

Morphologische und granulometrische Untersuchungen im Seegebiet vor Borkum

Von Gyula Samu

Inhalt

1.	Einführung	151
2.	Untersuchungsgebiet	152
3.	Unterlagen und Untersuchungsmethodik	154
3.1	Unterlagen	154
3.2	Arbeitsergebnisse	154
3.21	Auswertung der Korngrößen	154
3.22	Bearbeitung des Kartenmaterials	156
3.3	Darstellung der Ergebnisse	157
4.	Grundsätzliche Betrachtungen über die natürlichen Bedingungen des Sedimenttransportes	160
5.	Ergebnisse der Untersuchungen	162
5.1	Morphologische Entwicklung des Gebietes	163
5.2	Korngrößenverteilung	174
5.3	Beziehungen der morphologischen Entwicklung und der Sedimentverteilung zum Gesamttransport	177
5.4	Zusätzliche Betrachtungen ausgewählter Faktoren bei der Küstenbildung und beim Sedimenttransport	185
6.	Schlußbemerkung	185
7.	Schriftenverzeichnis	186

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie behandelt die kurzfristige morphologische Entwicklung des Küstenraumes vor Borkum. Es wird zunächst ein Überblick der Bearbeitungsmethoden und der formgestaltenden Kräfte gegeben. Die Auswertung der Peilkarten im Zusammenhang mit den wenigen zur Verfügung stehenden hydrologischen Daten haben ergeben, daß die Formenbildung und Veränderung der Rinnen und Platen ein ständiger aber nicht stetiger Vorgang sind. Die Teilrinnen der Außen-Ems (Wester-Ems, Randzelgat, Hubertgat, Alte Ems) sowie die Hubert-Plate und Möwensteert sind relativ stabil, nur ihre Randgebiete können stärkere Umlagerungen erleiden. So muß als sicher gelten, daß zwischen diesen Formen und den allgemeinen dynamischen Verhältnissen nur eine schwache Gleichgewichtsänderung herrscht, die erst in längeren Zeiträumen morphologisch sichtbar wird. Der Auf- und Abbau einiger Großformen (Horsborn- bzw. Neue Horsborn-Plate) vollzieht sich dagegen relativ schnell unter gewissen Gesetzmäßigkeiten, die hier mangels Meßunterlagen nicht vollständig geklärt werden konnten. Wie die verschiedenen Kräfte sich gegenseitig in ihrem Wirkungsbereich beeinflussen, kann durch die Verlagerung der Nordwest-Spitze des Möwensteert verdeutlicht werden, deren Folge die Einengung des Randzelgats, die Verlagerung der Rinnenachse in Richtung Borkum und die Ausräumung der Rinnensohle bzw. Rinnenböschung dort war. Die Analyse der Sedimentproben bekräftigt diese Aussage und weist auf eine starke küstenparallele Gezeitenströmung hin. Auch wenn keine unmittelbaren Zusammenhänge zwischen den morphologischen Veränderungen der Rinnen, den Gezeitenströmen und der Strandentwicklung festgestellt werden konnten und die Ablaufprozesse sich nur durch theoretische Überlegungen präzisieren ließen, muß trotzdem den Gezeitenströmen ein gewisser Einfluß auf die jeweiligen Verhältnisse am Strand eingeräumt werden.

Summary

The present study treats the short-lasting morphological development of the sea-area in front of the island Borkum. At first a survey of the methods of treatment and of the maps of the deeps in connection with the few disposable hydrological dates (values) shows, that the formation and change of the shapes of the channels and sands are perpetual but not continual processes. The single channels of the Außen-Ems (Western-Ems, Randzelgat, Hubertgat, Old-Ems) moreover the Hubert-Plate and Moewensteert are relatively stable only their districts near their borders can be subjected to more considerable changes. Thus it is rather certain that the deviation of balance between these forces and the general hydrological circumstances is only small and can not become morphologically visible before longer periods. On the other hand some great forms (Horsborn- and New-Horsborn-Plate) rise and vanish in relatively short periods and under certain natural conditions which could not be cleared up here completely for want of results of measurements. How the different forces influence one another mutually, can be illustrated by the displacement of the northwestern point of the Moewensteert, the consequences of which were the contraction of the Randzelgat, the displacement of the channel-axis in the direction of Borkum and the deeping of the channelbottom or of the erosion of the channel-slopes. The analysis of the samples of sediments confirms this statement and points to a strong tidal stream which is parallel to the coastline (shoreline). Although immediate connections between the morphological changes of the channels, the tidal streams and the development of the beaches could not be stated and the morphological and hydrological processes could only be precisely comprehended by theoretical deliberations, nevertheless it must be conceded that the tidal streams have a certain influence on the simultaneous morphological situations along the beaches and shorelines.

1. Einführung

Die Flußmündungen und Küsten von flachen Schelfmeeren mit Gezeitenwirkung gehören zu jenen Formen der Erdoberfläche, deren Gestaltung sich ununterbrochen in der Umwandlung befindet. Da die anschließenden Küstenräume meist stark besiedelt sind und große Ballungszentren beherbergen, sind die tief in das Land vordringenden Ästuarien im Hinblick auf verkehrsgeographische Verhältnisse von großer Bedeutung. Infolge der Ausbreitung des Handels wurden die Schiffsabmessungen größer, bis die Wassertiefen der großen Ströme, wie Elbe, Weser, Ems nicht mehr alle Ansprüche an Tiefe und Beständigkeit erfüllten. Wasserbauliche Maßnahmen (Baggerungen, Bühnenbau) waren notwendig, um den Erfordernissen der Schifffahrt gerecht zu werden. Auch andere bauliche Arbeiten (Küstenschutz, Landgewinnung, Sperrwerke) wurden mit der fortschreitenden Nutzung der Küste und der Küstengewässer erforderlich. Alle diese Eingriffe haben den Ablauf der Naturvorgänge mehr oder minder und nicht immer positiv beeinflusst. Die richtige Einschätzung des natürlichen Kräftespiels vor und nach Durchführung der Baumaßnahmen erfordert eine sorgfältige Voruntersuchung.

Daher wandte sich der Mensch schon früh an die *Erforschung* der Vorgänge, nach denen die natürliche Umgestaltung vor sich geht. Dabei spielt die Frage der Sandbewegung und der mit ihr ursächlich zusammenhängenden morphologischen Veränderung eine wichtige Rolle.

Die Zahl der zur Veränderung der Morphologie, Bodenbeschaffenheit und zur Dynamik des Küstenraumes erschienenen Arbeiten ist so groß, daß einleitend nur einige wenige von den älteren Werken Berücksichtigung finden können. Hinweise von neueren Beiträgen aus diesem Themenkreis werden an der entsprechenden Stelle im Text erwähnt.

Eingehende Untersuchungen über die Veränderung in Flußmündungen (Jade-Weser) haben KRÜGER (25) und POPPEN (35) geführt. Sie wiesen gewisse Regelmäßigkeiten der Bildung und Bewegung der Platen nach. JESSEN (22) dagegen versuchte überregional der Frage der Gestaltung der Flußmündungen nachzugehen. Ähnlich JESSEN behandelten JANSSEN (21) und ISBARY

(20) speziell die Ursache der Umgestaltung der Emsmündung, insbesondere der Entstehung der Strombögen und Gats. LÜDERS (28) diskutierte die Bildung von freien Nehrungsinseln am Beispiel der Ostfriesischen Inseln unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gezeitenverhältnisse. Wichtige Beiträge lieferten GAYE und WALTHER (12) über die Erscheinungsform der Sandbewegung im Bereich der Riffbögen vor den Seegaten sowie über die auftretenden Kräfte, die die Verlagerungsrichtung und -geschwindigkeit dieser Formen verursachen. PRATJE (36) (37) hat auf Grund seiner allgemeinen Untersuchungen grundlegende Kenntnisse über die Sedimentationsbedingungen in Nord- und Ostsee gewonnen. Mit den Fragen des Eindringens des Sandes in Flußmündungen beschäftigen sich CROMMELIN und MAASKANT (4). GRIPP (15) veröffentlichte eine zusammenfassende Darstellung zur Frage der Entstehung und Entwicklung der Deutschen Bucht. Schließlich gibt HENSEN ausführliche Hinweise zu den hydrodynamischen Vorgängen und Zusammenhängen in einem Tidefluß (16).

Zum Verständnis der Entwicklung regionaler Besonderheiten ist die Betrachtung der bisherigen Ergebnisse der hydrologischen, geologischen und morphologischen Forschung unerlässlich. Der allgemein gültige Charakter bestimmter physikalischer Phänomene erlaubt einen gewissen Vergleich zwischen den Erkenntnissen, die in verschiedenen Gebieten gewonnen wurden. Die nachfolgende Untersuchung soll in diesem Sinne als Beitrag dieses Problemkreises gewertet werden.

Das Baggergut aus dem Ems-Fahrwasser wurde in den Jahren 1961–1971 südwestlich der Insel Borkum in die tiefe Rinne des Randzelgats verklappt. Möglicherweise werden diese Materialmengen oder ein Teil davon verfrachtet. Über das Verbleiben und die Bewegung dieses Materials, vor allem über einen möglichen Zusammenhang mit dem Platen- und Strandaufbau, möchte man Kenntnisse gewinnen. Diesem Bericht vorangehende, mit radioaktiven Leitstoffen durchgeführte Untersuchungen (Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste – [2]) haben einen küstenparallelen Sedimenttransport ergeben. Jedoch zeigten auch einige auf dem Südstrand entnommene Proben erhöhte Radioaktivität. Um die gegebenen Möglichkeiten voll ausschöpfen zu können, wurden die zu radioaktiven Untersuchungen entnommenen Proben granulometrisch analysiert. Die Korngrößenverteilung bietet weitere Anhaltspunkte zur Sedimentbewegung. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird auch eine grundsätzliche Betrachtung der Morphologie und ihrer Wechselwirkungen auf die Sedimentbewegung angestrebt. Um die vorgenannten Fragen besser erläutern zu können, muß versucht werden, die Folge des menschlichen Eingriffs von den Naturvorgängen zu trennen.

2. Untersuchungsgebiet

Der betrachtete Raum umfaßt einen etwa 60 km² großen Ausschnitt der Emsmündung unmittelbar westlich und südwestlich der Insel *Borkum* (Abb. 1). Die Grenzen sind willkürlich gesetzt; in die Untersuchungen wurde nur das Gebiet einbezogen, dessen Betrachtung zum Verständnis der morphologischen Entwicklung unbedingt erforderlich war.

Im Westen liegt der östliche Teil der Wester-Ems, Hubert-Plate und des Hubertgats innerhalb des Untersuchungsgebietes. Im Süden bildet die geogr. Breite 53° 32' die Abgrenzung, und die 4-m-Tiefenlinie im Osten bzw. die 10-m-Tiefenlinie im Norden schließt im wesentlichen das Untersuchungsgebiet zu der Insel Borkum bzw. zum Hohen Riff ab.

3. Unterlagen und Untersuchungsmethodik

3.1 Unterlagen

Den Grundstock für die Bearbeitung der Korngrößenanalyse bildeten die Proben, die während der Sandbewegungsuntersuchungen mit radioaktiven Leitstoffen im Herbst 1969 entnommen wurden. Die Bodenproben sind gestört, denn sie wurden mit dem van-Veen-Greifer entnommen.

Für die morphologischen Untersuchungen stellte das WSA Emden die Tiefenpläne des Gebietes Hubertgat/Wester-Ems, östlicher Teil, sowie Strandpeilungen von Borkum und Angaben über die Hydrologie und die Baggerungen zur Verfügung¹⁾.

Bei der Auswertung der Meßergebnisse stützte sich der Verfasser auf die Darlegungen in den Arbeiten von D. MARSAL (32), E. KÖSTER (23), H. E. REINECK (39) und E. WALGER (50).

3.2 Arbeitsergebnisse

3.2.1 Auswertung der Korngrößen

Die Durchführung der Korngrößenanalyse erfolgte nach DIN 4188. Zum Sieben gelangten mit einigen Ausnahmen jeweils 200 g. Die Korngrößen der Schluffe und Tone (3 Proben) wurden mit dem Aräometer nach Cassagrande ermittelt. Alle Sedimente waren vor der Analyse entsalzt worden. Die Bezeichnung der Sedimente nach DIN 4022 ist in der nachfolgenden Unterteilung wiedergegeben (Tab. 1):

Tabelle 1

Korngröße in mm	Bezeichnung	Abkürzung
60-20	Grobkies	gKi
20-6	Mittelkies	} Kies
6-2	Feinkies	
2-0,63	Grobsand	gS
0,63-0,2	Mittelsand	mS
0,2-0,063	Feinsand	fS
		} Sand
0,063-0,002	Silt (Schluff)	Si (Su)
0,002	Ton	T

Diese als Norm festgelegte Einteilung hat sich gegenüber anderen Klassifikationen allgemein durchgesetzt. In den älteren Arbeiten, die sich mit Fragen der Sedimentverteilung des Seebodens im Küstengebiet der Nord- und Ostsee befassen, werden noch andere Einteilungen (PRATJE [36] [38], SIMON [43], DECHEND [5] [6]) oder nur in den einzelnen Fraktionen abweichende Einteilungen (BRESSAU [3]) verwendet.

¹⁾ Freundlicherweise stellte das WSA Emden zahlreiche Unterlagen zur Verfügung. Für die großzügige Unterstützung möchte ich allen Herren, die mir behilflich waren, Herrn RBD SCHWITERS, Herrn BETH und insbesondere Herrn Dipl.-Geogr. STEEN, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Neben den Hauptfraktionen werden ein oder zwei Nebenfraktionen genannt, die jeweils der Hauptfraktion vorangestellt und zusätzlich noch als stark oder schwach beteiligt gekennzeichnet sind (DIN 4022, REINECK [39]):

5–15 % = schwach z. B.	ms' = schwach, mittelsandhaltig
15–30 % = normalhaltig	ms = mittelsandhaltig
30–50 % = stark	ms̄ = stark, mittelsandhaltig

Ein Korngemisch mit z. B. 10 % Silt, 34 % Feinsand und 56 % Mittelsand würde geschrieben: si'fs mS und bedeutet: schwach siltig, stark feinsandiger Mittelsand.

Bei der vorliegenden Untersuchung zeigte sich, daß das Sohlenmaterial sehr uneinheitlich ausgebildet ist. In vielen der analysierten Proben ist an der Kornzusammensetzung der Sedimente fast das ganze Korngrößenintervall beteiligt. Solche unterschiedliche Korngrößenverteilung kann man nicht durch einen Wert (z. B. Mittelwert [Md]) oder durch einige wenige Hauptfraktionen (z. B. Feinsand etc.) beschreiben, wenn man eine differenzierte Aussage hinsichtlich der Deutung der Korngrößenverteilung der Sedimente gewinnen möchte. Anhand des nachfolgenden Beispiels soll erörtert werden, wie die Beschreibung der Korngröße durch einen Wert zu falschen Interpretationen führen kann. Die Probe Nr. 60 (Tab. 3c) hat einen Medianwert von 0,196 und die Nr. 59 0,190 mm (Tab. 3e). Sie sind als Feinsande einzustufen. Die Betrachtung der prozentualen Verteilung der einzelnen Fraktionen zeigt, daß bei der Probe Nr. 60 der Hauptanteil in den Bereich von mittelsandigem Feinsand fällt, dagegen die Probe Nr. 59 noch einen erheblichen Anteil anderer Fraktionen (Kies, Grob- und Feinsand, Silt) enthält. Man erkennt, welche Bedeutung die Vernachlässigung wichtiger Fraktionen bei der Beurteilung des Verhältnisses Strömung und Sedimente mit sich führen kann.

Daher werden die Bodenarten auf Grund der einzelnen Fraktionen zusammengefaßt. Dazu werden einzelne Korngrößenanalysen in Tabelle 3 aufgezeichnet, die jeweils kennzeichnend für die zugehörigen Bodenarten sind. Es wurden insgesamt 60 Analysen durchgeführt.

Ähnlich verfahren außer REINECK (39) auch noch BRESSAU (3) und LINKE (27), indem sie bestimmte Korngrößengruppen in der Darstellung aus mehreren Summenkurven zusammensetzen.

Tabelle 2

Bodenart	Abkürzung	Korngröße in mm
1. Feinsandiger Silt bis siltiger schwach mittelsandiger Feinsand	fs Si-si ms' fs	0,133–0,203
2. Feinsand bis schwach mittelsandiger Feinsand	fs-ms'fs	0,145–0,255
3. Mittelsandiger Feinsand bis stark mittelsandiger Feinsand	msfs-ms̄ fs	0,167–0,461
4. Feinsandiger Mittelsand bis grobsandiger Mittelsand	fsmS-gsmS	0,225–0,700
5. Kiesiger, schwach grobsandiger mittelsandiger Feinsand	ki gs'ms fs	0,662–2,707
6. Kiesiger, feinsandiger Mittelsand bis kiesiger grobsandiger Mittelsand	ki fs mS- ki gs mS	0,581–3,209

Aus der Kornsummenkurve lassen sich nahezu alle wichtigen Parameter zur Kennzeichnung eines Korngemisches ableiten. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, über die physikalischen Kräfte, die während der Ablagerung wirksam waren, gewisse Kenntnisse zu gewinnen. Zur Charakterisierung der Sedimente werden Medianwert (Md), Sortierungskoeffizient (So) und Schiefekoeffizient (Sk) herangezogen.

