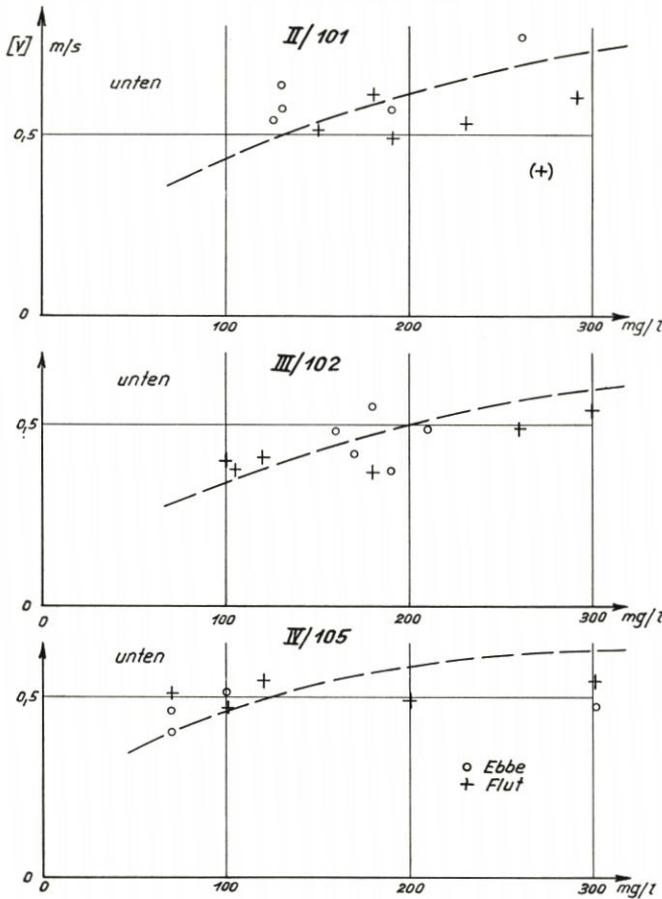


Abb. 6

VI/101b. Der Feinsandgehalt ($> 0,1$ mm) steigt bei den ersteren bei Flut von 5,3 auf 23 % und bei Ebbe von 9,6 auf 17,5 %, bei den letzteren bei Flut von 41,9 auf 61,6 % (in IV/103d) und bei Ebbe von 34,9 auf 67,1 %. Der besonders hohe Sandgehalt (in VI/102b) ist auf die größere Anzahl der Stufen in Nähe der Flußsohle zurückzuführen, die auch einen entsprechend höheren Gehalt an Sand ergeben muß.

Die jeweils in den einzelnen Meßstellen anfallenden Anteile an Fein- und Mehlsand ($\geq 0,05$ mm) sind, getrennt nach Flut und Ebbe und getrennt nach den Stromseiten, unten aufgeführt.

Auf der rechten Stromseite überwiegt der prozentuale Anteil an Fein- und Mehlsand bei Ebbe nur in II/101 (starkes Überwiegen der Ebbegeschwindigkeit v_e) und VI, im übrigen überwiegt der Sandanteil bei Flut. Auf der linken Stromseite dagegen überwiegt eindeutig der Fein- und Mehlsandanteil bei Flut denjenigen bei Ebbe in allen Profilen. Wenn aus den prozen-

Anteile an Feinsand ($> 0,05$ mm) in %

a) rechte Stromseite

Meßstelle	I/101 d	II/101	III/101	IV/103 d	VI/101 b
Flut (+)	26,3	27,4	34,1	69,0	66,4
Ebbe (—)	20,7	32,6	29,5	67,0	70,6
Unterschied	+ 5,6	— 5,2	+ 4,6	+ 2,0	— 4,2

b) linke Stromseite

Meßstelle	II/102	III/102	IV/105 c	VI/102 f
Flut (+)	32,0	53,2	71,2	84,3
Ebbe (—)	21,2	45,4	55,8	72,9
Unterschied	+ 10,8	+ 7,8	+ 15,9	+ 11,4

tualen Anteilen auch noch nicht unmittelbar auf die absoluten transportierten Sandmengen geschlossen werden kann, so ergibt die Gegenüberstellung doch schon eine wahrscheinliche Überlegenheit des Flutstroms bezüglich des Sandtransports. Es kann hieraus gefolgert werden, daß in den Profilen II bis VI vermutlich mehr Feinsand stromauf als stromab befördert wird.

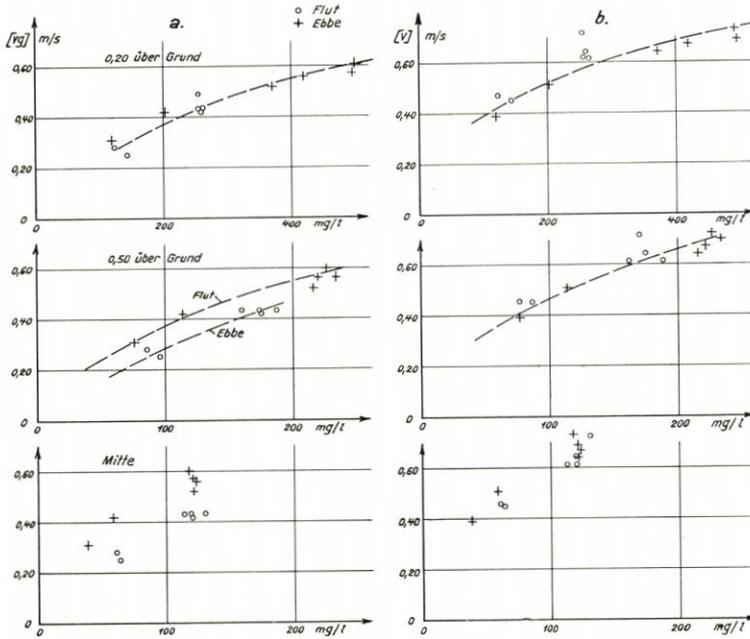


Abb. 7

- Beziehung zwischen mittl. Sinkstoffgehalt und
 a.) mittl. Grundgeschwindigkeit [vg] (= 0,5 m über Grund) und
 b.) mittl. Stromgeschwindigkeit [v], Meßstellen C/101 a—g

Enthielt Zahlentafel 3 den prozentualen Anteil der einzelnen Fraktionen, so ist in Zahlentafel 4 der mittlere Sinkstoffgehalt in mg/l getrennt nach Ebbe und Flut und nach vier Korngrößen für die Profile II und III zusammengestellt. In die letzte Spalte wurde außerdem die mittlere Grundgeschwindigkeit v_g (gemessen 0,5 m über Grund) eingetragen. Die Messungen II/101a und II/101e zeigen in allen Körnungen, die Messung II/101c in der Körnung $> 0,1$ mm größere Sinkstoffmengen bei Ebbe als bei Flut. Für die Sandkomponente ($\geq 0,05$ mm) ist dies zweifellos auf die höhere Grundgeschwindigkeit bei Ebbe (vgl. v_g) zurückzuführen. Bezüglich der Sinkstoffe ($\leq 0,05$ mm) ergibt sich der höhere Gehalt bei Ebbe aus der Lage der Meßstelle am unteren Ende der Brackwasserzone. Das mit Sinkstoffen angereicherte Wasser der Brackwasserzone durchströmt bei Ebbe das Profil. Bemerkenswert ist das Ansteigen der Fein- und Mehlsandmengen mit zunehmender Geschwindigkeit. So nimmt der Feinsandanteil z. B. in II/101 von 8 auf 38 mg/l (Ebbe) bzw. von 8 auf 19 mg/l (Flut) zu, der Mehlsandanteil entsprechend von 30 auf 104 mg/l (Ebbe) bzw. von 25 auf 55 mg/l (Flut), wobei die Messung II/101c mit 75 mg/l allerdings aus dem Rahmen fällt. Die mittleren Geschwindigkeiten steigen dabei bei Ebbe von 0,39 auf 0,60 m/s und bei Flut von 0,33 auf 0,51 m/s. Der mittlere Sandgehalt nimmt hiernach etwa mit der zweiten bis dritten Potenz der Grundgeschwindigkeit zu.

**Beziehung zwischen mittlerem Fein- und Mehlsandgehalt ($> 0,05 \text{ mm}$)
und mittl. Geschwindigkeit (gemessen 0,5 m über Grund)**
(vgl. Zahlentafel 4)

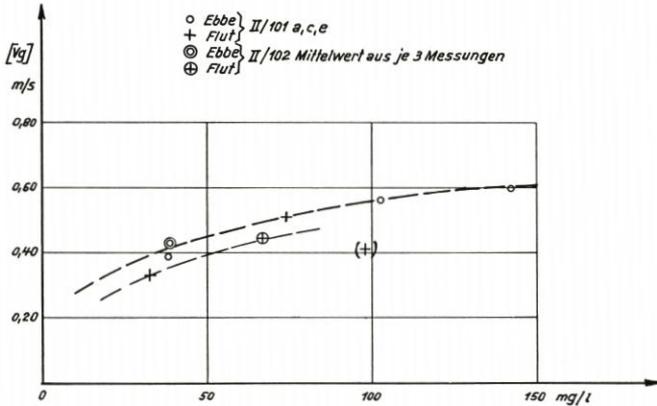


Abb. 8

Geschwindigkeitsunterschiede sind allerdings auch weniger ausgeprägt.

Die Messungen in III zeigen verhältnismäßig geringere Sinkstoffmengen als in II. Die Verringerung der Sinkstoffe ($< 0,05 \text{ mm}$) wird auf die größere Entfernung von der Brackwasserzone, sowie auf den Einfluß des Dollarts zurückzuführen sein. Die im Vergleich zur Geschwindigkeit ebenfalls geringeren Fein- und Mehlsandmengen lassen sich mit der seewärts zunehmenden Korngröße erklären.

