

Die Küste

ARCHIV
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE



3950-A-2012-0000082

Die Küste

ARCHIV
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

HERAUSGEBER:
DER KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE

Heft 23 - 1972

DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

FÜHRBÖTER, Alfred, Dr.-Ing., o. Prof. an der TU Braunschweig, 33 Braunschweig, Spielmannstr. 12a; KÖSTER, Rolf, Prof. Dr., Universität Kiel, 23 Kiel, Olshausenstr. 40/60; KRAMER, Johann, Ltd. Baudirektor, 296 Aurich, Mühlenweg 11; LAUCHT, Hans, Dr.-Ing., Erster Baudirektor, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafenbau, 2 Hamburg 11, Dalmannstr. 1-3; LÜDERS, Karl, Dr.-Ing., Regierungsdirektor a. D., 3 Hannover, Menschingstr. 7; MAGENS, Claus, Dr.-Ing., 23 Altenholz, Insterburger Weg 4; RODLOFF, Walter, Dr.-Ing., Regierungsbaudirektor a. D., 23 Kronshagen/Kiel, Birkenweg 8; SAMU, Gyula, Dr. rer. nat., Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, 2 Hamburg 13, Moorweidenstr. 14; SINDERN, Josef, Regierungsbaudirektor, 23 Kiel, Hindenburgufer 247; SCHWITTERS, Johann, Regierungsbaudirektor, 297 Emden, Friedrich-Naumann-Str. 7; ULRICH, Johannes, Dr. rer. nat., Institut für Meereskunde der Universität Kiel, 23 Kiel, Düsternbroker Weg; WIELAND, Peter, Dipl.-rer. hort., 2242 Büsum, Hafeninself.

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers: Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Präsident a. D. Dr.-Ing. E. h. LORENZEN †, 23 Kiel, 1, Feldstr. 251/253, gestattet.
Schriftleiter: Dr. habil. E. WOHLBERG, 225 Husum, Nissenhaus.

Präsident a. D. Dr.-Ing. E. h. Johann M. Lorenzen

ist am 16. Oktober 1972 kurz vor Vollendung seines 72. Lebensjahres nach einer wenige Monate währenden Krankheit gestorben. Sein Werdegang und seine Verdienste sind vor zwei Jahren anlässlich seines 70. Geburtstages in Heft 20 dieser Zeitschrift ausführlich gewürdigt worden. Der dabei ausgesprochene Wunsch aller seiner Freunde, Kollegen und Mitarbeiter, daß es ihm vergönnt sein möge, noch eine Reihe von Jahren in ungebrochener Schaffenskraft und guter Gesundheit zum Nutzen der deutschen Küsten zu wirken, ist nur zu einem allzu kleinen Teil in Erfüllung gegangen.

Wenn er seine Aufgaben und Pflichten als Vorsitzender des Küstenausschusses Nord- und Ostsee, als Vorsitzender des Ausschusses für Küstenforschung in der Deutschen Kommission für Ozeanographie, als Koordinator des Schwerpunktprogrammes der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ und auf manchen anderen Gebieten bis zuletzt vorbildlich wahrnahm, so geschah das nicht aus Ehrgeiz. Er hatte in den letzten Jahren mehrmals den Wunsch geäußert, einige dieser Aufgaben in andere Hände zu legen, war aber immer wieder von seinen Freunden gebeten worden, noch eine Zeitlang mit seiner einzigartigen Autorität und Erfahrung weiter zu wirken. Denn gerade in den letzten Jahren, in denen sich entscheidende Veränderungen in Bedeutung und Organisation der Küstenforschung und des Küsteningenieurwesens anbahnten, schien dies nötiger denn je zu sein.

Nun ist ihm versagt geblieben, das Ende dieser von ihm selbst geförderten Entwicklung absehen zu können, da bis jetzt noch nicht zu erkennen ist, wohin sie führen wird. Wenn ihn dies mit verständlicher Sorge erfüllt haben mag, so wußte er aber auch, daß jederzeit andere da sein würden, um die sich im Zuge der Zeit wandelnden Aufgaben in seinem Sinne und mit bestem Willen zu übernehmen. Und mit Genugtuung und Freude hat es ihn bis zuletzt erfüllt, daß sich inzwischen eine immer breitere jüngere Basis fähiger Mitarbeiter gebildet hatte, die – das Alte achtend und zugleich das Neue auf neuen Wegen suchend – gewillt waren und sind, den noch fernen Zielen näherzukommen.

Unsere Trauer um den Verstorbenen wird überglänzt von all dem, was er uns sichtbar und unsichtbar hinterlassen hat. Das wird denen, die ihn kannten, Ansporn sein, an die Gedanken dieses bescheidenen und dennoch wahrhaft großen Mannes der deutschen Küste in gleicher Redlichkeit anzuknüpfen und weiter nach besten Kräften an dem gemeinsamen Werk zu arbeiten.

Dr.-Ing. HANS LAUCHT

Inhaltsverzeichnis

Nachruf Präsident a. D. Dr.-Ing. E. h. Johann M. LORENZEN	III
<hr/>	
FÜHRBÖTER, Alfred, Prof. Dr.-Ing.	
KÖSTER, Rolf, Prof. Dr.	
KRAMER, Johann, Baudirektor	
SCHWITTERS, Johann, Regierungsbaudirektor	
SINDERN, Josef, Regierungsbaudirektor	
Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung	1
LÜDERS, Karl, Dr.-Ing., Regierungsdirektor a. D.	
FÜHRBÖTER, Alfred, Prof. Dr.-Ing.	
RODLOFF, Walter, Dr.-Ing., Regierungsdirektor a. D.	
Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog	63
ULRICH, Johannes, Dr.	
Untersuchungen zur Pendelbewegung von Tiderippeln im Heppenser Fahrwasser (Innenjade)	112
WIELAND, Peter, Dipl.-rer. hort.	
Untersuchung zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort	122
SAMU, Gyula, Dr.	
Morphologische und granulometrische Untersuchungen im Seegebiet vor Borkum	150
MAGENS, Claus, Dr.-Ing.	
Die Sichelbuhne	189

Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung

Von A. Führböter, R. Köster, J. Kramer, J. Schwitters und J. Sindern

Zusammenfassung

Die Westküste der Insel Sylt unterliegt einem ständigen Abtrag durch Brandungskräfte. Seit einem Jahrhundert wird versucht, die durch den Uferrückgang bedrohte Stadt Westerland mit Buhnen und Deckwerken zu schützen. Diese Schutzwerke mußten in der Vergangenheit fortlaufend erweitert und verstärkt werden durch Bau von schweren Stein-, Stahl-, Beton- und Asphaltbuhnen sowie senkrechten Ufermauern, Basaltdeckwerken, Tetrapodenwällen u. ä. Jedoch ist damit noch kein ausreichender Schutz der Stadt Westerland erreicht worden. Deshalb ist die weitere Verstärkung des Insel-schutzes notwendig, auch um die bestehenden Schutzwerke zu erhalten.

Es wird daher erwogen, durch eine Sandvorspülung den Materialhaushalt auszugleichen und die Schutzwerke zu sichern. Im Gegensatz zu bisherigen Aufspülungen soll hier ein Sanddepot in Form einer flachen, etwa 400 m in das Meer bis zu einem Längsriff hinausragenden Sandbuhne geschaffen werden. Erwartet wird dann, daß den angrenzenden Strandstrecken Sand nicht nur aus dem Abbruch dieser Sandbuhne zugeführt wird, sondern darüber hinaus auch Sand aus dem natürlichen Längstransport aufgefangen wird.

Der erste Teil „A“ des Berichtes beschreibt die Untersuchungen und Messungen, die notwendig sind, um die Wirtschaftlichkeit dieser Sandvorspülung beurteilen zu können. Der Teil „B“ gibt detaillierte Angaben zur Technik der Vorspülung einer solchen Sandbuhne und beschreibt deren Wirkungsweise.

Summary

The west coast of the island of Sylt suffers steady erosion by surf action. For about one century it is tried to protect the town of Westerland by groynes, seawalls and embankments. In the past the protection works had to be extended and strengthened continuously by groynes of stone, steel, concrete or asphalt, and seawalls or embankments of the same materials. Even in this way the town of Westerland has not been protected sufficiently. Therefore the further strengthening of the coastal protection works with the protection of the structures itself is necessary.

For that reason it is intended to compensate the beach erosion by artificial nourishment. On the contrary to earlier beach nourishments here the sand deposit shall be constructed with the shape of a flat groyne with an extension of about 400 m into the open sea up to an existing longshore bar. It is expected that the neighbouring beach not only will be nourished by the erosion of the groyne itself but also additionally by sand which is caught out of the natural longshore transport.

The part "A" of the report deals with the investigations and measurements urgent to review the economic aspects of this method of beach rehabilitation. The contents of part "B" is a detailed technical description for the construction of such a sand groyne, of which the behaviour is discussed.

Inhaltsverzeichnis

<i>Teilgutachten A: Untersuchungs- und Meßtechnik</i>	
1. Allgemeines zu den Untersuchungen	5
2. Topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen	6

2.1 Festlegung der Meßprofile	6
2.2 Strandvermessung	6
2.21 Allgemeines	6
2.22 Vermessung der Strandprofile	7
2.23 Auswertung	7
2.3 Vorstrandvermessung	7
2.31 Allgemeines	7
2.32 Querprofile	8
2.33 Längsprofile	9
2.34 Auswertung	9
2.4 Luftbildaufnahmen	9
2.5 Photographische Strandaufnahmen	10
3. Sedimentologische Untersuchungen	11
3.1 Oberflächenproben vom Strand und Vorstrand	11
3.11 Allgemeines	11
3.12 Bestandsaufnahme vor Beginn der Vorspülung	11
3.13 Entnahme von Vergleichsproben während der Vorspülung	12
3.14 Wiederholung der Bestandsaufnahme nach der Vorspülung	13
3.2 Gefügeuntersuchungen	13
3.3 Leitstoffmessungen	13
3.4 Aufbau des Materials im Sandentnahmegebiet	14
4. Hydrologische Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen	14
4.1 Wellenbeobachtungen	14
4.2 Wellenmessungen	16
4.3 Wellenbefliegung	19
4.4 Brandungsströmungsbeobachtungen	19
4.5 Schwimmermessungen	19
4.6 Dauerstrommessungen	20
4.7 Wasserstandsmessungen	20
4.8 Wasserstandsbeobachtungen	21
4.9 Strandversatzbeobachtungen	21
5. Meteorologie	21
6. Untersuchungen zum Spülbetrieb	21
7. Erforderliche (e) und wünschenswerte (w) Untersuchungen (Zusammenstellung)	22
8. Schlußbemerkung	23

Teilgutachten B: Vorschläge zur Einspültechnik

1. Einleitung	24
2. Natürliche Gegebenheiten am Strand und Vorstrand von Sylt	24
2.1 Allgemeines	24
2.2 Aufbau des Westerländer Geestkernes	26
2.3 Relief, Sedimentbedeckung und anstehendes Gestein am Nordseeboden seewärts der Riffzone	26
2.4 Relief, Sedimentbedeckung und Sandbewegung am Strand und Vorstrand	28
2.41 Allgemeines	28
2.42 Relief des Vorstrandes	28
2.43 Sedimente des Vorstrandes	28
2.44 Leitstoffuntersuchungen zur Sandbewegung im Vorstrandbereich	30
2.45 Veränderungstendenzen im Vorstrandbereich	31
2.46 Veränderungen im Strandbereich	32
2.47 Massenbilanz und Wechselbeziehungen zwischen Strand und Vorstrand	33
2.48 Wirksame Kräfte im Strand- und Vorstrandbereich	34
3. Eigenschaften des vorgesehenen Spülgutes	35
3.1 Geologischer Aufbau des Sandentnahmegebietes	35
3.2 Folgerungen für Entnahme und Vorspülung	37
4. Verhalten bisheriger Strandvorspülungen	38
4.1 Allgemeines	38
4.2 Beispiele von Strandvorspülungen	39

4.21 Verklappen von Baggergut im Vorstrandbereich	39
4.22 Flächenhafte Strandvorspülungen	39
4.23 Vorspülung örtlich begrenzter Sandlager	45
4.24 Kontinuierliche Strandvorspülungen	45
4.3 Folgerungen aus den durchgeführten Strandvorspülungen für den geplanten Versuch vor Westerland	46
5. Vorschläge zur Sandvorspülung vor Westerland	49
5.1 Einpassung der Sandvorspülung in das natürliche Geschehen	49
5.2 Vorspülung in der Form einer Stranderhöhung und -verbreiterung	49
5.3 Vorspülung als Sandbühne oder Sandhöft	50
5.31 Wechselwirkung zwischen Vorspülung und Seegang an einer Sandbühne	50
5.32 Umwandlung der Sandbühne in ein Sandhöft	52
5.4 Verbindung von uferparalleler Strandvorspülung und Sandhöft	54
5.5 Sandmenge und Spülleistung	55
5.51 Sandmengenschätzung für die Sandbühne	55
5.52 Gesamtpülmenge	56
5.53 Erforderliche Spülleistung	58
5.6 Spülbetrieb	58
5.61 Ausführung der Spülarbeiten	58
5.62 Überwachung des Vorspülvorganges	59
5.63 Überlegungen zur Formgebung des Sandhöftes	60
6. Schlußbetrachtung	60
Schriftenverzeichnis	61

Veranlassung und Einführung

Der Weststrand der Insel Sylt unterliegt dem ständigen Abtrag durch Brandungs- und Gezeitenkräfte. Um vor allem den Inselbereich vor der Stadt Westerland zu schützen, sind ab 1872 Inselschutzwerke angelegt worden. Der Bau von Deckwerken und Bühnen hat zwar den Abbruch verlangsamt, jedoch nicht zu einer Stabilisierung des Inselstrandes im gewünschten Umfange geführt.

Die Probleme des Uferabbruches und -schutzes an der Westküste von Sylt werden seit Jahrzehnten untersucht. Von verschiedenen Seiten sind dazu umfangreiche und wertvolle Arbeiten geleistet worden, die in zahlreichen Berichten und Veröffentlichungen niedergelegt sind. Sie bilden eine Grundlage für die vorliegenden Erwägungen.

Bis vor wenigen Jahren standen bei allen Überlegungen zum Uferschutz feste Werke wie Bühnen, Strandmauern, Deckwerke, Tetrapodenwälle o. ä. im Vordergrund, was in erster Linie einen passiven Schutz gegen die Naturkräfte bedeutet. In jüngsten Jahren jedoch haben neuere wissenschaftliche Erkenntnisse zu der Einsicht geführt, daß ein aktiver Eingriff in das Brandungsgeschehen die wirksamste Form des Küstenschutzes darstellt. Eine dieser Eingriffsmöglichkeiten ist die Strandvorspülung, worüber bereits Erfahrungen im In- und Ausland vorliegen.

Im Jahre 1972 wird deshalb vor Westerland der erste Versuch einer Sandvorspülung unternommen werden, wozu es allerdings an dieser exponierten Uferstrecke eingehender Untersuchungen bedarf.

Mit dem Schreiben vom 2. 7. 1970 hat sich der Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein daher an den Küstenausschuß Nord- und Ostsee mit der Bitte gewandt, eine Gutachtergruppe mit der Beratung für die Vorbereitung, Durchführung, Steuerung und Beurteilung einer versuchsweisen Vorspülung am Weststrand der Insel Sylt zu beauftragen. In Besprechungen der daraufhin vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee mit

Schreiben vom 9. 7. 1970 berufenen „Gutachtergruppe Sylt“* mit der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Schleswig-Holstein, die ihren Niederschlag im Schreiben der „Gutachtergruppe Sylt“ vom 3. 11. 1970 an den Küstenausschuß Nord- und Ostsee fanden, wurde nachfolgende Gliederung des Gutachtens vorgeschlagen:

Teilgutachten A: Untersuchungs- und Meßtechnik

Teilgutachten B: Vorschläge zur Einspültechnik

Teilgutachten C: Steuerung der Einspülung

Teilgutachten D: Beurteilung der Sandvorspülung nach ihrer Fertigstellung

Da seitens der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Schleswig-Holstein über die versuchsweise Vorspülung 1971 entschieden werden sollte, war die Bearbeitung der einzelnen Teilgutachten kurzfristig geboten. Als erstes wurde das „Teilgutachten A“ erstattet. Das „Teilgutachten B“ wurde vor der Ausschreibung der Sandvorspülung übergeben, während das „Teilgutachten C“ während deren Ausführung im Jahre 1972 bearbeitet wird. In dem „Teilgutachten D“ wird nach Abschluß der Vorspülung und längerer Beobachtung die Auswirkung einer künstlichen Sandzufuhr auf den Inselschutz von Sylt beurteilt werden müssen.

Die vorliegende Arbeit enthält das „Teilgutachten A“ vom November 1970 und das „Teilgutachten B“ vom Februar 1971.

* Mitglieder der „Gutachtergruppe Sylt“: Prof. Dr.-Ing. FÜHRBÖTER, Braunschweig; Prof. Dr. KÖSTER, Kiel; Ltd. Baudirektor KRAMER (Leiter der Gutachtergruppe), Aurich; Ltd. Regierungsbaudirektor SCHWITTERS, Emden; Regierungsbaudirektor SINDERN, Kiel.

Teilgutachten A: Untersuchungs- und Meßtechnik

1. Allgemeines zu den Untersuchungen

Art der Untersuchung: In den folgenden Abschnitten werden die Messungen und Beobachtungen sowie sonstige Untersuchungen aufgeführt, die unbedingt erforderlich sind, um das Geschehen am Strand und Vorstrand der Insel Sylt (Abb. 1) als Auswirkung der Vorspülung voll erkennen zu können. Darüber hinaus werden weitere Messungen und Beobachtungen empfohlen, um unter Ausnutzung dieses Vorspülungsversuches die Kenntnisse über die Anwendbarkeit des Vorspülungsverfahrens zu vertiefen. Ebenfalls werden Untersuchungen zum geplanten Spülbetrieb erörtert.