Die wichtigsten Quartilmaße sind die $Q_1 = P_{25}$, $Q_3 = P_{75}$ (Schnittpunkt der Summenkurve mit 25 0/0- bzw. 75 0/0-Linie) und $Q_2 = P_{50} = Md$ (Schnittpunkt der Summenkurve mit der 50 0/0-Linie). Aus der gegenseitigen Verknüpfung ergeben sich statistische Parameter (TRASK [47], KRUMMBEIN [24]):

$$S_o = \frac{P_{75}}{P_{25}}$$

$$S_k = \frac{P_{75} \cdot P_{25}}{(P_{50})^2}$$

Der Sortierungskoeffizient (S_o) ist eine Kenngröße, die ein Maß für die Zahl der am Aufbau einer Kornmenge beteiligten Kornklassen ist. Man erhält Aussagen über die Streuung. Je mehr Kornklassen am Aufbau eines Kornkollektivs beteiligt sind, um so flacher ist die Summenkurve und um so größer der Abstand von P_{75} zu P_{25} , also auch der Zahlenwert dieser Koeffizienten. Ein ideal sortierter Sand hat den Kennwert 1.0.

Die sich aus den Sortierungskoeffizienten ableitenden Sortierungsgrade werden nach H. SINDOWSKI (45) wie folgt eingeteilt:

S_o unter 1,20	sehr gut sortiert
1,20–1,50	gut sortiert
1,50–2,50	mäßig sortiert
über 2,50	schlecht sortiert.

Der Schiefekoeffizient (S_k) zeigt die Abweichungen von der Symmetrie der Summenkurve, d. h. ausgehend von der mittleren Korngröße besagen die errechneten Werte, ob gröbere oder feinere Kornklassen überwiegen. Eine vollkommen symmetrische Kurve besitzt den Wert 1.

3.22 Bearbeitung des Kartenmaterials

Die richtige Beurteilung der morphologischen Entwicklung eines Gebietes wird im wesentlichen von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Karten großen Maßstabes und nicht zuletzt von der übersichtlichen Erarbeitung der daraus gewonnenen Veränderungen bestimmt. Die Genauigkeit des Kartenmaterials ist wiederum von der Genauigkeit der Aufnahme bzw. der Wiedergabe der Meßergebnisse abhängig, auf die hier aber nicht näher eingegangen wird. Hierbei werden folgende Methoden angewandt:

1. Bestimmung der Veränderung der Tiefenlinien

Das Übereinanderzeichnen der Tiefenlinien kann erfolgreich nur bei Benutzung von wenigen Tiefenlinien angewandt werden, sonst geht die Übersichtlichkeit verloren.

2. Erarbeitung von Tiefenänderungsplänen (Differenzkarten) kann auf unterschiedlichem Wege erfolgen. Die elektronische Datenverarbeitung bietet dabei neue Möglichkeiten, besonders wenn unzählige Differenzwerte verarbeitet werden müssen (GÖHREN [14]).

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde noch manuell verfahren. Die Differenzbildung wird mit Hilfe der Tiefenlinien erreicht. Zunächst werden die Tiefenlinien zweier zu vergleichender Karten übereinandergezeichnet. Unter Verwendung eines Transparentblattes werden die Differenzwerte einerseits in dem Schnittpunkt der Tiefenlinien ermittelt. Ferner umschließen die für den Vergleich herangezogenen verschiedenen Tiefenlinien Flächen, wobei flächenmäßige Differenzen entstehen. Die Kombination beider Werte ergibt die Tiefenänderung eines Gebietes. Dieses Verfahren entbehrt der Vollständigkeit, die auch noch von der Wahl des gewählten Tiefenlinienabstandes beeinflusst wird. Zur Erfassung der typischen Verände-

- rungen werden die Tiefenlinien in 2 m Abstand berücksichtigt. Diese Voraussetzungen genügen zur Abschätzung der allgemeinen morphologischen Entwicklung.
3. Vergleichende Betrachtung der Querschnittsentwicklung (Abb. 1) ist eine hilfreiche Ergänzung zu den übrigen Untersuchungen und führt zu detaillierten Ergebnissen.

3.3 Darstellung der Ergebnisse

Die Entnahmepunkte der für die folgenden Darstellungen verwandten Proben sind aus der Sonderkarte (Abb. 14) zu entnehmen. Außer der flächenmäßigen Darstellung der Korngrößen wurden auch Isolinien der Kornkennwerte gebildet, um dadurch die Transportvorgänge besser verdeutlichen zu können. Dabei war von vornherein klar, daß diese Werte nur in Verbindung mit anderen Ergebnissen annähernd brauchbare Kenntnisse liefern können. Die Summenkurven wurden im Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt, denn die Proben sind Durchschnittsproben, die mehrere Einzellagen erfassen.

Tabelle 3a
Korngrößen-Analysen
Bodenart: Silt bis siltiger Feinsand (1)

Probenr.:	18 (24. 9. 69)	39 (24. 9. 69)	56 (30. 9. 69)	49 (25. 9. 69)	
Probemenge in g:		128	141	200	
	Gew.- $\%$	Gew.- $\%$	Gew.- $\%$	Gew.- $\%$	
Siebanalyse					
mm \varnothing					
>10,00		8,6			
7,00 — 10,00					
5,00 — 7,00					
3,00 — 5,00					
2,00 — 3,00		6,9	0,1		
1,00 — 2,00		3,0	0,3	0,9	
0,63 — 1,00		2,7	0,2	0,3	
0,315 — 0,63		4,9	1,8	0,4	
0,200 — 0,315		3,6	5,6	0,7	
0,100 — 0,200		22,2	67,8	74,5	
0,063 — 0,100	3,0	1,5	1,6	13,5	
< 0,063				9,7	
Schlammanalyse					
\varnothing					
63 — 55 μ	0,6	63 — 52 μ	2,6	63 — 42 μ	1,2
55 — 40	5,8	52 — 38	5,2	42 — 27	1,9
40 — 25	4,6	38 — 24	3,8	27 — 15	1,0
25 — 15	7,1	24 — 14	6,8	15 — 8,5	1,9
15 — 8,2	7,4	14 — 8	6,4	8,5 — 5,5	1,0
8,2 — 5,3	8,8	8 — 5,3	13,5	5,5 — 3,5	3,9
5,3 — 3,4	13,1	5,3 — 3,5	3,8	3,5 — 1,6	0,1
3,4 — 1,6	13,2	3,5 — 1,6	0,4	< 1,6	11,6
< 1,6	36,4	< 1,6	4,1		
Sediment- bezeichnung	toSi	ms'fsSi	sifS	si'fS	
Medianwert in mm	0,0093	0,105	0,145	0,136	

Tabelle 3b

Korngrößen-Analysen

Bodenart: mittelsandiger Feinsand (2)

Probenr.:	5 (23. 9. 69)	30 (24. 9. 69)	42 (25. 9. 69)
Probemenge in g:	200	174	200
	Gew.- ⁰ / ₀	Gew.- ⁰ / ₀	Gew.- ⁰ / ₀
Siebanalyse			
mm Ø			
>10,00			
7,00 — 10,00			
5,00 — 7,00			
3,00 — 5,00			
2,00 — 3,00	0,05	0,3	
1,00 — 2,00	0,30	0,3	0,1
0,63 — 1,00	0,20	1,0	—
0,315 — 0,63	0,90	4,0	0,1
0,200 — 0,315	7,45	10,0	1,1
0,100 — 0,200	75,35	79,0	87,8
0,063 — 0,100	10,05	2,8	9,6
< 0,063	5,70	2,6	1,3
Sediment- bezeichnung	si' ms' fS	ms' fS	fS
Medianwert in mm	0,147	0,184	0,136

Tabelle 3c

Bodenart: mittelsandiger Feinsand (3)

Probenr.:	60 (1. 10. 69)	11 (24. 9. 69)	27 (24. 9. 69)
Probemenge in g:	200	200	200
	Gew.- ⁰ / ₀	Gew.- ⁰ / ₀	Gew.- ⁰ / ₀
Siebanalyse			
mm Ø			
>10,00			
7,00 — 10,00			
5,00 — 7,00			
3,00 — 5,00			
2,00 — 3,00			0,43
1,00 — 2,00		0,05	1,36
0,63 — 1,00		0,05	6,50
0,315 — 0,63	0,60	0,55	10,80
0,200 — 0,315	42,50	23,80	10,58
0,100 — 0,200	55,30	73,10	56,60
0,063 — 0,100	0,30	1,25	7,36
< 0,063	1,30	1,20	6,37
Sediment- bezeichnung	— msfS	msfS	si' gs' msfS
Medianwert in mm	0,196	0,189	0,160

Tabelle 3d
Korngrößen-Analysen
Bodenart: Mittelsand (4)

Probenr.: Probemenge in g:	14 (24. 9. 69) 200 Gew.-%/o	37 (24. 9. 69) 200 Gew.-%/o	25 (24. 9. 69) 200 Gew.-%/o
Siebanalyse			
mm Ø			
>10,00			
7,00 — 10,00		0,5	
5,00 — 7,00		0,4	0,4
3,00 — 5,00		1,4	0,3
2,00 — 3,00	0,4	0,9	1,8
1,00 — 2,00	0,3	2,0	7,9
0,63 — 1,00	0,3	3,6	27,2
0,315 — 0,63	7,2	25,7	57,2
0,200 — 0,315	45,5	28,6	1,8
0,100 — 0,200	43,0	8,8	2,0
0,063 — 0,100	1,0	1,4	0,2
< 0,063	2,3	27,7	1,2
Sediment- bezeichnung	fsmS	fs'simS	gsmS
Medianwert in mm	0,206	0,250	0,590

Tabelle 3e
Bodenart: kiesiger Feinsand (5)

Probenr.: Probemenge in g:	4 (23. 9. 69) 200 Gew.-%/o	59 (30. 9. 69) 190 Gew.-%/o
Siebanalyse		
mm Ø		
>10,00	8,0	
7,00 — 10,00	0,44	2,5
5,00 — 7,00	2,09	1,0
3,00 — 5,00	6,40	2,6
2,00 — 3,00	4,41	2,2
1,00 — 2,00	8,21	2,3
0,63 — 1,00	6,73	1,8
0,315 — 0,63	7,33	10,7
0,200 — 0,315	3,36	22,9
0,100 — 0,200	43,60	43,7
0,063 — 0,100	5,06	5,0
< 0,063	4,37	5,3
Sediment- bezeichnung	ki'gs'msfS	ki'si'msfS
Medianwert in mm	0,194	0,190

Tabelle 3f
Korngrößen-Analysen
Bodenart: kiesiger Mittelsand bis Grobsand (6)

Probenr.:	1 (23. 9. 69)	19 (24. 9. 69)	24 (24. 9. 69)
Probemenge in g:	200 Gew.-%	300 Gew.-%	300 Gew.-%
Siebanalyse			
mm Ø			
>10,00			2,0
7,00 — 10,00	0,8	1,5	0,3
5,00 — 7,00	0,17	1,9	2,0
3,00 — 5,00	0,74	7,1	8,2
2,00 — 3,00	3,61	5,6	6,6
1,00 — 2,00	6,47	11,7	16,2
0,63 — 1,00	6,59	16,7	19,8
0,315 — 0,63	27,35	42,5	32,4
0,200 — 0,315	24,80	6,2	3,2
0,100 — 0,200	23,10	5,0	7,7
0,063 — 0,100	2,80	0,3	0,3
< 0,063	3,57	1,5	1,3
Sediment- bezeichnung	ki'gs'fsmS	kigsmS	kimsgS
Medianwert in mm	0,292	0,605	0,690

In dieser Darstellungsform (in Wahrscheinlichkeitsnetz) ist deutlich zu erkennen, daß die Korngrößenverteilung der Sande aus mehreren lognormalen Komponenten mit verschiedenen Medianwerten und verschiedenen Anteilen besteht (WALGER [50]) und daß der größte Teil der Proben eine asymmetrische Verteilung hat. In diesem Fall läßt sich das gesamte Korngrößenintervall nicht durch einen Wert beschreiben. In der Summenlinie unterscheiden sich die Kurven der stark gemischten Zusammensetzung (Abb. 17) wesentlich von den mehr homogenen Zusammensetzungen (Abb. 16). Der Kurvenverlauf ist damit ein Charakteristikum, das beim Vergleichen verschiedener Analysen Schlüsse besonders in genetischer Hinsicht ermöglicht. Die zwei ausgewählten Abbildungen 16, 17 zeigen einige kennzeichnende Durchschnittssummenkurven und die Variationsbreite des entsprechenden Korngemisches, die aus in ihnen vorkommenden Einzelsummenkurven zusammengesetzt sind.

4. Grundsätzliche Betrachtungen über die natürlichen Bedingungen des Sedimenttransportes

Die Ursachen der morphologischen Veränderungen und der Sedimentverteilung sind von periodischer, teils unperiodischer Natur. Die Tideströmungen, die durch die überwiegend westlichen Winde erzeugten Triftströmungen, der Seegang und die Brandung bewirken eine komplizierte Umlagerung des Meeresbodens und die damit verbundene Formänderung. Der Umfang der Massenänderungen hängt stark von Art und Geschwindigkeit des aufnehmenden und absetzenden Wasserkörpers und der Form und Beschaffenheit des Meeresbodens ab. Die aus der Nordsee ins Ems-Ästuar einlaufende Tide ist hauptsächlich eine halbtägige Hauptmond tide (M^2) mit einer Periode von 12 Stunden und 25 Minuten (DHI [7]). Die in Abbildung 2 dargestellte Tidekurve am Pegel Borkum-Südstrand entspricht etwa einer mittleren Tide.

Die Gezeitenströmungen haben im allgemeinen in den Rinnen hohe Geschwindigkeiten, die bei mittlerer Tide die maßgebenden kritischen Grenzgeschwindigkeiten erreichen, die für die Erosion der Sohle hier auch ausreichen. Die Höchstwerte der Gezeitenströme sind in den großen Rinnen zwischen Borkum und Emden meistens zwischen 1,2 und 2,0 m/s. Die Ergebnisse der neuesten Messungen aus dem Jahre 1971 (51) zeigen im Querschnitt Rottum-Borkum, daß sowohl bei Flut als auch bei Ebbe hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen (Abb. 1)²⁾.

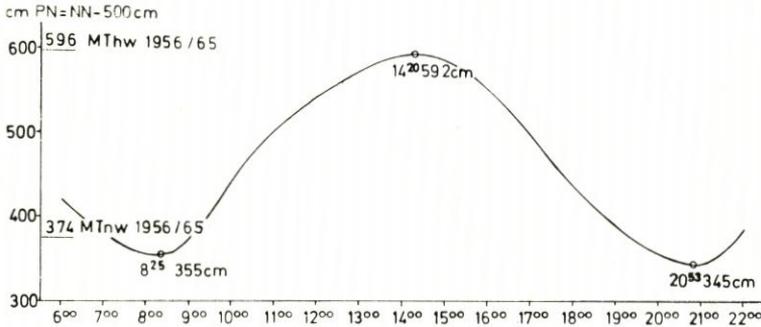


Abb. 2. Tidekurve am Pegel Borkum-Südstrand vom 10. 5. 1966

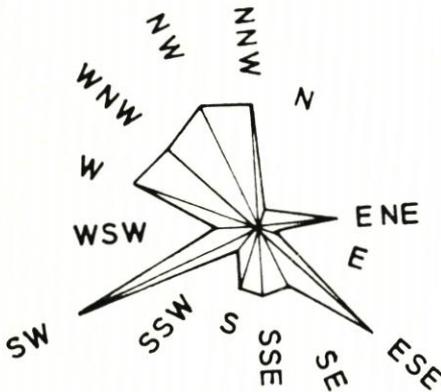


Abb. 3. Häufigkeiten der Windrichtungen für die Zeit vom 8. 9.-8. 10. 1969 an der Signalstelle Borkum (BAW)

Tabelle 4

Häufigste Windrichtungen in Borkum
(aus 8 Richtungen)

Jahr	SW
Januar-März	SW
April-Mai	NE
Juni	NW
Juli	NW
August-Dezember	SW

²⁾ Die Dienststelle der Rijkswaterstaat in Delfzijl hat mir diese Angaben überlassen. An dieser Stelle sei hierfür gedankt.

Über die Windverhältnisse, deren Wirkung auf die Strand- und Vorstrandentwicklung direkt oder indirekt erstrangig betrachtet werden muß, geben die nachstehende Tabelle 4 (DORRESTEIN [8]) und für die Untersuchungszeit mit radioaktiven Leitstoffen das Diagramm (Abb. 3) einen Überblick.

5. Ergebnisse der Untersuchungen

Der Sedimenttransport und die Korngrößenverteilung stehen in enger Beziehung zu den Veränderungen der morphologischen Formen. Daher erfordert die Deutung der morphologischen Entwicklung des Seegebietes vor Borkum eine umfassendere Betrachtung. Im Rahmen dieser Untersuchung wird auf die kurzfristige Entwicklung des Gebietes eingegangen. Die Erforschung der Wandlung des Gebietes über längere Zeiträume ist bereits Gegenstand anderer Studien gewesen (HOMEIER-LUCK [18], JANSSEN [21], LANG [26], JESSEN [22], NIEBUHR [33], SCHUBERT [42]). Hier wird nur eine kurze Schilderung dieser Verhältnisse wiedergegeben.