Zahlentafel 4
Mittlerer Sinkstoffgehalt¹ getrennt nach Korngrößen
und nach Ebbe und Flut in mg/l

Messung		$< 0,02$	$0,02 - 0,05$	$0,05 - 0,1$	$> 0,1$	[vg] ² cm/s
II/101 a	E	138	55	30	8	39
	F	112	43	25	8	(33)
II/101 c	E	97	49	72	31	56
	F	111	54	75	23	41
II/101 e	E	132	77	104	38	60
	F	124	76	55	19	51
II/102 b	E	167	38	4	7	39
	F	133	38	18	16	38
II/102 d	E	102	33	6	56	(44)
	F	85	36	24	63	45
II/102 f	E	92	29	14	31	46
	F	76	37	43	38	48
III/101 b	E	66	28	10	11	64
	F	63	32	11	30	53
III/101 d	E	40	24	16	27	68
	F	48	32	18	30	41

¹ Tidemittel aus 3 Stufen: 0,20 m; Mitte; oben.

² Mittlere Tidegeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

Der Gehalt an Sinkstoffen ($< 0,02 \text{ mm}$) zeigt dagegen keine solche Abhängigkeit. Die Messung II/101a mit der kleinsten Geschwindigkeit zeigt etwa den gleichen Sinkstoffgehalt wie die Messung II/101e.

Die Messungen II/102b, d und f zeigen für die Körnungen ($> 0,05 \text{ mm}$) bei Flut größere Sinkstoffmengen als bei Ebbe, bei annähernd gleichen Geschwindigkeiten. Nur die feinsten Schwebstoffe ($< 0,02 \text{ mm}$) überwiegen auch hier bei Ebbe. Das Ansteigen der Feinsandmengen mit zunehmender Geschwindigkeit ist in II/102 nicht so eindeutig wie in II/101. Die

In Abbildung 8 wurden die mittleren Fein- und Mehlsandgehalte ($\geq 0,05$ mm) für die Meßstellen in II (6 Messungen) getrennt nach Ebbe und Flut in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit [vg] (0,5 m über Grund) graphisch aufgetragen. Die Zunahme des Sandgehalts mit der Geschwindigkeit ist ersichtlich.

4. Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, Kornzusammensetzung

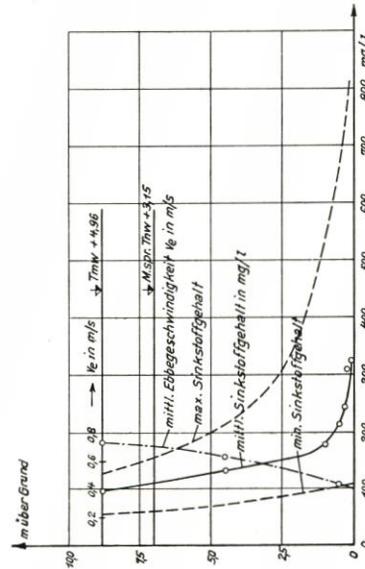
Zur Feststellung der Verteilung der Sinkstoffe in der Lotrechten wurden an einigen Meßstellen Sinkstoffproben in bis zu acht Tiefenstufen entnommen. Die Messungen wurden wieder in Zeitabständen von je 20' ausgeführt und jeweils über eine Flut- bzw. Ebbe-Tide ausgedehnt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Und zwar wurde der mittlere Sinkstoffgehalt während einer Flut- bzw. Ebbe-Tide in den Meßstellen C, Y und Z am Meßtage in mg/l wiedergegeben. Gestrichelt wurden außerdem die Linien der minimalen und maximalen Gehalte, wie sie sich während der Messung ergaben, eingetragen.

Die Sinkstoffgehaltskurven aller drei Meßstellen zeigen eine stetige Zunahme des Sinkstoffgehalts mit der Wassertiefe. Der mittlere Gehalt 10 cm über Grund schwankt dabei zwischen 468 mg/l an der Meßstelle Y (Flutmessung) und 269 mg/l an der Meßstelle Z (Ebbemessung)! An der Oberfläche ergeben sich Werte von 66 mg/l an der Meßstelle Y gegenüber 61 mg/l an der Meßstelle Z und 95 mg/l an der Meßstelle C. Da letztere Meßstelle bereits im Emders Fahrwasser

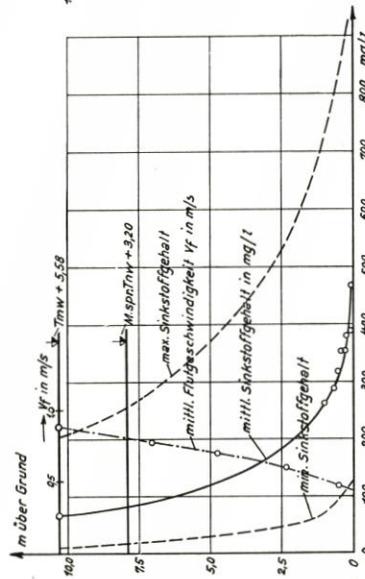
Sinkstoffverteilung in der Lotrechten

(mittl. Sinkstoffgehalt während einer Flut- bzw. Ebbe-tide in mg/l)

c/101g vom 24.9.1949 (Ebbemessung)



y" Messung vom 10.8.1949 (Flutmessung)



z/101 vom 27.7.1949 (Ebbemessung)

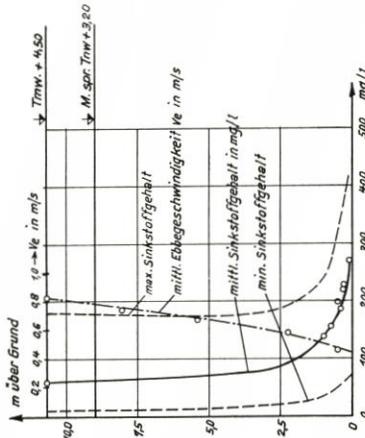
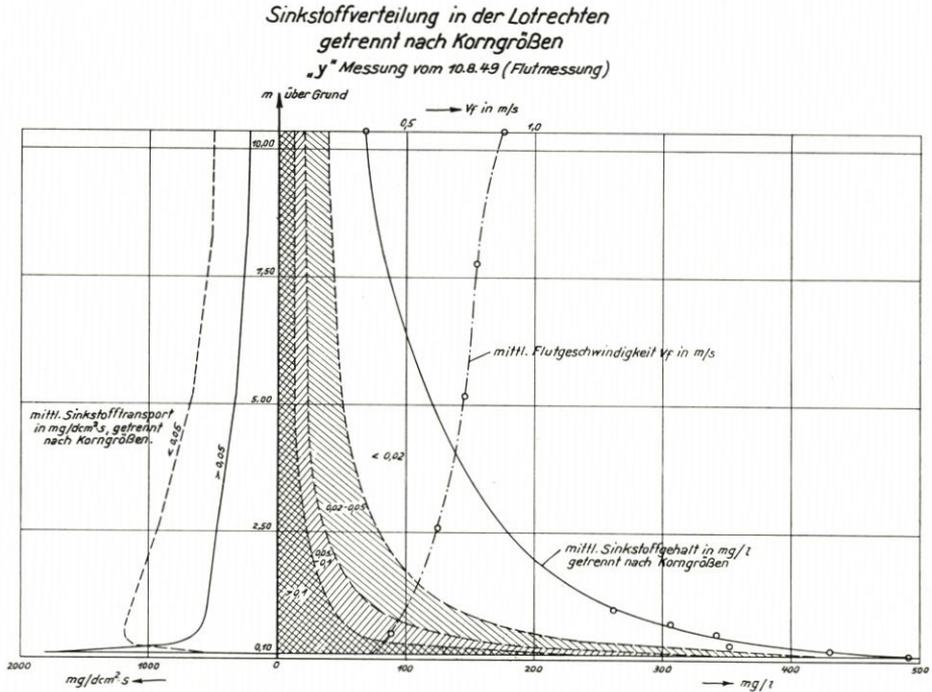


Abb. 9

liegt, und damit außerhalb des Bereichs des Dollarts, macht sich hier der größere Gehalt an Sinkstoffen innerhalb der Brackwasserzone der Ems deutlich bemerkbar. Auch die verhältnismäßig hohen Werte der minimalen Gehalte in C deuten auf einen hohen Gehalt der feinsten Sinkstoffe hin. Im Verlauf der Tide wurden in Y (Flutmessung) 10 cm über Grund bis zu 929 mg/l und an der Oberfläche bis zu 214 mg/l, in Z (Ebbmessung) 10 cm über Grund bis 416 mg/l und an der Oberfläche bis zu 180 mg/l gemessen.



Der höhere Sinkstoffgehalt der Y-Messung ist abgesehen von lokalen und zeitlich bedingten Umständen auch auf die höhere Tide während der Messung — sie lag 0,54 m über MThw — zurückzuführen. Die C-Messung wurde etwa bei MThw und die Z-Messung bei einer um 0,14 m über MThw liegenden Tide ausgeführt.

Um einen Einblick in die Zusammensetzung der in den einzelnen Tiefenstufen transportierten Sinkstoffe zu erhalten, wurden die Sinkstoffproben der „Y“- und „Z“-Messungen nach Tiefenstufen getrennt auf ihre Kornzusammensetzung hin untersucht. Das Ergebnis der Kornanalysen der Y-Messung ist auf Abbildung 10 graphisch aufgetragen.