Die Bestandsaufnahme am Strand und Vorstrand von Sylt vor Beginn der Aufspülung soll die Grundlage für die Abschätzung des Einflusses der Aufspülung auf die Materialverteilung bilden. Hierbei wird die Schwierigkeit auftreten, daß der graduelle Umfang der ständigen natürlichen Veränderungen nicht bekannt ist. Deshalb ist es unumgänglich, den Umfang der Untersuchungen nicht zu knapp zu bemessen.

Zu unterscheiden sind die Meß- und Untersuchungsverfahren, die vor, während und nach der Vorspülung notwendig sind, um jederzeit deren Auswirkung auf den unmittelbar betroffenen Bereich, d. h. trockenen Strand, nassen Strand, Rinne, Riff und seeseitigen Hang des Riffes, einwandfrei und vollständig meßtechnisch erfassen zu können. Das Untersuchungsprogramm muß deshalb umfassen:

- a) Topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen,
- b) sedimentologische Untersuchungen,
- c) hydrologische Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen,
- d) meteorologische Auswertungen und
- e) Untersuchungen zum Spülbetrieb.

Untersuchungsgebiet: Die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebietes erstreckt sich auf den unmittelbaren Vorspülungsbereich und auf den angrenzenden Strand und Vorstrand, soweit dieser in seinem Zustand durch die Vorspülung voraussichtlich beeinflusst wird. Als Beobachtungs- und Untersuchungsgebiet wird sich deshalb der Bereich vor Westerland bis zu einer Entfernung von rd. 2,0 km von der Uferlinie (rd. NN — 10,0 m Tiefenlinie) und mit einer Nord-Süd-Ausdehnung von zunächst 9,0 km erstrecken müssen, worauf noch eingegangen wird. Es ist zu erwarten, daß das Spülgut sowohl seewärts als auch nach Norden und Süden verlagert wird.

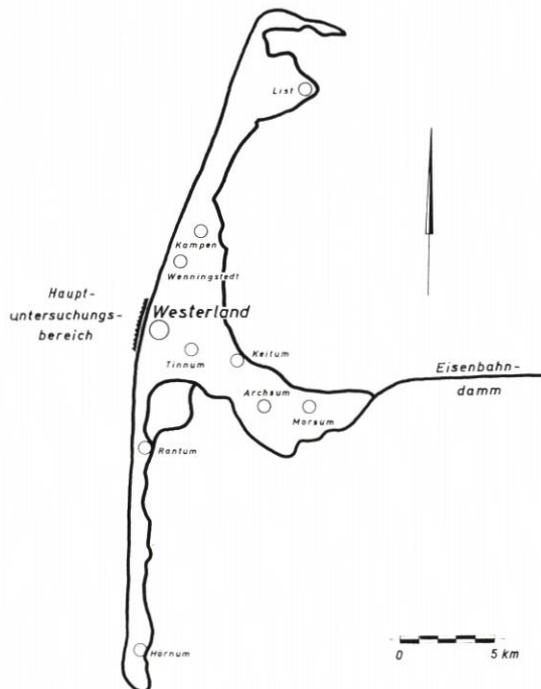


Abb. 1. Insel Sylt mit Hauptuntersuchungsgebiet

Entsprechend wird der Untersuchungsbereich ausgedehnt werden müssen, wenn während oder nach der Vorspülung erkennbar wird, daß hier Auswirkungen zu erwarten sind.

2. Topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen

2.1 Festlegung der Meßprofile

Der Tiefenplan (Marschenbauamt Husum: Bericht über die Strand- und Vorstrandverhältnisse im Bereich der Küstenschutzwerke vor Westerland/Sylt, Tiefenplan 1 : 5000, vom 15. 1. 1969) weist aus, daß die Meßprofile zur Beobachtung der Tiefenveränderungen am Strand Ost-West orientiert sind und einen unterschiedlichen Abstand zwischen etwa 60 m und 150 m haben. Außerdem verlaufen die Profillinien nicht senkrecht zur Uferlinie und nicht buhnenparallel. Deshalb sind sie ungeeignet, die Bühnenfelder meßtechnisch vollständig zu erschließen. Hinzu kommt, daß die Profillinien und deren Standlinien nicht genügend fest und damit sicher vermarktet sind.

Um die Vorgänge in den Bühnenfeldern ausreichend – jedoch ohne übertriebenen Aufwand – beobachten und berechnen zu können, wird nach den Erfahrungen der Sandvorspülungen auf Norderney 1951/52 und 1967 vorgeschlagen, Meßprofile mit etwa 50 m Abstand – mindestens 3 Meßprofile je Bühnenfeld – senkrecht zur Uferlinie festzulegen. Die beiden seitlichen Profile sollen nahe der Bühnen in einem solchen Abstand verlaufen, daß sie außerhalb der durch das Bühnenbauwerk verursachten Ausspülungen liegen. Das dritte Profil ist in Bühnenfeldmitte anzuordnen. Werden wegen größerer Bühnenabstände mehr als 3 Meßprofile erforderlich, so sind sie mit gleichen Abständen zwischen den buhnenbenachbarten Profilen einzuschalten.

Die in Bühnenfeldmitte liegenden Meßprofile erhalten aus noch zu erläuternden Gründen die Bezeichnung „Hauptprofil“. Diese sollten jedoch nicht mehr als 200 m Abstand haben; ggf. sind zusätzliche Hauptprofile einzuschalten. Hat ein Bühnenfeld eine gerade Zahl von Profilen, so gilt das nördlich von der Bühnenfeldmitte liegende Meßprofil als Hauptprofil. Alle Hauptprofile sind durch 2,50 m lange Schraubpfähle mit einem Durchmesser von rund 80 mm zu vermarkten. Die Schraubpfähle sind an eine festvermarkte Standlinie (Polygonzug) anzuschließen. Ihre Lage und Höhe ist mindestens einmal jährlich nachzuprüfen und ggf. zu berichtigen. Bei wesentlichen Strandveränderungen sind die Schraubpfähle der Strandlage anzupassen und neu zu vermessen.

Alle übrigen Meßprofile können durch Holzpfähle oder eingemeißelte Zeichen an festen Bauwerken vermarktet werden. Sämtliche Profile müssen eine eindeutige Bezeichnung erhalten, aus der hervorgehen muß, ob es sich um ein Hauptprofil oder ein normales Profil handelt.

Auf diese Profillinien sind alle Messungen, Beobachtungen und sonstige Untersuchungen auszurichten. Je nach deren Art werden die Meßprofile mehr oder weniger weit seewärts ausgenutzt.

2.2 Strandvermessung

2.2.1 Allgemeines

Die Vermessung des trockenen und nassen Strandes (oberhalb der MTnw-Linie) hat insofern eine besondere Bedeutung als sie um Tideniedrigwasser nahezu unabhängig vom Seegang mit geringem Aufwand bis zu täglich einmal möglich ist und deshalb sehr flexibel gchandhabt

werden kann. Um die topographischen Veränderungen zu erfassen, ist die Strandvermessung die sicherste Methode. Die tachimetrische Aufnahme ist für diese Vermessung ausreichend genau.

Im Profil sind die Meßpunkte jeweils mit Bandmaß vom Profilmullpunkt ausgehend in 10 m Abständen auszumessen. Durch Einhalten fester Abstände wird sichergestellt, daß immer die gleichen Meßpunkte überprüft werden. Nur bei Flächen mit besonders stark wechselnden Höhen ist die Entfernung der Meßpunkte entsprechend geringer zu wählen.

Von großer Wichtigkeit ist eine möglichst schnelle Erfassung des Meßgebietes, vor allem während des Spülbetriebes, weil dann – zum mindesten zeitweise und örtlich – kurzfristige Veränderungen zu erwarten sind.

2.22 Vermessung der Strandprofile

Vier Wochen vor Beginn der Aufspülarbeiten sind alle Hauptprofile des 9 km langen Meßgebietes wöchentlich einmal aufzunehmen, damit der Ausgangszustand des Strandes und seine kurzzeitigen Veränderungen hinreichend genau erfaßt werden.

Vom Beginn des Spülens an sind alle oberhalb der MTnw-Linie neu entstehenden Flächen im Einspülbereich und 1000 m nördlich und südlich davon täglich um die Niedrigwasserzeit in allen Meßprofilen aufzunehmen.

In den benachbarten Bereichen brauchen, solange keine Sandeintreibungen beobachtet werden, nur die Hauptprofile vermessen zu werden. In mehr als 1000 m Abstand von der äußersten beobachteten Sandeintreibung wird die Einmessung jedes 2. Hauptprofils ausreichen. Diese Grenzen verschieben sich mit der festgestellten Ausbreitung des vorgespülten Sandes. Sobald in einem Hauptprofil des benachbarten Bereiches Auflandungen gemessen werden, sind dort auch die Normalprofile aufzunehmen.

Nachdem sich eine größere Menge Spülgut oberhalb der MThw-Linie abgelagert hat, können die täglichen Strandvermessungen auf die Bereiche beschränkt werden, die von der Vorspülung und der durch sie beeinflussten Brandung und Strömung betroffen werden. Diese Trockenflächen brauchen nur in Abständen von 14 Tagen und nach Überflutungen während höherer Tidehochwasserstände oder starkem Sandflug – möglichst gleichzeitig mit dem Vorstrand (s. 2.3) – vermessen zu werden.

2.23 Auswertung

Die Profilhöhen sind in Meßprotokollen festzuhalten. Die Hauptprofile sind immer dann aufzutragen, wenn gleichzeitig Vorstrandprofile gemessen worden sind. Die Auswertung der sich daraus abzeichnenden Strandneigungen ist für die Steuerung des Aufspülvorganges wesentlich.

Nach jeder Vorstrandaufnahme sind Tiefenlinienpläne des Strandes und Vorstrandes zu zeichnen und der Sandumsatz zu berechnen (s. 2.34).

2.3 Vorstrandvermessung

2.31 Allgemeines

Auf dem Vorstrand unterhalb der MTnw-Linie werden sich neben den topographischen Veränderungen als direkte Folge der Vorspülung auch solche durch die Wirkung von Brandung und Tideströmung ergeben. Sie können nur durch Lotungen von Schiffen aus ermittelt werden.

Die Genauigkeit der nivellitischen oder tachimetrischen Strandvermessung kann im Bereich des Vorstrandes durch Lotung nicht erreicht werden. Die Ursachen sind einerseits die Verfahren der Seevermessung (Lotung, Ortung und Beschickung), andererseits kann die Unterwassermorphologie nicht eingesehen und die Lage der Aufnahmepunkte auf ihre Formen abgestellt werden. Hinzu kommt die starke Witterungsabhängigkeit der Seevermessung, die bedingt ist durch Strömung, Wind und Wellen.

Um eine möglichst große Meßgenauigkeit zu erzielen, bedarf die Vermessung des Vorstrandes einer sorgfältigen Vorbereitung und guten Organisation.

2.32 Querprofile

Die Vermessungen des Vorstrandes sollen sich auf die Hauptprofile beschränken und im zweiwöchigen Abstand vorgenommen werden. Wenn während der Vorspülung sich örtlich besonders starke Veränderungen abzeichnen, wird es erforderlich sein, in solchen Bereichen die Vorstrandvermessungen auf alle Profile auszudehnen (Teilgutachten C).

Die Lotungen sind von geeigneten Meßschiffen mit Echographenpeilungen auszuführen. Da wegen der teilweise geringen Wassertiefen im Vorstrandbereich nur ein kleines Fahrzeug eingesetzt werden kann, auf dem nur wenig Personal und Gerät unterzubringen ist, sind für die Ortung besondere Vorkehrungen zu treffen. Eine Hifix-Kette könnte die Ortung wesentlich erleichtern und verbessern. Da sie jedoch nicht verfügbar ist, muß mit herkömmlichen Mitteln eine ausreichende Ortung sichergestellt werden.

Für alle Hauptprofile sind Bakenlinien mit Unter- und Oberbake aufzustellen, die während der gesamten Messungen vor, während und nach der Aufspülung zu erhalten sind. Die Bakenlinien müssen so ausgebildet werden, daß sie bis zur rd. 700 m vor den Inselfschutzwerten liegenden 7,0-m-Tiefenlinie gut auszumachen sind und auch im Bereich der 10,0-m-Tiefenlinie, rd. 2000 m vor den Schutzwerten, mit Hilfe eines Fernglases noch eine Orientierung nach der Bakenlinie ermöglichen. Zu dem Zweck muß die Unterbake eine Höhe von mindestens 7,0 m und die Oberbake von mindestens 9,0 m über Gelände haben. Der gegenseitige Abstand der Baken sollte 60 m betragen, damit die Profillinie ausreichend genau befahren werden kann. Die Baken sind mit Toppzeichen von ungefähr 1,0 m Durchmesser eindeutig erkennbar zu machen. Die jeweils zu einer Profillinie gehörende Unter- und Oberbake müssen korrespondierende Toppzeichen erhalten (Doppelkegel, Spindel, Raute o. ä.).

Für die Ortung von Bord ist die Doppelwinkelmessung oder für die Ortsbestimmung von Land her der Vorwärtseinschnitt anzuwenden. Für die Ortung wäre ein Hydrodist sehr geeignet; sein Einsatz kann jedoch durch Funkstörungen sehr beeinträchtigt werden. Für die Ortung mit Sextanten muß eine ausreichende Zahl von Objekten auf der Insel verfügbar sein. Für diesen Zweck lassen sich auch besonders gekennzeichnete Baken der Hauptprofile verwenden, wenn sie als Festpunkte in die Arbeitskarte eingetragen werden.

Die Normalprofile werden nach Bedarf ausgebakt, wofür etwa 6 Bakenpfähle vorzuhalten sind. Die Unterbaken müssen mindestens 5,0 m und die Oberbaken mindestens 6,5 m über Gelände hoch sein. Sie sollten ein 1,0 m hohes und 0,60 m breites rautenförmiges Toppzeichen erhalten, damit sie leicht erkennbar sind. Bakenpfahl und Toppzeichen sind auf der einen Seite weiß und auf der anderen Seite rot zu streichen. Vor hellem Hintergrund wird die rote und vor dunklem Hintergrund die weiße Seite gezeigt. Die Baken werden auf Anforderung des Meßschiffes – per Funksprechgerät, das unempfindlich gegen Salz und Feuchtigkeit sein sollte – durch entsprechend einzuweisende Meßgehilfen jeweils von Normalprofil zu Normalprofil umgesetzt. Die Bakenpunkte sind durch etwa 1,5 m lange Stahlrohre, die sich als Köcher

für die Baken verwenden lassen, zu vermarken. In ihrer Höhenlage sind die etwaigen Veränderungen der Strandhöhe anzupassen.

2.33 Längsprofile

Die Kleinformen des Vorstrandes werden durch Querprofile nicht ausreichend erkannt. Um sie daher auch im Riffbereich genügend zu erfassen, der wegen seines Einflusses auf das Wellenklima für die Strand- und Vorstrandverhältnisse von erheblicher Bedeutung ist, werden in diesem Gebiet ergänzende Tiefenaufnahmen für erforderlich gehalten.

Es wird die Aufnahme von Längsprofilen empfohlen, und zwar mindestens je eines auf dem Riff, eines auf dessen seeseitigen Hang und eines im tiefsten Teil der Rinne zwischen Riff und Strand. Angepaßt an die bestehenden Vorstrandformen handelt es sich um 3 Längsprofile mit einem Abstand von rd. 100 m, wobei die mittlere Profillinie auf der Kuppe des Riffs liegen sollte.

Nach Auswertung der ersten Längsprofilaufnahmen wird überlegt werden müssen, welcher Wert ihnen für die Beurteilung der Vorstrandentwicklung beizumessen ist, ob sie noch ausgedehnt oder verdichtet werden müssen oder auf sie teilweise oder ganz verzichtet werden kann (Teilgutachten C).

Für die Ortung müssen auf der Insel geeignete Meßobjekte in ausreichender Zahl vorhanden sein oder zusätzlich aufgestellt werden. Die gegenseitigen Abstände der Objekte sind so zu bemessen, daß sich keine ungünstigen Meßwinkel ergeben. Daher dürfen die Objekte entlang des 9 km langen Meßbereiches – soweit sie nahe dem Strande stehen – nicht mehr als etwa 1000 m Abstand haben. Sie müssen durch ihre jeweilige Form oder durch Toppzeichen unverwechselbar voneinander zu unterscheiden sein. Als Meßobjekte lassen sich auch Oberbaken der Hauptprofile verwenden, wenn sie entsprechend markante Formen erhalten.

2.34 Auswertung

Die Ergebnisse der Vorstrandvermessung sind in der Form der bisher vom Marschenbauamt Husum angefertigten Tiefenpläne im Maßstab 1:5000 mit Meter- und Halbmeterlinien darzustellen. Die Meterlinien sind wie bisher auszuziehen, während die Halbmeterlinien zu stricheln sind. In den Tiefenlinienplan sollte auch der Strandbereich mit eingezeichneten Höhenlinien einbezogen werden.

Die Strand- und Querprofilaufnahmen sind zusammenhängend und übereinander aufzutragen, um die Strand- und Vorstrandveränderung beurteilen und den Fortgang der Vorspülung steuern zu können (Teilgutachten C).

Nach jeder Hauptprofilaufnahme ist eine Massenberechnung vorzunehmen, damit fortlaufend der Spülerfolg festgestellt werden kann.