Das Seegebiet der Außen-Ems zwischen Borkum und Rottum mit den Teilrinnen Westerems – Randzelgat und Hubertgat – Alte Ems und die dazwischen sich erhebenden Platen Ballonplate, Hubert-Plate-Möwensteert hat, seit eine vergleichende Betrachtung möglich ist (16. Jahrh.) (LANG [26]), deutliche Veränderungen erfahren. So schwenkte der seewärtige Teil der Außen-Ems vor Borkum, aber insbesondere das Hubertgat aus einer NW-SO verlaufenden Richtung in eine mehr west-östliche seit dem 19. Jahrhundert. In dem gleichen Zeitraum verlagerte sich der Rinnen-Platen-Komplex nach Nordosten, der Möwensteert sowie die alte Ems dagegen erfahren eine südwestliche Schwenkung. Insgesamt wandern die Inseln Rottum und Borkum in östliche Richtung. Während der Mündungsschwenkung ging auch eine charakteristische Veränderung der Platen vor sich. Die Hubert-Plate spaltete sich aus dem südlichen Wattsockel östlich Rottum am Ende des 16. Jahrhunderts ab, um anschließend durch das Wechselspiel der Gezeiten im Laufe der folgenden drei Jahrhunderte eine nordwestliche Bewegung zu durchlaufen. Diese Entwicklung zeigte in dem erfaßten Zeitraum keine einheitliche Tendenz, sondern wurde von Rückbildungen und Stillständen unterbrochen.

Die Entwicklung des Möwensteerts verlief dagegen gleichmäßiger. Er löste sich von dem Randzelwatt und bewegte sich unter Verlängerung des Platenendes deutlich nach NW, was die Einengung der alten Ems bewirkte. Etwa seit den vierziger Jahren begann die Entstehung einer neuen Plate aus dem südlichen Wattgebiet, der sog. Horsborn-Plate, der dasselbe Schicksal zuteil wurde wie jenes der Hubertplate.

Diese Veränderungen der Rinnen bringt JESSEN (22) mit der Verlegung des Gezeitentiefes in jungalluvialer Zeit zusammen. Die Achse des Gezeitentiefs drehte sich aus einer ursprünglich nördlichen bis nordwestlichen Richtung gegen den Uhrzeigersinn in eine westöstliche. Diese Ablenkung beginnt in frühgeschichtlicher Zeit und ist mit der Entwicklung der Deutschen Bucht verknüpft. „Die Ursache der Verlegung der Festlandflüsse . . . liegt . . .“ – wie es dort heißt – „ . . . in dem Bestreben der Wasserläufe, sich den heutigen Küstenverhältnissen, im besonderen der Angriffsrichtung der Gezeiten und Sturmfluten und der Sandwanderung anzupassen.“

Die Herausbildung neuer Flußmündungsarme und deren Erweiterung auf Kosten der alten ergeben sich als das Werk der Gezeiten, dem durch Sturmfluten wirksam vorgearbeitet wurde“ (S. 165).

Dagegen hält ISBARY (20) die West-Ost-Richtung für eine natürliche durch die Gezeiten gegebene Ausgangslage, die nur vorübergehend durch die großen Meereseinbrüche verändert wurde. Die in die Meeresbuchten ein- und ausströmenden Wassermassen veränderten die Lage der Gaten. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema lieferte NIEBUHR (33). „Die treibenden

Kräfte haben von außerhalb beginnend den Emslauf umgestaltet und ihm die heutige Form gegeben. Die Umbildung der Platen war hierbei, wie nachgewiesen werden konnte, nur die natürliche Folge der Veränderungen in den Strömungsverhältnissen“ (S. 62). Diese treibende Kraft, die die Umgestaltung der Emsmündung bewirkte, glaubt NIEBUHR in den Veränderungen der meteorologischen Bedingungen gefunden zu haben; daneben mißt er der Sandwanderung einen gewissen Einfluß bei.

5.1 Morphologische Entwicklung des Gebietes

Die Abbildungen 4 bis 6 geben die Lage der einzelnen morphologischen Großformen wieder, die sie im Jahre 1960, 1966 und 1970 eingenommen haben. Das Mündungsgebiet der Ems trägt die morphologischen Merkmale, ähnlich wie die meisten Ästuarien der deutschen Nordseeküste, eines Flut- und Ebb-Rinnensystems. Das Nebeneinander der Platen und Rinnen gliedert die Flußmündung.

Das morphologische Bild der Mündung im Jahre 1960 wird durch die Rinnen Wester-Ems-Randzelgat (nördliche) und Hubertgat-Alte Ems (südliche) geprägt (Abb. 4). Die beiden Teilerinnen werden durch den aneinandergereihten Platenkomplex Möwensteert-Horsborn-Plate und Hubert-Plate getrennt, die sich deutlich über das Niveau der Rinnensohle in Form eines Rückens erheben. Die höchstliegenden Teile des Möwensteert und der Hubert-Plate reichen fast an die MTnw-Linie, dagegen liegt die Horsborn-Plate wesentlich tiefer, nur an ihrem NW-Teil weist sie weniger als 6 m unter SKN auf. Lediglich zwischen der Horsborn-Plate und Hubert-Plate besteht eine schmale Verbindungsrinne von der Wester-Ems zum Hubertgat (Abb. 4).

Die durchgeführten Kartenvergleiche haben für den geschilderten Zeitraum nicht nur eine beachtliche Verlagerung der morphologischen Formen ergeben, sondern auch gezeigt, daß die Entwicklung nicht immer gleichzeitig verlaufen ist.

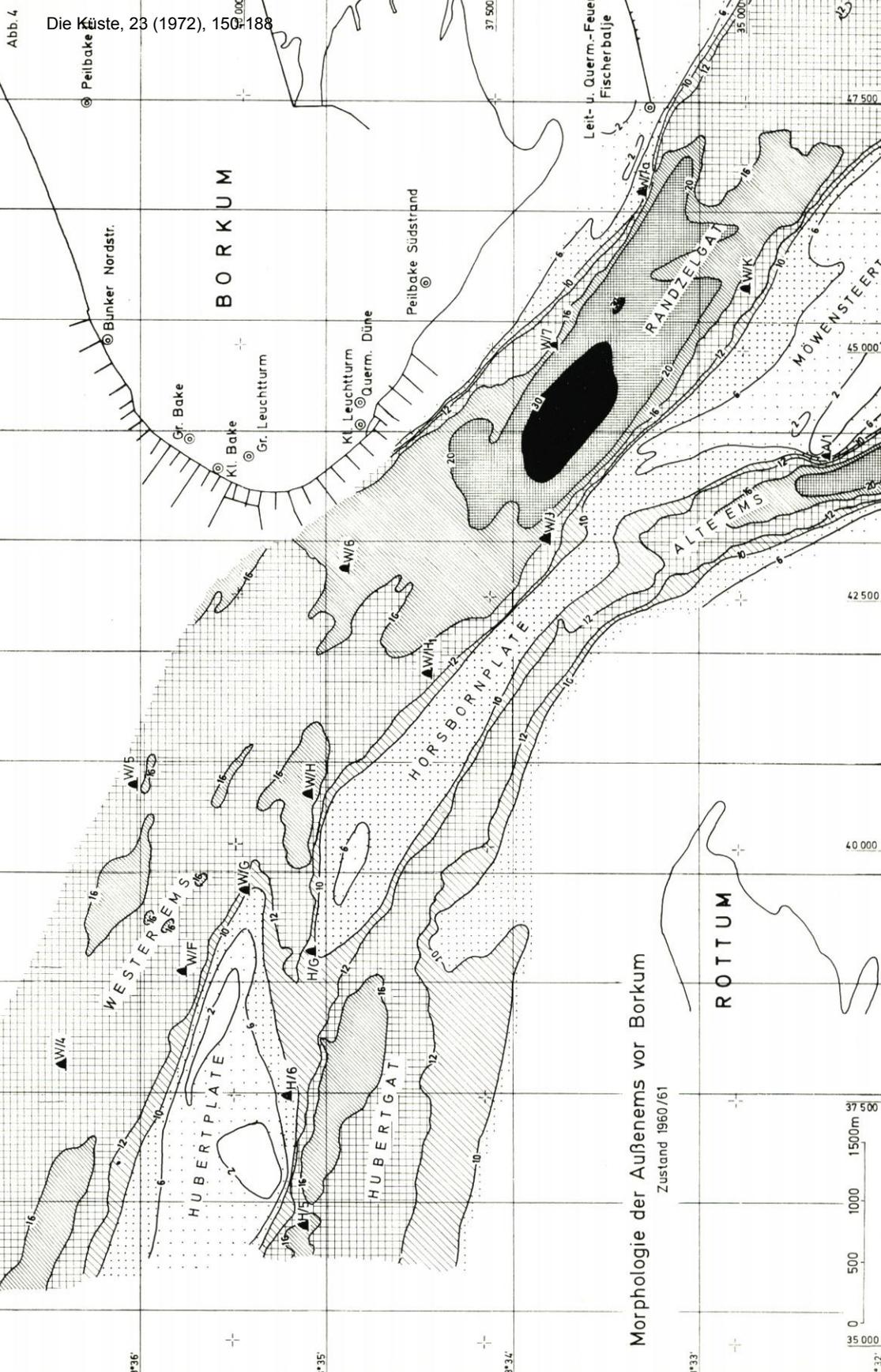
Der südöstliche Teil der Horsborn-Plate wurde ständig abgebaut, die einstige Rückenfläche, die bis zum Möwensteert reichte, verschwand allmählich. An ihrer Stelle entstand eine bis etwa 13 m unter SKN reichende breite Rinne, die Hubertfahrt, die jetzt das Hubertgat und die Wester-Ems verbindet (Abb. 6).

Gleichzeitig gliedert sich der Rest der Horsborn-Plate an die Hubert-Plate an und bildet ihre östliche Fortsetzung (Abb. 6).

Dieser Unterwasserkörper bewegt sich fast ununterbrochen nach NW, insgesamt macht die Verlagerung etwa 1000 m aus (Abb. 7), demzufolge die alte Hubertfahrt (die Verbindungsrinne) langsam zugeschüttet wird, die besonders durch den Differenzplan verdeutlicht wird (Abb. 8).

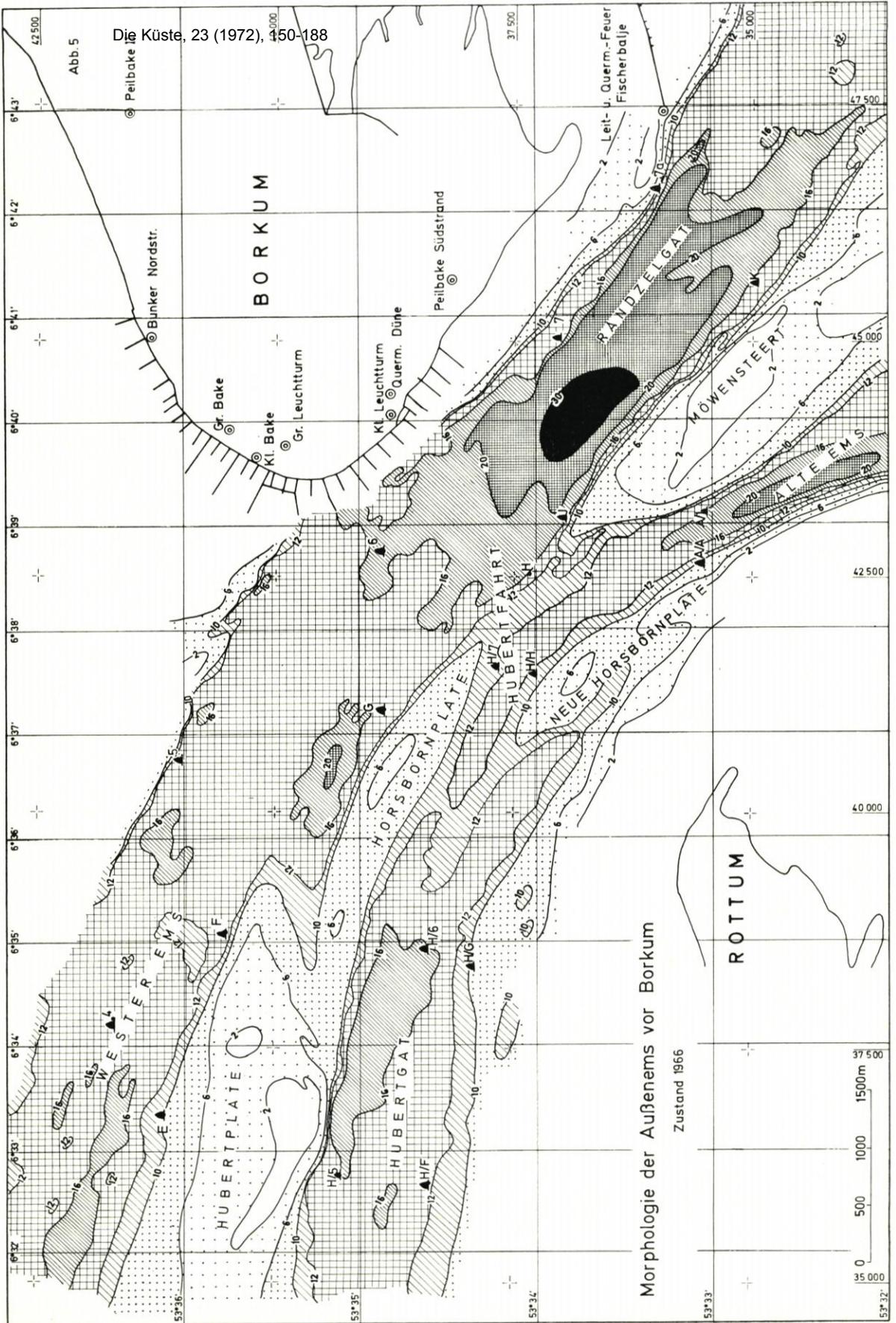
An der Nordostseite der Plate wird die Wester-Ems bis auf mehr als 20 m SKN ausgekolkt (Abb. 6, 7, 8). Als Folge der Verlagerung der Horsborn-Plate wird der bis dahin in der Verbindungsrinne abfließende Ebbstrom abgelenkt und prallt auf dem Ostteil der Hubert-Plate, woraus der Abbau dieses Teiles der Hubert-Plate (Abb. 7-8) resultiert.

Die Hubert-Plate zeigt im Süden keine nennenswerten Änderungen, dagegen wird im Norden durch das Vorrücken sämtlicher Tiefenlinien bis 16 m hinunter eine deutliche Ausdehnung nach Norden angezeigt (Abb. 7). Die Rinnenachse in der Wester-Ems verlagerte sich geringfügig nach Nord-Nordosten unter Abnahme der Durchschnittstiefe. Sowohl für die Wester-Ems als auch für das Hubertgat ist die Abnahme des Querschnitts unter 10 m SKN kennzeichnend. Eine andauernde Erhöhung der Sohle spielt sich im Randzelgat ab (Abb. 8), insbesondere ist auffallend die starke Tiefenabnahme zwischen der Insel Borkum und der NW-Spitze des