Der mittlere Gehalt an Feinsand ($> 0,1$ mm) nimmt von 225 mg/l : 10 cm über Grund auf rund 50 mg/l : 1,0 m über Grund stark ab, beträgt aber selbst an der Oberfläche immerhin noch 13 mg/l. Der mittlere Gehalt an Mehlsand (0,05—0,1 mm) nimmt von 115 mg/l : 10 cm über Grund auf 30 mg/l : 1,0 m über Grund und auf 8 mg/l an der Oberfläche ab. Der Sinkstoffgehalt ($< 0,05$ mm) nimmt von 151 mg/l : 10 cm über Grund auf rund 140 mg/l : 0,3 m über Grund zu, um dann bis auf 47 mg/l an der Oberfläche wieder abzunehmen. Der Prozentgehalt der einzelnen Fraktionen beträgt:

Korndurchmesser mm	0,1—0,25	0,05—0,1	0,02—0,05	< 0,02
Oberfläche in ‰	19,3	11,8	27,3	41,6
0,10 m über Grund in ‰	45,8	23,4	13,1	17,7

Während der Feinsandgehalt hiernach von 19,3 ‰ an der Oberfläche auf 45,8 ‰ : 0,10 m über Grund zunimmt, nimmt der Sinkstoffgehalt (< 0,02 mm) von 41 ‰ oben auf 17,70 ‰ :

*Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, getrennt nach Korngrößen
Messung Z/101 vom 27. 7. 1949 (Ebbmessung)*

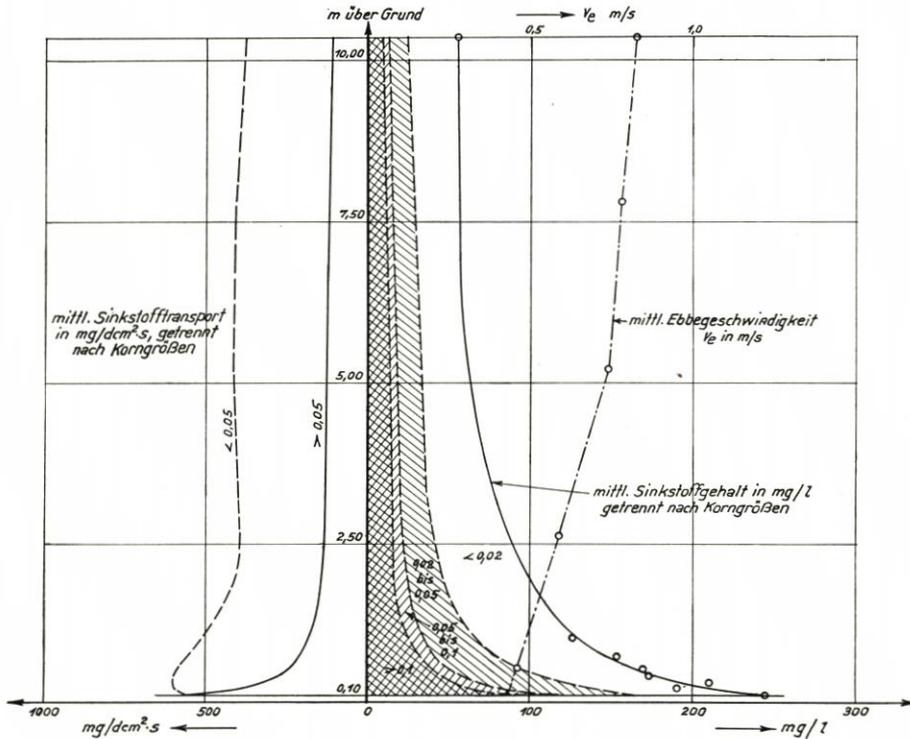


Abb. 11

0,10 m über Grund ab. Die zunehmende Vergrößerung der Sinkstoffe nach unten kommt hier klar zum Ausdruck¹⁾.

Abbildung 11 zeigt in gleicher Weise die Sinkstoffverteilung in der Lotrechten, getrennt nach vier Korngrößen, für die Meßstelle Z 101 (Ebbmessung). Der mittlere Gehalt an Feinsand nimmt von 98 mg/l : 0,10 m über Grund auf 24 mg/l : 1,0 m über Grund bzw. 8 mg/l an der Oberfläche ab. Er ist demnach bedeutend geringer als oben in Y (Flutmessung). Der mittlere Gehalt an Mehlsand ist mit 19 mg/l : 10 cm über Grund, 9 mg/l : 1,0 m über Grund und 4 mg/l

¹⁾ VAN VEEN hat aus einer Anzahl von Messungen im „Het Vlie“, bei denen gleichzeitig in 10, 30, 50 und 70 cm über dem Boden Sinkstoffproben entnommen wurden, das Verhältnis der Sandgehalte in diesen Höhen im Mittel zu 100 : 54 : 34 : 28 gefunden. Aus der Darstellung Abbildung 10 ergeben sich für den Fein- und Mehlsand (> 0,05 mm) entsprechende Verhältniszahlen von 100 : 51 : 37 : 29, also ähnliche Zahlen, wie sie VAN VEEN festgestellt hat.

an der Oberfläche verhältnismäßig gering. Der Sinkstoffgehalt ($< 0,05$ mm) nimmt von 128 mg/l : 10 cm über Grund auf 43 mg/l an der Oberfläche ab. Der Prozentgehalt der einzelnen Fraktionen beträgt:

Korndurchmesser mm	0,1—0,25	0,05—0,1	0,02—0,05	$< 0,02$
Oberfläche in %	15,1	7,0	21,7	56,2
0,10 m über Grund in %	40,0	7,7	16,7	35,6

Auch hier zeigt sich eindeutig die Vergrößerung der Sinkstoffe nach dem Grunde zu. Bemerkenswert erscheint der hohe Anteil an feinsten Sinkstoffen ($< 0,02$ mm) 0,10 m über Grund.

Einen Vergleich der Sandgehalte ($> 0,1$ mm) an der Oberfläche von drei weiteren Meßstellen mit denen der Meßstellen Y und Z gibt die nachfolgende Zusammenstellung:

Mittlerer Sandgehalt an der Oberfläche ($> 0,1$ mm)

Meßstelle	mg/l	Windrichtung und Stärke	Unterschied gegen MThw	Meßdauer
III/101 c	3,0	SW 3/S 3	— 0,19 m	volle Tide
III/101 e	8,5	SW 5/S 2	— 0,05 m	" "
U/101	5,9	—	— 0,08 m	" "
Y	12,7	SW 3	+ 0,54 m	Flutmessung
Z/101	8,0	—	+ 0,14 m	Ebbmessung

Der höhere Sandgehalt bei der Y-Messung wird einerseits auf die um 0,54 m erhöhte Tide zurückzuführen sein — die übrigen Messungen wurden bei Tiden ausgeführt, die bis zu 0,19 m unter MThw lagen —, andererseits wird aber auch der Umstand eine Rolle spielen, daß es sich bei Y um eine reine Flutmessung handelt. Die Zunahme des Sandgehalts an der Oberfläche mit erhöhter Tide ist beachtlich und läßt auf eine zunehmende Turbulenz schließen. Es darf als unzweifelhaft angesehen werden, daß bei Sturmfluten bedeutende Sandmengen bis an die Oberfläche gelangen.

B. Geschiebemessungen mit der „LÜDERSCHEN“ Sandfalle

Die unmittelbar über der Sohle sich abspielenden Vorgänge konnten, wie bereits bemerkt, durch die Sinkstoffentnahme mit den zur Verwendung gekommenen Wasserschöpfern nicht erfaßt werden. Um jedoch einen Einblick in die unmittelbar über der Sohle stattfindende Sandbewegung zu gewinnen, wurden parallel zu den Sinkstoffentnahmen auch Geschiebemessungen mit der Sandfalle durchgeführt. Sie sollten damit das durch die Sinkstoffmessungen bereits gewonnene Bild über den Sandtransport ergänzen. Geschiebemessungen wurden in den Profilen I bis VI durchgeführt. Außerdem fand eine Reihe von Sondermessungen statt. Die Sandfalle wurde hierbei jeweils 5 Minuten lang in etwa 30 Minuten Zeitabstand eingesetzt. Grundsätzlich wurden die Messungen über eine ganze Tide ausgedehnt.

1. Einige charakteristische Ergebnisse

Die Abbildungen 12 a—c zeigen einige charakteristische Meßergebnisse aus den Profilen II, III und IV. Aufgetragen wurden oben die gleichzeitig gemessenen Stromgeschwindigkeiten (gemessen 0,5 m über Grund), unten die Fangergebnisse in $\text{cm}^3/5$ Minuten. Die angegebenen Mengen