2.4 Luftbildaufnahmen

Luftbilder sind eine wertvolle Ergänzung der Profilmessungen, weil sie morphologische Formen festhalten, die auch engmaschige Vermessungen nicht ergeben. Sie vermitteln Abbilder der Dynamik der Sandbewegung, der trockenfallenden Oberfläche und der Uferlinie im Vorspülbereich.

Luftaufnahmen haben außerdem den Vorteil, daß sie für die Auswertung schnell verfügbar sind. Aus Kostengründen sollte aber die Häufigkeit der Befliegung auf eine für den vorliegenden Zweck ausreichende Anzahl begrenzt werden.

Die Aufnahmen müssen jeweils um die Niedrigwasserzeit und möglichst bei gleichem Wasserstand ausgeführt werden, damit die Luftbilder vergleichbar und der Strand soweit wie möglich trockenliegt. Gleichzeitig ist die Lage und Wirkung der Riffe auf den Seegang bei Tide-niedrigwasser am besten zu erkennen.

Die Befliegungen sollten wenigstens einmal vor und während der Vorspülung in Abständen von möglichst zwei Wochen unternommen werden.

Als Maßstab für eine Gesamtdarstellung des Sylter Strandes von der Süd- bis zur Nordspitze der Insel ist 1 : 25 000 zu empfehlen. Der 3 km lange Spülfeldbereich sowie die südlich und nördlich anschließenden ebenfalls 3 km langen Abschnitte sind im Maßstab 1 : 10 000 darzustellen.

Der Auftrag für Luftaufnahmen muß einer mit Inselbefliegungen vertrauten Firma übertragen werden, mit der die Einzelheiten der Aufnahmetechnik, der Markierungen, der Wetterlage usw. abzustimmen sind. – Das gilt auch für die in einem späteren Abschnitt behandelten Luftaufnahmen der Wellenbildung vor Sylt.

Im Rahmen der Steuerung der Vorspülung können bei der Bearbeitung des Teilgutach-tens C weitere Luftaufnahmen empfohlen werden.

2.5 Photographische Strandaufnahmen

Photographische Strandaufnahmen mit festgelegten Terminen und von geeigneten Stand-orten haben sich seit 1951 als sehr wertvoll bei der Beurteilung der Strandentwicklung auf den Ostfriesischen Inseln erwiesen. Sie ergeben wertvolle Aufschlüsse über die Strand- und Dünen-entwicklungen mit Auf- und Abtrag und können als Anschauungs- und Beweismaterial Berichten und Entwürfen beigelegt werden.

Die Aufnahmen werden dem Verlauf der Vorspülung angepaßt und von vermarkten Punkten aus in festgelegte Richtungen genommen werden müssen. Gegenstand der Aufnahmen ist die Entwicklung des Vorspülbereiches, gekennzeichnet durch Veränderungen der Höhenlage des Strandes im Vergleich zu Deckwerken und Bühnen sowie anderen geeigneten Objekten.

Die photographischen Aufnahmen können sich solange auf den 3 km langen Vorspül-bereich beschränken, bis in den benachbarten Bereichen aus den Strandvermessungen erkennbar ist, daß die Strandentwicklung durch die Vorspülung beeinflußt wird. Entsprechend der fort-schreitenden Ausdehnung der Vorspülung ist der Aufnahmebereich auszudehnen.

Die Aufnahmestandpunkte sollten möglichst hoch liegen und müssen einen Abstand von etwa 400 m haben und an der oberen Vorderkante der Strandmauer oder Deckwerke und, wo Strandschutzwerke fehlen, am Dünenfuß liegen. Von den Standpunkten sind mindestens in 2 Blickrichtungen – nach Norden und Süden – Aufnahmen zu machen. Im unmittelbaren Spül-bereich sind Panoramaaufnahmen anzufertigen (Abb. 2).

Weitere Aufnahmen von fest markierten Punkten an der Niedrigwasserlinie, z. B. auf Bühnen, Dünen und Deckwerken mir schräg zum Strand verlaufender Aufnahmerichtung sind zweckmäßig. Wenn die markierten Punkte von Spülsand überdeckt werden, sind die Mar-kierungen höher zu legen.

Auf dem Spülfeld sind mit zunehmender Ausdehnung neue Aufnahmestandpunkte und -richtungen festzulegen.

Die Aufnahmen werden nach Aufnahmestandpunkt und -richtung sowie zeitlicher Folge

archiviert, wodurch die Vergleichbarkeit der Aufnahmen am besten gegeben ist. Die Sammlung ist zweckmäßigerweise in Loseblattform anzulegen, damit Ergänzungen möglich sind.



Abb. 2.
Uferschutzwerke vor
Westerland mit Riff-
brandung (Blick vom
neuen Kurzentrum
nach Norden)

3. Sedimentologische Untersuchungen

3.1 Oberflächenproben vom Strand und Vorstrand

3.11 Allgemeines

Über die Sedimentverteilung und den Aufbau der Schichtfolgen im Spülgebiet sowie den nördlich und südlich angrenzenden Bereichen liegen bisher noch keine flächenhaften Informationen vor. Die Kenntnisse beschränken sich auf:

- a) Bohrungen aus dem Jahre 1969, davon standen im Spülgebiet 8, in den angrenzenden Bereichen 3.
- b) Strand- und Greiferproben anlässlich der Tracerversuche 1963 und 1970.

Da zudem in der Riffzone mit kurzfristigen Veränderungen von Morphologie und Sedimentverteilung gerechnet werden muß, können diese Unterlagen nur in sehr begrenztem Umfange für Vergleiche mit der Materialverteilung unter dem Einfluß der Vorspülung herangezogen werden.

Somit werden an Untersuchungen vorgeschlagen:

1. Bestandsaufnahme vor Beginn der Vorspülung.
2. Entnahme von Vergleichsproben während der Vorspülung.
3. Wiederholung der Bestandsaufnahme nach der Vorspülung (Teilgutachten D).

3.12 Bestandsaufnahme vor Beginn der Vorspülung

Die Proben sollen nach Möglichkeit entlang der im Abschnitt 2.1 angeführten Hauptprofile entnommen werden, und zwar in möglichst geringem zeitlichem Abstand von der Strand- und Vorstrandvermessung innerhalb einer Großwetterlage. Hierdurch kann trotz der schnellen

Veränderungen am Strand und Vorstrand eine sichere Korrelation von Morphologie und Materialverteilung erreicht werden.

Im Vorspülgebiet und in etwa 1000 m langen Nachbarbereichen im Norden und Süden wird die Probenentnahme auf jedem Hauptprofil vorgeschlagen, in den weiter entfernten Bereichen auf jedem 2. Hauptprofil. Eine Verdichtung ist hier nur anzustreben, wenn diese durch zwischenzeitliche Auswertungen erforderlich erscheint (Teilgutachten C).

In den einzelnen Profillinien sind Proben zu entnehmen:

a) Auf dem nassen Strand 5 cm tief auf 20×20 cm großer Fläche

1. an der MThw-Linie
2. etwa in der Mitte zwischen MThw und MTnw
3. an der MTnw-Linie

Ergänzende Proben können notwendig werden, um auffallende Sonderformen zu erfassen.

b) Auf dem Vorstrand mit Backengreifer

4. am Hang zwischen MTnw und der Rinne zwischen Strand und Riff
5. in der Rinne zwischen Strand und Riff
6. am Hang zwischen der Rinne und dem Riff
7. auf dem Riff
8. am seeseitigen Hang des Riffs (evtl. mehrere Proben, je nach der Länge des Profils)

Auch hier sind bei Vorliegen besonderer Formen, wie z. B. Teilung von Rinne oder Riff, zusätzlich Proben zu entnehmen. Die seeseitige Grenze ist so zu wählen, daß ein Anschluß an das vom Geologischen Institut Kiel in Zusammenarbeit mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern Tönning und Cuxhaven erstellte Probennetz erreicht wird.

Im Mittel wird mit etwa 10 Proben je Hauptprofil zu rechnen sein. Die Anpassung an MThw, MTnw und das natürliche Relief ist dabei wichtiger als die Einhaltung gleichbleibender Probenabstände.

Die Proben müssen im Labor auf Korngrößenverteilung sowie auf Schwer- und Leichtminerale untersucht werden. Da diese Arbeiten bei einer großen Probenzahl eine nicht unerhebliche Zeit beanspruchen, die Daten aber schnell benötigt werden, sind die Voraussetzungen für eine ausreichende Laborausstattung für Siebanalysen auf Sylt zu schaffen.

3.13 Entnahme von Vergleichsproben während der Vorspülung

Gleichzeitig mit der Vermessung im Vorspülbereich und den angrenzenden Gebieten während der Spülung sind weitere Proben zum Vergleich mit den vorher entnommenen zu gewinnen.

Die Entnahmestellen sollen, soweit nicht besondere Beobachtungen eine Abweichung verlangen, den gleichen Hauptprofilen folgen, wie denen der Bestandsaufnahme vor der Sandspülung. Dasselbe gilt für die Lage der Positionen in bezug auf das Relief.

Sehr starke Veränderungen in der Morphologie können es erforderlich machen, die Zahl der Probenpunkte zu erhöhen, indem Proben

a) an den entsprechenden strukturellen Positionen (z. B. auf dem Riff, in der Rinne usw.) und b) an den gleichen Koordinaten wie bei der Bestandsaufnahme

entnommen werden. Darüber kann erst entschieden werden, wenn die Ergebnisse der Vergleichsvermessungen, der Luftbildaufnahmen usw. vorliegen. Dasselbe gilt für die Frage, wie weit die Vergleichsproben auf allen Profilen zu nehmen sind oder ob eine Beschränkung auf ausgewählte Hauptprofile ausreichend sein wird.

Der zeitliche Abstand von Vergleichsserien hängt vom Fortgang der Vorspülung und den

wetterbedingten Arbeitsmöglichkeiten ab. Für die zugehörigen Laborarbeiten gilt das im Abschnitt 3.12 Angeführte. Weitere Einzelheiten können erst im Teilgutachten C festgelegt werden.

3.14 Wiederholung der Bestandsaufnahme nach der Vorspülung

Die Wiederholung der Bestandsaufnahme nach der Vorspülung entwickelt sich kontinuierlich aus der Entnahme von Vergleichsproben. Einzelheiten sind Aufgabe des Teilgutachtens D.

3.2 Gefügeuntersuchungen

Die im Abschnitt 3.1 angeführten Arbeiten erfassen nur die Oberflächensedimente. Die Umlagerungen reichen mit Sicherheit tiefer hinab. Der Aufbau der Schichtfolgen und die Gefüge können nur aus ungestörten Kernen erschlossen werden. Für deren Gewinnung kommt in erster Linie der Vibrocoring in Frage. Die Entnahme von Kernen ist sowohl im Stadium der Bestandsaufnahme wie auch während der Vorspülung anzustreben.

Der Einsatz des Vibrocoringers im Vorstrandbereich vom Schiff aus erscheint nicht möglich. Fahrzeuge, die die Mindestanforderungen für Größe des Arbeitsdecks und Belastbarkeit von Winde und Ausleger selbst bei Beschränkung auf Kerne von 1,0 m Länge erfüllen, sind wegen der geringen Wassertiefen und des Seeganges dort nicht mehr einsetzbar.

Somit sind folgende Arbeiten anzustreben:

- a) An Vergleichspositionen vor der Vorspülung die Entnahme von Vibratorkernen seewärts des Riffes zur Feststellung von Sandmächtigkeit und Lagerungsformen unter natürlichen Bedingungen, während der Aufspülung zur Ermittlung möglicher Veränderungen unter dem Einfluß der Sandzufuhr und zur Klärung der Frage, wie weit aufgespülter Sand über das Riff hinaus seewärts verfrachtet wird.
- b) Entsprechende Untersuchungen in der Riffzone sind wünschenswert. Sie setzen voraus, daß der Vibrocoring entweder von einem Hubschrauber oder einem geeigneten schwimmenden Fahrzeug mit geeigneter Arbeitsöffnung aus eingesetzt wird.

Die Kerne sind etwa zur Hälfte zur Laborbearbeitung wie unter Abschnitt 3.12 und 3.13 zu verwenden, der Rest ist mittels Kunstharz zur Bearbeitung der Schichtlagerung zu härten.

3.3 Leitstoffmessungen

Um die Verlagerung des Spülgutes mittels Probenentnahme und -bearbeitung verfolgen zu können, werden geeignete Merkmale in Gestalt von künstlichen oder natürlichen Tracern benötigt.

Im Herbst 1970 sind im Vorstrandbereich vor Westerland radioaktive Leitstoffmessungen eingeleitet worden. Den Verbleib des eingebrachten Materials in das Jahr 1971 hinein zu verfolgen, ist eine wichtige Aufgabe. Da die Halbwertszeit 84 Tage beträgt, ist die Einbringung neuer Radioaktivität im nächsten Jahr im Zusammenhang mit der Vorspülung unzumutbar. Zudem soll im Sommer vorgespült werden, so daß der Einsatz radioaktiver Tracer auch wegen einer möglichen Gefährdung des Badebetriebes ausgeschlossen ist.

Im Gegensatz hierzu ist es empfehlenswert, die Ausbreitung des vorgespülten Sandes mit Hilfe von Luminophoren zu verfolgen, die an geeigneten Stellen auf der Spülfläche auszubringen sind. Da Luminophoren bereits mehrfach vor Westerland eingebracht worden sind, müssen Farben gewählt werden, die bisher noch nicht benutzt wurden. Für einen solchen Versuch dürfte vor allem die Farbe „Blau“ in Frage kommen.

Es ist auch daran zu denken, örtlich begrenzte Leitstoffversuche vorzunehmen, mit denen die augenblickliche Verlagerungsrichtung und -geschwindigkeit festgestellt werden kann. Die Verfolgung dieser Leitstoffe würde sich dann nur über Stunden oder höchstens einen Tag erstrecken. Für diese Versuche können wesentlich geringere Konzentrationen verwendet werden.

Zusammen mit der Bestandsaufnahme der Sedimente vor Beginn der Vorspülung ist auf jeden Fall eine Messung der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen radioaktiven Reststrahlung und der Verbreitung und Häufigkeit von Luminophoren erforderlich.

Zu klären ist weiterhin, ob im Spülsand Naturtracer vorhanden sind. Dieses Verfahren hat sich auf dem Seegrund bei den zur Zeit laufenden Untersuchungen seewärts der Riffzone als anwendbar erwiesen. Als Ausgangsmaterialien für den holozänen Meeressand kommen hier pliozäner Kaolinsand und pleistozäner Geschiebemergel vor, die sich in der Verteilung von Schwer- und Leichtmineralien charakteristisch unterscheiden. Proben aus Vorstrand und Strand sind noch nicht untersucht worden. Hier ist eine Vermischung beider Mineralvergesellschaftungen wahrscheinlich. Das Spülgut wäre dann gut zu verfolgen, wenn es sich hiervon deutlich abheben würde.

3.4 Aufbau des Materials im Sandentnahmegebiet

Im vorgesehenen Entnahmegebiet vor dem Rantum-Becken sind 1967 Bohrungen niedergebracht worden. Die Schichtenverzeichnisse und Korngrößenbestimmungen geben über die Korngrößenverteilung Aufschluß, nicht jedoch über die Einstufung des Materials (holozäner Sand, pleistozäner Schmelzwassersand, pliozäner Kaolinsand). Diese Frage entscheidet jedoch über die Möglichkeit, ob Naturtracer aufzufinden sind.

Proben aus den bisherigen Bohrungen im Entnahmegebiet haben bisher nicht zur Untersuchung vorgelegen. Die Schichtenverzeichnisse erwähnen ab NN — 8,0 m bis — 10,0 m sehr hellen bis weißen Sand, der unter grauem Sand liegt, was Kaolinsand unter Schmelzwassersand wahrscheinlich macht. Archivunterlagen des Geologischen Landesamtes für Schleswig-Holstein weisen in die gleiche Richtung. Sollte dies zutreffen, dann wären im Entnahmegebiet und am Strand wie am Vorstrand sehr ähnliche Mineralvergesellschaftungen zu erwarten, so daß mit dem Vorkommen von Naturtracern nicht zu rechnen ist.

Zur Klärung dieser Frage ist die Untersuchung weiterer Bohrproben erforderlich. Sie müssen aus den vom Marschenbauamt Husum noch geplanten drei ergänzenden Bohrungen entnommen werden. Ferner wird vorgeschlagen, sofern kein Kaolinsand gefunden wird, eine Bohrung bis auf NN — 40 m abzuteufen und festzustellen, ob in dieser Tiefe brauchbare Sandvorräte angetroffen werden. Bei Kaolinsand kann mit größerer Schichtmächtigkeit gerechnet werden, in die allerdings nicht selten Tonlagen eingeschaltet sind.

Weiterhin müßte mit Hilfe der geplanten Bohrungen die überhaupt verfügbare geeignete Spülsandmenge ermittelt werden. Eine größere Zahl von Korngrößenbestimmungen wäre außerdem vorzunehmen.

4. Hydrologische Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen

4.1 Wellenbeobachtungen

Es wird empfohlen, am Strand einen Beobachtungsdienst einzurichten, der regelmäßig die Höhe der brechenden Wellen, jeweils bei Tidehochwasser und Tideniedrigwasser beobachtet und

außerdem mit einer Stoppuhr die mittlere Wellenperiode aus dem Mittel von 10 Wellenbeobachtungen festhält. Die Wellenrichtungen sind von einem erhöhten Punkt (z. B. Düne) aus mit Hilfe eines Kompasses zu ermitteln.