Morphologie der Außenems vor Borkum
Zustand 1960/61

Abb. 5



Morphologie der Außenems vor Borkum

Zustand 1966

ROTTUM

0 500 1000 1500m 37 500

Abb. 5

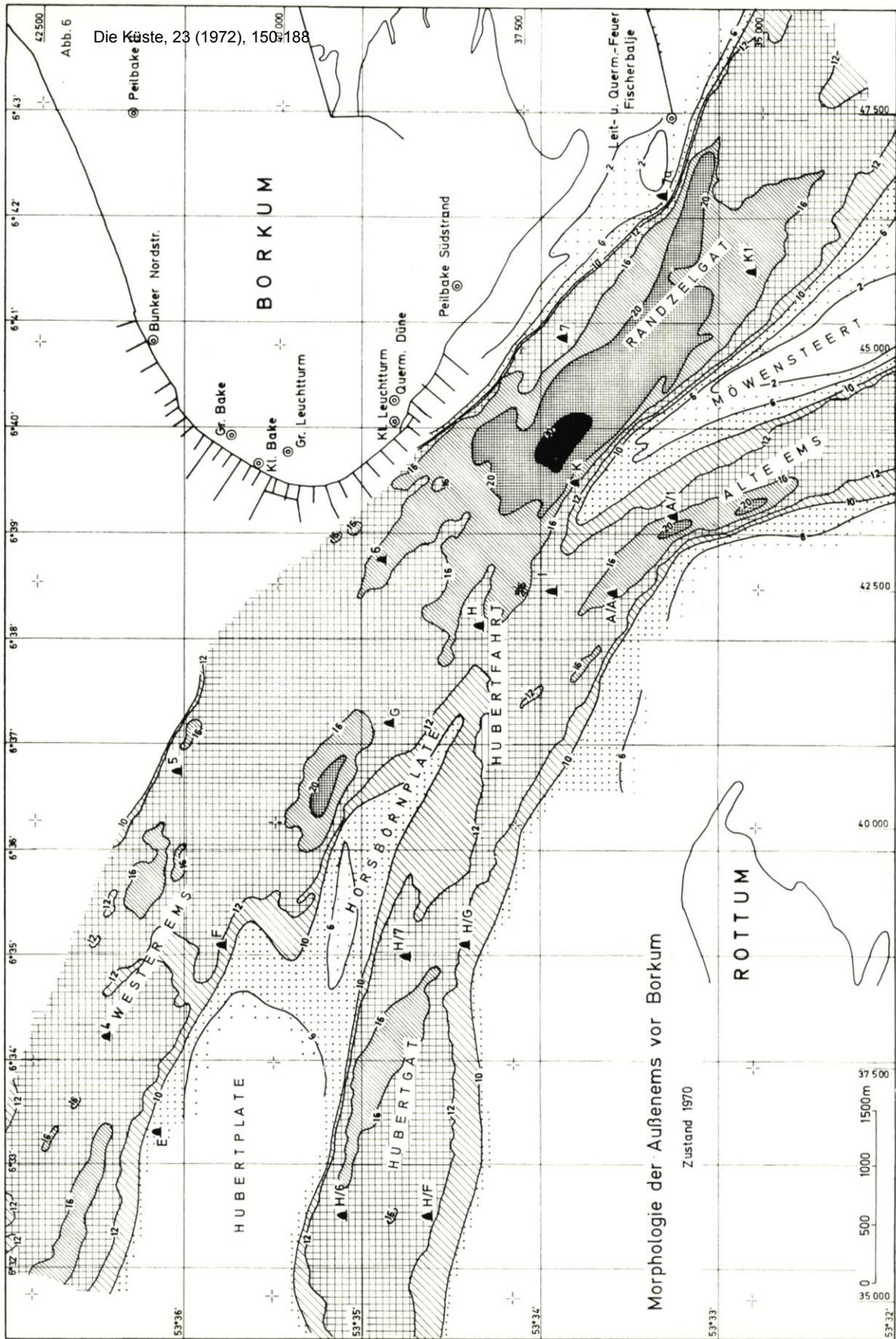
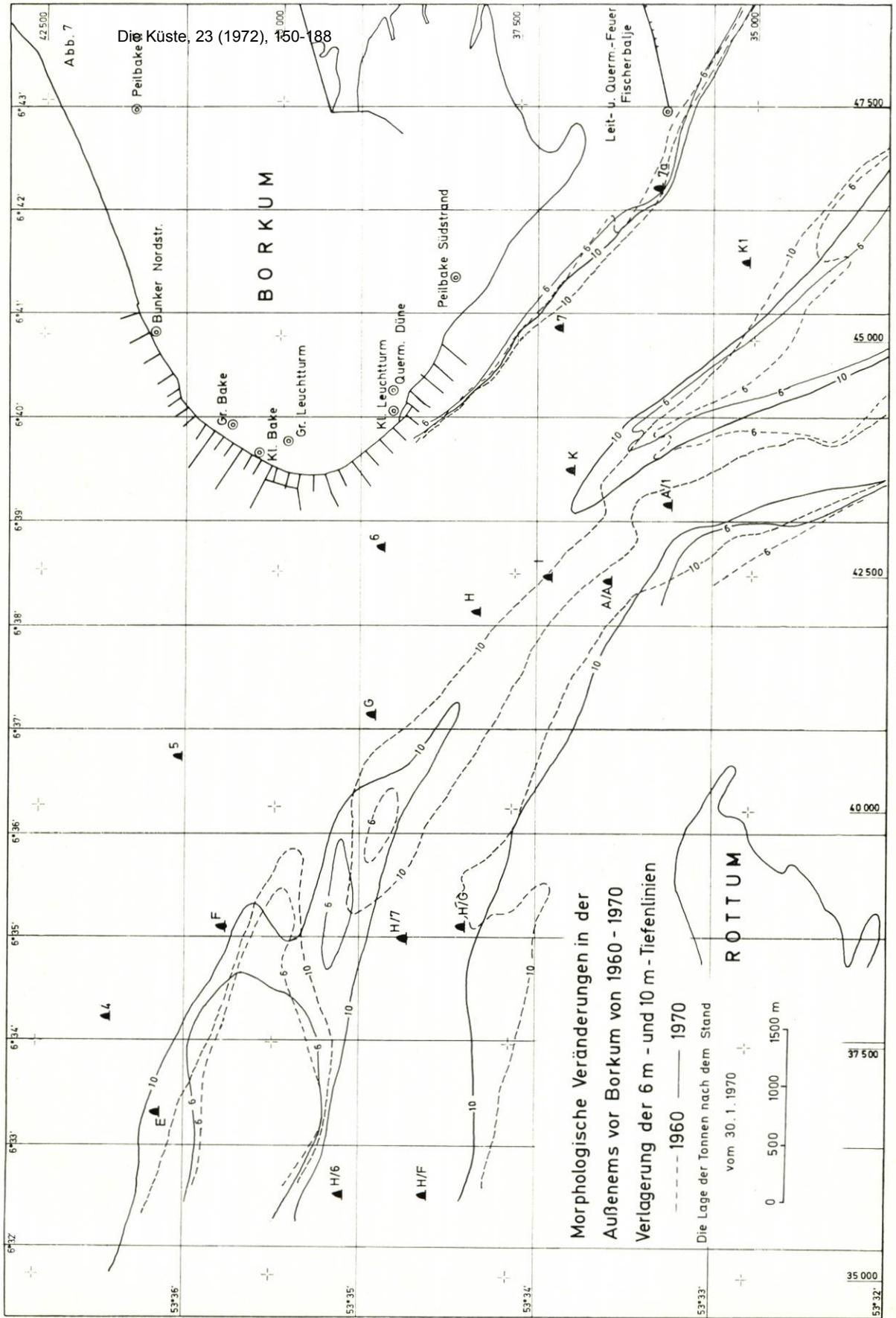


Abb. 6



Morphologische Veränderungen in der Außenums vor Borkum von 1960 - 1970
 Verlagerung der 6 m - und 10 m - Tiefenlinien vom 30.1.1970

Die Lage der Tonnen nach dem Stand vom 30.1.1970

0 500 1000 1500 m

Abb. 8

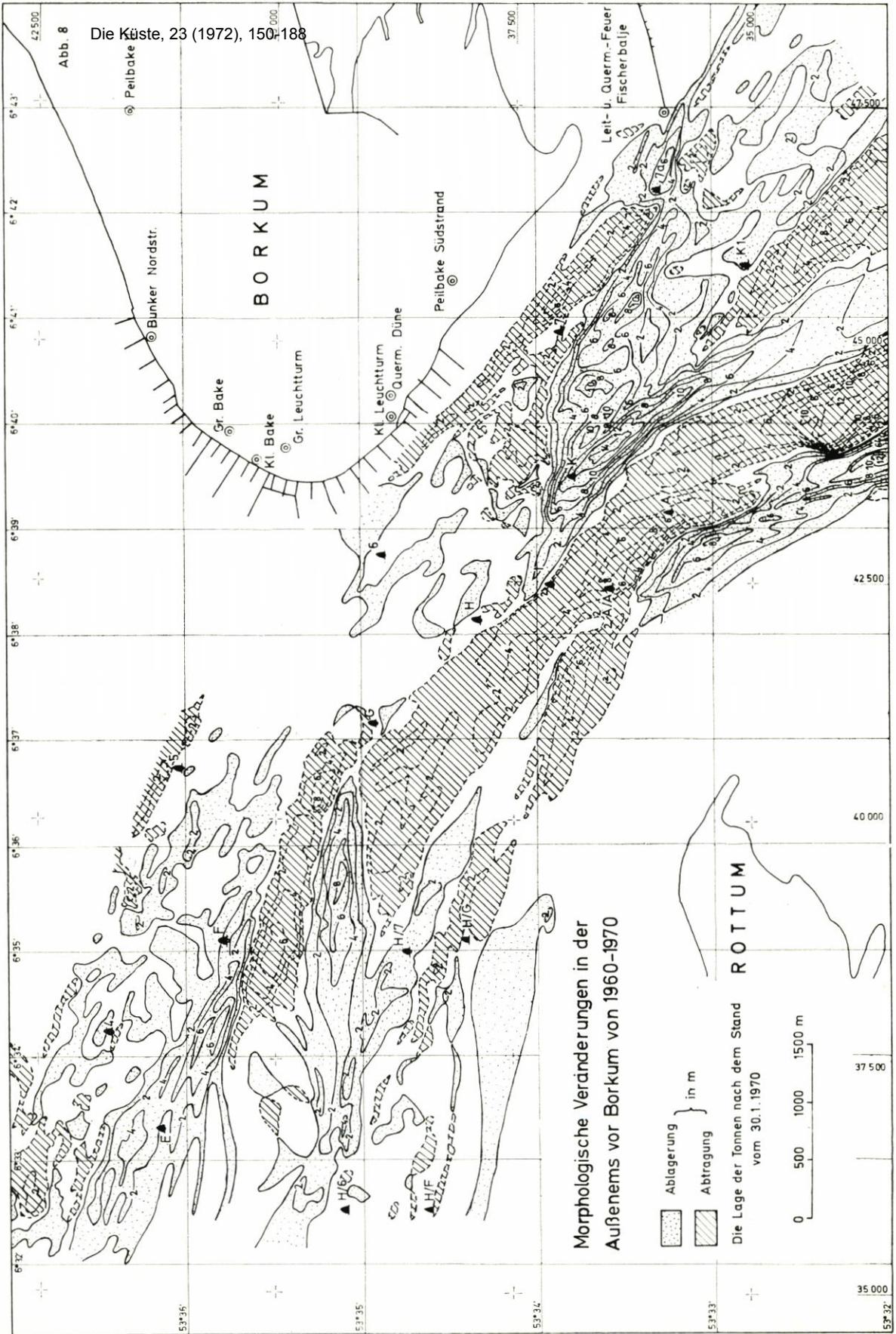


Abb. 8

Möwensteerts. Auf einen eventuellen Zusammenhang zwischen dem verklappten Baggergut und der Sohlenerhöhung wird im Kap. 5.3 eingegangen. Die Fläche unter 30 m, aber auch noch unter 20 m, hat ihren Umfang erheblich eingebüßt (Abb. 4 bis 6). Der Möwensteert verlängerte sich unter Abnahme seiner Breite nach Nordwesten, wobei er auch eine deutliche Verlagerung nach Nord-Nordosten in das Randzelgat erfahren hat (Abb. 7, 8). In dieser Untersuchungszeit vollzog sich teils die mäßige Verlagerung, teils die Verbreiterung der Alten Ems auf Kosten des

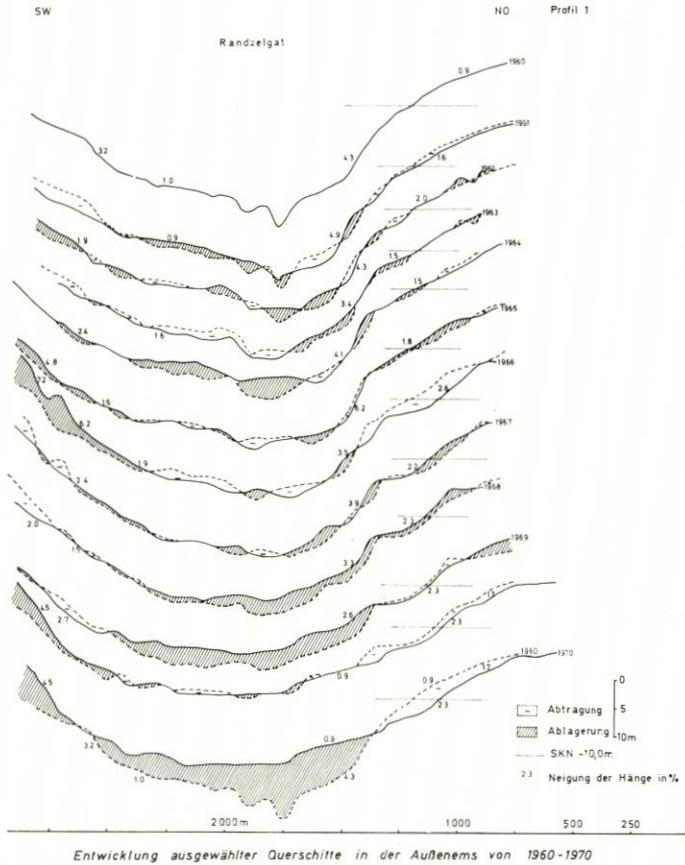


Abb. 9

Möwensteerts. Ihre Westteile haben ebenfalls in größerem Maße Auffüllungen erfahren (Abb. 7, 6). Die die westliche Begrenzung bildenden Wattgebiete wachen in die Alte Ems hinein.

Während der Untersuchungszeit waren nicht immer eindeutige Tendenzen festzustellen. So entstand für kurze Zeit die Neue Horsborn-Plate, die von dem südlichen Wattgebiet rasch in das Hubertgat vorgedrungen war (Abb. 5, 13). Dieser Zustand der Morphologie erinnert an die Entwicklung und Entstehung der Hubert- und Horsborn-Plate, indem in diesem Teil der Emsmündung die Entstehung eines Sandhakens zur Barre oder Plate beginnt, und wo es nach Ablösung derselben zu einer Wanderung nach NW kommt.

Ab 1966 setzt bereits Erosion ein, und so kommt es nicht zu der oben geschilderten Ent-

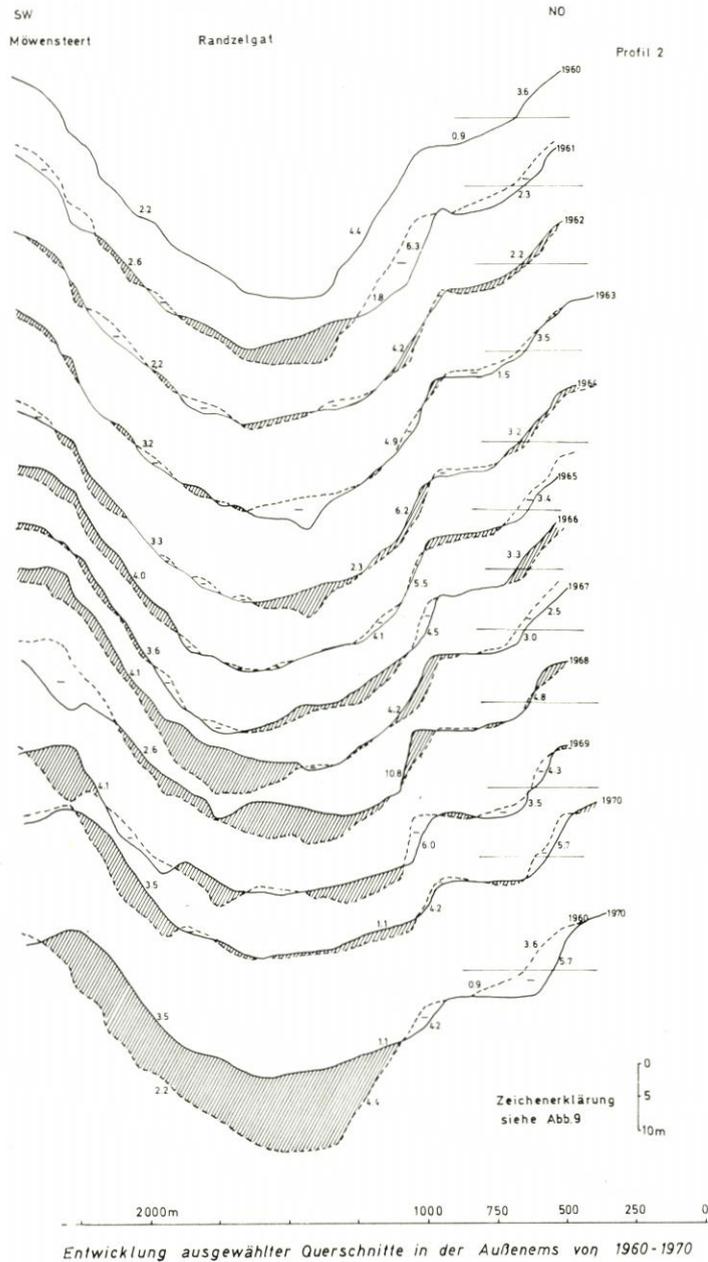


Abb. 10

wicklung der Neuen Horsborn-Plate. Im Hubertgat alternieren Ablagerung und Abtragung; bis 1964 überwiegt die Abtragung, ab 1964 folgt eine Ablagerungsperiode (Einengung des Hubertgats) (Abb. 8, 13).