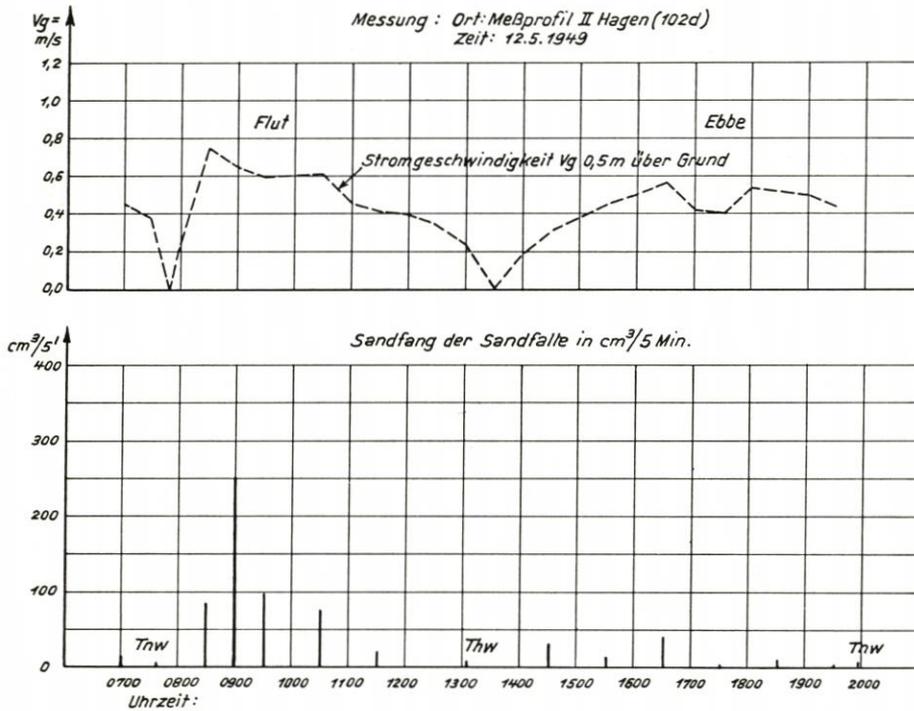


Abb. 12a. Geschiebemessungen mit der Sandfalle im Meßprofil II

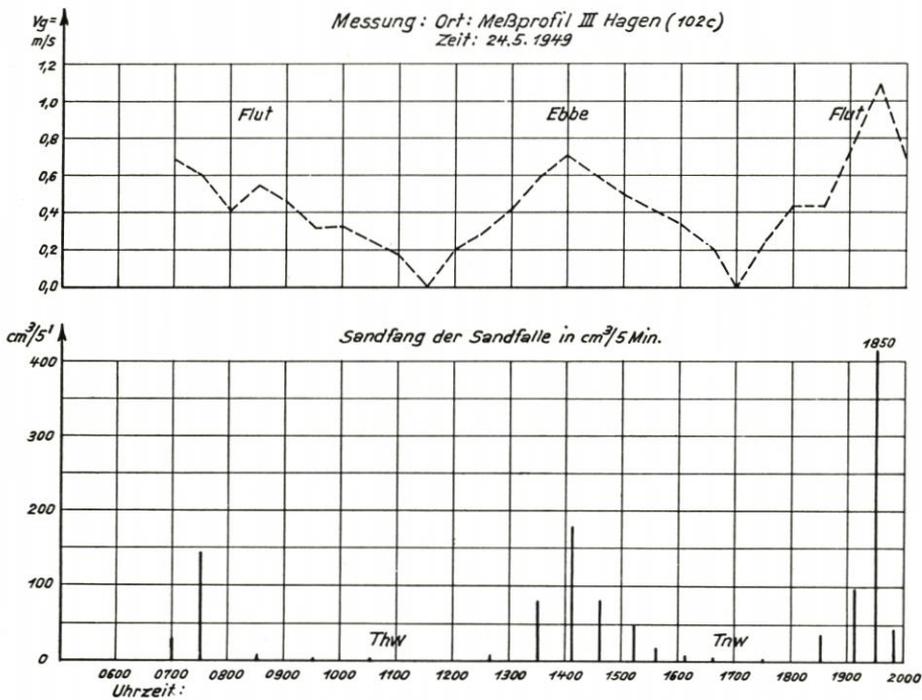


Abb. 12b. Geschiebemessungen mit der Sandfalle im Meßprofil III

(Fangergebnisse) beziehen sich ausschließlich auf Sand, der sich in den für die Mengenbestimmung benutzten Meßgläsern deutlich von dem gleichzeitig mitgefangenen Schlick abgrenzte. Eine Auswertung der Schlickmengen, die im allgemeinen nur gering ($\leq 10 \text{ cm}^3$) waren, ist unterblieben. Sie wäre auch wertlos, da das Wasser innerhalb der Falle ja nicht zur Ruhe kommt. Die mitgeführten feineren Sinkstoffe treten daher größtenteils aus den Austrittsöffnungen der Sandfalle wieder aus. Anders steht es dagegen mit dem Sand. Es kann angenommen werden, daß der Sand mit einem Korndurchmesser $\geq 0,1 \text{ mm}$ im wesentlichen in der Sandfalle tatsächlich zurückgehalten wurde. Vergleichende Kornanalysen zwischen dem jeweils anstehenden Bodensediment und dem Sandfallenmaterial bestätigen dies.

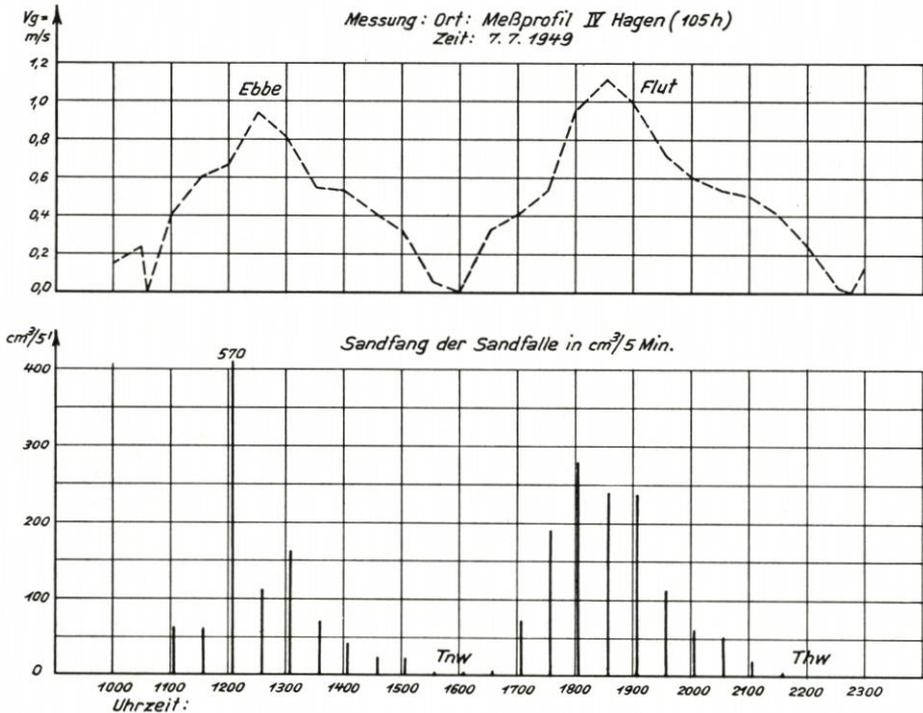


Abb. 12c. Geschiebemessungen mit der Sandfalle im Meßprofil IV

2. Abhängigkeit des Sandtransports auf der Sohle von der Stromgeschwindigkeit, Grenzgeschwindigkeit

Die Abbildungen 13 bis 15 geben die Fangergebnisse in den Meßprofilen II und VI sowie in den Meßstellen Q, N²) und Z, abhängig von der Stromgeschwindigkeit (0,5 m über Grund) wieder. Die Messungen wurden an vier bis sieben aufeinanderfolgenden Tagen, jeweils an ein und derselben Stelle und über eine volle Tide durchgeführt. Die Flut- und Ebbmessungen wurden hierbei durch besondere Signaturen gekennzeichnet. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Flut- und Ebbmessung ist aber nicht erkennbar. Eine weitere Unterscheidung zwischen den Meßergebnissen bei steigendem und fallendem Wasser ist unterblieben. Die große Streuung der Meßergebnisse ließ dies als zwecklos erscheinen. Wenn die Auftragungen auch erhebliche Streuungen zeigen — das trifft insbesondere für die Außengebiete der Ems (Profil VI) zu —, so ist die Zunahme der Sandbewegung mit der Stromgeschwindigkeit doch unverkennbar. Die

²) Die Meßstellen Q und N liegen zwischen den Profilen II und III in der Nähe der Meßstelle Z.

starke Streuung ist auf die Unvollkommenheit des Geräts und die Welligkeit der Sohle (Riffelbildung) zurückzuführen, zum Teil wohl aber auch darauf, daß die Stromgeschwindigkeit nicht an der Entnahmestelle selbst gemessen werden konnte, sondern — bedingt durch die Anordnung der Meßgeräte — in einem Abstand von 5 bis 10 m von der Entnahmestelle entfernt. Außerdem wurde die Stromgeschwindigkeit nicht unmittelbar an der Sohle, sondern etwa 0,5 m über Sohle gemessen. Es kommt hinzu, daß die Sandbewegung wahrscheinlich nicht kontinuierlich sich steigend, sondern, wie aus Modellversuchen bekannt, mehr oder weniger stoßweise vor sich geht. Hierbei entstehen Unregelmäßigkeiten, die nur durch eine genügend große Anzahl von Messungen ausgeglichen werden können. Unter der Voraussetzung, daß die einzelnen Meßergebnisse gleichwertig sind, läßt sich im Wege der Ausgleichsrechnung eine Beziehung zwischen dem Sandfang G_s und der Geschwindigkeit v ableiten. G_s wächst offenbar mit einer Potenz der

Abhängigkeit des Sandfanges (Lüders'sche Sandfalle) von der Stromgeschwindigkeit

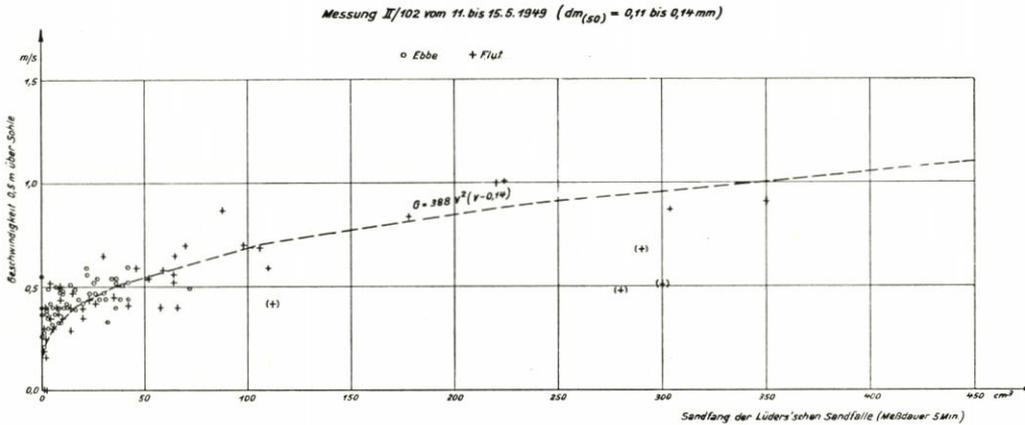


Abb. 13

Stromgeschwindigkeit, die größer als 2 ist. Wird weiter berücksichtigt, daß G_s für $v = v_0$ (Grenzgeschwindigkeit) = 0 werden muß, so kann in erster Annäherung geschrieben werden: $G_s = C \cdot v^\alpha (1 - v_0/v)$, worin C und α zwei Konstante und v_0 die Grenzgeschwindigkeit bedeuten. Für die Meßstelle II/102 (Abb. 13) wurden die Meßergebnisse unter Ausschaltung der offensichtlich herausfallenden Werte (eingeklammert) entsprechend ausgewertet. Mit $\alpha = 3$ (angenommen) errechneten sich die übrigen Konstanten — nach der Methode der kleinsten Quadrate — zu: $C = 388$ und $v_0 = 0,14$ m/s, wobei sich G_s in $\text{cm}^3/5$ Minuten ergibt. Die entsprechende Ausgleichskurve wurde in Abbildung 13 eingetragen.