Die Beobachtungen müssen an einer Stelle durchgeführt werden, die von der Vorspülung nicht unmittelbar betroffen wird und an der keine störenden Einflüsse durch Buhnen vorhanden sind. Es wird ein Querschnitt südlich des Südendes des Tetrapodenwalles empfohlen, damit die Strandbrandung auch bei erhöhten Wasserständen noch ungestört reflexionsfrei verläuft; im übrigen sollte dieser Wellenmeß-Querschnitt mit einem passenden Hauptprofil zusammenfallen.

Um subjektive Fehler bei der Schätzung der Wellenhöhen zu vermeiden, sind in diesem Beobachtungsprofil in Abständen von 20 m dickwandige Stahlrohre von etwa 100 mm Außendurchmesser einzubringen, deren Oberkanten einheitlich auf NN + 3,00 m – wenn bautechnisch möglich, noch höher – liegen. Die Pfahlreihe (10–15 Pfähle) sollte unmittelbar am Dünenfuß beginnen und sich so weit wie bei gutem Wetter ausführbar bis unter die MTnw-Linie erstrecken. Alle Pfähle sind auf je 0,5 m abwechselnd schwarz-weiß oder rot-weiß seewasser- und gischtbeständig anzustreichen; eine feinere Unterteilung ist unzweckmäßig, weil die Ablesegenauigkeit durch die unruhige Wasseroberfläche begrenzt ist und bei der schnellen Abschätzung Abzählfelder mit feinerer Unterteilung zunehmen. Dagegen ist zu empfehlen, wechselnd einen Pfahl rot-weiß, den darauffolgenden schwarz-weiß zu markieren, um das schnelle Erkennen der Pfahlstation zu erleichtern; dies könnte auch durch eine gut sichtbare Marke (Ball o. ä.) auf jedem zweiten Pfahl erreicht werden.

Wenn irgend möglich, sollten die Pfähle mit einer Länge eingebracht werden, die ihrer freien Standhöhe über der Sohle entspricht. Es muß damit gerechnet werden, daß bei außergewöhnlichen Wellen- und Eiskräften Pfähle unbrauchbar werden. Deshalb sollten genügend Ersatzpfähle (etwa 5 Stück) vorgehalten werden, damit beschädigte oder abgeknickte Pfähle so bald wie möglich ersetzt werden können.

Auf jedem der (vorgedruckten) Meßprotokolle müssen folgende Daten festgehalten werden:

- a) Datum
- b) Uhrzeit der Beobachtung
(bei 10 Min. Beobachtungsdauer den Mittelwert angeben)
- c) Eintrittszeit des astronomischen Tidehoch- oder Tideniedrigwassers
- d) Mittlere Lage des Brechpunktes der *Strandbrandung*
(auf die Pfahlstation bzw. auf Station 0,00 m für den strandseitigen Abschluß der Pfahlreihe bezogen)
- e) Mittlere Höhe der brechenden Wellen
(Hierzu muß der Beobachter genau eingewiesen werden. Erfahrungsgemäß ist am Brechpunkt der Unterschied zwischen den arithmetischen Mitteln der Wellenhöhen und der kennzeichnenden Wellenhöhe $H/3$ gering, wenn Klarheit darüber besteht, welche Wellen als solche bezeichnet werden. Kleine Zwischenbrecher sind auszulassen, wenn ihre Perioden kürzer als etwa 3 Sekunden sind.)
- f) Mittlere Höhe der Wellenkämme an den Pfahlstationen
- g) Mittlere Höhe der Wellentäler an den Pfahlstationen

Bemerkung:

Die Ergebnisse von f) und g) werden am günstigsten graphisch in ein vorgedrucktes Koordinatensystem auf dem Meßprotokoll eingetragen, das die Pfähle und ihre Farbmarkierung enthält.

- h) Mittlere Wellenperiode
(mit der Stoppuhr aus dem Durchgang von 10 deutlich erkennbaren Brechern in der Nähe des mittleren Brechpunktes zu bestimmen)
- i) Wellenrichtung in der Brecherzone der *Strandbrandung*
(mit der Kante eines rechteckigen Kastens zu messen, in dem der Kompaß befestigt ist)

- j) Wellenrichtung auf dem *Riff* mit Angabe darüber, ob zum Beobachtungszeitpunkt in der Verlängerung des Meßprofils Riffbrandung zu beobachten war oder nicht, ggf. Schätzung der Brecherhöhe auf dem Riff
(gemessen wird mit dem Kompaßkasten wie unter i) angegeben)
- k) Geschwindigkeit der Brandungsströmung (s. 4.4)
- l) Lufttemperatur am Strand
- m) Wassertemperatur in der Wellenauflaufzone
(es genügt die Angabe der Temperatur im nassen Sand unter dem Auflaufwasser soweit seawärts, wie es möglich ist)
- n) Bei Tideniedrigwasser:
Angaben der Strandhöhe an den Pfählen so weit seawärts, wie es unter den jeweiligen Wetter- und Seegangsbedingungen möglich ist. Die Pfahlreihe für die Wellenbeobachtungen soll deshalb in einem der Hauptprofile errichtet werden. Die Strandhöhen werden in das Koordinatensystem für die Beobachtung unter f) und g) eingetragen, und zwar auch in das Meßprotokoll für das vorhergehende Tidehochwasser.
- o) Wasserstände an den Pegeln List und Hörnum zur Beobachtungszeit, desgl. den Wasserstand des zu errichtenden Schreibpegels vor Westerland (s. 4.7)
- p) Windrichtung und Windstärke 3 Std. vor der Beobachtungszeit
1) SKN = Seekartennull.

(Die zeitliche Entwicklung des Seeganges kann dadurch annähernd berücksichtigt werden.)

Die Daten von a) bis n) werden unmittelbar zur Beobachtungszeit gewonnen, während die Werte unter o) und p) später nachgetragen werden. Besondere Erscheinungen sollen unter einer weiteren Spalte „Bemerkungen“ festgehalten werden.

Diese Beobachtungen sind täglich mindestens zweimal (zur Hoch- und Niedrigwasserzeit) durchzuführen, um ein lückenloses Bild des Wellenklimas vor, während und nach der Vorspülungszeit zu erhalten. Die Meßprotokolle werden der Gutachtergruppe für die Bearbeitung des Teilgutachtens C fortlaufend zugesandt.

Zusätzlich zu den bestehenden Beobachtungen wird unbedingt empfohlen, zu geeigneten Zeiten Filmaufnahmen von dem Seegang an der Pfahlreihe zu machen, und zwar immer von demselben Standort aus, der aus Beleuchtungsgründen am besten südlich des Wellenmeßprofils liegt und von dem aus die gesamte Pfahlreihe, nach Möglichkeit auch noch die Riffzone, erfaßt werden kann. Es muß darauf geachtet werden, daß eine genaue Reproduktion des Zeitablaufes möglich ist (mit Zeitmarken, wie Schwenken einer Fahne o. ä.). Diese Filme werden von der Gutachtergruppe im Rahmen des Teilgutachtens D ausgewertet und werden wertvolles Material über die Umformung des Seeganges in der Brandungszone darstellen. Gleichzeitig ist ein Beobachtungsprotokoll anzufertigen, d. h. die Filmaufnahmen sollten zur Hoch- oder Niedrigwasserzeit gemacht werden.

4.2 Wellenmessungen

Der Einsatz von 3 Wellenpegeln wird dringend empfohlen, davon 2 Geräte am seeseitigen Hang des Riffes in Verlängerung des Wellenmeßprofils (s. 4.1), und zwar je eines auf etwa NN — 5 m und — 7 m Wassertiefe (Abb. 3). Der 3. Pegel ist in der Rinne neben der Vorspülung aufzustellen. Nach Möglichkeit sollten Geräte verwendet werden, die von Land aus eingeschaltet werden können oder noch besser, bei denen die Registrierung auf dem Lande erfolgt. Fast alle bisher im Bereich der Deutschen Bucht verwendeten Wellenpegel sind pfahlgebundene oder schiffsgebundene Geräte. Deshalb empfiehlt es sich hier, das Echolotverfahren anzuwenden und Gestelle, welche die Schwinger tragen, auf dem Meeresgrund abzusenken oder verankerte Bojen als Meßgeräteträger zu verwenden und die Meßdaten über Kabel an Land zu übertragen.

Wie bekannt ist, hat eine Kieler Firma derartige nach dem Echolotprinzip arbeitende Geräte entwickelt (Abb. 4), die in EL AAIUN – Provincia del Sahara, etwa 3 km vor der Küste, mit Erfolg eingesetzt sind. Mit Hilfe einer Programmschaltung kann der Papiervorschub im Echographen gesteuert werden, so daß das Gerät sowohl als Wellenpegel wie auch für Wasserstandaufzeichnung verwendet werden kann (Abb. 5).

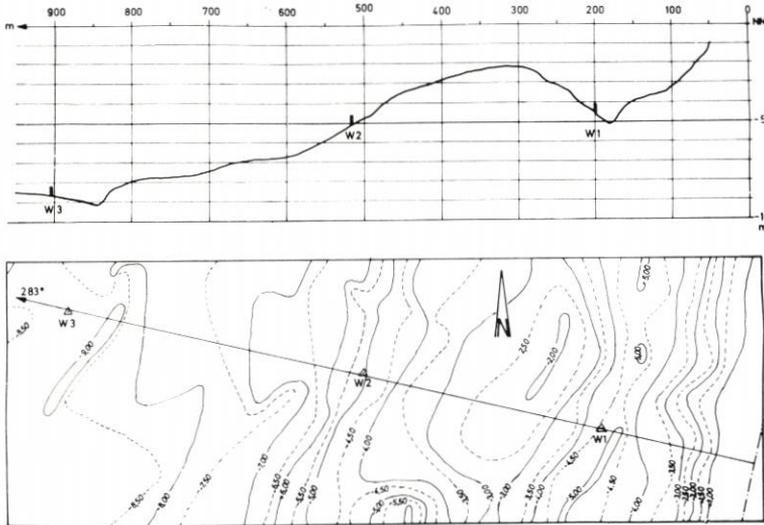


Abb. 3. Lage der 3 Fahrenholz-Wellenschreiber vor Westerland (vgl. Abb. 9)

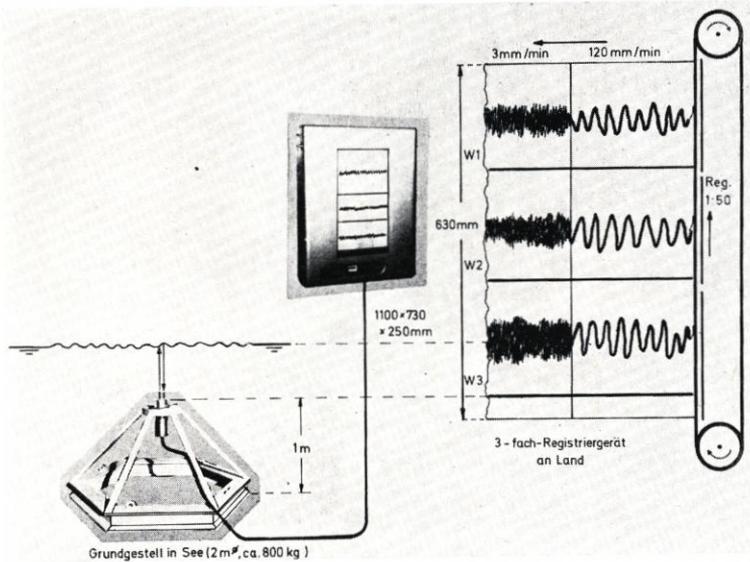


Abb. 4. Fahrenholz-Wellenschreiber mit 3 Meßstellen W1, W2, W3. Hochfrequente Ultraschallimpulse werden von einem auf einem Grundgestell montierten Kristallschwinger scharf gerichtet zur Wasseroberfläche 15mal in der Sekunde abgestrahlt und als Echos auf einem Echographen registriert. Schreibende Pegel nach diesem Prinzip haben eine Elektronik zur automatischen Eineichung der jeweiligen Schallgeschwindigkeit

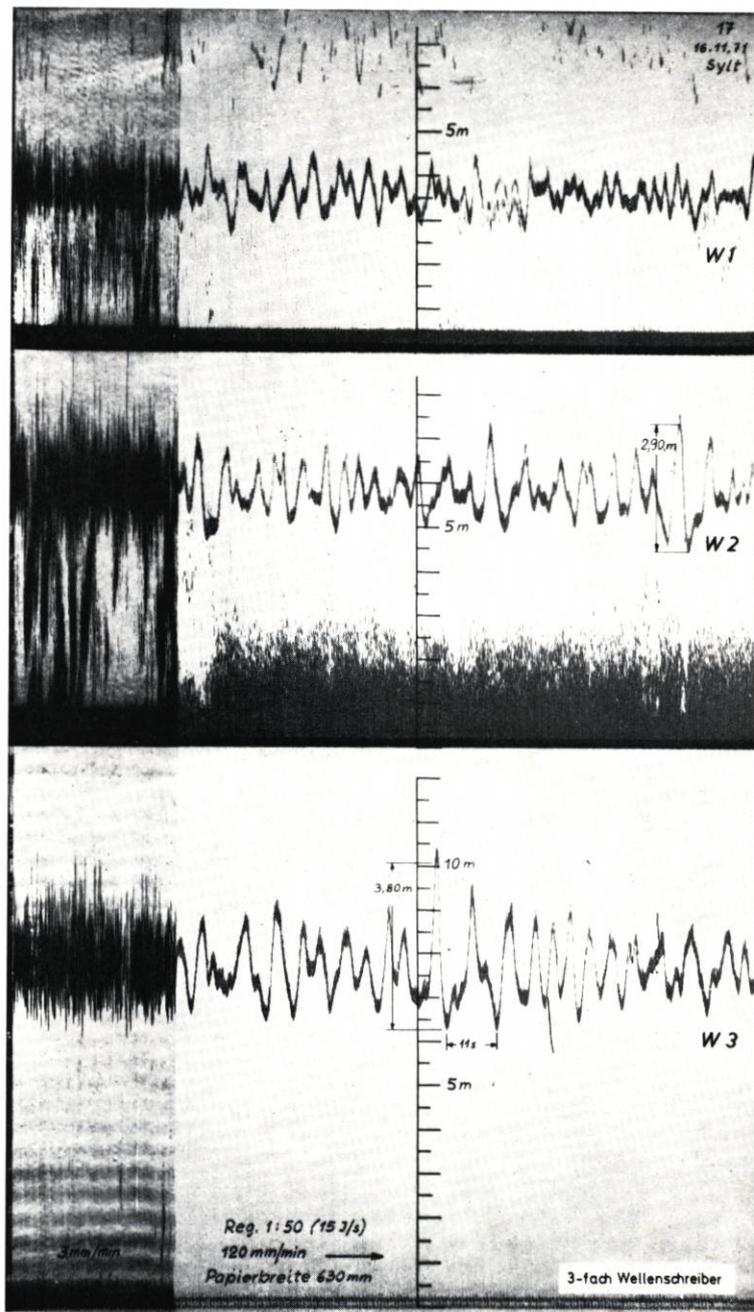


Abb. 5. Wellen-Echogramme der Fahrenholz-Wellenschreiber

Anzustreben ist, synoptische Messungen mit den Pegeln der Hasselmann-Kette oder denen anderer Meßprogramme abzusprechen.

Wenn in der Kürze der Zeit neue Wellenpegel nicht beschafft werden können, muß ver-

sucht werden, auf dem Wege der Amtshilfe vom Deutschen Hydrographischen Institut oder anderen Behörden die im Nordseeküstenbereich gebräuchlichen Wellenmeßgeräte zu erhalten.

4.3 Wellenbefliegung

Besonders bei Südwest- und Nordwestwindlagen sollte bei entsprechender Wellenrichtung, also Südwest oder Nordwest, das Wellenbild durch eine Befliegung aufgenommen werden. Dadurch wird eine großräumige Übersicht über Wellenrichtungen und Brandungszonen ermöglicht. Ferner können die durch die Vorspülung besonders zu beachtenden Refraktionen und Diffraktionen festgestellt werden.

Die Befliegungsbilder sind der Gutachtergruppe für die Bearbeitung des Teilgutachtens D zur Verfügung zu stellen; sie sollten stets mit einer Wellenbeobachtung nach Abschnitt 4.1 verbunden werden.

4.4 Brandungsströmungsbeobachtungen

Durch Einbringen von Farbstoffen, z. B. unter Verwendung kleiner Raketen (vgl. die allgemein bekannten Arbeiten von LAMPRECHT), können Brandungsströme in der Brandungszone beobachtet und auch hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit beurteilt werden.

Diese Brandungsströmungsuntersuchungen sind zweckmäßigerweise mit den Wellenbefliegungen (s. 4.3) zu verbinden, wobei die Farbstoffe vom Flugzeug (am besten Hubschrauber) abgeworfen werden können. Durch Farbaufnahmen aus der Luft in bestimmten Zeitabständen kann nicht nur die Geschwindigkeit der Brandungsströmung, sondern auch die Diffusion in ihr ermittelt werden. Für geeignete Bezugspunkte ist zu sorgen.

4.5 Schwimmermessungen

Bei ruhigem Wetter und glatter See sollten während einer Spring- und einer Nipptide die Tideströmungen vor dem Vorspülungsgebiet mit Schwimmern gemessen werden, und zwar von markierten Festpunkten (Bojen) aus über dem seeseitigen Hang des Riffes, über dem Riff und etwa in der Tiefe der Rinne zwischen Riff und Strand. Die Messungen müssen eine volle Tide umfassen und sind je einmal vor, während und nach Beendigung der Vorspülung auszuführen.