Im Vorstrandbereich der Insel Borkum konnte keine eindeutige Richtung der Entwicklung festgestellt werden. Offensichtlich hat die Verlagerung des Möwensteert die morphologische Ge-

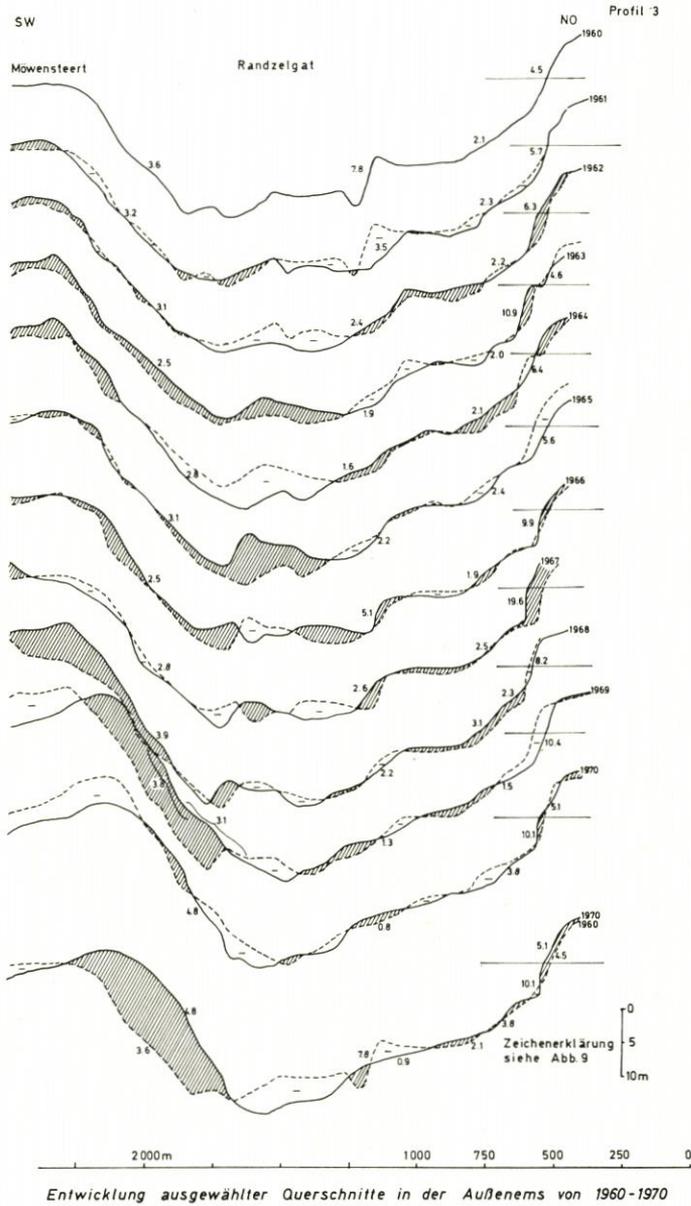


Abb. 11

staltung des Meeresbodens in Inselhöhe beeinflusst. Die Sohle des Randzelgats in der Tiefenlage von SKN — 13 bis — 16 m bzw. der Unterwasserhang bis — 4 m SKN zeigt das Alternieren von Sedimentation und Erosion mit etwas größerer Neigung zur Erosion. Die in der Darstellung der Differenzwerte angegebenen Werte können nur zur groben Orientierung dienen, da sie im Fehlerbereich der Genauigkeit liegen. Ein besseres Bild vermittelt die Lageänderung der Tiefenlinien. Die 6- und 10-m-Tiefenlinien haben sich im Durchschnitt bis etwa in Höhe der Peilbake inselwärts vorgeschoben. Dieses Bild wird durch die sinusförmig verlaufenden Tiefenlinien in

der Nähe der Bühnenköpfe auf der Strecke von Bühne 22 bis etwa in Höhe der Peilbake modifiziert. Hier sind mehrere Kolke in 13–17 m Wassertiefe entstanden, die einbuchtend in den Inselsockel erodiert wurden. Dazwischen erheben sich höherliegende Rücken, die nasenartig in das Randzelgat hineinragen. An solchen Stellen ist eine positive Verschiebung der Tiefenlinien zu verzeichnen. Dagegen haben sich die Tiefenlinien (6 m und 10 m) in der Umgebung der Fischerbalje fortlaufend seewärts verschoben.

Der Ablauf der Veränderungen wird durch die Betrachtung einiger Querschnitte weiter verdeutlicht. Die beobachtete Profilfolge ist an die Entwicklung des Seegrundes im Randzelgat geknüpft. Die Querschnitte (Abb. 9 bis 12) (Profil 1, 2, 3) weisen eine unterschiedliche und asymmetrische Form auf. Nach den Profilen beurteilt, besitzt der Unterwasserhang von der Insel zur Sohle hin größere Neigungen und eine gestufte Form, die allerdings im Jahre 1960

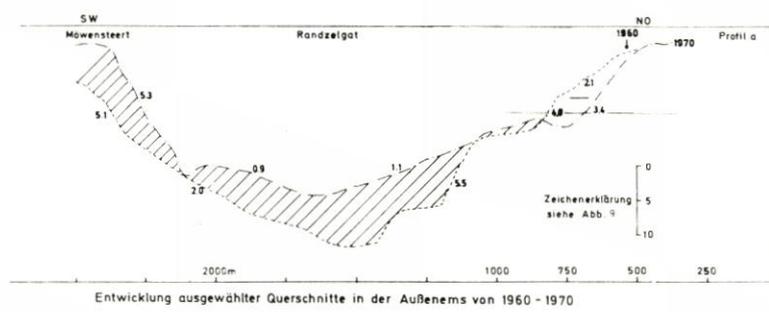


Abb. 12

erst in schwachen Ansätzen vorhanden war (Abb. 9 bis 11). Die Böschungen sind konkav bis gerade entwickelt. Konvexe Böschungen sind häufiger als konkave bei Verteilung des Profils. Die Sohle des Randzelgats ist unruhig. Auf der anderen Seite, zum Möwensteert, steigt der Meeresboden mit nahezu geradlinigem Hang bei fast gleichbleibendem Neigungswinkel hoch. Während der Untersuchungszeit haben die Hohl- und Vollformen in diesem Raum die stärksten Änderungen erfahren. Die andauernde Erhöhung der Sohle spielte sich in den Abschnitten Profil 1 (Abb. 9) und Profil 2 (Abb. 10) besonders stark ab. Die Auffüllung der Rinne trat beschleunigt in den Jahren 1964 und besonders seit 1966 ein. Die weiteste Verlagerung des Möwensteerts in das Randzelgat hinein fällt auch etwa in diese Periode. Abwechslungsreicher ist die Entwicklung des Unterwasserhanges im Vorstrandbereich Borkums.

In den Jahren 1961–1968 schaltete sich eine ebene Fläche in den bis dahin mehr oder minder gleichmäßig abfallenden Hang hinein (Abb. 9 bis 12), die sich ständig inselwärts verlagernd vergrößerte. Diese Fläche, ähnlich einer Flußterrasse, hat seit 1967 eine Umformung erfahren. Die höchsten Teile der Einebnung liegen an der Seeseite, die sich von da an mit rückläufigem Gefälle inselwärts erstrecken (Abb. 12). Diese Querschnitte spiegeln für die entsprechenden Jahre (1967 bis 1970) die Entstehung der Kolke wider. Eine Bindung dieser terrassierten Fläche an die Tiefenlage von 13 bis 15 m unter SKN ist erkennbar. Oberhalb dieser Fläche entwickelt sich eine steilere konvexe Böschung bis etwa zur Tiefe SKN — 4 m. Zu der größeren Tiefe der Rinne bricht sie mit einer Steilstufe ab. Seit 1968 ist eine rückläufige Entwicklung zu beobachten. Der Auffüllung des Meeresbodens folgte zwangsläufig der Abbau dieser Steilstufe.

In der Gesamtentwicklung weist das Untersuchungsgebiet temporären Charakter auf, indem der Auf- und Abbau der Rinnen und Platen mit unterschiedlicher Stärke vor sich geht. Einige verharren über längere Zeit an gleicher Stelle, nur ihre Randzonen werden in die Bereiche intensiver Umformungen einbezogen (Hubert-Plate, Möwensteert, süd. Wattsockel), an-

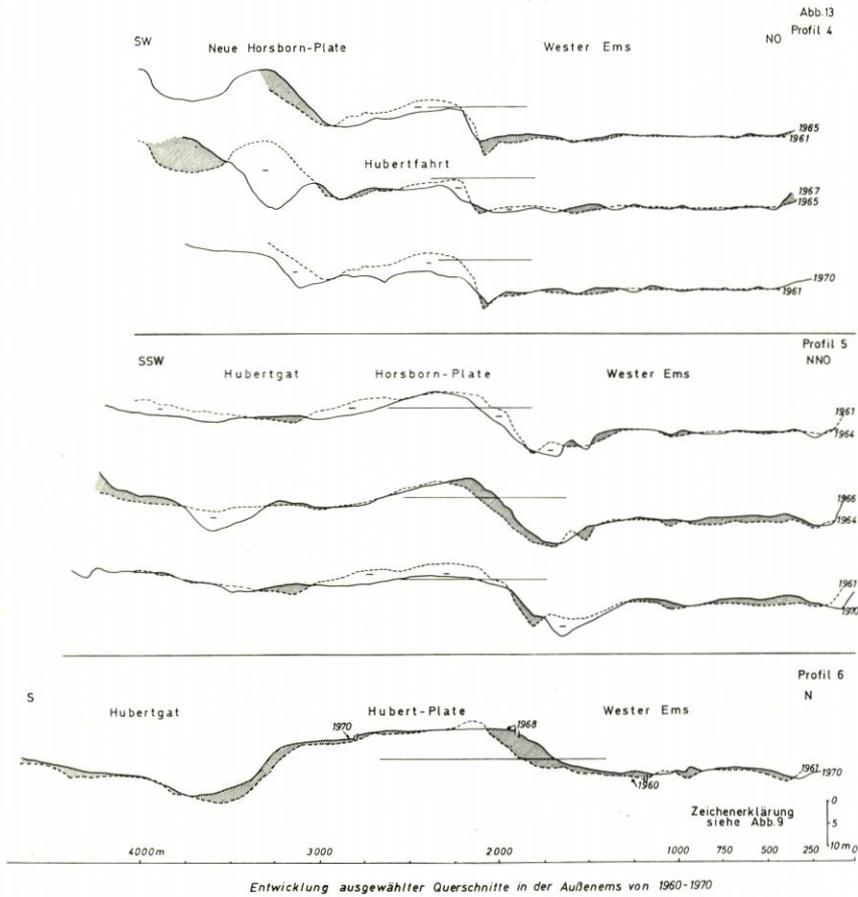


Abb. 13

dere können binnen kurzer Zeit verschwinden und wieder neu aufgebaut werden (Horsborn-Plate und Neue Horsborn-Plate). Über die Intensität der Materialumlagerungen gibt die Abbildung 8 ein anschauliches Bild. In Punkten zusammengefaßt sind für die Entwicklung des weiteren und nahegelegenen Küstenvorfeldes vor Borkum die folgenden Ergebnisse von Bedeutung:

1. Abbau und Angliederung der Horsborn-Plate an die Hubertplate, die sich gleichzeitig nach Norden ausdehnt.
2. Entstehung und Abbau der Neuen Horsborn-Plate.
3. Verbreiterung und Ostverlegung der Alten Ems.
4. Verlagerung des Möwensteerts in das Randzelgat bzw. Verschiebung nach Nordwesten, verbunden mit einer Verlängerung des Platenendes.
5. Auffüllung der Sohle und Verengung des Querschnitts des Randzelgates.
6. Entstehung einer Steilstufe auf der Inselfseite des Randzelgates.
7. Ausbildung einer ebenen Fläche in 13 bis 15 m Wassertiefe unter SKN.
8. Oberhalb und unterhalb dieser Fläche Formung von steileren Rinnenböschungen.

Dieser Abschnitt des Emsgebietes kann, wie andere Strommündungen auch, als morphologisch instabil angesehen werden. Es zeigt sich, daß es an dem Berührungsbereich der Teilrinnen immer wieder zu Bildung von Unterwasserkörpern kommt.

5.2 Korngrößenverteilung

Die Sedimentverteilung spiegelt das Gleichgewicht der Transportkräfte wider, wobei die Sandbewegung indirekt erfaßt wird, nämlich in der vom abgelagerten Sediment abgebildeten Sandsortierung. Jeder natürliche oder künstliche Eingriff in die bestehenden hydrodynamischen Verhältnisse führt zwangsläufig zur Änderung der Sedimentverteilung. Die Korngrößenanalyse erlaubt gewisse Aussagen hinsichtlich der Wirkung der Transportkräfte.

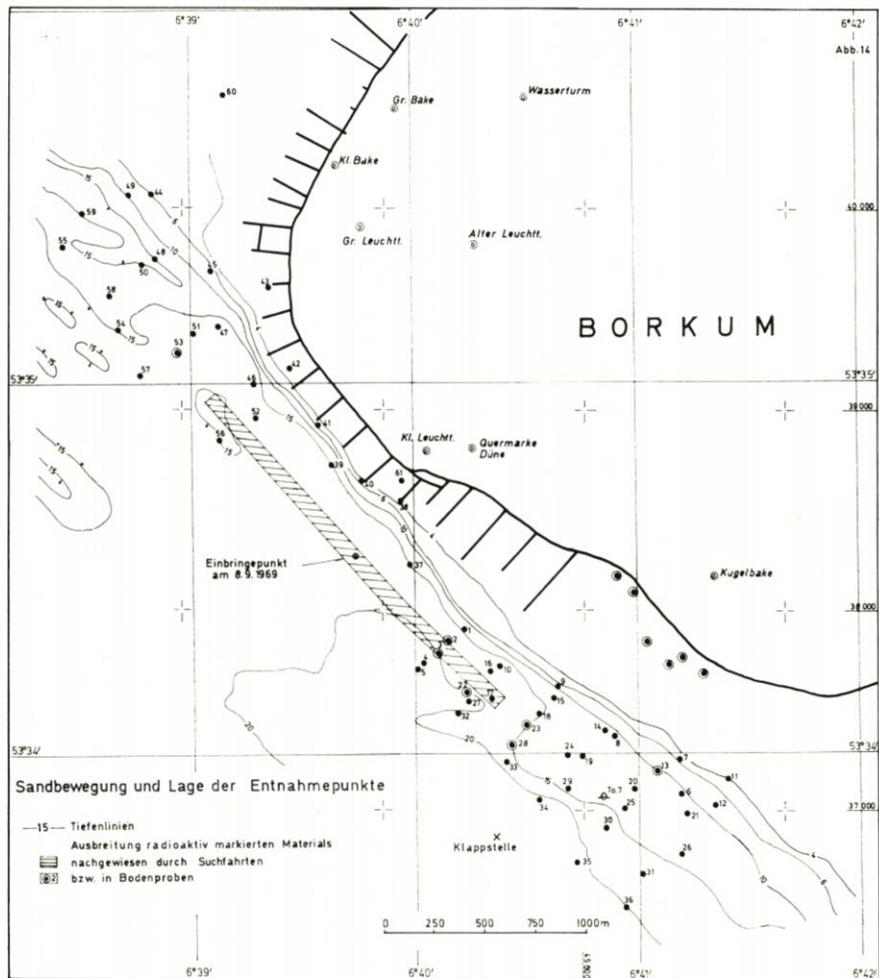


Abb. 14

In den Tidestromrinnen sind in der Regel die Sande grob (Mittel- und Grobsande, teils kiesig (DÖRJES u. a. [9], LÜNEBURG [30], OOMKENS-TERWINDT [34], REINECK [39], SAMU [41], SIMON [44])). Gebietsweise sammelt sich auch Muschelschill in größeren Mengen an. Die Platen und Watten bestehen aus feineren Sedimenten (mittelsandiger Feinsand bis toniger Silt). Die Korngrößen der Rinnenränder liegen erfahrungsgemäß dazwischen. Das auf der Grundlage der entnommenen Proben entworfene Bild der Sedimentverteilung entspricht im Untersuchungs-

gebiet nur bedingt dem oben geschilderten Muster, vielmehr haben die Analysen der 60 Proben (Abb. 14), die größtenteils aus dem Randzelgat vor dem Südstrand stammen, ein stark differenziertes Bild der Korngrößenverteilung ergeben (Abb. 15).

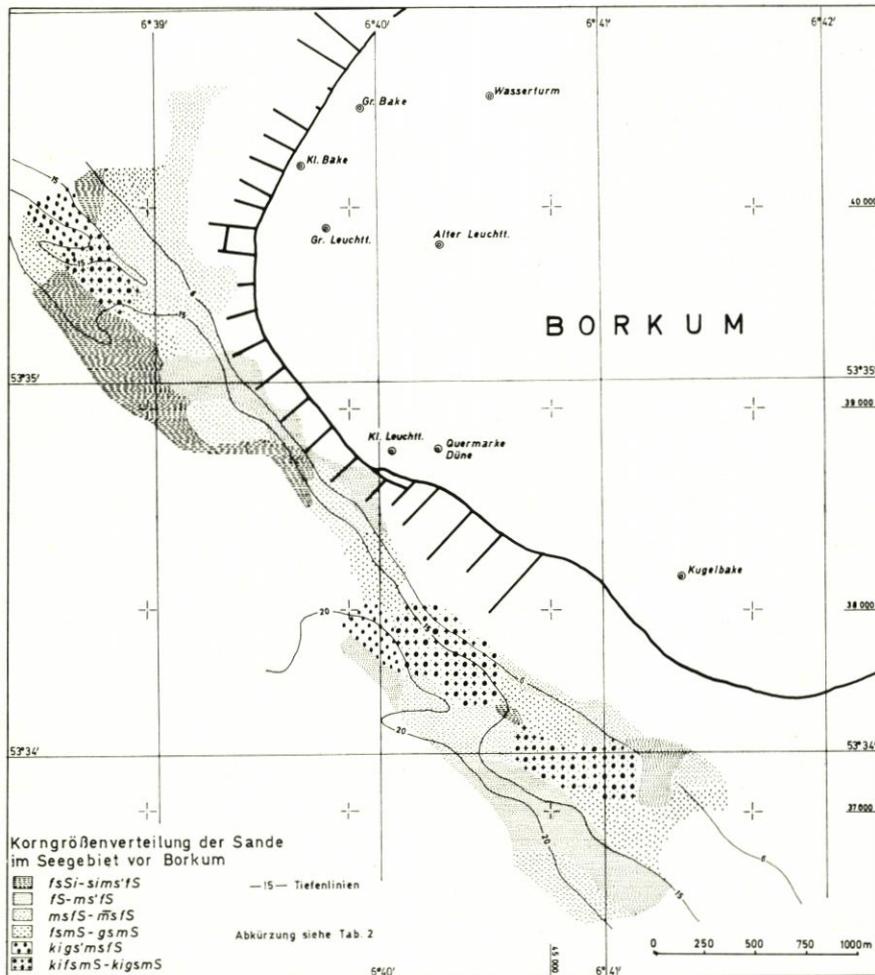


Abb. 15

Man kann auch nichts Näheres über die Verhältnisse des Seegebietes vor Borkum während der Untersuchungszeit sagen, da die Proben nur einen kleinen Ausschnitt des Raumes darstellen. Die früheren Untersuchungen, die für die Emsmündung durchgeführt wurden, geben nur einen groben Überblick der Sedimentbeschaffenheit vor Borkum, da es sich außer der kleinmaßstäblichen Darstellung noch um weitgestreute Probepunkte handelt.