Dieselbe Kurve wurde gleichfalls in die Abbildungen 14 und 15 eingetragen. In der Meßstelle VI (Abb. 14) liegen die Meßergebnisse zum größeren Teil darüber, d. h. die Geschiebemengen sind im Mittel kleiner als der eingezeichneten Schwerlinie entsprechen würde. Mit stromab zunehmendem Korndurchmesser nimmt der Geschiebetrieb entsprechend ab. Im Gebiet der Messungen Q/101, N/102 und Z 102 (Abb. 15) liegen offenbar besondere Verhältnisse vor. Die Geschiebemengen sind bedeutend größer als in II. Die Messungen wurden auf einem besonders starken Umlagerungen unterworfenen Gebiet der Mittelplate (Fein- und Mehlsand) durchgeführt.

Die Grenzgeschwindigkeit v_0 ist in erster Linie von den Eigenschaften des Geschiebes, wie Korndurchmesser, Kornform, spezifischem Gewicht, Schlickgehalt, ferner von der jeweils herrschenden Turbulenz, außerdem aber auch von der Temperatur und Dichte des Wassers abhängig. Bei Mischsedimenten, mit denen man es meistens in mehr oder minder großem Umfang

zu tun hat, ist v_0 veränderlich. Die Grenzgeschwindigkeit wird in diesem Fall auf den maßgebenden Korndurchmesser (d) bezogen, der von verschiedenen Verfassern verschieden definiert wird. MEYER-PETER setzt z. B. als Wert für (d) den Durchmesser der Siebmaschen an, die 35 0/0 des Sandes durchlassen. Andere nehmen hierfür den mittleren Durchmesser dm (50 0/0).

Abhängigkeit des Sandfanges (Lüders'sche Sandfalle) von der Stromgeschwindigkeit

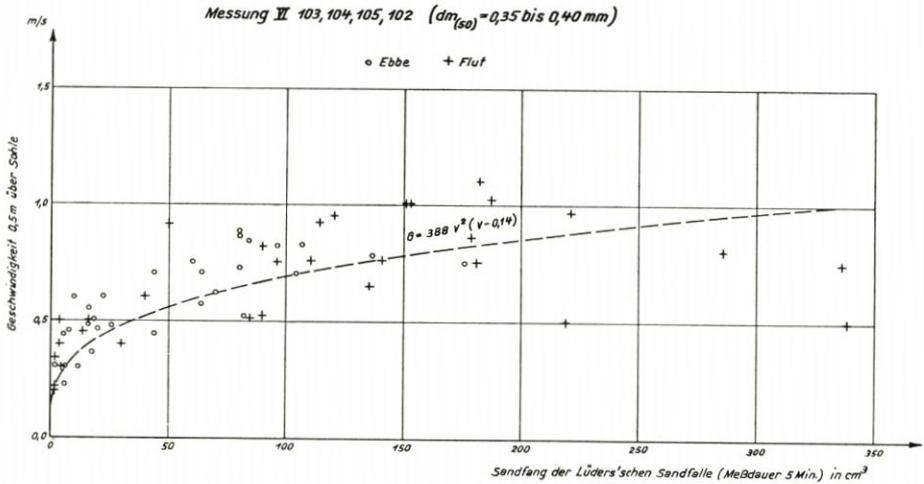


Abb. 14

Abhängigkeit des Sandfanges (Lüders'sche Sandfalle) von der Stromgeschwindigkeit

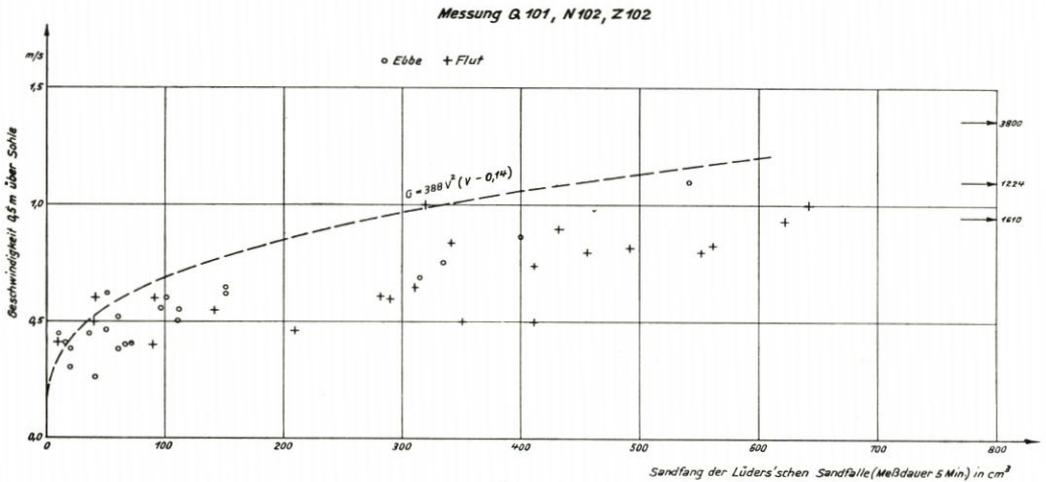


Abb. 15

VAN VEEN gibt in grober Annäherung für reinen Sand von 0,50 mm Korndurchmesser Grenzgeschwindigkeiten von 30 bis 50 cm/s an, wobei die Geschwindigkeit 15 cm über Boden gemessen wurde. Bei dem feineren Sediment der Ems ist die Grenzgeschwindigkeit kleiner. Sie beträgt bei einem mittleren Korndurchmesser des bewegten Geschiebes dm (50 0/0) = 0,11 bis 0,14 mm etwa 0,14 m/s (0,50 m über Grund) und steigt bei einem mittleren dm (50 0/0) = 0,35 bis 0,40 mm auf etwa 0,20 m/s (0,50 m über Grund).

3. Mittlerer Korndurchmesser und Kornzusammensetzung des Bodensediments im Vergleich zum Sediment der Sandfallen

Drei mit dem Bodengreifer in II/102 entnommene Proben ergaben mittlere Korndurchmesser [dm (50 %)] von 0,18, 0,19 und 0,14 mm, eine in III/102 entnommene Bodenprobe einen mittleren Korndurchmesser von 0,23 mm. Die Proben enthielten dabei bis zu 12 % Mehlsand ($\leq 0,1$ mm). Grober Sand ($\geq 0,5$ mm) trat nur in einer Probe in geringer Menge (4 %) auf. Sandfallenproben wurden in den Meßprofilen II, III und VI sowohl bei Flut als auch bei Ebbe entnommen. In den Zahlentafeln 5 und 6 sind die Siebergebnisse der Bodenproben sowie der Sandfallenproben der Messung II/102 d und III/102 d mit ihren mittleren Korndurchmessern und den gleichzeitig gemessenen Stromgeschwindigkeiten (0,5 m über Sohle) zusammengestellt.

Zahlentafel 5
Kornanalyse der Bodenproben und der Sandfallenmessungen
II/102 d (12. 5. 1949) (in %)

Nr.	Korndurchmesser mm					dm mm	vg ¹ cm/s	Sandfang cm ³ /5 Min.
	< 0,1	0,1—0,15	0,15—0,20	0,20—0,25	> 0,25			
Flutmessung								
S 4	12	48	28	7	5	0,145	74	86
S 5	11	49	22	6	12	0,14	64	(250)
S 8	18	32	25	9	16	0,15	61	76
S 11	37	45	8	3	7	0,11	40	10
Ebbmessung								
S 19	20	35	21	7	17	0,14	52	36
G a) ²	10	19	34	19	18	0,185		
G b) ²	4	16	35	22	23	0,195		
G c) ²	12	54	20	6	8	0,140		

¹ vg = Grundgeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

² Grundproben, entnommen in II/102 am 12. 5. 1949.

Die Flutproben S 4 und S 8 (Zahlentafel 5) zeigen bei abnehmender Geschwindigkeit (von 74 auf 61 cm/s) einen mittleren Korndurchmesser zwischen 0,14 und 0,15 mm. Erst bei weiterer Abnahme der Geschwindigkeit auf 40 cm/s (S 11) verringert sich der mittlere Korndurchmesser auf 0,11 mm. Die Ebbmessung S 19 ergibt bei einer Geschwindigkeit von 52 cm/s dm = 0,14 mm. Die Flutproben S 1 bis S 3 (Zahlentafel 6) haben bei zunehmender Geschwindigkeit einen mittleren Korndurchmesser dm = 0,19 bis 0,20 mm, während die Proben S 17 bis S 23 (Ebbmessung) bei einem mittleren Korndurchmesser dm = 0,13 bis 0,16 mm trotz zum Teil größerer Geschwindigkeiten wesentlich feiner waren.