Ein vielfach verwendeter und für diese Messungen geeigneter Schwimmertyp besteht aus zwei senkrecht sich kreuzenden quadratischen Holztafeln (je 1,0 m \times 1,0 m), an deren senkrechter Schnittlinie, die durch Dachlatten verstärkt ist, oben ein Kanister als Auftriebskörper und unten mehrere Schäkkel als Beschwerung befestigt sind. Die Schäkkel haben so schwer zu sein, daß sie die Holztafeln vollständig unter Wasser ziehen. Nur der farbig gestrichene Auftriebskörper ragt rd. 30 cm über die Wasseroberfläche hinaus. Somit sind Winddrifteinflüsse gering. Der gesamte Tiefgang des Schwimmers beträgt etwa 1,6 m, der als optimal angesehen werden kann.

Die Schwimmer werden von den markierten Festpunkten aus der Strömung überlassen und in geeigneten Zeitabständen von Land aus eingemessen. Die Standorte werden in einen Lageplan eingetragen und in zeitlich richtiger Reihenfolge miteinander zu einer Schwimmer-

bahn verbunden. Aus dem zeitlichen und räumlichen Abstand zweier Standortmessungen läßt sich die mittlere Bahngeschwindigkeit errechnen.

Unter Annahme konstanter Bahngeschwindigkeiten zwischen zwei Meßpunkten lassen sich Bahnpunkte ermitteln, auf denen der Schwimmer zu bestimmten Zeitpunkten gewesen ist. Können gleichzeitig mehrere Schwimmer eingesetzt werden, so lassen sich Punkte gleicher Zeiten miteinander verbinden. Die Verbindungslinien von Punkten zweier Bahnen, die gleichzeitig passiert werden (Isochronen), werden so eingezeichnet, daß sie in viertelstündlichem Abstand (auf Hochwasser bezogen) die Verschiebung der Schwimmer kennzeichnen. Die Isochronen beziehen sich auf die Hochwasserzeiten des Tidekalenders, wodurch Unterschiede in Strömungsgeschwindigkeit und -richtung deutlich werden.

Auf dem Plan werden in einer Tabelle mittlere Windgeschwindigkeit, mittlere Windrichtung, eingetretene Hoch- und Niedrigwasserzeiten sowie die entsprechenden Ablesungen am vorgeschlagenen Pegel Westerland (s. 4.7) oder zumindest an einem Lattenpegel (s. 4.8) des Meßtages festgehalten.

4.6 Dauerstrommessungen

Empfohlen wird der Einsatz von 4 Schaufelradstrommessern, und zwar zwei seewärts des Riffes (je 1 Gerät auf etwa NN — 5 m und — 8 m Wassertiefe) und in der Rinne inselwärts vom Riff je 1 Gerät nördlich und südlich der Vorspülung zur Feststellung der auftretenden Strömungen und Strömungsveränderungen.

Wenn auch die Schaufelradstrommessungen aufwendig sind und das Auslegen der Geräte wegen der eingebauten feinmechanischen Instrumente geschultes Fachpersonal erfordert, werden die Messungen dennoch empfohlen. Die Schaufelradstrommessungen ergänzen wirksam die Schwimmermessungen nach Abschnitt 4.5 und erfassen die Strömungen bei Sturm quantitativ.

Die Aufbereitung der Strömungsmessungen erfaßt sowohl die Tide- als auch die Winddriftströmungen in allen Tidephasen und zu allen Wetterlagen. Die Auswertung besteht u. a. darin, daß in 24 Lageplänen nach Wetterlagen getrennt, an jedem Meßpunkt die gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten vektoriell eingetragen und außerdem auf den Reststromvektor ausgewertet werden. Die Auswertung erlaubt die Zeichnung von Strömungskarten jeweils für die vollen Stunden vor bzw. nach Hochwasser.

4.7 Wasserstandsmessungen

Da die Pegel List und Hörnum nicht ausreichen, die Wasserstände vor der Insel zu erfassen, ist ein Schreibpegel vor Westerland zu fordern. Er soll als Hauptpegel für sämtliche Beobachtungen im Zusammenhang mit der Vorspülung dienen und ist auch erforderlich, um das Verhalten der Vorspülung nach ihrer Fertigstellung zu beurteilen.

Dieser Schreibpegel wird zweckmäßigerweise außerhalb der Brandungszone auf dem seeseitigen Hang des Riffes aufgestellt, damit der Wellenstau eliminiert wird. Er besteht aus einem Stahlrohrpfahl von 100 bis 120 cm Durchmesser, der zugleich als Pegelschacht dient. Die Gesamtlänge richtet sich nach der Wassertiefe. Bei einer Wassertiefe von 9 m unter SKN¹⁾ und Annahme einer Auskolkung von 2 m ist die erforderliche Einspannlänge 8 m. Die Unterkante des Meßraumes liegt mit 9 m über SKN noch rd. 3 m über HHT_w. Auf besondere Maßnahmen zum Eisschutz kann verzichtet werden, da in diesem Bereich die Wellenbelastung größer als die Eisbelastung ist. Die Station sollte mit einem Bandschreiber und einem Loch-

streifenpegel sowie einer Lotvorrichtung ausgerüstet werden, um eine größtmögliche Sicherheit bei der Gewinnung der Aufzeichnungen zu erhalten. Der Schwimmer jedes der beiden Meßgeräte bewegt sich in einem eigenen Schwimmerrohr im Innern des Pegelschachtes.

Die Pegelstation ist nach den Sicherheitsbestimmungen für die Schifffahrt zu bezeichnen. Es ist anzustreben, einen Wellenpegel (s. 4.2) mit dem Schreibpegel zu verbinden. Sehr dringend wird eine Meßwertübertragung durch Funk oder Kabel an eine Landstation empfohlen, um die Meßwerte jederzeit verfügbar zu haben.

4.8 Wasserstandsbeobachtungen

Empfehlenswert ist eine synoptische Beobachtung von Lattenpegeln längs des Weststrandes der Insel Sylt, etwa bei Hörnum, Westerland, Wenningstedt und List, weil Tideniedrig- und Tidehochwasser an verschiedenen Punkten mit mehr als 1 Stunde Unterschied eintreten. Damit werden solche Beobachtungen Aufschluß über die Spiegelhöhendifferenzen längs des Weststrandes zu verschiedenen Tidephasen geben.

4.9 Strandversatzbeobachtungen

Durch Treibkörper sollte der Strandversatz beobachtet werden, um zu erkennen, welche Geschwindigkeiten das Wasser in der Wellenauflaufzone hat, um daraus auf die Verdriftung des Sandes zu schließen.

Geeignet wären gut sichtbare kleine Bälle von etwa neutralem spezifischem Gewicht (um $\gamma = 1$), die nicht den Windkräften ausgesetzt sind. Gemessen werden soll vornehmlich am Wellenmeßprofil (s. 4.1), mit einer Meßstrecke von 50 m bei starken, von 10 m bei schwachen Strandbrandungen (mit der Stoppuhr zu messen); seitlich des Wellenprofils sind Marken (Fluchtstäbe) dafür zu verwenden. Während der Vorspülung könnten solche Strandversatzuntersuchungen auch an anderen Orten (vor dem Spülstrand) von Interesse sein, was bei der Bearbeitung des Teilgutachtens C entschieden werden muß.

5. Meteorologie

Es erscheint nicht erforderlich, eigene meteorologische Beobachtungen anzustellen, weil entsprechende Werte vom Institut für Bioklimatologie der Universität Kiel in Westerland und von der Wetterdienststelle in List gemessen und ausgewertet werden. Mit diesen Stellen müßte Verbindung aufgenommen werden. Außerdem wird empfohlen, den neuen Hauptpegel (s. 4.7) zusätzlich mit einem Wind- und Böenschreiber auszurüsten.

6. Untersuchungen zum Spülbetrieb

Es wird vorausgesetzt, daß das Material im Entnahmegebiet ohne hydrologische Nachteile entnommen werden kann. Vor Beginn der Bodenentnahme müssen Schichtaufbau und Ausdehnung des Sandkörpers durch Bohrungen genügend erschlossen sein. Bei der Beurteilung des Spülbodens ist davon auszugehen, daß Kornanteile unter 0,2 mm kaum Aussicht haben, auf dem Strand liegenzubleiben. Sie werden bereits während der Aufspülung als Spülverlust weitgehend verlorengehen.

Auch unter der Annahme, daß die Spülgutmenge im Abtrag abgerechnet wird, muß vom Unternehmer gefordert werden, das Spülgerät mit einem Durchfluß- und Konzentrationsmesser auszurüsten. Um den Spülgutfluß laufend kontrollieren zu können, müssen beide Geräte registrierend arbeiten. Aus gleichem Grunde sind außerdem integrierende Meßgeräte, nach Möglichkeit mit Multiplikatorschaltung zwischen Konzentration und Durchfluß erwünscht. Die Kornverteilung am Ausfluß muß täglich geprüft werden. Außerdem ist vom Unternehmer zu fordern, daß zwischen Spülfeld und Spüler eine ständige Sprechverbindung vorhanden ist, damit eine ständige Abstimmung zwischen Spüler und Spülfeld sichergestellt ist.

Als selbstverständlich wird angesehen, daß ein genaues Bautagebuch sowohl auf dem Spüler als auch auf dem Spülfeld geführt wird, das durch die Durchfluß- und Konzentrationsregistrierungen ergänzt wird. Tagebücher und Registrierungen müssen vom Bauherrn jederzeit eingesehen oder angefordert werden können.

Weitergehende Überlegungen zum Spülbetrieb werden im Teilgutachten B erörtert.

7. Erforderliche (e) und wünschenswerte (w) Untersuchungen

	vor	während der Vorspülung	nach
1. Allgemeines zu den Untersuchungen	—	—	—
2. Topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen	—	—	—
2.1 Festlegung der Meßprofile	—	—	—
2.2 Strandvermessung	—	—	—
2.21 Allgemeines	—	—	—
2.22 Vermessung der Strandprofile	e	e	e
2.23 Auswertung	e	e	e
2.3 Vorstrandvermessung	—	—	—
2.31 Allgemeines	—	—	—
2.32 Querprofile	e	e	e
2.33 Längsprofile	e	e	e
2.34 Auswertung	e	e	e
2.4 Luftbilddaufnahmen	e	e	e
2.5 Photographische Strandaufnahmen	e	e	e
3. Sedimentologische Untersuchungen	—	—	—
3.1 Oberflächenproben vom Strand und Vorstrand	—	—	—
3.11 Allgemeines	—	—	—
3.12 Bestandsaufnahme vor Beginn der Vorspülung	e	—	—
3.13 Entnahme von Vergleichsproben während der Vorspülung	—	e	—
3.14 Wiederholung der Bestandsaufnahme nach der Vorspülung	—	—	e
3.2 Gefügeuntersuchungen:			
a) seewärts des Riffes	e	e	—
b) in der Riffzone	w	w	—
3.3 Leitstoffmessungen:			
a) radioaktive Tracer	e	—	—
b) Luminophoren	—	e	w
3.4 Aufbau des Materials im Sandentnahmegebiet	e	—	—
4. Hydrologische Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen	—	—	—
4.1 Wellenbeobachtungen:			
a) an Pfahlreihen	e	e	e
b) auf dem Riff	w	w	w
c) mit Filmaufnahmen	w	w	w
4.2 Wellenmessungen	e	e	e
4.3 Wellenbefliegung	w	e	w
4.4 Brandungsströmungsbeobachtungen	w	w	w

4.5	Schwimmermessungen	e	e	e
4.6	Dauerstrommessungen	w	e	w
4.7	Wasserstandsmessungen	e	e	e
4.8	Wasserstandsbeobachtungen	w	—	—
4.9	Strandversatzbeobachtungen	w	w	w
5.	Meteorologie	e	e	e
6.	Untersuchungen zum Spülbetrieb	e	e	—

8. Schlußbemerkung

Das Teilgutachten A enthält die erforderlichen und wünschenswerten Untersuchungen zur Strandvorspülung bei Westerland auf Sylt. Der besseren Übersicht wegen sind sie in einer Tabelle (Abschnitt 7) zusammengestellt.

Wenn auf die einzelnen Untersuchungen mehr oder weniger ausführlich eingegangen worden ist, so ist zu bemerken, daß bekannte Verfahren weniger, nicht geläufige dagegen ausführlicher behandelt worden sind.

Die im Teilgutachten A vorgeschlagenen Untersuchungen haben einen erheblichen Umfang. Deshalb wird empfohlen, daß Aufgaben, die über die Möglichkeiten der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Schleswig-Holstein hinausgehen, in Amtshilfe oder auftragsweise anderen Verwaltungen oder Forschungsinstituten übertragen werden. Auf diese Weise können auch für Teilaufgaben Fachkräfte, die über entsprechende technische Ausrüstungen verfügen, herangezogen werden.

Teilgutachten B: Vorschläge zur Einspültechnik

1. Einleitung

Nach der Einführung „Veranlassung und Aufgabenstellung“ zu dem in die Teilgutachten A–D gegliederten Gutachten ist das „Teilgutachten B“ vor Bearbeitung des Entwurfes und der Ausschreibung der versuchsweisen Sandvorspülung am Strand von Westerland abzuschließen, um dafür als Grundlage herangezogen werden zu können.

In diesem Teilgutachten ist das Einspülverfahren zu behandeln, das den zunächst darzulegenden geologischen, morphologischen, sedimentologischen und hydrologischen Bedingungen am Strand und Vorstrand von Sylt angepaßt werden muß. Der geologische Aufbau des vorgesehenen Sandentnahmegebietes im Rantumer Watt ist zu untersuchen, um beurteilen zu können, ob das anstehende Bodenmaterial als Spülgut geeignet ist. Weiterhin sind Erfahrungen zu nutzen, die bereits mit Sandvorspülungen an der deutschen Küste und im Ausland gewonnen wurden. Vor allem sind Einspülgebiet und Einspülvorgang im Strandbereich mit dem größten Sandmangel festzulegen. Die insgesamt vorzuspülende Sandmenge ist unter Berücksichtigung der Spülverluste und der erforderlichen täglichen Spülleistung zu ermitteln.

Auf die spültechnischen Erfordernisse, wie Wahl des Spülgerätes, der Spülleitung mit Zwischenpumpstationen und anderes, soll nicht eingegangen werden, da diese im erheblichen Maße vom Gerätepark der jeweils anbietenden Firmen abhängig sind.

Besondere Beachtung wird der Entwicklung und Veränderung der Vorspülung auf Grund der Wechselwirkung zwischen Naturkräften und Sandstrand gewidmet werden müssen, um durch künstliche Sandzufuhr mit gezieltem Eingriff in die natürliche Sandbewegung eine optimale Sandanlagerung vor der Uferstrecke zu bewirken. Um das zu erreichen, soll das Teilgutachten C „Steuerung der Einspülung“ die Möglichkeit geben, den Einspülvorgang zu beeinflussen. Dazu werden auch Ergebnisse der im Teilgutachten A „Untersuchungs- und Meßtechnik“ vorgeschlagenen Untersuchungen genutzt werden können.

Wie es die Besprechung mit dem Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein – Abteilung Wasserwirtschaft – am 8. 1. 1971 ergeben hat, soll den Vorschlägen der Gutachtergruppe zur Untersuchungs- und Meßtechnik im vollem Umfange entsprochen werden, was an dieser Stelle hervorzuheben ist. Die Wasserwirtschaftsverwaltung ist unter Einsatz erheblicher Mittel bestrebt, die Sandvorspülung vor Westerland als Großversuch in der Natur so zu überwachen und auszuwerten, daß daraus technische und wirtschaftliche Konsequenzen für den künftigen Inselchutz von Sylt gezogen werden können.

2. Natürliche Gegebenheiten am Strand und Vorstrand von Sylt

2.1 Allgemeines

Die geplante Sandvorspülung vor Westerland bedeutet einen tiefen Eingriff in das natürliche Geschehen. Ihre Aufgabe ist, die gefährdeten Uferschutzwerke durch Erhöhung und Verbreiterung des Strandes zu sichern. Das wird um so besser und dauerhafter erreichbar sein, je wirksamer die Vorspülung im positiven Sinne in die Naturvorgänge eingreift. Deshalb wird eine Zusammenfassung der Kenntnisse über den morphologisch-geologischen Zustand und das sedimentologische und hydrologische Geschehen vorangestellt. Sie beruht auf dem Schrifttum und auf noch nicht veröffentlichten geologischen Untersuchungen, die im Rahmen des Schwerpunktes „Sandbewegung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgeführt werden.