Die erste umfangreiche Probenahme erfolgte im Jahre 1939. Im Rahmen einer weiteren Untersuchung wurden im Jahre 1948 erneut Bodenproben im Emsgebiet genommen. Anhand dieser Daten hat DECHEND (5) die Ems von Emden bis zur See sedimentologisch neu kartiert. Aus dieser Kartierung unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Jahre 1939 geht hervor, daß im Randzelgat-Wester-Ems grobes Material (Mittelsand bis Steine) vorliegt, das randlich

von immer feineren Sanden umgeben ist. Das Hubertgat und die Alte Ems sind von Feinsanden ausgefüllt. Diese Ergebnisse sind deshalb noch interessant, weil sie zeigen, daß in der Nähe der Tonne 7 im Randzelgat seit 1948 die Kornzusammensetzung Veränderungen erfahren hat. In dem tieferen Rinnenteil lagert wesentlich feinkörnigeres Sediment, das vermutlich aus den Baggerungen stammen dürfte (s. Kap. 5.3). Das angrenzende Gebiet landwärts weist dagegen grobes Material mit hohen Anteilen von sehr feinem Material auf.

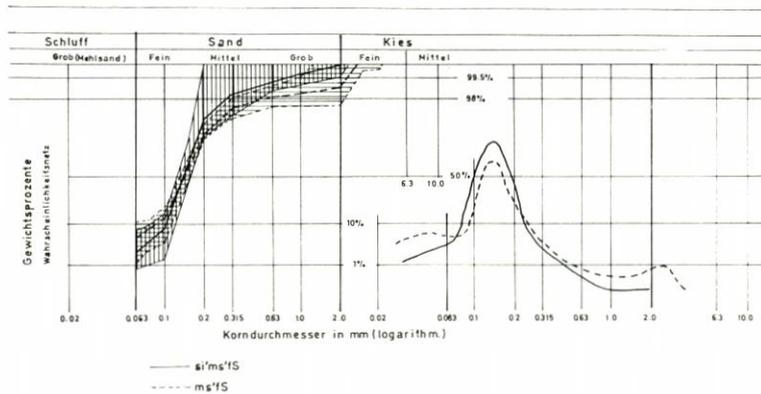


Abb. 16. Sammeldiagramm von Kornsummenkurven mit abgeleiteten Häufigkeitskurven

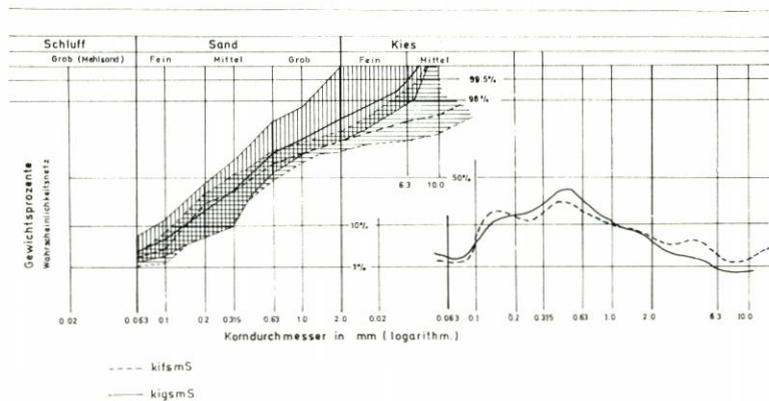


Abb. 17. Sammeldiagramm von Kornsummenkurven mit abgeleiteten Häufigkeitskurven

Die Verteilung der Sedimente im Untersuchungsraum vor der Küste von Borkum zeigt eine gewisse Zonierung (Abb. 15). Diese Differenzierung ist offensichtlich vom Relief abhängig. Die Sedimente bilden in der Reihenfolge fein – grob – fein von der Küste aus gesehen drei fast parallele Streifen. Die feinsandigen Silte bzw. Feinsande bedecken mit zwei Ausnahmen an der Strandseite oberhalb der 6-m-Tiefenlinie unter SKN das Untersuchungsgebiet bzw. an der Rinnenseite in 15–20 m Tiefe unter SKN.

Dazwischen nehmen die Mittelsande bzw. kiesige Sande größere Flächen in der Tiefenlage von 6 m bis 15–18 m unter SKN ein. Diese größeren Fraktionen lassen sich nicht zusammenhängend verfolgen. Sie bilden zwei Areale, ein größeres vor dem Südstrand in jenem Bereich,

wo der Vorstrand mit einem starken Gefällsknick zu dem Flachseeboden in 13 bis 15 m Tiefe abfällt, und ein kleines etwa in der Höhe des Gr. Leuchtturms. In diesem Bereich lagern noch sehr feinkörnige Materialien.

Auffallend ist ein starke Beteiligung von größeren Bestandteilen bei fast der Hälfte aller Proben, die alle Kornklassen erfassen (Tab. 3, Abb. 15). Wegen des hohen Prozentsatzes von kiesigen und grobsandigen Komponenten war die Zuordnung von einigen Proben zu den Fein-, Mittel- und Grobsanden oder zu den Kiesen recht problematisch. Diese Proben wurden zwei neuen Gruppen, und zwar den kiesigen Feinsanden und den kiesigen Mittelsanden, zugeordnet (Tab. 3e, f; Abb. 17). Neben den grobkörnigen Komponenten erhalten einige Proben bzw. alle Korngruppen zusätzlich noch Beimengungen von sehr feinkörnigen Komponenten. Die Summenkurven dieser Sedimente bieten ein unausgewogenes Spektrum, aber auch die Häufigkeitskurven machen deutlich, daß neben eingipfligen auch sehr viele zwei- und mehrgipflige Verteilungen in den untersuchten Sedimenten vorkommen (Abb. 17). Diese Sedimente gehören zu den am schlechtesten sortierten des Untersuchungsgebietes. Die ausgesprochenen hohen Mittelwerte sind auch aus dieser Ursache heraus zu erklären. Allerdings sind niedrige Mittelwerte keine Kriterien für gute Sortierung, wie bereits angedeutet wurde. Bei solchen Proben mit kleinen Medianwerten können einige Prozent grobe Bestandteile auftreten, die sich auf die Sortierung auswirken. Dem Auftreten der schlechtsortierten Sedimente kommt eine besondere Rolle bei der Interpretation der Sedimentbewegung zu.

5.3 Beziehungen der morphologischen Entwicklung und der Korngrößenverteilung zum Gesamttransport

Die Ergebnisse der morphologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Korngrößen-Analysen und der Leitstoffmessungen sowie die zur Verfügung stehenden hydro-meteorologischen Daten erlauben zwar einen Einblick in das natürliche Geschehen, doch können daraus kaum allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden. Aussagen über den Gesamttransport können wegen des begrenzten räumlich-zeitlichen Ausschnittes nur als Hinweise gewertet werden.

Das Mündungsgebiet der Ems bildet, wie alle Flußmündungen im Gezeitenbereich, ein offenes temporäres System, in dem Materialmengen ein- und ausgehen. Die Art und Intensität der morphologischen Entwicklung und damit verbundene Materialbewegung resultiert aus der Wechselwirkung der gestaltenden Kräfte, von denen die Gezeiten, die Triftströmungen, der Seegang und die Brandung als wichtigste zu nennen sind. In der Außenems liegt ein regelmäßig gegliedertes Flut-Ebbe-Rinnensystem vor, wie es VAN VEEN (48) beschrieben hat. Diese Rinnensysteme zeigen ein instabiles Verhalten, indem der Formenschatz ständige Verlagerungen unter den sich stets ändernden Transportverhältnissen erleidet, besonders dort, wo die Rinne einen verhältnismäßig breiten Querschnitt besitzt. Das Gebiet zwischen Borkum und Rottum stellt von Zeit zu Zeit einen solchen Raum dar. Während der in Betracht gezogenen kurzen Untersuchungszeit konnte eine merkbliche Veränderung der Voll- und Hohlformen festgestellt werden. Außer den beiden Inseln Borkum und Rottum sind die Hubert-Plate und der Möwensteert relativ lagestabil. Die beiden Platen zeigen in ihrem Kern keine nennenswerten Verlagerungstendenzen. Allerdings können ihre Randgebiete in den Bereich stärkeren Materialumsatzes hineingezogen werden (Abb. 8 bis 13). Sehr stabil dagegen verhält sich die Horsborn-Plate und Neue Horsborn-Plate. Die Entstehung und Bewegung dieser Erscheinungsformen läßt sich durch die verschiedene Richtung des Flut- und Ebbstromes in Beeinflussung von der jeweiligen morphologischen Gestalt des Meeresbodens erklären. Die stärksten Flut- und Ebbströme neigen

dazu, in getrennten Bahnen zu fließen (Corioliseffekt), wodurch ein Raum umschlossen wird, in welchem sich eine Zone von geringerer Strömungsgeschwindigkeit befindet, in der die Entstehung von Sandbänken (Barren) begünstigt wird. Der Stromquerschnitt Borkum-Rottum bietet günstige Voraussetzungen für die Ausbildung von getrennten Flut- und Ebbbahnen, doch die sich wiedervereinigenden bzw. trennenden Teilrinnen komplizieren die Verhältnisse. In den folgenden Ausführungen wird der Entwicklungsablauf einer Plate skizzenhaft dargestellt (Abb. 18).

In Zeiten, in denen zwischen dem Möwensteert und der Hubert-Plate keine Barre vorhanden ist, läuft der stärkste Flutstrom vom Hubertgat unter spitzem Winkel auf die Südwestküste der Insel Borkum zu. Der aus der Westerems kommende Flutstrom berührt die Insel tangential. Die beiden Strömungen drängen vorwiegend in das Randzelgat. Dabei werden erhebliche Wassermengen über den Möwensteert in die Alte Ems abgegeben, auch bei Ebbe findet Wasserabgabe über dem Möwensteert statt. Ein Teil der Wassermenge wird auch bei Flut in die Alte Ems vom Hubertgat kommend einströmen. Der im Hubertgat an der südlichen Fahrwasserseite in West-Ost-Richtung verlaufende Flutstrom hat durch die feste Begrenzung des südlichen Wattgebietes und infolge der Rechtsablenkung eine straffe Führung (Abb. 18, Nr. 1). Nach Verlassen dieses natürlichen Leitwerkes behält die Strömung einerseits die vorgegebene Richtung, andererseits ist sie durch den Möwensteert zur Verzweigung und Richtungsänderung gezwungen (Alte Ems). In solchen gekrümmten Strecken können durch die so gegebenen hydrologischen Verhältnisse Energieverluste eintreten. Der mit Annäherung an die Küste mit Sand angereicherte Flutstrom lagert die mitgeführten Stoffe oder einen Teil derselben in der Krümmung ab. Es ist auch zu vermuten, daß mit der Gezeitenströmung verstärkt durch die Triftströmungen über die Watten um die Insel Rottumeroog hinweg Material transportiert wird, das in der angrenzenden Rinne der Alten Ems zusätzlich abgelagert wird.

Zunächst entsteht ein Knick des Wattsockels, der bald zu einem untermeerischen Haken bis nahe an die Tnw-Linie hinaufwachsen kann (Abb. 18, Nr. 2). Die Bildung dieses Sedimentkörpers wird dadurch begünstigt, daß der stärkste Ebbstrom aus der Alten Ems nicht an der Westseite der Rinne abfließt. Ein Teil der Wassermassen strömt über den Möwensteert hinweg in das Randzelgat. Die vorhandenen Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 1) reichen nicht mehr aus, die abgelagerten Sedimente wieder fortzuführen. Der entstandene Haken wird nicht wie bei einer echten Nehrung durch seitliche Verlängerung hinauswachsen, sondern modifizierend durch den Ebbstrom wird er nach Nordnordwesten in das Hubertgat vorgeschoben. Der Ebbstrom beeinflusst somit die Bildung der Unterwasserkörper und beteiligt sich auch durch Materialzufuhr an ihrem Aufbau. Der Haken bildet ein Hindernis, der Flutstrom verliert die festen Führungsbahnen, teils wird er gezwungen, das selbst geschaffene Hindernis zu umfließen, teils bewirkt dieses einen gewissen Aufstau, der über es hinweg durch Querströmungen kompensiert wird. In beiden Fällen kommt es zu verstärktem Sedimentausfall, was ein schnelles Wachstum zur Folge hat (Abb. 18, Nr. 3). Unter dem äußeren Zwang des Hakens beginnt der stärkste Flutstrom, da er ohnehin das Bestreben hat, südlicher einzuströmen, eine neue Flutrinne hinter dem Haken zu bilden, bis es zu einem Durchbruch kommt (Abb. 20, Nr. 4). Eine Begünstigung der Ausbildung der Flutrinne kann durch die hier vorhandenen Wattpriele (Sparregat) eingeleitet werden.

Die neu entstandene Plate regelt sich mit ihrer Längsachse zunehmend parallel zur Strömungsrichtung ein (Abb. 18, Nr. 4). Der Sand wird beiderseits an die Plate herangeführt. Unter der Wirkung des resultierenden Stromes wird sie langsam nach Nordwesten versetzt, bis sie schließlich an den nächsten Platenkomplex Anschluß findet (Abb. 18, Nr. 5, 6).

In der Nachbarschaft von stark durchströmten Rinnen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten ist an Wattvorsprüngen mit einer außerordentlich starken Sedimentation zu rechnen. Die

allgemein herrschenden hydrologischen Bedingungen führen auch an anderen Küstengebieten der Nordsee zum Aufbau ähnlicher Akkumulationskörper. Beispiele zu diesem Thema lieferten aus dem Jadegebiet insbesondere KRÜGER (25) und POPPEN (35), die die Gesetzmäßigkeiten der Platenwanderung zuerst erkannten und aus der neueren Zeit REINECK (39), der das Gebiet sedimentologisch untersuchte. Im Elbegebiet hat GÖHREN (14) den Vorbau des Mittelgrundes aus den südöstlichen Watten festgestellt.

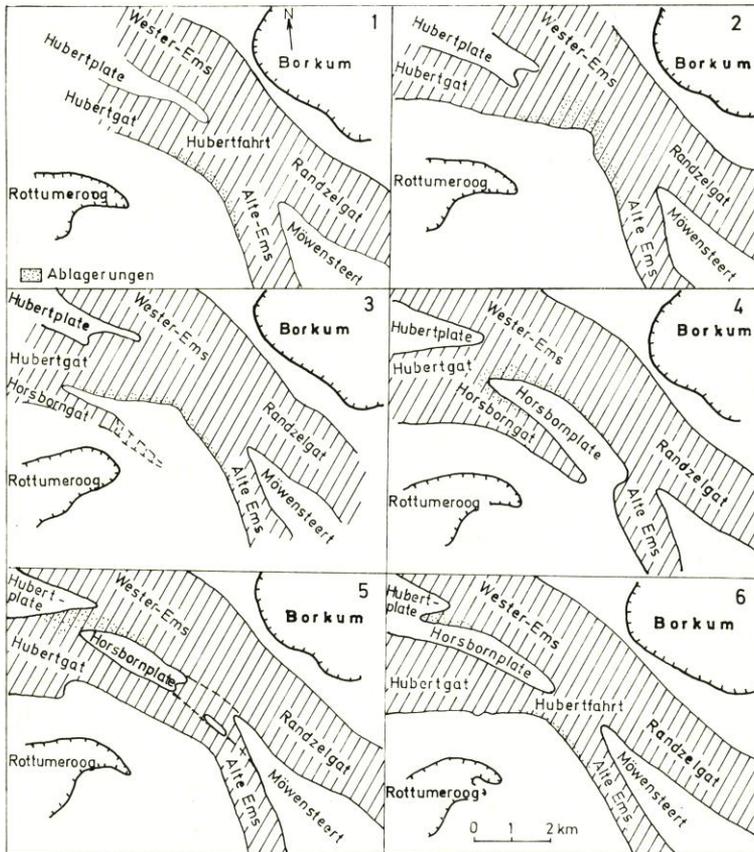


Abb. 18. Schematische Darstellung der Entwicklung einer Plate in der Außenems zwischen Borkum und Rottum

Im Süden kann die Entstehung und Bewegung einer neuen Plate ihren Anfang nehmen. Allerdings dürfte für den kontinuierlichen Ablauf Voraussetzung sein, daß zwischen der Hubert-Plate und dem südlichen Wattgebiet eine genügend breite Rinne vorhanden ist. Falls die sich nach Nordwest bewegend Plate, in unserem Fall die Horsborn-Plate, schon eine Verbindung mit der Hubert-Plate hat, aber der südliche Teil den Querschnitt merklich verengt, kommt es nicht zur Ausbildung eines neuen morphologischen Unterwasserkörpers im Süden, oder nach anfänglichen Ansätzen wird durch Abbau die Entwicklung rückgängig gemacht. Dieses Schicksal wurde auch der Neuen Horsborn-Plate zuteil. Die entworfene Skizze soll uns das Resultierende der vermutlich komplizierteren Bewegung darstellen.