Zahlentafel 7 enthält eine Probenreihe aus dem Meßprofil VI. Die Kornzusammensetzung der Proben ist bedeutend gröber als in den weiter oberhalb gelegenen Meßprofilen II und III. Der mittlere Korndurchmesser der Proben schwankt hier zwischen 0,30 und 0,40 mm. Bei bereits wieder abnehmender Geschwindigkeit ist noch zunehmende Vergrößerung des Geschiebes bis etwa zwei Stunden nach Ke (= Kenterung bei Ebbe) festzustellen. Diese Erscheinung ist vermutlich auf die Gezeitenschichtung des Sediments zurückzuführen. Jede Tide wird eine Sortierung des Sediments hervorrufen derart, daß bei abnehmender Geschwindigkeit zuerst das gröbere und später das feinere Sediment zur Ablagerung kommt. Mit wieder ansteigender Geschwindigkeit wird dann zunächst das zuletzt abgelagerte feinere und erst später das gröbere

Sediment aufgearbeitet. Dabei kann es bei verhältnismäßig kurzem ansteigenden Ast der Geschwindigkeitskurve, wie er sich bei Flut häufig zeigt, vorkommen, daß die größeren Sedimente erst zur Aufarbeitung kommen, wenn das Maximum der Geschwindigkeit bereits überschritten ist. Voraussetzung ist nur, daß die Geschwindigkeit noch groß genug ist, um das gröbere Material in Bewegung zu setzen. Erst bei noch weiterem Abfall der Geschwindigkeit muß dann wieder infolge Ausfällung der größeren Bestandteile eine Verfeinerung des in Bewegung befindlichen Sediments eintreten.

Die Kornzusammensetzung des Sandfalleninhalts unterscheidet sich, wie ein Vergleich mit den Kornanalysen entsprechender Bodenproben gezeigt hat, nur wenig von diesen. Sie ist allgemein etwas feiner als das Grundsediment.

Zahlentafel 6
Kornanalyse der Bodenproben und der Sandfallenmessungen
III/102 d (25. 5. 1949) (in %)o

Nr.	Korndurchmesser mm					dm mm	vg ¹ cm/s	Sandfang cm ³ /5 Min.
	< 0,1	0,1—0,15	0,15—0,20	0,20—0,25	> 0,25			
Flutmessung								
S 1	5	13	56	9	17	0,19	49	74
S 2	2	13	34	30	21	0,20	54	152
S 3	2	14	37	26	21	0,20	75	172
S 4	9	22	44	6	19	0,17	49	82
S 5/7	8	18	36	12	26	0,18	32	73
Ebbmessung								
S 17	4	22	59	8	7	0,16	80	770
S 18/20	8	68	17	3	4	0,13	56	482 ²
S 22/23	4	44	34	9	9	0,16	59	167 ³
G III/102 e ⁴	2	7	18	54	19	0,23	—	—

¹ vg = Grundgeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

² Drei Proben zusammengeschüttet.

³ Zwei Proben zusammengeschüttet.

⁴ Grundprobe, entnommen in III/102 am 26. 5. 1949.

Zahlentafel 7
Kornanalyse der Bodenproben und der Sandfallenmessungen
(Flutmessung) VI/102 (13. 10. 1949) (in %)o

Zeit der Messung ¹	Korndurchmesser mm					dm mm	vg ² cm/s	Sandfang cm ³ /5 Min.
	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,25	0,25—0,5	> 0,5			
10 ⁰⁰	2,6	16,1	15,9	63,0	2,4	0,36	0,82	90
10 ³⁰	0,3	12,7	6,9	77,0	3,1	0,37	0,96	220
11 ⁰⁰	0,3	7,4	7,1	79,0	6,2	0,40	0,75	180
11 ³⁰	1,1	23,4	12,3	61,4	1,8	0,30	0,64	136
12 ⁰⁰	1,4	12,2	13,1	69,6	3,7	0,33	0,60	40
Grundprobe (38 d — 4 a)	1,5	16,5	3	53	26	0,42	—	—

¹ Ke = 90⁴.

² vg = Grundgeschwindigkeit, gemessen 0,5 m über Grund.

In der Stromrinne ist eine Zunahme der mittleren Korndurchmesser von $dm = 0,14$ bis $0,20$ mm in II, auf $0,30$ bis $0,40$ mm in VI festzustellen. Das Sediment wird nach See zu gröber.

C. Der Sinkstofftransport

1. Beziehung zwischen mittlerem Sinkstofftransport und Stromgeschwindigkeit

Der Sinkstofftransport ergibt sich aus dem Sinkstoffgehalt multipliziert mit der Stromgeschwindigkeit. Der Sinkstoffgehalt läßt sich nach den Ausführungen auf Seite 75 nur insoweit zur Stromgeschwindigkeit in Beziehung setzen, als es sich um sandiges Sediment ($\sim \geq 0,05$ mm) handelt. Für den sandigen Anteil wurde eine Zunahme des Sinkstoffgehalts mit der zweiten bis dritten Potenz der Stromgeschwindigkeit bereits festgestellt. Berücksichtigt man, daß die Aufarbeitung des Sediments erst bei der Grenzgeschwindigkeit v_0 — abhängig unter anderem von dem mittleren Korndurchmesser dm — beginnt, so läßt sich für den Sinkstoffgehalt S in erster Annäherung anschreiben:

$$S = C \cdot v^\alpha \left(1 - \frac{v_0}{v}\right) \text{ in g/dcm}^3 \quad (1)$$

S mit der jeweiligen Stromgeschwindigkeit multipliziert, ergibt dann den Sinkstofftransport S_T

$$S_T = C \cdot v^{\alpha+1} \left(1 - \frac{v_0}{v}\right) \text{ in g/dcm}^2 \cdot \text{sec} \quad (2)$$

Hieraus erhält man den mittleren Sinkstofftransport während einer Tide durch Summierung und Mittelung:

$$S_{Tm} = C \cdot \frac{\sum_1^n v^{\alpha+1} \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)}{n} \text{ in g/dcm}^2 \cdot \text{sec} \quad (3)$$

worin n die Anzahl der Messungen während einer Tide ist, v die jeweils gemessene Stromgeschwindigkeit, v_0 die Grenzgeschwindigkeit und C und α von örtlichen Bedingungen abhängende Konstante darstellen.

Für die jeweils eine volle Tide umfassenden Messungen II/2, 6, 10, 17, C/101 a bis g und II/101 a bis g wurden für $\alpha = 2$ (angenommen) die Ausdrücke $\sum vg^3 \cdot (1 - v_0/vg)$, worin vg die Grundgeschwindigkeit $0,5$ m über Grund (in Tide/12 gemessen) und v_0 die Grenzgeschwindigkeit ($= 0,15$ m/s) bedeuten, gebildet und zum jeweils gemessenen mittleren Sinkstofftransport ($0,20$ m über Grund) in Beziehung gebracht. Die Darstellung auf Abbildung 16 zeigt eine annähernd gradlinige Abhängigkeit des mittleren Sinkstofftransports von dem obigen Ausdruck. Die eingetragenen Schwerlinien gehen aber nicht durch den Koordinatennullpunkt, wie es eigentlich sein sollte. Es bleibt für $v_0/vg = 1$ noch ein gewisser Rest an Sinkstofftransport, der auf den Anteil feiner Sinkstoffe ($\leq 0,05$ m/s) schließen läßt. Diese sind bei der angenommenen Grenzgeschwindigkeit noch in Schwebe bzw. von der jeweiligen Stromgeschwindigkeit überhaupt unabhängig.

In Abbildung 17 wurde für die Messung II/101 a, c, e, g die Abhängigkeit des Sandanteils ($> 0,05$ mm) allein von der Geschwindigkeit, und zwar a) für $\alpha + 1 = 3$ und b) für $\alpha + 1 = 4$ aufgetragen. Die Ebbwerte zeigen eine nahezu eindeutige Abhängigkeit nach der angegebenen Beziehung. Die Flutwerte, die nur wenig auseinanderliegen, folgen im Mittel gleichfalls diesem Gesetz. Für $\alpha + 1 = 4$ ergibt sich eine gerade Linie. Der Sandtransport wächst daher eher mit der vierten als der dritten Potenz von vg . Auch geht die Schwerlinie jetzt durch den 0-Punkt, d. h. für $v_g = v_0$ wird der Sandtransport $= 0$. Ein von der Geschwindigkeit unabhängiger Rest, wie er oben auf Abbildung 16 noch festzustellen war, ist nicht mehr vorhanden.

Beziehung zwischen mittl. Sinkstofftransport in $g/dcm^2 \cdot s$
 0,20 m über Grund u. $\approx Vg^3(1 - \frac{V_0}{Vg})$; $V_0 = 0,15 m/s$

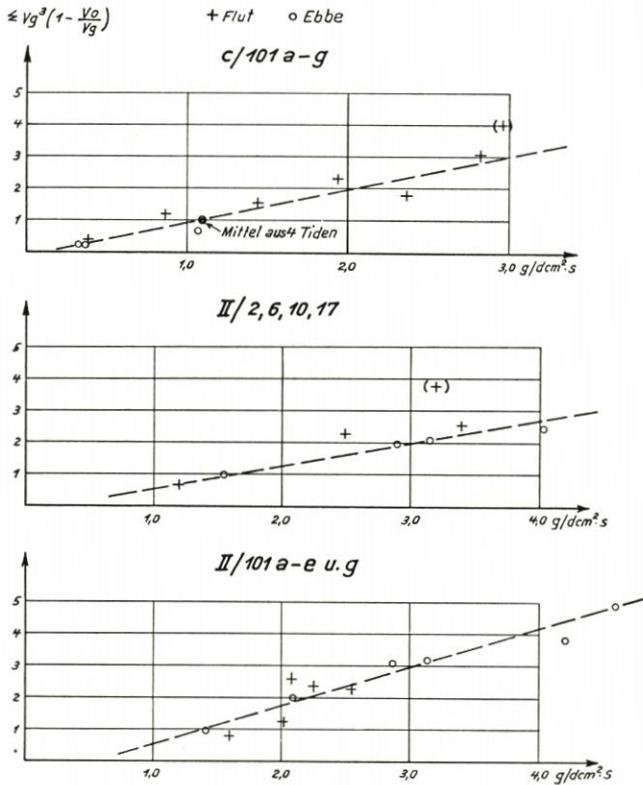


Abb. 16

2. Der Sinkstofftransport in den Meßstellen Y und Z, getrennt nach Korngrößen

Abbildung 10 (Y-Messung) enthielt auf der rechten Seite den gemessenen mittleren Sinkstoffgehalt in mg/l in Abhängigkeit von der Tiefe, getrennt nach vier Korngrößen. Für die einzelnen Korngrößen ergaben sich Sinkstoffgehaltskurven, die sich nach oben stark verjüngen. Gleichzeitig wurden auf der rechten Seite die mittleren Geschwindigkeiten aufgetragen.