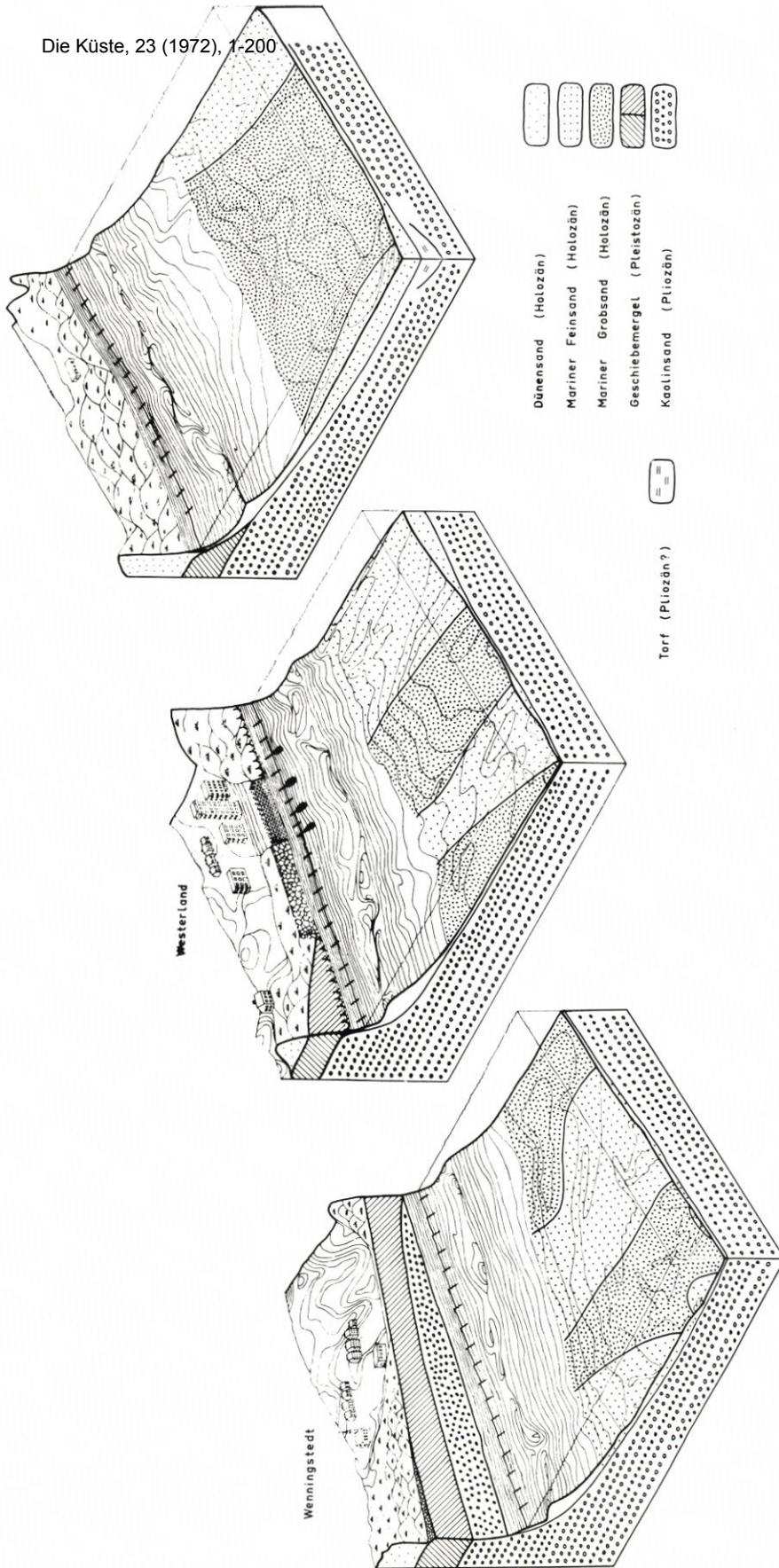


Abb. 6. Blockbilder des Seegrundes westlich von Westerland/Sylt (aus R. KÖSTER 1971)

2.2 Aufbau des Westerländer Geestkernes

Das Gebiet der geplanten Sandvorspülung vor Westerland liegt nahe am Südrand des Westerländer Geestkernes, der im Stadtgebiet von Westerland nur noch wenige Meter über dem Meeresspiegel aufragt (Abb. 6).

Der Westerländer Geestkern unterliegt im Westen dem starken Angriff der Nordsee. Der schnelle Küstenrückgang hat zur Entstehung des Roten Kliffs in seinem heutigen Zustand geführt. Etwa am Institut für Bioklimatologie und Meeresheilkunde nahe am Nordrand der Stadt Westerland wird am Kliffuß Kaolinsand sichtbar, der nach Norden bis etwa zum ehemaligen Kurhaus Kampen reicht. Vor Wenningstedt nimmt er das Kliff bis etwa zur halben Höhe ein. Der Kaolinsand wird stets von Geschiebelehm überlagert. Im Norden und Süden bildet er allein den sichtbaren Teil des Steilufers.

Diese Materialunterschiede, die nicht nur am Kliff, sondern auch auf dem Seeboden bestehen, sind für die Erosionsfestigkeit bei gleichen Bedingungen des Angriffes von großer Bedeutung. Der Geschiebelehm wird durch Wellen und Strömungen wesentlich langsamer ausgeräumt als der lockere Kaolinsand.

2.3 Relief, Sedimentbedeckung und anstehendes Gestein am Nordseeboden seewärts der Riffzone

Westlich der Riffzone folgt ein relativ steiler Unterwasserhang, der schließlich in den flach abfallenden Nordseeboden übergeht (Abb. 6). Dieser Bereich wird im Norden und Süden durch die weit vorspringenden Sandbänke vor dem Lister Tief und dem Vortrapptief begrenzt.

In großen Teilen des Gebietes tritt eine Gliederung durch etwa Ost-West verlaufende Rücken und Rinnen auf. Sie beginnen am seewärtigen Hang der Riffzone. Die Rinnen bilden flache talähnliche Formen mit einer Breite von rund 100 m und einer relativen Tiefe bis zu 2 m bei Wassertiefen von 8 bis 12 m. Die Breite der Rücken liegt demgegenüber in der Größenordnung von Kilometern. Im Norden und Süden klingen sie mit der Annäherung an die nach Westen vorspringenden Sandbänke aus, sind also überwiegend an die Umgebung des Vorfeldes des Roten Kliffs gebunden.

Der Vergleich mit älteren Vermessungen des Deutschen Hydrographischen Institutes deutet an, daß die Formen in den Grundzügen im letzten Jahrzehnt eine ziemlich konstante Lage gehabt haben müssen. Außerdem macht die Gegenüberstellung der Vermessungen für den Mittelabschnitt der Insel eine landwärtige Verschiebung der Tiefenlinien wahrscheinlich, während von etwa Rantum an nach Süden und von Kampen an nach Norden zunächst eine gleichbleibende Lage und schließlich eine seewärtige Verschiebung der Tiefenlinien außerhalb der Riffzone vorzuliegen scheint.

Die Oberfläche des Seebodens wird fast immer von holozänen Meeressanden gebildet (Abb. 7). Nur an wenigen Stellen sind Blockpackungen oder Geschiebemergel ohne Überdeckung durch Sand anzutreffen. Die Grobsprache von Greiferproben zeigt vor Mittel-Sylt eine auffallende küstennormale Verteilung von Feinsand- und Grobsandzonen, die über 15 km weit nach Westen reichen. Die Grobsandzonen stimmen näherungsweise mit den morphologischen Rinnen, die Feinsandzonen mit den Rücken und den Vorfeldern der Sandbänke überein.

Die Auswertung der Korngrößen ergibt für die einzelnen Streifen von Süd nach Nord eine allmähliche Abnahme, auf die mit scharfer Grenze die nächste Grobsandzone folgt. Wahrscheinlich spielen deshalb nordwärts gerichtete Bodenströmungen eine erhebliche Rolle. Andererseits finden sich in den Rinnenzonen vielfach Schwermineralanreicherungen, die nach Erfahrungen

am Strand durch Auswaschungen zu erklären sind (CORDES 1966). Dann müssen zusätzlich küstennormale Strömungen wirksam sein. Über das zeitliche und räumliche Zusammenwirken beider Strömungskomponenten und möglicher weiterer können auf Grund des bisherigen geologischen Befundes keine Angaben gemacht werden.

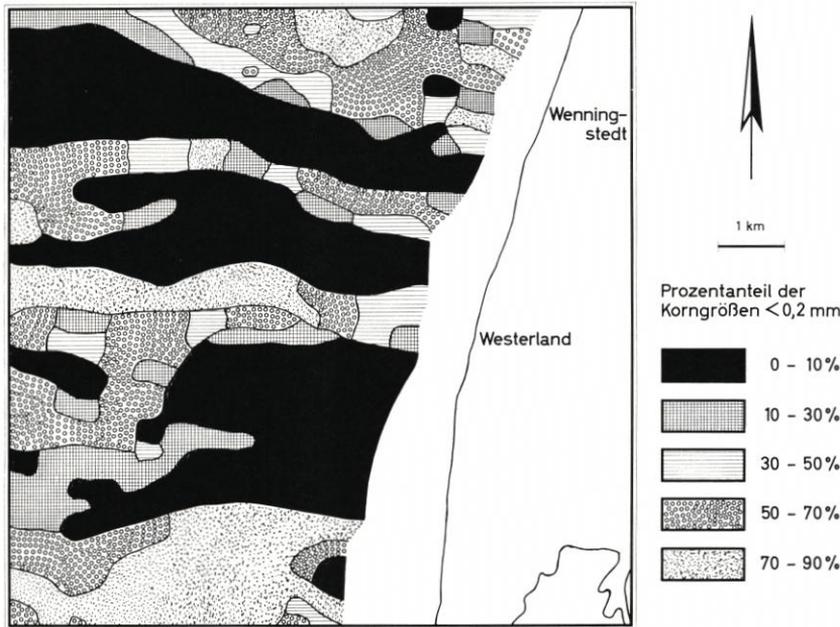


Abb. 7. Sedimentbedeckung des Seegerundes westlich der Mitte von Sylt am Beispiel der Korngrößen < 0,2 mm

Untersuchungen in der Kiesfraktion sowie die Bearbeitung der Schwer- und Leichtminerale ermöglichen das Erkennen der unterschiedlichen Ausgangsgesteine – Kaolinsand und Geschiebemergel – im holozänen Sediment. Die Verbreitung von Sand und Kies mit typischen Kaolinsandkomponenten beschränkt sich auf das Vorfeld des Roten Kliffs etwa in der Inselmitte und das Vorfeld von Rantum. Weiter im Norden, Westen und Süden sowie in einem kleineren Bereich vor Westerland überwiegen Sand und Kies mit Mineralen und Gesteinen des Geschiebemergels oder Mischungen der Bestandteile beider Ausgangsgesteine.

Bohrungen, Vibratorkerne und Sedimentechogramme vermitteln Angaben über die Mächtigkeit der holozänen Sedimente und ihre Auflagerung auf das Ausgangsmaterial. Die größte Sandanhäufung wurde mit etwa 4,5 m (Bohrung) in dem Rücken vor Westerland angetroffen, die geringste mit 0,25 m (Vibratorkern) in Rinnen. Die Rücken haben sich als dem anstehenden Material aufgesetzte Sandkörper erwiesen. Sie stellen also Transportkörper dar. Das Ausgangsmaterial ist im Mineralcharakter meist dem Holozänsand ähnlich. Vermischungen treten in erster Linie in den Übergangsbereichen auf, was wahrscheinlich macht, daß Umlagerungen gegenüber dem weiträumigen Transport überwiegen.

2.4 Relief, Sedimentbedeckung und Sandbewegung am Strand und Vorstrand

2.41 Allgemeines

Strand und Vorstrand bis zum seeseitigen Riffuß bilden vor der Mitte der Insel einen durchschnittlich 600 m breiten Streifen. Dem Kräftespiel seiner Umgebung ausgesetzt, ist dieser Streifen der Bereich mit den schnellsten Veränderungen. In ihn soll die Sandvorspülung gestaltend eingreifen.

2.42 Relief des Vorstrandes

Das Relief des Vorstrandes wird durch den morphologischen Gegensatz zwischen der Rinne und dem Riff bestimmt (Abb. 8). Das Riff erstreckt sich als langgezogener, flacher Sandrücken seewärts der Rinne uferparallel vor dem größten Teil der Insel. Die Höhendifferenz zwischen Riff und Rinne kann bis zu 2 m (Abb. 8, Zustand 1970) betragen.

Vor der Ufermauer und dem Betondeckwerk von Westerland sind Abweichungen vom Normaltyp zu erkennen. Das Riff ist streckenweise sehr schwach entwickelt, so daß es morphologisch kaum ausgeprägt ist. In der Rinne liegen im gleichen Bereich verschiedene kolkartige Eintiefungen.

Von dieser Zone mit schwach ausgebildetem Riff und tiefen Kolken geht die größte Gefahr für die Uferschutzwerke aus.

2.43 Sedimente des Vorstrandes

Die Kenntnisse über den geologischen Aufbau dieses Teiles des Vorstrandes beruhen vor allem auf den 1969 in Zusammenarbeit vom Marschenbauamt Husum und dem Geologischen Institut der Universität Kiel niedergebrachten und bearbeiteten Bohrungen, ferner einer Reihe vom Marschenbauamt Husum untersuchter Greiferproben (Abb. 7). Fünf Bohrpunkte liegen innerhalb des Vorspülgebietes, weitere im nördlich anschließenden Vorstrandbereich und im vorgelagerten Seegebiet (HOFFMANN 1970).

Bohrungen in den Kolken erbrachten 1–2 m holozänen Meeressand über Geschiebemergel (vor dem Südabschnitt der Uferschutzmauer) bzw. über Kaolinsand (vor dem Nordabschnitt der Uferschutzmauer). Auf dem Riff wurden dagegen rd. 5 m holozäner Meeressand angetroffen. Aus den Bohrungen folgt, daß vom geologischen Aufbau her der Nordabschnitt der Uferschutzmauer durch leichter ausräumbaren Untergrund stärker gefährdet ist als der Südabschnitt. Ferner ist an den Bohrpunkten innerhalb der Riffzone eine stärkere Sandansammlung auch dort vorhanden, wo das Riff morphologisch weniger ausgeprägt ist. – Die Mächtigkeitsangaben für das Holozän haben nur für den Zeitpunkt der Bohrungen uneingeschränkte Gültigkeit.

Der Aufbau des Holozäns in den Bohrungen ist sehr wechselhaft. Grobsand und Feinsand wechseln sowohl in der Sedimentbedeckung der Oberfläche wie innerhalb des einzelnen Profiles (HOFFMANN 1970). Für Greiferproben aus der Vorstrandzone vor Rantum und Kampen werden mittlere Medianwerte von 0,38 mm und 0,29 mm angegeben (MBA Husum 1967).

Die natürliche Tendenz der Sandverlagerung im Vorstrandbereich ist für das Verhalten des Vorspülendes von ausschlaggebender Bedeutung. Nach der bisher vorherrschenden Meinung dient dieser Vorstrandbereich als Transportbahn, in der das beim Uferabbruch anfallende

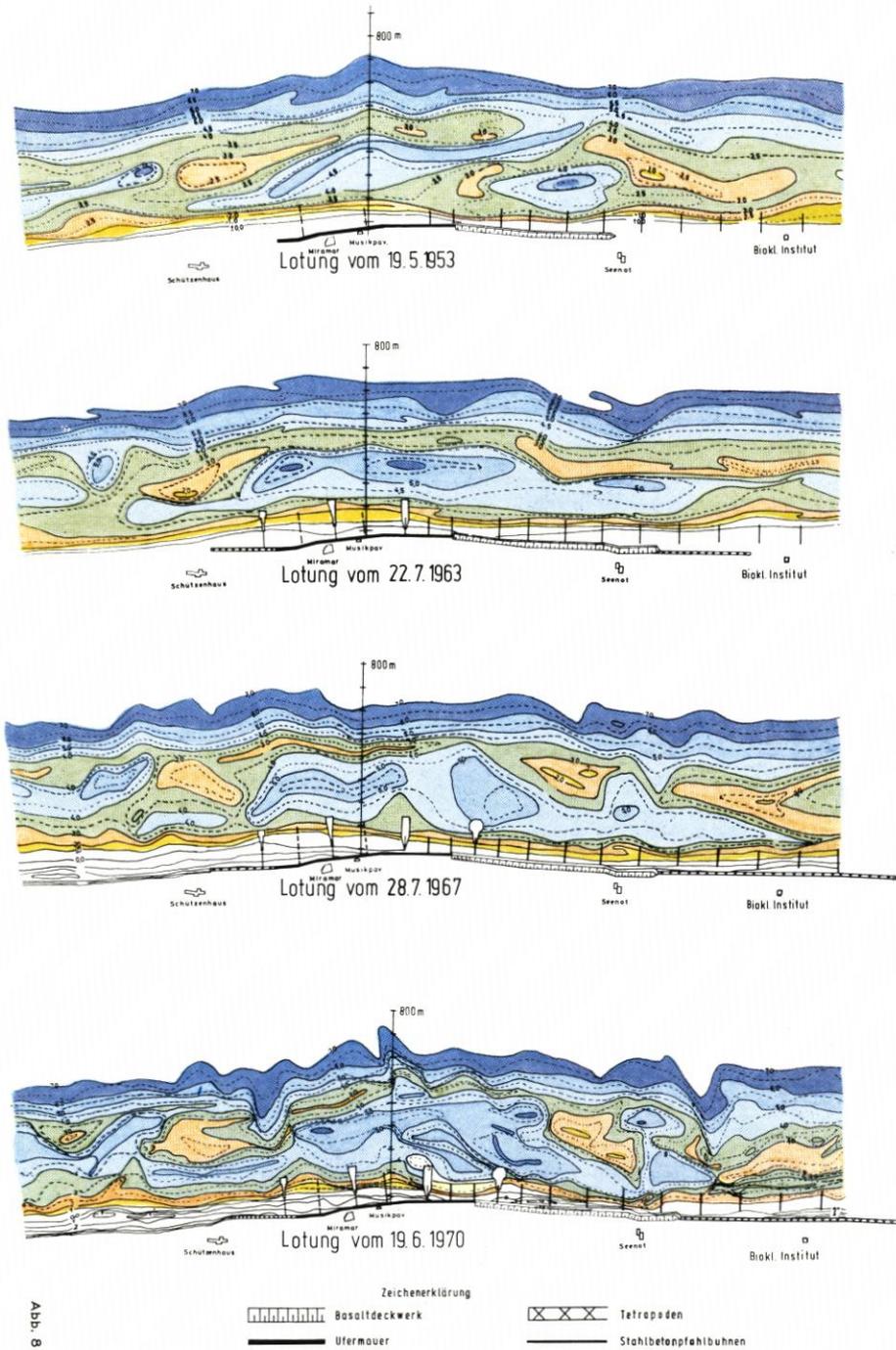


Abb. 8

Abb. 8. Tiefenpläne vor Mittel-Sylt

Material nach Norden und Süden verfrachtet wird, bis es in den Barren und Sandbänken vor dem Lister Tief und dem Vortrapptief wieder abgelagert wird. So einleuchtend diese Vorstellung zunächst ist, so wenig ist sie mit dem Aufbau des Bereiches vor dem Vortrapptief zu vereinbaren.