In welche Richtung auch die Entwicklung verlaufen mag, im Untersuchungsraum besteht immer wieder eine Tendenz zur Sedimentablagerung, die für die Schifffahrt hinderlich ist. Die erst in jüngster Zeit (seit 1968) angeführten Baggerungen können diese Entwicklung nur modifizieren. Über die Baggermengen im Untersuchungsgebiet sind seit Beginn der Baggerungen folgende Zahlen bekannt:

Tabelle 5

Jahr Gebiet	1968	1969
	Menge in m ³	
To. H/7-H/H	7 700	163 500
To. H/4-H/5	—	667 800

Wahrscheinlich hat dieser Eingriff kaum auf den Entwicklungsverlauf einen Einfluß ausgeübt.

Die Formung des Unterwasserreliefs vor Borkum ist in den letzten zehn Jahren durch die Verlagerungstendenz des Möwensteert beeinflusst worden, dessen Gestaltung wiederum in ursächlichem Zusammenhang mit den Geschehnissen im Gebiet der alten Ems und des Hubertgat betrachtet werden muß. Die Verlagerung des Möwensteert hat nicht nur zur Verengung des Querschnitts geführt (Abb. 10, 11), der zwischen der 6-m-Tiefenlinie von 1,9 km auf 1,65 km zurückging, sondern trug zur Auffüllung der Sohle bei und bewirkte auch die nordöstliche Versetzung der Rinnenachse des Randzelgats. Wie weit die Aufsandung des Randzelgats auf die Verklappung des Baggergutes zurückzuführen ist, kann nicht mit eindeutiger Sicherheit beantwortet werden. Die Baggermengen stammen überwiegend aus den Baggerungen des Fahrwassers oberhalb des Untersuchungsgebietes. Unter der Annahme, daß die verklappten Baggermengen im wesentlichen die Sedimentation verursachen, wurde versucht, die Menge des verklappten Baggergutes und die Sohlenerhöhung miteinander zu korrelieren (Abb. 19). Die Betrachtung der Vergleiche zeigt, daß zwischen dem verklappten Baggergut und der Sohlenerhöhung von 1964 bis 1967 gute Übereinstimmung besteht. In den folgenden Jahren macht sich immer mehr Materialverlust bemerkbar. Seit 1967 fehlten etwa 3 Mio. m³ Baggergut. Es kann vermutet werden, daß ein Teil des Sandes an Ort und Stelle verbleibt, ein anderer Teil weitertransportiert wird. Dann müßte das Materialdefizit in der Rinne durch den Sand, der aus dem Vorrücken des Möwensteerts stammt, ersetzt werden. Dazu wurden noch von 1966 bis September 1970 jährlich durchschnittlich 0,7 Mio. m³ stark schlickhaltiges Material aus dem Emdrer Fahrwasser verklappt, dessen Verbleib an Ort und Stelle bei den herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten fraglich ist.

Eine genauere Abschätzung läßt sich nicht machen, weil zwischen der Kornzusammensetzung der Platensedimente und der verklappten Materialmengen kein Unterschied besteht, beide gehören überwiegend in die Kornklasse 0,1–0,2 mm. Die Karte der Sedimentverteilung zeigt, wie der Sand in Richtung der Klappstelle zunehmend feiner wird. Im Gegensatz zu älteren Untersuchungen (DECHEND [6]) ist in der Rinne eine eindeutige Veränderung der Körnung eingetreten. Das Überwiegen der Feinsande kann somit auch auf die Verklappung zurückgeführt werden. Eine eindeutigere Antwort auf die Frage, wie weit die verklappten Baggermengen die Umformung des Meeresgrundes mitbeeinflusst haben, kann man vielleicht in der Zukunft erhalten. Denn nach Verlegung der Klappstelle kann die Entwicklung unbeeinflusst vor sich gehen, falls bis dahin keine anderen anthropogenen Eingriffe vorgenommen werden. Das Verbleiben des fehlenden Materials kann man ohne einige grundsätzliche Untersuchungen schwer verfolgen. Der Sand kann in dem Hin und Her der Gezeitenbewegung nach Nordwesten in

das Gebiet der Hubert-Plate und des Hohen Riffs gelangen oder nach Südosten stromaufwärts transportiert werden. Die Leitstoffmessungen und die Sedimentverteilung dürften einige Angaben für diese Vermutungen liefern.

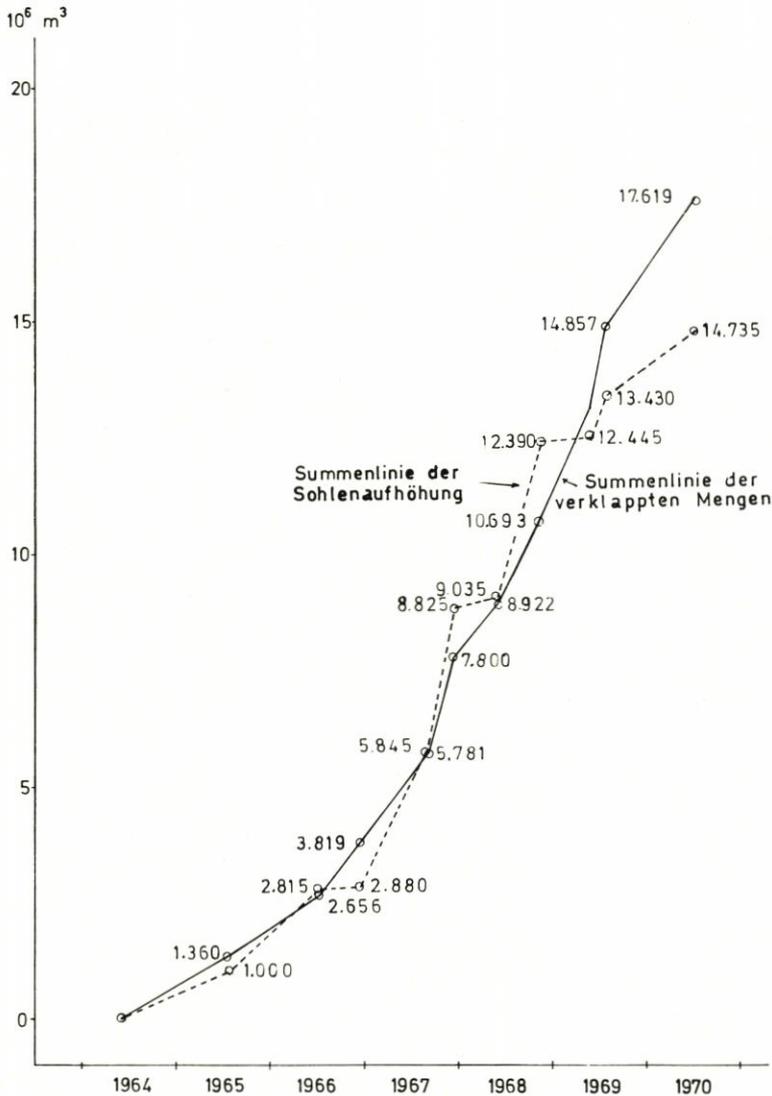


Abb. 19. Menge des verklappten Baggergutes und der Volumenänderung der Sohle unterhalb 15 m Tiefe bei Tonne 7

Anhand der Korngrößenverteilung von Durchschnittsproben ist über die Transportrichtung keine differenzierte Aussage möglich, doch eine resultierende Transportrichtung kann beurteilt werden. Um die Zusammenhänge besser verdeutlichen zu können, soll auf einige Abhängigkeiten zwischen Strömung, Kornverteilung und Kornkennwerte eingegangen werden, die für die Beurteilung der Materialbewegung im Rahmen dieser Untersuchung von Bedeutung sind.

Das Aufnehmen oder Absetzen des Bodenmaterials ist von der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der daraus resultierenden Transportenergie abhängig. Eine Wasserbewegung von gewisser Stärke kann, wie aus den Transportformeln ersichtlich ist (Abb. 20)³⁾, nur Material bestimmter Korngröße vom Boden aufnehmen oder transportieren. Beim Unterschreiten der kritischen Grenzgeschwindigkeiten fallen bestimmte Korngrößen aus, das Material erfährt eine Sortierung. Jede Änderung der Transportbedingungen, die durch Gezeitenströme, Seegang und Brandung in der Küstennähe eintreten kann, bewirkt die Änderung der Korngrößenverteilung.

Die Korngrößenverteilung bzw. die Kornkennwerte spiegeln die zeitlichen Wechsel der hydrodynamischen Bedingungen am Ablagerungsort wider (WALGER [50]). Der Medianwert

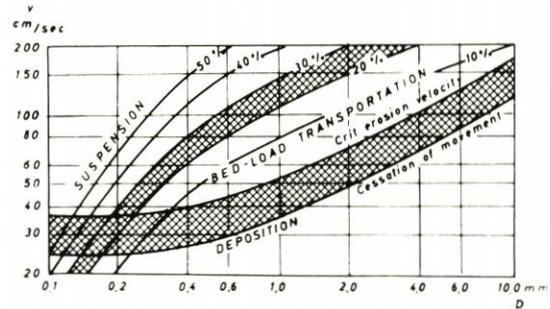


Abb. 20.
Grenzgeschwindigkeit des Geschiebe-
transportes in 1 m Höhe über dem Boden
und das Verhältnis Suspension zu Geschiebe
bzw. Ablagerung in Prozenten ausgedrückt
(n. SUNDBORG 46)

ist unmittelbar mit der Strömungsgeschwindigkeit, die das Sediment transportiert, ursächlich verknüpft, d. h. sie ist eine Funktion der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit (FOLK [10], FRIEDMANN [11], INMAN [19], KRUMBEIN [24], McCAMMON [31], TRASK [47], WALGER [50]). Der Sortierungsgrad hängt mit den Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit zusammen. Daher ist zu erwarten, daß aus der Abnahme des Medianwertes und der Zunahme der Sortierung die resultierende Transportrichtung abzulesen ist. Zwischen dem Md- und So-Wert wiederum besteht im allgemeinen ein Zusammenhang; mit der Verfeinerung des Materials folgt eine Verbesserung der Sortierung. Daß die beiden Kennwerte miteinander funktionell verknüpft sind und ein Zusammenhang zu den Strömungsgeschwindigkeiten besteht, wurde von mehreren Forschern festgestellt (s. o.).

Im Gezeitenbereich, wo die Sedimente in räumlich und zeitlich wachsender Stärke fortbewegt werden, ist die Bestimmung des Transportes aus der Änderung des Medianwertes und des Sortierungsgrades erschwert. Sobald in Ebb- als auch in Flutstromrichtung ist eine Materialverfrachtung möglich. Über das Verhältnis zwischen dem zurückgelegten Transportweg und den Strömungsgeschwindigkeiten geben die Konturenkarten relative Orientierungsdaten. Die Isolinien erhalten in Richtung der stärksten Strömung eine langgezogene Form.

Aus der kartenmäßigen Darstellung der Kornkennwerte (Abb. 21, 22) ist ein überwiegend in Richtung der Gezeitenströme erfolgender Massentransport ersichtlich, wie auch die Ausbreitung der radioaktiv markierten Sande ebenfalls eine küstenparallele Verfrachtung anzeigen.

Die Proben in der Nähe des Südstrandes bilden einen Bereich, in dem vermutlich ältere Absätze, die unter anderen Ablagerungsbedingungen entstanden sind, freigespült werden. Solche

³⁾ Die Feststoffbewegung in offenen Gerinnen hängt von mehreren Veränderlichen ab, von denen die Strömungsgeschwindigkeiten und die Korngröße des Materials die wichtigsten sind. Wegen der praktischen Bedeutung wurden zahlreiche Beziehungen zwischen den beiden Größen unter Berücksichtigung anderer Faktoren abgeleitet, die alle keine allgemeine Gültigkeit besitzen, da der eine oder andere Faktor vernachlässigt werden muß. Die wichtigsten Transportformeln sind in (49) angegeben und erläutert.

Gebiete bilden dann Verteilungszentren des in ihnen vorkommenden Materials. SIMON (43) stellte vielfach in der Elbe derartige Kolke mit freigespülten älteren Absätzen fest. Wie die Abfolge der größeren Sedimente zu feineren sich ändert, so nimmt auch die Sortierung zu. Für einen überwiegend in der Längsrichtung vorhandenen Materialstrom spricht, daß die stärksten

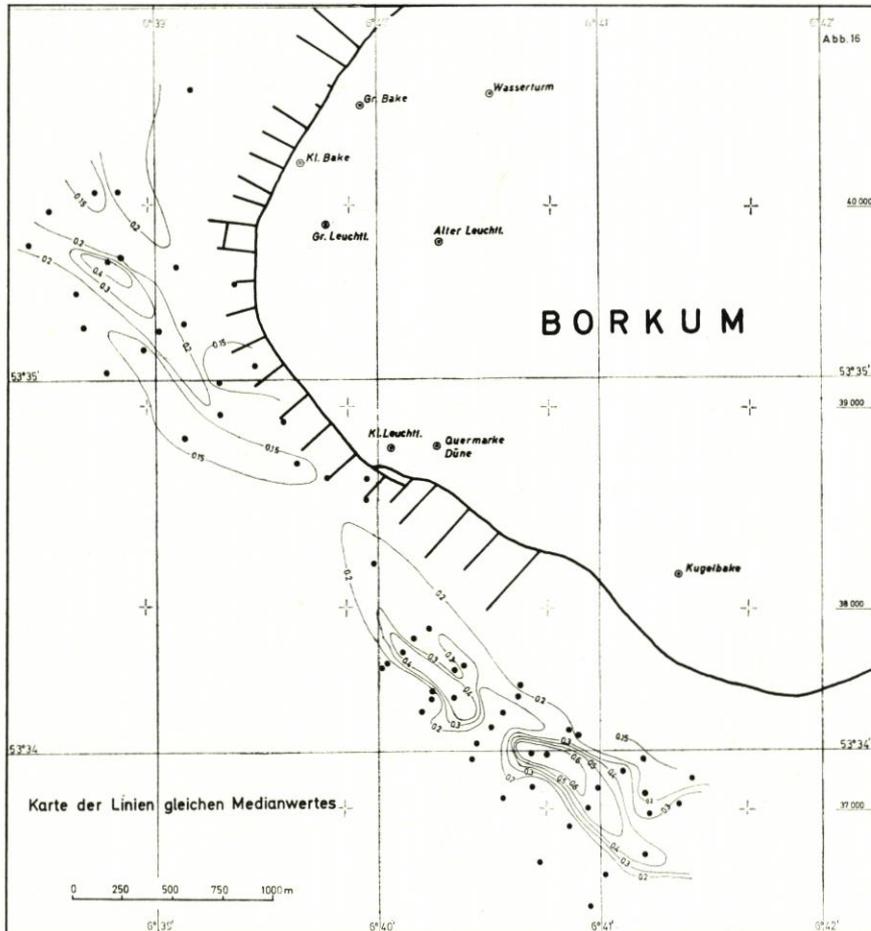


Abb. 21

Ablagerungen an der Nordwest-Spitze des Möwensteert erfolgten. REINECK (39) bringt Beispiele aus dem Gebiet der Jade, daß Transportrichtung und die Verlagerung des Transportkörpers nicht, wie die Schüttungsrichtungen der Klein- und Großrippeln zeigen, übereinzustimmen brauchen. Welcher der beiden Strömungen, der Ebbe oder der Flut, der Haupttransport zuzuschreiben ist, könnte nur durch systematische Strömungsmessungen geklärt werden. Die Frage nach einem auflandigen Transport muß zunächst unbefriedigend beantwortet werden.

Die Leitstoffmessungen haben am Strand Proben mit radioaktiv markierten Sanden erbracht (Abb. 14). Es besteht aber noch keine zwingende Notwendigkeit, zwischen dem Eingabeort und diesen Proben einen unmittelbaren Zusammenhang zu sehen, d. h. der ermittelte Weg des radioaktiv markierten Sandes braucht nicht auf einen stattgefundenen kontinuierlichen

Transportweg zu deuten. Die Sandmengen können auch, wenn man andere diesbezügliche Untersuchungen berücksichtigt (REINECK [39]), durch Ablagerung und Wiederaufnahme vom Boden mittels der durch Seegang erzeugten Brandungsströmungen in dem System der Sandriffe und -priele auf den Strand transportiert werden. Die neuesten Meßergebnisse zeigen eine schwache aufländige Komponente der Strömung. Allerdings sind diese Werte noch nicht als

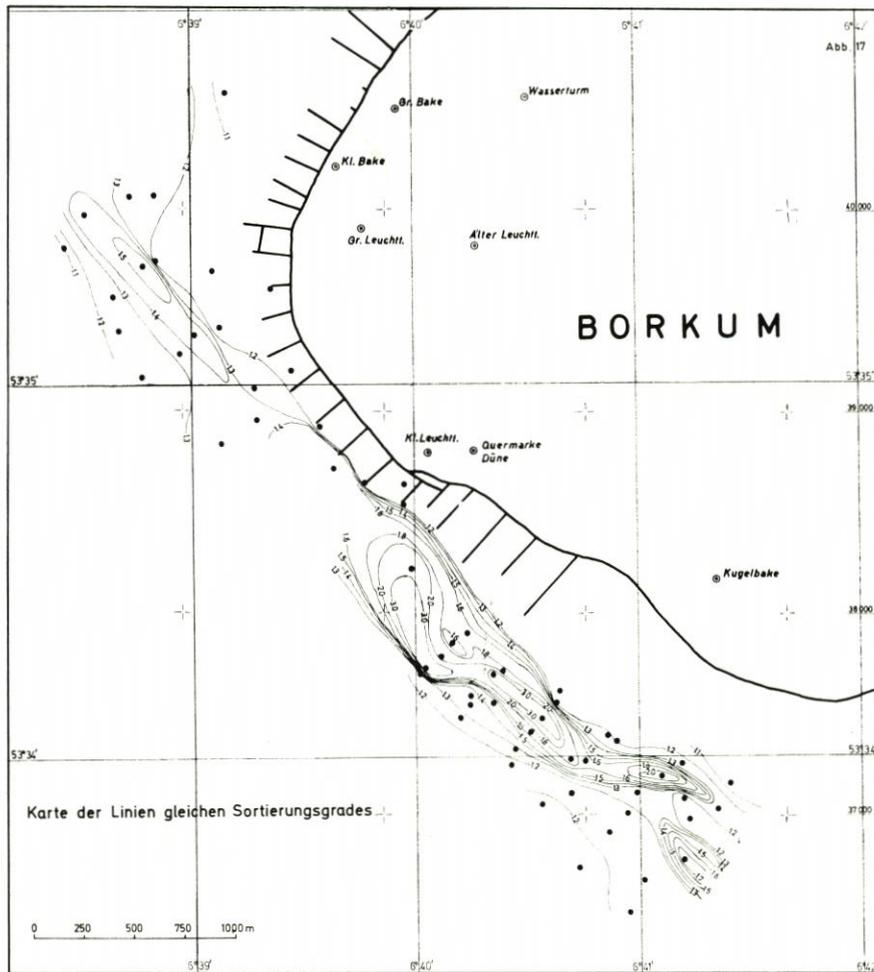


Abb. 22

repräsentativ anzusehen, da sie aus kurzfristig angesetzten Messungen abgeleitet werden. Ein indirektes Anzeichen der Beanspruchung des Inselsockels ist durch die Entstehung der Kolkreihen in unmittelbarer Inselnähe gegeben.