Auf der linken Seite der Abbildung wurde der durch Mittelung über die Tide erhaltene mittlere Sinkstofftransport in $mg/dcm^2 \cdot s$, getrennt für den sandigen Anteil ($> 0,05 mm$) und den schluffigen Anteil ($< 0,05 mm$), aufgetragen. Während der sandige Anteil von rund $600 mg/dcm^2 \cdot s : 1,0 m$ über Sohle bis auf rund $1600 mg/dcm^2 \cdot s : 10 cm$ über Sohle stark zunimmt, nimmt der schluffige Anteil in den gleichen Tiefen von rund $1100 mg/dcm^2 \cdot s$ auf rund $600 mg/dcm^2 \cdot s$ ab. Unterhalb der 10-cm-Grenze ist mit weiterer Zunahme des sandigen Anteils zu rechnen, während der schluffige Anteil mit Annäherung an die Sohle eher abnimmt als zunimmt. Das Maximum des schluffigen Anteils liegt etwa 50 cm über der Sohle.

Die Planimetrierung der eingeschlossenen Flächen ergibt den mittleren Transport je Längeneinheit und Sekunde bzw. mit Df (= Flutdauer) multipliziert, den Transport je Längeneinheit und Flutdauer. Für 1 m Flußbreite und Sekunde bzw. Df erhält man folgende Mengen:

Sinkstofftransport an der Meßstelle „Y“ (Flut)
 in $g/m \cdot s$ bzw. in $kg/m \cdot Df$ ($Df = 22 860 s$)

Feinsand > 0,1	Mehlsand, grob 0,05 bis 0,1	Mehlsand, fein u. Schluff $\leq 0,05$	Σ
238	154	746	1 138 g/ms
5 440	3 510	17 050	26 000 kg/m Df
20,9	13,5	65,6	100 ‰

Insgesamt wurden somit oberhalb 0,10 m über Grund $26 t/m \cdot Df$ transportiert. Hiervon entfallen auf Mehl- und Feinsand ($> 0,05 mm$) $8,95 t/m \cdot Df$ oder = 34,4 ‰ und auf Mehlsand

und Schluff (< 0,05 mm) 17,05 t/m · Df oder = 65,6 %. Der Feinsandanteil allein (> 0,1 mm) betrug dabei mit 5,44 t/m · Df rund 21 % der Gesamtmenge.

Nicht erfaßt wurden bisher die unmittelbar an der Sohle (0 bis 0,10 m über Grund) transportierten Sinkstoffe. Sie lassen sich nur schätzungsweise angeben, da Messungen hierüber nicht vorliegen. Hierbei interessiert nur der mit Annäherung an die Sohle zunehmende sandige Anteil; der nach der Sohle zu abnehmende schluffige Anteil kann, da unerheblich, außer Betracht bleiben.

Um einen Anhalt über die Größenordnung zu erhalten, wurden in Abbildung 18 die mittleren Mehl- und Feinsandgehalte (> 0,05 mm) S_m und die mittleren Geschwindigkeiten v_m in Abhängigkeit von der Höhe h über Grund auf doppelt logarithmischem Papier aufgetragen. Die Zunahme des Sinkstoffgehalts bzw. die Abnahme der

Stromgeschwindigkeit mit Annäherung an die Sohle lassen sich entsprechend dem Verlauf der Ausgleichsgeraden mit genügender Genauigkeit durch folgende Exponentialfunktionen darstellen:

$$S_m = 340 \cdot h^{-0,61} \tag{4}$$

$$v_m = 3,65 \cdot h^{1/2} \tag{5}$$

Der entsprechende Sinkstofftransport (> 0,05 mm) je $dc m^2 \cdot s$ ergibt sich durch Multiplikation der Gleichungen (4) und (5) und der gesamte Sinkstofftransport je $dc m \cdot s$ von 0 bis 1 $dc m$ über Grund durch Integration zwischen den Grenzen 0 und 1. Man erhält:

$$S_{T0-1 dc m} = 1270 \int_0^1 h^{-0,467} dh = 2320 \text{ mg}/dc m \cdot s = 23,2 \text{ g}/m \cdot s$$

Der Mehl- und Feinsandtransport (> 0,05 mm) von 0 bis 0,10 m über Grund beträgt hiernach nur etwa 6 % der oberhalb 0,10 m über Grund transportierten Menge. Der Sandtransport geht somit im wesentlichen in dem durch die Messungen erfaßten Querschnitt vor sich. Der Transport unterhalb der 10 cm-Grenze beträgt nur einen Bruchteil des Gesamttransports.

In gleicher Weise wie für die Y-Messung wurden auch für die Messung Z/102 vom 27. 7. 1949 (Ebbmessung) die Sinkstoffgehalt- und Sinkstofftransportkurven, getrennt nach Korngrößen, ermittelt und auf Abbildung 11 graphisch dargestellt.

²⁾ PRANDTL (3) gibt für wandnahe Punkte als Näherung für die Abnahme der Geschwindigkeit eine Potenzformel an, nach der v gleichfalls proportional der 7. Wurzel von h ist. In Rohren ist diese nach PRANDTL bis etwa $Re = 100\,000$ gut bestätigt.

Beziehung zwischen mittl. Sandtransport (0,05–0,25 mm) in $g/dcm^2 \cdot s$ u. $\Sigma Vg^{\alpha+1} \cdot (1 - \frac{V_0}{Vg})$; $V_0 = 0,15 \text{ m/s}$

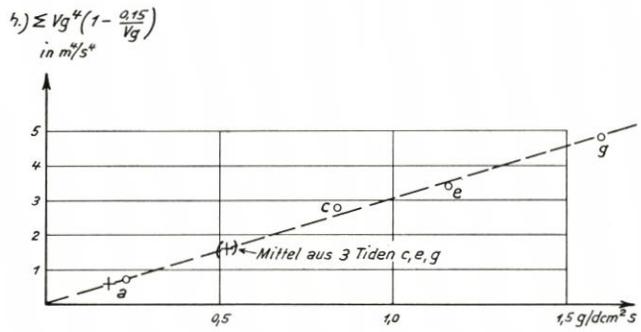
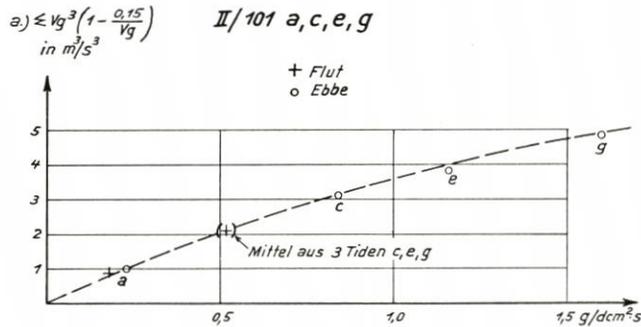


Abb. 17

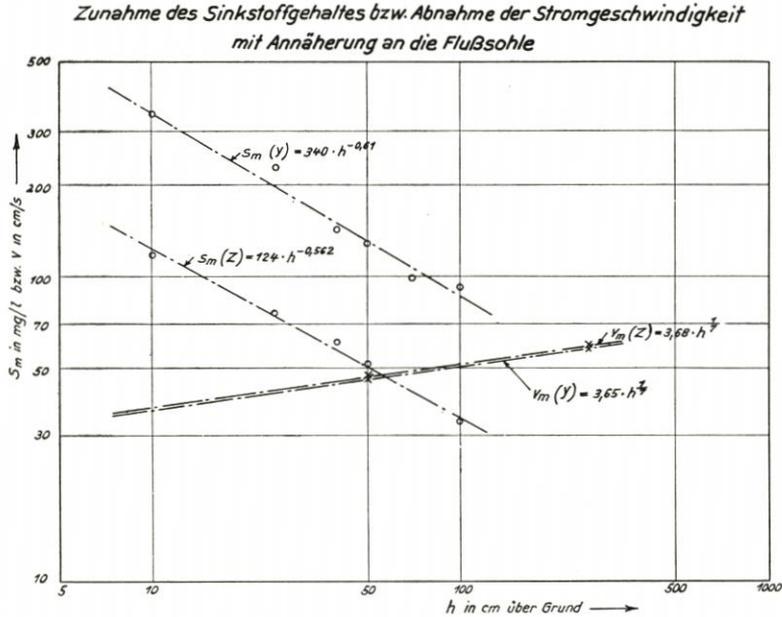


Abb. 18

Wie an der Meßstelle „Y“, nimmt auch hier der sandige Anteil mit Annäherung an die Sohle stark zu, während der schluffige Anteil sein Maximum etwa bei 0,30 m über Grund erreicht. Die Sinkstofftransportmengen je 1 m Flußbreite und Sekunde bzw. Ebbedauer (De) ergeben sich wie folgt:

Sinkstofftransport an der Meßstelle „Z“ (Ebbe)
in g/m · s bzw. kg/m · De (De = 23 460 s)

Feinsand > 0,1	Mehlsand, grob 0,05 bis 0,1	Mehlsand, fein u. Schluff ≤ 0,05	Σ
105	39	433	577 g/ms
2 460	920	10 150	13 530 kg/mDe
18,2	6,8	75,0	100 ‰

Von dem Gesamttransport in Höhe von 13,5 t/m · De entfallen auf Mehl- und Feinsand (> 0,05 mm) 3,38 t/m · De = 25 ‰ und auf Mehlsand und Schluff (< 0,05 mm) 10,15 t/m · De = 75 ‰. Der Feinsandanteil allein (> 0,1 mm) betrug dabei mit 2,46 t/m · De 18,2 ‰ der Gesamtmenge.