Das Flachwassergebiet vor Amrum wird mit etwa NNO-SSW-Richtung vom Vortrapptief durchzogen. Von ihm zweigen zwischen Sandbänken mehrere Rinnen nach Westen bis Nordwesten ab. In den tieferen Teilen der Rinnen und in den angrenzenden Flachwassergebieten (Tiefe NN — 2 m bis — 5 m) besteht der Seegrund aus Grobsand und Kies, deren Mächtigkeit unbekannt ist. Sie entstammen nach ihrer petrographischen Zusammensetzung mindestens zum erheblichen Teil der Erosion und Verfrachtung durch das Vortrapptief, also nicht einem Transport von Abbruchmaterial der Insel Sylt nach Süden.

Vor Amrum werden der flache äußere Teil der Rinnen, der seeseitige Rand der Barrenzone und der angrenzende Seegrund aus Feinsanden aufgebaut, über deren Herkunft — aus Abbruch der Insel Sylt, aus Antransport vom Seegrund oder dem Vortrapptief — gegenwärtig noch keine Angaben möglich sind. In den bisher untersuchten Proben liegen 50 bis 70 % des Sandes im Korngrößenbereich zwischen 0,1 mm und 0,2 mm, wenige Prozent im feineren Bereich, der Rest überwiegend zwischen 0,2 mm und 0,4 mm. Er ist also wesentlich feinkörniger als der Sand aus der Vorstrandzone von Sylt. Entsprechende Untersuchungen aus der Umgebung des Lister Tiefs liegen noch nicht vor.

Aus den genannten Gründen müssen heute Zweifel gegenüber der bisherigen Ansicht über die Transportbahnen geltend gemacht werden. Die Flachwasserbereiche an den Enden von Sylt dürften — im Süden sicher, im Norden vermutlich — wenigstens teilweise aus Material bestehen, das aus den Gezeitenrinnen stammt. Unter diesem Gesichtspunkt stellt sich die Frage nach dem Verbleib des Abbruchmaterials vor Sylt neu in der Form und inwieweit Wechselbeziehungen zwischen dem Material des Vorstrandes und dem des vorgelagerten Seegrundes bestehen.

Die bisherigen geologischen Erkenntnisse erlauben hierzu keine gesicherten Folgerungen. Eine Stellungnahme wird erst möglich sein, wenn die im Teilgutachten A angeführten Untersuchungen abgeschlossen sind.

2.44 Leitstoffuntersuchungen zur Sandbewegung im Vorstrandbereich

Durch die Unvollständigkeit der bisherigen geologischen Informationen gewinnen die Leitstoffuntersuchungen von PETERSEN und Mitarbeitern im Jahre 1963 (EURATOM 1965) besondere Bedeutung. Als wichtigstes Ergebnis der naturgemäß nur für die Wetterlagen während des Versuches repräsentativen Messungen ist festzustellen, daß sich die markierten Sande nur innerhalb der Riffzone verteilten und nicht über die Riffzone hinaus nach Westen ausbreiteten. Vor Kampen konnte das Ausbreitungsgebiet des radioaktiven Sandes nach 20 Sturmtagen auf einer Breite von 700 m sowie etwa 2000 m nach Norden und 600 m nach Süden vom Eingabepunkt abgegrenzt werden.

Mit dieser experimentellen Erfahrung stehen theoretische Überlegungen im Einklang. Wenn es auch eine geschlossene Theorie der Riffbildung noch nicht gibt (vgl. z. B. ZENKOVIC 1968), so gehen doch die meisten Ansätze davon aus, daß auf dem seeseitigen Riffhang landseitiger Transport vorherrscht. Ein seewärts gerichteter Transport wird nur bei sehr feinem Material angenommen.

Einem solchen Materialverlust kann durch Auswahl möglichst groben Spülgutes und vorsorgliche Einrechnung eines entsprechenden Spülverlustes begegnet werden.

2.45 Veränderungstendenzen im Vorstrandbereich

Strand und Vorstrand gehören zu den am stärksten veränderlichen Gebieten. Während aber die Vorgänge am Strand der Beobachtung direkt zugänglich sind, können sie im Vorstrandbereich nur aus Lotungen abgeleitet werden. Damit sie vergleichbar sind, müssen Abstand der Lotlinien, Beschickung u. ä. einander entsprechen sowie eine ausreichende Anzahl von Messungen vorliegen.

Vergleichsmessungen an begrenzten Strandabschnitten nach verschiedenen Wetterlagen innerhalb eines Jahres sind vor Rantum und Klappholtal von NACHTIGALL in Zusammenarbeit mit DOLEZAL, KRAATZ u. a. im Jahre 1965 unternommen worden (NACHTIGALL 1968). Die Abstände der Lotlinien (75 bis 125 m) und das Beschickungsverfahren entsprachen einander. Als wichtigste Ergebnisse sind festzuhalten:

Die morphologischen Formen blieben im Vergleichszeitraum weitgehend erhalten. Eine geringe morphologische Umgestaltung erfuhren im allgemeinen nur die breiter und flacher angelegten Riffkörper. Tiefendifferenzkarten ergaben jedoch, daß trotzdem größere Materialmengen umgelagert wurden. Die durchschnittlichen positiven (Materialauftrag) und negativen (Materialabtrag) Tiefenänderungen betragen im Mittel etwa 0,4 m, seltener und örtlich begrenzt bis zu 1,0 m.

Auf- und Abtrag wechselten in Küstenlängsrichtung wiederholt ab. Auffällig war eine vor allem vor Kampen zu beobachtende fast regelmäßige Wechselfolge von bis zu 450 m weiten küstennormalen Flächen mit Materialauftrag und Materialabtrag (NACHTIGALL 1968).

Ähnliche Vergleiche sind (LAMPRECHT 1957) unter Hinzuziehung von Vermessungen seit 1870 durchgeführt worden. Wegen der unterschiedlichen Methoden sind die Aussagen über die wahre Gestalt des Seegrundes qualitativ nicht gleichwertig. Das gilt auch für einen Vergleich der Vermessungen von 1953 bis heute, die in Abbildung 8 in vier Beispielen dargestellt sind:

1. 1953 MBA Husum (LAMPRECHT)
2. 1963 MBA Husum (KRAATZ)
3. 1967 DHI, MBA Husum, Geol. Inst. Kiel
4. 1970 MBA Husum (WIEDECKE)

Das Vermessungsverfahren beeinflusst das in den Peilplänen niedergelegte Bild des Seegrundes. Eine engmaschige Peilung liefert dabei natur- und erwartungsgemäß ein wesentlich unruhigeres Bild des Seegrundes (HENSEN 1948). Unter diesen Gesichtspunkten müssen die in der Abbildung 8 wiedergegebenen Tiefenpläne gesehen werden, nämlich: Auffallend ist die größere Gleichförmigkeit der Tiefenlinien nach den Lotungen 1953 und 1963 gegenüber den später durchgeführten Lotungen, besonders der aus dem Jahre 1970.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen zeigen die Karten die Instabilität des Reliefs im Vorstrandbereich, ohne daß sichere Verlagerungstendenzen von Einzelformen im Riffkörper oder der Kolke abgeleitet werden können. Das vorliegende Material erlaubt deshalb keine sicheren Aussagen, ob seit 1953 im Vorstrandbereich von Westerland schwerwiegende Veränderungen eingetreten sind, obwohl manche Einzelheiten solche Gedanken nahelegen.

So scheint sich z. B. abzuzeichnen, daß vor Westerland Übergangsrücken (*cross bars*) zwischen dem Riff und dem Strand sowohl vor dem südlichen Ende der Uferschutzmauer als auch auf der Höhe des Seenotrestaurants nach Größe und Lage bemerkenswert stabil geblieben sind.

Unter Vorbehalt der Unsicherheit durch die vorgenannten Bedingungen ergibt der Versuch eine Massenabschätzung des Riffkörpers oberhalb der Tiefe NN — 4,0 m folgende Zahlen:

1.	1953	rd. 250 000 m ³
2.	1963	rd. 330 000 m ³
3.	1967	rd. 400 000 m ³
4.	1970	rd. 390 000 m ³

Die Zahlen werden genannt, ohne daß sie hier gedeutet werden sollen. Sie zeigen auch, daß in den beiden letztgenannten Jahren die Massen sich kaum verändert haben. Die geringeren Mengen, die sich aus den älteren Vermessungen ergeben, können auf die ungenauere Erfassung des Reliefs durch die größeren Abstände der Lotlinien zurückgeführt werden.

Somit ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, daß die im Teilgutachten A vorgeschlagenen Lotungen mit gleichbleibendem Aufwand durchgeführt werden.

2.46 Veränderungen im Strandbereich

Den ständigen Veränderungen im Vorstrandbereich stehen in der Auswirkung ähnliche Vorgänge am Strand gegenüber. Er wird jedoch nur noch zeitweise vom Wasser bedeckt. Im Bereich des nassen Strandes ist dies bei jeder Tide der Fall, auf dem trockenen Strand dagegen nur bei Sturmfluten. Sie sind zwar selten, aber die dann wirksamen Naturkräfte sind außergewöhnlich groß. Deshalb stehen längeren Zeiten mit nur geringen Veränderungen plötzliche weitgehende Umformungen des Strandes gegenüber. Während der sturmflutfreien Zeiten wirken auf den trockenen Strand nur noch der Wind und der Mensch ein.

Die heutigen, auf genaue Messungen zurückzuführenden Kenntnisse, die über die schon seit langer Zeit übliche Einmessung der Uferlinie hinausgehen, sind vor allem den umfangreichen Untersuchungen zu verdanken, die in den Berichten von LAMPRECHT und KRAATZ dargestellt sind. Auf sie stützt sich die Zusammenfassung der für die Sandvorspülung wesentlichen Ergebnisse. Danach (LAMPRECHT 1955) schwankt die Breite des trockenen Strandes auf Sylt zwischen 120 und 17 m. Inzwischen ist sie an einzelnen Stellen bis nahe 0 m zurückgegangen. Für den nassen Strand gab LAMPRECHT eine mittlere Breite von 26 m an. Als mittleres Gefälle bestimmte er am trockenen Strand 1:17, am nassen Strand 1:15.

Die Neigung des Strandes und auch des seeseitigen Dünenhanges haben sich über fast 100 Jahre nicht nennenswert verändert. Deshalb nahm er an, daß der Strand bestrebt ist, ein „mittleres Profil“ einzuhalten, das jedoch ständig nach Osten verschoben wird. Dabei erreichen schon die mittleren täglichen Höhenänderungen vor allem im Bereich des nassen Strandes erhebliche Beträge. LAMPRECHT erhielt an drei ausgewählten Profilen während der zehnmonatigen Meßperiode im Jahre 1954 folgende Größen:

Profil 5 N	: 9,4 cm/Tag
Profil 0	: 8,3 cm/Tag
Profil 2 S	: 13,4 cm/Tag,

wobei im letzteren Profil die Schwankungsbreite in 4 Monaten über 4 m betrug.

Schon innerhalb weniger Tage können nach den Ergebnissen von LAMPRECHT bei Vorliegen extremer Bedingungen ganz erhebliche Höhenänderungen auftreten:

„Tägliche Vermessungen des gleichen Profils zeigten, daß in einem Meßzeitraum von 10 Monaten im Jahre 1954 die Strandhöhe in einem Bereich von fast 5 m schwankte. Die größte Änderung der mittleren Strandhöhe von einem Tag zum anderen beträgt 1,60 m (Profil 5 N), während ein Strandpunkt in einem anderen Falle seine Höhenlage um 2,60 m in 2 Tagen änderte (Profil 0).“

Ein Vergleich von Strandprofilen aus verschiedenen Jahren führt also leicht zu Fehlschlüssen, wenn die täglichen Strandveränderungen nicht berücksichtigt werden. Diese Schwierigkeit bei Vergleichen tritt z. B. sehr stark in Erscheinung, wenn versucht wird, die Auswirkung baulicher Maßnahmen auf den Strand mit unzureichendem Meßaufwand zu erfassen. Deshalb ist auch auf dem Strand das im Teilgutachten A zusammengestellte umfangreiche Meßprogramm erforderlich.

Auf einige Einzelfragen über die Einwirkung von Buhnen verschiedener Bauart auf Erhöhung oder Abbau des Strandes ist in einem Bericht des Marschenbauamtes Husum (KRAATZ 1966) eingegangen worden. Bei derartigen Untersuchungen treten die Probleme bei Vergleichsmessungen naturgemäß besonders stark hervor. Zusammenfassend ist festzustellen, daß vor allem die Buhnenbauten der letzten beiden Jahrzehnte zwar bei manchen Wetterlagen günstig auf das Naturgeschehen eingewirkt haben, aber nicht im erwarteten Umfange.

Auch PETERSEN kam bei seinen Untersuchungen mit Leitstoffen zu dem Ergebnis, daß die Strandbuhnen den Sandhaushalt vor einem Strandabschnitt nur geringfügig beeinflussen, weil sie nicht bis zum Riff reichen. Damit werden die Überlegungen auf die Wechselbeziehungen zwischen Strand und Vorstrand geführt.

2.47 Massenbilanz und Wechselbeziehungen zwischen Strand und Vorstrand

Die Fragen der Massenbilanz an der Küste von Sylt sind vor allem in dem Bericht des Marschenbauamtes Husum (KRAATZ 1966) behandelt. Die Abschätzung beruht auf der Annahme (s. 2.46), daß sich das mittlere Sylter Küstenprofil (Neigung der Randdüne und des Strandes sowie des Vorstrandes und des seeseitigen Hanges) ohne wesentliche Veränderungen seiner Form um das mittlere Abbruchmaß nach Osten verlagert, solange der Mensch nicht in diesen Vorgang eingreift. Als obere und untere Begrenzung werden die Abbruchkante und die NN — 10 m Tiefenlinie zugrunde gelegt.

Nach KRAATZ beträgt die durchschnittliche Abbruchmenge rd. 715 000 m³/Jahr, während den Anwachszonen im Norden und Süden der Insel im Durchschnitt 242 000 m³/Jahr bzw. rd. 34 % der Abbruchmenge zugeführt werden:

„Der Unterschied zwischen Anwachs- und Abbruchmenge, also das Gesamtdefizit, beträgt demnach rd. 473 000 m³/Jahr.“

Darüber hinaus hat KRAATZ einen Versuch unternommen, am Beispiel von 3 Buhnenfeldern vor Kampen auf der Grundlage von 8 Wiederholungsmessungen zu einer Aussage über die Größenordnung der Querumlagerungen zu kommen. Sein zahlenmäßiger Vergleich zwischen Umsatz- und Verlustrate auf der Grundlage dieses begrenzten Materials zeigt,

„daß durch die Querumlagerungen zwischen Strand und Vorstrand sehr viel größere Massen hin- und hertransportiert werden, als im gleichen Zeitraum effektiv verlorengehen. Das Verhältnis zwischen Umsatz- und Verlustrate liegt bei 11:1.“

Nach KRAATZ dürfte der tatsächliche Umsatz jedoch vielfach größer sein, da er mit den 8 Messungen nicht vollständig erfaßt werden konnte. Daraus ist zu folgern, daß die normal zur Uferlinie wirksamen Kräfte ebenfalls erheblich größer sein müssen als diejenigen, die den uferparallelen Transport verursachen.

2.48 Wirksame Kräfte im Strand- und Vorstrandbereich

Die an der Gestaltung und dem Zurückweichen der Inselküste beteiligten Kräfte sind in ihrer wahrscheinlichen Rangfolge:

Wellenbrandung und Brandungsströmung,
Tide- und Windstauströmung,
Winderosion,
der Anstieg des Meeresspiegels und
Regenerosion.

Mit einer Sandvorspülung vor Westerland wird in eine Strandmorphologie eingegriffen, die einmal durch starken Umsatz in den Querprofilen (Abb. 8), zum anderen durch starken strandparallelen Transport in der Strand- und in der Riffbrandung geprägt ist. Diese Sandverlagerungen am Strand und Vorstrand mit Riff sind im wesentlichen auf Wellen und wellenerzeugte Strömungen zurückzuführen, während nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse die Tide- und Windstauströmungen nur von untergeordneter Bedeutung für das Kräftespiel sind.

Die vor Sylt am häufigsten auftretende Wellenhöhe ist 0,5 m. Etwas über 50 % aller gemessenen Wellen hatten Höhen von 0,5 m und weniger, rd. 4 % der Wellen waren über 2 m hoch. Die größte zwischen 1952 und 1956 vor Westerland gemessene Welle betrug 3 m. Als größtmögliche Wellenhöhe wird von LAMPRECHT 4 m angenommen¹⁾.

In dem Kräftespiel, das durch die Reibung der Medien Wasser und Land ausgelöst wird, sind die Wellenbrandung und Brandungsströmung die mit Abstand größten Einflußfaktoren. Die resultierende Geschwindigkeit der uferparallelen Brandungsströmung ist nicht groß. LAMPRECHT hält Strömungsgeschwindigkeiten, auch bei Sturmfluten, nur bis 1,5 m/s für möglich. Sie führen aber in Verbindung mit den Orbitalgeschwindigkeiten und der starken Turbulenz in der Brandungszone zu starker Massenumlagerung, weil das Material teilweise suspendiert wird.