Die vergleichende Betrachtung der morphologischen Entwicklung und die Analyse der Sedimentverteilung sprechen für eine zunehmende Intensität der Gezeitenströme. Die Bildung der ebenen Flächen mit teilweise rückläufigem Gefälle (Abb. 12), die Hangverteilung (Abb. 9 bis 11), die Korngrößenverteilung, die Karte der Linien gleicher Medianwerte und gleichen Sortierungsgrades deuten auf einen verstärkten Angriff der Sohle hin. Sicher ist, daß die Quer-

schnittverengung durch das Vordringen des Möwensteert den stärksten Stromstrich in Richtung Borkum gedrückt hat. Das unausgewogene Spektrum der Korngrößen, die Grobkörnigkeit des Sediments und die breite Streuung der Komponenten innerhalb der einzelnen Proben können als direkte Anzeichen der Abtragung aufgefaßt werden. Der in der Probe 18 gefundene Klei könnte auch als Folge der Sohlenerosion gewertet werden. Dieses Material ist wahrscheinlich eine ältere Wattablagerung, die durch die Ostbewegung der Insel überwandert wurde. Der gleiche Klei kommt bei der letzten Buhne am Südstrand unmittelbar an der Tnw-Linie vor.

Ein nicht abschätzbarer Anteil der Seitenerosion an der Formung des Inselsockels wird durch die Verteilung des Unterwasserhanges sichtbar. Die Gezeitenströme sind damit indirekt an der Hanggestaltung beteiligt, und zwar bewirken sie durch die Vertiefung der am Hangfuß vorgelagerten Fläche die Instabilität der Hänge, deren Folge eine Rückverlegung sein kann. Falls ein Zurückweichen des Möwensteerts beginnt, kann sich die Erosionsgrenze wieder in andere Richtung verlagern.

5.4 Zusätzliche Betrachtung ausgewählter Faktoren bei der Küstenbildung und bei dem Sedimenttransport

Die Wirkung der Gezeitenströme darf nicht als alleiniges Kriterium betrachtet werden. Wahrscheinlich ist den Seegangs- und Brandungskräften wesentlich größere Bedeutung beizumessen, die im Strand- und Vorstrandbereich den stärksten Einfluß auf das litorale Geschehen ausüben. Der Scheitel der hufeisenförmigen Insel ist der vom Westen kommenden Nordseebrandung entgegengerichtet, die durch Brandungskräfte freigewordene Energie setzt eine Küstenströmung in Bewegung, die nach Norden wie Süden verläuft. Die Verlagerung der maximalen Strandbreiten (HOMEIER-LUCK [18]) vom Scheitelpunkt aus nach Norden wie Süden muß als Anzeichen einer solchen Strömung gewertet werden. Dieser Effekt wird durch die zahlreichen Transportkörper (Sandbänke, Riffe), die in Luftbilddaufnahmen besonders hervortreten, sichtbar. Nach eigenen Beobachtungen am Südstrand werden die Riffe, die an der Seeseite flach und an der Landseite steil sind, von Transportkräften der Schwallströmung in südöstlicher Richtung schräg auf den Strand verlagert.

Der Wind kann auch zur Zerstörung des Strandes beitragen, indem es zu Auswehungen kommt. Die Dünen werden erniedrigt, es entstehen Einkerbungen an der Dünenfront. Somit kann bei Sturmfluten die Dünenkette leichter durchbrochen werden. Bei länger anhaltenden Sandflugperioden aus Westen bis Norden waren während meines Aufenthaltes im Juli 1970 an den Bühnen und Wegen am Südstrand erhebliche Ablagerungen zu sehen, die größtenteils von dem teils befestigten Dünenmaterial dieses Gebietes stammen müssen. Diese Erscheinungen zeigen, daß sie bei der Beurteilung des Windes als morphologisch wirksame Kraft von Bedeutung sein dürften.

6. Schlußbemerkung

Ein grober Vergleich der erbrachten Ergebnisse der morphologischen wie granulometrischen Untersuchungen hat ergeben, daß im Seegebiet vor Borkum der Formenschatz teils aus relativ stabilen und teils aus schneller veränderlichen Transportkörpern besteht. Unabhängig von ihrer Bewegung sind die Randgebiete der Großformen (das Küstenvorfeld mit einbezogen) die intensivsten Bereiche der Materialumlagerungen. Die Erforschung der Ursache dieser Veränderungen des Bodenreliefs ist notwendig, wenn bei möglicher nachteiliger morphologischer Entwicklung

rechtzeitig in das Geschehen eingegriffen oder bei baulichen Maßnahmen eine solche Entwicklung verhindert werden soll. Die Erkenntnisse, die durch die Auswertung der Bodenproben der radioaktiven Leitstoffmessung gewonnen wurden, lassen erhoffen, daß derartige Bodenuntersuchungen, gezielt in kritischen Gebieten angewandt, bessere Ergebnisse bringen können.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß die Erforschung der Naturkräfte nach wie vor eine komplexe Untersuchungsreihe erfordert, da die Faktoren miteinander bis auf die offene See hinaus in wechselseitigen Beziehungen stehen. Zu den schnelllebigen Formgemeinschaften des Meeresbodens gehören die submarinen Sanddünen (Riesenrippeln, large sand waves), deren Verhalten wichtige Hinweise für den Sedimenttransport liefert.

Zerstörung und Aufbau des Strandes und Vorstrandes müssen in Verbindung zu Brandungserscheinungen gesehen werden. Zu dieser Sandverfrachtung im Wasser kommt noch die Sandverfrachtung auf dem trockenen Strand bei überwiegend westlichen und nordwestlichen Winden.

Die morphologische Entwicklung des Strandes und des Vorstrandes stellt einen wichtigen Faktor des Sandtransports dar, der im Zusammenhang mit Wellenbewegung, Brandung und Windverhältnissen erforscht werden sollte.

Für das Studium leicht veränderlicher Gebilde ist das Luftbild ein geeignetes Hilfsmittel. Nur der systematische Ausbau der Meßunterlagen, Strömungsmessungen aller Art in den Rinnen, auf den Platen und in der Brandungszone, die Verdichtung der Probeentnahmestellen, die genauere Vermessung des Meeresbodens und die Wellenmessungen ermöglichen präzisere Aussagen.

7. Schriftenverzeichnis

1. BECKER, H. (1951): Fahrwasserveränderungen im Bereich von Hubertgat, Westerems und Hubertfahrt (unveröff. Bericht des WSA Emden).
2. Bundesanstalt für Wasserbau (1969): Untersuchung der Sandbewegung mit radioaktiven Isotopen vor Borkum Sept./Okt. 1969 (unveröff. Bericht).
3. BRESSAU, S. (1957): Abrasion, Transport und Sedimentation in der Beltsee. Die Küste 6, 64-102, Heide.
4. CROMMELIN, R. D., und MAASKANT, A. (1940): Sedimentpetrologische Untersuchungen im Stromgebiet der Weser und der Elbe. Med. van d. Landbouwnoogsch. Wageningen, D. 44, Vch. 2, Wageningen.
5. DECHEND, W. (1950): Die geologischen Untersuchungen in der Ems (unveröffentl. Bericht des WSA Emden).
6. DECHEND, W. (1950): Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands. Dtsch. Hydr. Ztsch. 3, 264-303, Hamburg.
7. Deutsches Hydrograph. Institut (1969): Gezeitentafeln, Europäische Gewässer, Hamburg.
8. DORRESTEIN, R. (1960): Einige klimatologische und hydrologische Daten f. d. Ems-Estuarium. Verh. Kon. Ned. Geol. Minb. Gen., Geol. Serie. D. XIX, Symposium Ems-Estuarium (Nordsee) S. 39-42 s'Gravenhage.
9. DÖRJES, J., u. GADOW, J. C., REINECK, H. E., u. SINGH, I. B. (1969): Die Rinnen der Jade (südl. Nordsee). Sedimente und Makrobenthos. Senck. maritima 1, 5-62, Frankfurt a. M.
10. FOLK, R. L., u. WARD, W. C. (1937): Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sediment. Petrol. 27, 3-26, Manasha.
11. FRIEDMAN, G. M. (1962): On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain size distribution of sandstones. J. Geol. 70, 737-753, Chicago.
12. GAYE, J., WALTHER, F. (1935): Die Wanderung der Sandriffe vor den ostfriesischen Inseln. Bautechnik 41, 1-13, Berlin.
13. GIERLOFF-EMDEN, H. G. (1961): Luftbild und Küstengeographie am Beispiel der deutschen Nordseeküste. Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum. Schriftenfolge d. Inst. f. Landeskunde in der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung 4, Bad Godesberg.

14. GÖHREN, H. (1970): Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. Hamburger Küstenforschung, H. 14, Hamburg.
15. GRIPP, K. (1944): Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht. Archiv d. Dtsch. Seewarte u. d. Marineobs. Bd. 63, Nr. 2, 45 S., Hamburg.
16. HENSEN, W. (1941): Die Entwicklung der Fahrwasserhältnisse in der Außenelbe. Jb. Hafenbautechn. Ges. 18, 91-165, Berlin.
17. HOMEIER, H., KRAMER, J. (1957): Verlagerung der Platen im Riffbogen vor Norderney u. ihre Anlandung a. d. Strand. Jahresbericht d. Forschungsstelle Norderney 1956, 8, 37-60, Norderney.
18. HOMEIER, H., LUCK, G. (1971): Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge als Grundlage f. d. Fortführung d. Inselschutzes am Südweststrand Borkums. Jahresbericht d. Forschungsstelle f. Insel u. Küstenschutz d. Niedersächs. Wasserwirtschaftsverwaltung 1969, 21, 7-37, Norderney.
19. INMAN, D. L. (1952): Measures for describing the size distribution of sediments. J. Sediment. Petrol. 22, 125-145, Manasha.
20. ISBARY, G. (1936): Das Inselgebiet von Ameland bis Rottumeroog, Morphologie und Hydrographie. Archiv d. Dt. Seewarte 56, 1-55, Hamburg.
21. JANSSEN, TH. (1937): Die neuere Entwicklung d. Seegebietes vor Borkum. Abh. Nat. Ver. Bremen 30, 253-261, Bremen.
22. JESSEN, O. (1922): Die Verlegung der Flußmündungen und Gezeitentiefs an der festländischen Nordseeküste in jungalluvialer Zeit. Ferdinand Enke-Verlag, Stuttgart.
23. KÖSTER, E. (1964): Granulometrische und morphometrische Meßmethoden. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
24. KRUMBEIN, W. C. (1936): The use of quartile measures in describing and comparing sediments. Am. J. Science 32, 98-111.
25. KRÜGER, W. (1911): Meer und Küste bei Wangeroog und die Kräfte, die auf ihre Gestaltung einwirken. Ztschr. f. Bauwesen 61, 451-463, Berlin.
26. LANG, A. W. (1954): Untersuchung zum Gestaltungswandel des Emsmündungstrichters von der Mitte des 16. Jahrhunderts bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts (unveröffentl. Bericht d. WSA Emden).
27. LINKE, G. (1969): Die Entstehung der Insel Scharhörn und ihre Bedeutung f. d. Überlegungen zur Sandbewegung i. d. Deutschen Bucht. Hamburg. Küstenforschung, H. 11, 45-84, Hamburg.
28. LÜDERS, K. (1935): Grundsätzliches ü. d. Beziehung zwischen Gezeitenstrom einerseits und Wandermaterial u. Sediment andererseits. Ann. d. Hydr. u. Marit. Meteorologie 63, 189-195, Hamburg.
29. LÜDERS, K. (1953): Die Entstehung der Ostfriesischen Inseln und der Einfluß der Dünenbildung auf den geologischen Aufbau der ostfriesischen Küste. In: Probleme der Küstenforschung im Gebiet d. südl. Nordsee, Schriftenreihe d. Nieders. Landesst. f. Marschen- u. Wurfenforchung, Bd. 5, 5-15, Hildesheim.
30. LÜNEBURG, H. (1960): Zur Sedimentverteilung i. d. Außenweser zwischen Hoheweg und Rotersand. Veröff. d. Inst. f. Meeresforschung in Bremerhaven VII, H. 1, 1-15, Bremen.
31. McCAMMON, C. R. (1962): Efficiencies of percentile measures for describing the mean size and sorting of sedimentary particles. J. Geol. 70, 453-465, Chicago.
32. MARSAL, D. (1967): Statistische Methoden für Erdwissenschaftler. Schweizerbart, Stuttgart.
33. NIEBUHR, W. (1952): Über die neuere Entwicklung der Außenems und ihre vermutliche Ursache. Die Küste, H. 1, 42-63, Heide.
34. OOMKENS, E., TERWINDT, J. H. J. (1960): Inshore estuarine sediments in the Haringsvliet (Netherlands). Geol. en Mijnb. N.S. 22, 39, 701-710, Leiden.
35. POPPEN, H. (1962): Die Sandbänke an der Küste der Deutschen Bucht der Nordsee. Ann. d. Hydrographie 40.
36. PRATJE, O. (1931): Die Sedimente der Deutschen Bucht. Wiss. Meeresunters. N.F. Abt. Helgoland 18 (6), 1-126, Oldenburg.
37. PRATJE, O. (1949): Die Bodenbedeckung der nordeuropäischen Meere. Handbuch der Seefischerei Nordeuropas Bd. 1, Nr. 3, Schweizerbart, Stuttgart.
38. PRATJE, O. (1950): Die Erfahrungen bei der Gewinnung v. rezenten marinen Sedimenten in den letzten 25 Jahren. Mitt. Geogr. Ges. Hamburg 50.

39. REINECK, H. E. (1963): Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. Abh. Senck. Naturf. Ges. 505, 1-138.
40. RIJKSWATERSTAAT (1967): Aanbevelingen betreffende de meest geschikte plaats vor een Ems-haven. Rijkwaterstaat. Directie Groningen, Afdeling Studiedienst, Delfzijl.
41. SAMU, GY. (1970): Zur Korngrößenverteilung der Sande in der Jade (unveröff. Bericht der Bundesanstalt f. Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg).
42. SCHUBERT, K. (1970): Ems u. Jade. Die Küste, H. 19, 29-67, Heide.
43. SIMON, W. G. (1952): Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Außenelbe und ihre Ausdeutung hinsichtl. d. Sandwanderung 1949/50. Mitt. d. Wasser- u. Schifffahrtsdirektion Hamburg Nr. 4, Hamburg.
44. SIMON, W. G. (1961): Bericht über Untersuchungsergebnisse an Grundproben a. d. Bericht d. Außenelbe vom Sommer 1959. Mitt. d. Wasser- u. Schifffahrtsdirektion Hamburg, Nr. 12, Hamburg.
45. SINDOWSKI, G. (1960) in BENTZ, A., Lehrbuch der angewandten Geologie, 1. Bd. Allg. Methoden, Stuttgart.
46. SUNDBORG, A. (1956): The river Klarälven. A Study of Fluvial Processes. Geografiska Annaler 38, 125-316, Stockholm.
47. TRASK, F. D. (1932): Origin and environment of source sediments of Petroleum. Houston Gulf Publ. Co., S. 67.
48. VEEN, J. VAN (1950): Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse Getij-wateren. Tijdschr. Kon. Ned. Aadr. Gen. 67, 303-325.
49. VOLLMERS, H. (1969): Feststoffbewegungen bei Strömungen. In: Deutsche Berichte zum XXII. Int. Schifffahrtkongreß Paris 1969 Thema 4: Verhalten der Küsten S. 275-284, Bonn.
50. WALGER, E. (1961): Die Korngrößenverteilung von Einzellagen sandiger Sedimente und ihre genetische Bedeutung. Geol. Rundschau 51, 494-507, Berlin.
51. WSA Emden: Verschiedene unveröffentlichte Dienstberichte.