Bei Ermittlung des Sandtransports (> 0,05 mm) 0 bis 0,10 m über Grund wurde in gleicher Weise verfahren wie für die Meßstelle „Y“. Die entsprechenden Exponentialfunktionen lauten in diesem Fall:

$$S_m = 124 \cdot h^{-0,562} \tag{6}$$

$$v_m = 3,68 \cdot h^{1/2} \tag{7}$$

Der Sinkstofftransport (> 0,05 mm) je dcm · s von 0 bis 1 dcm über Grund ergibt sich analog wie oben zu:

$$S_{T0-1 \text{ dcm}} = 456 \int_0^1 h^{-0,419} \cdot dh = 784 \text{ mg/dcm} \cdot \text{s} \\ = 7,8 \text{ g/m} \cdot \text{s}$$

Der Mehl- und Feinsandtransport von 0 bis 0,10 m über Grund hat an der Meßstelle „Z“ somit nur 5,4 ‰ der oberhalb transportierten Menge betragen.

Die Messungen „Y“ und „Z“ wurden am einbuchtenden Ufer des ostfriesischen Gattjebogens in der Nähe der Knock (vgl. Lageplan Abb. 1) ausgeführt. Sicherlich liegen hier besondere Verhältnisse vor, die eine Verallgemeinerung der Ergebnisse nicht ohne weiteres gestatten. Sie sind auch nicht miteinander vergleichbar, da sie an verschiedenen Stellen und zu verschiedener Zeit (Zeitdifferenz = 14 Tage) ausgeführt wurden. Die Tidehübe waren allerdings mit 3,42 m („Y“) und 3,46 m („Z“) annähernd gleich. Auch die mittleren Profilgeschwindigkeiten waren wenig verschieden. Sie betragen 70,0 cm/s in „Y“ und 68,9 cm/s in „Z“. Dagegen war der Verlauf der Geschwindigkeitskurven unterschiedlich. Während in „Y“ die Grundgeschwindigkeit innerhalb von eineinhalb Stunden bis auf ~ 70 cm/s anstieg, erreichte diese in „Z“ in der gleichen Zeit nur eine Größe von ~ 55 cm/s. Hierauf mag, abgesehen von örtlich bedingten Umständen, wie Verschiedenheit der Bodenzusammensetzung und -lagerung, wenigstens zum Teil der höhere Sinkstofftransport in „Y“ zurückzuführen sein. Immerhin darf der relativ größere Sandtransport bei Flut in „Y“ (34,4 %) gegenüber demjenigen bei Ebbe in „Z“ (25 %) als charakteristisch festgestellt werden. Es ergab sich ferner, daß die unmittelbar über Sohle transportierten Sinkstoffmengen (0 bis 0,10 m über Grund) nur einen Bruchteil der durch den übrigen Querschnitt transportierten Menge betragen (etwa 6 %).

D. Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Die Sinkstoffmessungen ergaben, daß eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem mittleren Sinkstoffgehalt und der mittleren Stromgeschwindigkeit bei sonst gleichen örtlichen Bedingungen nur für die unteren Schichten bis etwa 0,5 m über Grund nachzuweisen ist. Für den Sinkstoffgehalt in den Tiefenstufen Mitte und Oben konnte eine gleiche Abhängigkeit im allgemeinen nicht festgestellt werden. Der Grund hierfür wurde darin gefunden, daß in den unteren Schichten die Fein- und Mehlsandanteile überwiegen, während weiter oben die schluffigen Anteile ($< 0,05$ mm) ausschlaggebend sind. Die letzteren kommen aber während der Kenterzeiten wegen ihrer geringen Fallgeschwindigkeiten nur zu einem geringen Prozentsatz zur Sedimentation. Im allgemeinen kann daher zwischen den schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm) und der jeweiligen Stromgeschwindigkeit eine unmittelbare Beziehung nicht erwartet werden. Betrachtet man den Fein- und Mehlsandgehalt jedoch für sich, so ist für diesen eine Beziehung zur Stromgeschwindigkeit festzustellen.

2. Der Sinkstoffgehalt nimmt in der Längsrichtung mit Annäherung an die Brackwasserzone stark zu. Gleichzeitig vergrößert sich der Anteil an schluffigen Bestandteilen gegenüber dem sandigen Anteil. In der Lotrechten verhält sich der Gehalt an Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) in 10, 30, 50 und 70 cm über Grund etwa wie 100 : 51 : 37 : 29 („Y“-Messung), Werte, wie sie ähnlich auch VAN VEEN angibt (100 : 54 : 34 : 28). Der Gehalt an Mehlsand und Schluff ($< 0,05$ mm) erreicht demgegenüber bei 30 bis 50 cm über Grund sein Maximum.

3. Die Ergebnisse der durchgeführten Sandfallenmessungen unterliegen beträchtlichen Streuungen, die auf Unvollkommenheiten des Gerätes sowie der Meßmethode, z. T. aber auch auf die wahrscheinlich sprunghafte Bewegung des Sandes zurückzuführen sind. Nur aus einer größeren Anzahl von Messungen, wie sie in der Ems an verschiedenen Meßstellen durchgeführt wurden, kann eine Beziehung zwischen Geschiebebewegung und Stromgeschwindigkeit abgeleitet werden. Da der Wirkungsgrad der Sandfalle unbekannt ist, sind die erhaltenen Werte jedoch in erster Linie als Vergleichswerte zu betrachten.

Die Geschiebebewegung ist örtlich verschieden; sie hängt außer vom Korndurchmesser und der Kornform der Sedimente vom jeweiligen Schlickgehalt sowie von der Beschaffenheit der Fluß-Sohle ab. Die Grenzgeschwindigkeit v_0 wurde für einen mittleren Korndurchmesser von 0,1 bis 0,15 mm zu etwa 15 cm/s (0,5 m über Grund) und für einen mittleren Korndurchmesser von 0,3 bis 0,4 mm zu etwa 20 cm/s (0,5 m über Grund) gefunden.

4. Als Näherung für den Sinkstofftransport kann die Beziehung genannt werden:

$$S_T = C \cdot v^\alpha + 1 \left(1 - \frac{v_0}{v} \right)$$

Für den sandigen Anteil ergab sich hierbei $\alpha \approx 3$.

Für die Meßstellen „Y“ und „Z“ wurde der Sinkstofftransport, getrennt nach vier Korngrößen ermittelt. Es ergab sich für die „Y“-Messung (Flut) bei einem Gesamttransport von 26,0 t/m ein Transport

von Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) von $8,95$ t/m = 34% der Gesamtmenge und von schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm) von $14,05$ t/m = 66% der Gesamtmenge.

Für die „Z“-Messung (Ebbe) betrug der Gesamttransport $13,53$ t/m bei einem Fein- und Mehlsandanteil ($> 0,05$ mm) von $3,38$ t/m = 25% der Gesamtmenge und einem schluffigen Sinkstoffanteil ($< 0,05$ mm) von $10,15$ t/m = 75% der Gesamtmenge.

Durch Extrapolation wurde der von 0 bis $0,10$ m über Grund transportierte Fein- und Mehlsand in „Y“ (Flutmessung) zu etwa 6% und in „Z“ (Ebbmessung) zu etwa $5,4\%$ der oberhalb transportierten Menge ermittelt.

Wenn auch aus den Einzelmessungen „Y“ und „Z“ noch keine quantitativen Angaben über den Gesamt-Sinkstoffhaushalt der Ems gemacht werden können, so ergibt sich doch aus diesen Messungen ein vermutliches Überwiegen des Sandtransports ($> 0,05$ mm) zugunsten der Flut ($34\% : 25\%$).

Es ist daher anzunehmen, daß jedenfalls im Meßbereich im allgemeinen mehr Fein- und Mehlsand stromauf als stromab transportiert wird, während das Umgekehrte bei den feinen Sinkstoffen der Fall zu sein scheint. Bei erhöhten Tiden ist sicherlich mit einer bedeutend vermehrten Sandbewegung und damit auch mit einem erhöhten Sandtransport stromauf zu rechnen, während über das Verhalten der feinen Sinkstoffe bei erhöhten Tiden nichts Bestimmtes gesagt werden kann.

E. Schriftenverzeichnis

1. Küstenausschuß Nord- und Ostsee: Bilanzbericht der Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie“. Stand 1951 (unveröffentlicht).
2. LÜDERS, K.: Unmittelbare Sandwanderungsmessung auf dem Meeresboden. Veröff. Inst. Meeresk. N.F.A. H. 24. Berlin 1933.
3. PRANDTL, L.: Strömungslehre. Breslau 1949.
4. SCHAANK, E. M. H.: The transportation of Sand in rivers. Vortrag. Washington 1939.
5. WOHLBERG, E.: Der horizontale Wasserschöpfer. Dt. Hydrogr. Ztschr. III, 516, 1950.
6. WOHLBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste II, 2, 1954.