Die normalen Tideströmungen – bei ruhigem Wetter von LAMPRECHT gemessen – sind gering, und zwar beträgt

die größte Flutstromgeschwindigkeit 30 cm/s und
die größte Ebbestromgeschwindigkeit 35 cm/s,

wobei die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten über die Lotrechte gemittelt wurden. Während ruhiger Wetterlagen ist der Flutstrom etwa von Süd nach Nord und der Ebbestrom umgekehrt von Nord nach Süd gerichtet. Ab Windstärken von etwa 4 Bft. aus Nordwest oder Südwest beginnt die Brandungsströmung die Tideströmung zu überlagern, so daß keine Kennterung eintritt (LAMPRECHT 1957).

Die Sandumlagerungen in Quer- und Längsrichtung nehmen im allgemeinen mit den Wellenhöhen zu. Der strandparallele Transport ist dabei außerdem von der Wellenrichtung abhängig. Wellen aus Westrichtung bringen geringen Längstransport. Durch den überwiegenden Schrägangriff der Wellen werden Massenumlagerungen mit einem uferparallelen Versatz hervorgerufen, der je nach Windrichtung nach Norden oder Süden vonstatten geht. Durch Wellen aus dem nordwestlichen Sektor ist der strandparallele Transport südlich und durch Wellen aus dem südwestlichen Sektor nördlich gerichtet. Der Längstransport verläuft haupt-

¹⁾ Das in A 4.2 beschriebene Wellenmeßprogramm lieferte im Winter 1971/72 mittlere Wellenhöhen über 4 m und höchste Wellenhöhen von 6,5 m bei einer leichten Sturmflut, die bei einer Windstärke 7 Bft aus nordwestlichen Richtungen nur eine Wasserstandserhöhung von ~ 1,50 über MThw am Pegel List ergab. Höhere Sturmfluten traten während des bisherigen Meßzeitraumes nicht auf.

sächlich in zwei Sandströmen, der eine in der Brandungszone auf dem Strand, der andere in der Brandungszone auf dem Riff bzw. auf den einzelnen Riffkörpern.

Mit der jeweiligen Lage der Brandungszone und den in ihr auftretenden Brecherarten verschiebt sich auch die Lage und Stärke der Sandströme. Tritt bei Hochwasser oder bei nur mäßigen Wellenhöhen keine Riffbrandung auf, so ist im wesentlichen nur ein Sandstrom auf dem Strand vorhanden, dessen Breite etwa vom Brechpunkt bis zur Wellenauflaufzone reicht. Bei Riffbrandung dagegen laufen zwei Sandströme auf dem Riff und Strand in gleicher Richtung, wobei auf dem Riff der Transport um so stärker wird, je mehr Wellenenergie dort durch Brandung umgesetzt wird.

Über die Sedimentbewegungen an der Küste gibt eine von AJBULATOW, GRIESSEIER und SADRIN 1962 veröffentlichte Arbeit „Küstendynamische Untersuchungen in der Uferzone der Anapa-Nehrung“ (REINEKE 1966) Auskunft. In ihr werden quantitative Ermittlungen über die Geschwindigkeiten, Mengen und Wege der Sedimente beschrieben. Durch das mit einer Seilbahn überspannte Meßprofil sind bei fast gleichmäßiger Verteilung der Stärke und Häufigkeit der Seegänge innerhalb eines Jahres 37 000 m³ bzw. 31 000 m³ Sand transportiert worden, so daß die Sandbilanz recht ausgeglichen war. Als Beispiel der wichtigsten Ergebnisse seien hier die Mengen der schwebend verfrachteten Sandmenge in m³/Std. angegeben.

Seegangs- stärke	Strand- wall	1. Rinne	1. Riff	2. Rinne	2. Riff	Summe
2 bis 3	0,6	1,5	18	1,9	5,4	27,4
4 bis 5	4,8	3,3	28,3	13,9	126,0	176,3

Natürlich können die Verhältnisse am tidefreien Schwarzen Meer nicht ohne weiteres auf die Westküste von Sylt übertragen werden. Die Zahlen geben aber doch eine Vorstellung der Größenordnung der Sandbewegung auf den Riffen im Vergleich zu den Rinnen.

LAMPRECHT und KRAATZ haben unter meßtechnisch günstigen Bedingungen eine Reihe von Messungen unternommen, die Hinweise auf die Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeiten, Wellen, Wind und andere Parameter geben. Es sind und bleiben, örtlich und zeitlich gesehen, aber Einzelmessungen. Die Erfahrung hat gelehrt, daß Einzelmessungen nicht repräsentativ sein müssen. Da es sich also nicht um längere systematische Meßreihen handelt, ist eine verallgemeinernde Auswertung nicht zulässig. Erst das Ergebnis der im Teilgutachten A vorgeschlagenen systematischen hydraulischen Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen wird die Vorgänge besser beurteilen helfen.

3. Eigenschaften des vorgesehenen Spülgutes

3.1 Geologischer Aufbau des Sandentnahmegebietes

Für die Sandentnahme hat das Marschenbauamt Husum ein Wattgebiet östlich des Rantum-Beckens und südlich der Keitumer Marsch ausgewählt. Es liegt am Nordende eines Priel-systems und schwankt in der Höhe um NN. Für die Wahl war entscheidend, daß nach den geologischen Unterlagen – Oberflächenkartierung und Bohrungen – hier ein ausgedehntes Vorkommen meist mittel- bis grobkörniger Sande zu erwarten ist (DIETZ 1952).

Der Westerländer Geestkern mit seiner Schichtfolge aus Geschiebelehm über Kaolinsand taucht südlich von Westerland, Tinnum und Keitum unter die holozäne Marsch ein und ragt

nur noch an einzelnen Stellen aus dieser hervor. Etwa 1 bis 3 km südlich der Grenze der Marsch keilt der pleistozäne Geschiebelehm durch jungeszeitliche Abtragung aus, so daß hier das Holozän unmittelbar auf dem Kaolinsand liegt. Für eine Sandentnahme zur Vorspülung bietet dieses Gebiet von der Korngröße und Schichtfolge her günstige Bedingungen.

Die Bohrungen zur Vorbereitung des Deichbaues vor dem Rantum-Becken im Westen des vorgesehenen Sandentnahmegebietes ermöglichen eine erste Abgrenzung. Die Bohrung 111 der Erläuterung zur geologischen Karte von Sylt (DIETZ 1952, Bohrung 1937, bearbeitet von DITTMER), etwa 750 m südlich vom Nordende des Deiches, ergab über Kaolinsand (ab 3,10 m unter Ansatzpunkt) pleistozänen Grobsand (0,80 m bis 3,10 m unter Ansatzpunkt) und holozänen Feinsand (0 bis 0,80 m unter Ansatzpunkt). Die Bohrung 117 (500 m südwestlich von Bohrung 111, ebenfalls 1937 von DITTMER bearbeitet) wurde vor Erreichen des Kaolinsandes abgebrochen. Hier liegen über grauem pleistozänem Sand (ab 8,50 m unter Ansatzpunkt) 0,20 m Lehm mit Steinen (2,50 m bis 2,70 m unter Ansatzpunkt) und 2,50 m holozäner Sand. – Für das Gebiet im Nordosten der vorgesehenen Sandentnahme verzeichnet die geologische Karte von Sylt (DIETZ 1952) zahlreiche große Steine im Watt, also Auswaschungsreste von Geschiebelehm.

In dem so umgrenzten Bereich hat das Marschenbauamt Husum im Sommer 1967 insgesamt 5 Bohrungen abteufen lassen, deren Schichtenverzeichnisse, ergänzt durch zusammen 44 Siebanalysen zur Korngrößenbestimmung, vorliegen. Die Bohrprotokolle geben übereinstimmend unter 2 bis 4 m schluffigem Feinsand mit Kleilagen („schlickiger Wattsand“) mittel- bis grobkörnige, teilweise stark kiesige Sande an, die nach der Beschreibung zumindest überwiegend Kaolinsand sein dürften. Die Medianwerte des hangenden Feinsandes liegen zwischen 0,1 mm und 0,2 mm, die des liegenden vermutlichen Kaolinsandes fast immer zwischen 0,2 mm und 0,6 mm. Im vermutlichen Kaolinsand bleibt der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm meist unter 20 %, überschreitet jedoch bei Einzelproben aus den Bohrkernen auch 40 % und erreicht in einer der 44 Proben sogar 90 %. Hier dürfte eine der im Kaolinsand häufigen tonigen Lagen bearbeitet worden sein.

Aus den vorgenannten Unterlagen ist zu folgern, daß der Sand nach Entfernung des hangenden Feinsandes für die geplante Vorspülung insgesamt günstige Eigenschaften besitzt. Zeitweise Behinderungen der Arbeiten durch Tonlagen im vermutlichen Kaolinsand sind jedoch möglich.

Das Bohrnetz ist im Winter 1970/71 seitens des Marschenbauamtes Husum durch 3 weitere Bohrungen ergänzt worden. Bisher liegen die Schichtenverzeichnisse von 2 Bohrungen zur Stellungnahme vor, die dritte Bohrung ist zur Zeit der Abfassung des Gutachtens noch nicht beendet. Korngrößenbestimmungen konnten noch nicht angefertigt werden. Dagegen war es möglich, die bis zum 14. 1. 1971 vorliegenden Bohrkern im noch ungeöffneten Zustand anzusprechen.

Der grundsätzliche Aufbau der Schichtfolgen stimmt mit den Angaben in den Protokollen über die Bohrungen 1967 überein. Mittel- bis grobkörnige und kiesige Sande werden von 2 m bis 4 m schluffigem Feinsand („schlickiger Wattsand“) überlagert. Darüber hinaus fällt innerhalb des Kaolinsandes auf, daß die Bohrarbeiten mehrfach durch Steinhindernisse stark beeinträchtigt worden sind.

Zusätzlich werfen die Bohrungen jedoch vorher nicht erwartete Fragen auf. Die Bohrung 8, die von allen Bohrungen am weitesten östlich und am Ostrand des geplanten Sandentnahmegebietes liegt, soll nach dem Bohrprotokoll von 3,20 m bis 5,20 m unter Ansatzpunkt sehr steinigen Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm angetroffen haben. Nach dem geologischen Aufbau des Gesamtgebietes wäre dies möglich, wenn auch das Vorspringen des Geschiebelehmes an dieser Stelle zunächst überrascht. Da ein solches Vorkommen für die Sandentnahme ein großes Hindernis bedeuten würde, muß dringend empfohlen werden, die Grenze dieser Schicht inner-

halb des vorgesehenen Sandentnahmegebietes durch weitere Bohrungen bzw. Sondierungen zu klären.

Darüber hinaus ist zu überprüfen, ob es sich tatsächlich um Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm handelt. Das Protokoll der gleichen Bohrung gibt in etwa 32 m Tiefe unter dem Ansatzpunkt eine weitere Mergelbank innerhalb des Kaolinsandes an. Eine solche Schichtfolge ist jedoch geologisch nicht möglich. Deshalb dürfte eine Verwechslung mit einer stark tonigen Lage in Kaolinsand vorliegen. Die gleiche Möglichkeit kann für das Mergelvorkommen 3,20 m bis 5,20 m unter dem Ansatzpunkt nicht von vornherein ausgeschlossen werden.

3.2 Folgerungen für Entnahme und Vorspülung

Aus dem vorherigen Abschnitt ergibt sich, daß das Material im in Aussicht genommenen Sandentnahmegebiet mit wenigen Einschränkungen für die Vorspülung vor Westerland gut geeignet ist. Folgende Vorbehalte sind jedoch zu beachten:

- a) Der schlickige Wattsand muß vor Beginn der Vorspülarbeiten entfernt werden. Da ein Wiedereintritt während der Sandentnahme unerwünscht ist, muß das feine Material über die nächste Wattscheide hinweg gefördert werden.
- b) Mit der Möglichkeit von Störungen des Betriebes bei der Sandentnahme durch Tonlagen im Kaolinsand muß gerechnet werden. Da es sich stets um räumlich begrenzte Vorkommen handelt, können Verbreitung und Mächtigkeit auch bei einer wesentlich höheren Zahl von Bohrungen nicht sicher vorausgesagt werden.
- c) Wenn sich das Vorkommen von Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm zumindest im östlichen Teil des Sandentnahmegebietes bestätigen sollte, müßte seine genaue Umgrenzung den geologischen Gegebenheiten angepaßt werden. Hierzu sind weitere flache Bohrungen bis zum Erreichen des Kaolinsandes notwendig.

Nach den geologischen Aufschlüssen ist dringend erforderlich, daß bei der Ausschreibung nicht nur sämtliche Bohrergergebnisse verfügbar gemacht werden, sondern daß auch die Bieter die Bohrproben einsehen können.

Mit einer Versalzung des Grundwassers der Insel Sylt durch die Sandentnahme ist nicht zu rechnen. Der Kaolinsand ist zwar der wichtigste Grundwasserspeicher der Insel, doch ist zu erwarten, daß der Porenraum im Kaolinsand unter dem Watt ohnehin mit Salzwasser gefüllt ist. Zudem kann durch die Sandentnahme keine wesentliche Änderung der hydraulischen Druckverhältnisse eintreten.

Andere Fragen betreffen die Sauberkeit des Wassers, das mit dem Spülgut aus dem Sandentnahmegebiet an den Strand vor Westerland gepumpt wird. Hier sind organische wie anorganische Verunreinigungen möglich. Der schlickige Wattsand enthält üblicherweise einen relativ hohen Anteil zersetzter organischer Substanzen, die wohl eine vorübergehende optische Verschmutzung des Strandsandes zu bewirken vermögen, im übrigen aber ungefährlich sind. Die Erfahrungen in Norderney zeigten, daß binnen weniger Monate – unabhängig von der Wetterlage – die Verschmutzung ausgewaschen war (KRAMER 1958/59).

Kritischer sind dagegen die Auswirkungen der Kläranlage am Rantum-Becken, durch die bakterielle Verunreinigungen eintreten könnten. Auch bei Zusammentreffen ungünstiger Umstände ist es aber wenig wahrscheinlich, daß Wasser und Strand vor Westerland gesundheitsgefährdend beeinträchtigt werden. Zur Kontrolle ist es ratsam, daß im Sandentnahmegebiet sowie am Strand und Vorstrand vor Westerland Untersuchungen auf Bakterien durchgeführt werden. Weiter wird empfohlen, mit diesen Untersuchungen schon 1971 mit mehrfacher Wiederholung in den verschiedenen Jahreszeiten zu beginnen, damit Vergleiche mit dem ungestörten Naturzustand möglich sind.

Denkbar ist, daß Schlick und Ton in Spülfeldnähe Ablagerungen bilden, die zumindest vorübergehend so weich sind, daß ein Betreten gefährlich wäre. Das biologische Gleichgewicht im Seewasser in Strandnähe könnte bei ruhigem Wetter durch die Trübung zeitweise gestört werden. Während der Vorspülung ist daher eine ständige Beobachtung erforderlich, um gegebenenfalls rechtzeitig warnen oder eingreifen zu können.

4. Verhalten bisheriger Strandvorspülungen

4.1 Allgemeines

Vor etwas mehr als hundert Jahren wurde an der deutschen Nordseeküste begonnen, Strände aus Gründen des Küstenschutzes oder auch mit dem Ziel der Erhaltung oder Schaffung von Badestränden durch Bauwerke zu sichern. Die spätere Erfahrung lehrte jedoch, daß die errichteten Bauwerke nur in verhältnismäßig wenigen Fällen die in sie gesetzten Erwartungen voll erfüllten. Eine sandfangende Wirkung konnte nur unter besonderen Gegebenheiten erreicht werden. Vielfach wurde der Strandabbruch lediglich verzögert. Diese Wirkung konnte nur dort befriedigen, wo Perioden der Erosion mit Perioden der Auflandung abwechseln und sich insgesamt gesehen ein Ausgleich ergibt. In den Fällen, in denen der Abbruch lediglich verzögert werden konnte oder gar unbeeinflusst blieb, mußte nach neuen Methoden zur Stranderhaltung gesucht werden.

Zunächst wurden Fortschritte in einer Änderung der Bauweisen, Bauformen, Baumethoden und der Verwendung anderer Baustoffe gesucht. Auch diese Bemühungen brachten vom Grundsätzlichen her keine wesentlichen Erfolge. Erst als es gelang, sich von der Vorstellung zu lösen, daß Massivbauwerke die einzige Möglichkeit bieten, in das Naturgeschehen am Strand einzugreifen, konnte der Gedanke Fuß fassen, die vom Strand fortgespülten Sedimente durch künstliche Zufuhr entsprechenden Materials zu ersetzen und dadurch einen Strand zu erhalten oder gar zu verbessern.

Schon im Jahre 1904 vertrat der Geheime Oberbaurat GERMELMANN im Preußischen Ministerium der öffentlichen Arbeiten in gutachtlichen Stellungnahmen die Auffassung, daß elastisch zu konstruieren sei, wenn es sich nicht um besondere Bauten (z. B. Hafenanlagen) handele und daß man dem Meere Material zur teilweisen Zerstörung anbieten müsse, um die zu schützende Küste selbst vor Schäden zu bewahren (REINEKE 1966). Solche Werke, wie Sandanhäufungen zwischen den Buhnen, Vordünen und Dünen, werden durch Sturmfluten zwar mehr oder weniger fortgespült, sie lassen sich im allgemeinen mit vertretbarem Aufwand wieder erneuern.

Aus dem Studium der in- und ausländischen Literatur ergibt sich, daß derartige Materialersatzmethoden in den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts erstmals gezielt zur Ausführung kamen. Die Anwendung bestand zunächst darin, daß im Bereich von Stränden, die im Abtrag lagen, Baggergut verklappt wurde. Der herrschenden Strömung und Brandung wurde es überlassen, das verklappte Material am Strand zu verteilen. Die erwünschte Vertriftung des Baggergutes in den im Abbruch liegenden Strandbereich trat im allgemeinen nur zu einem geringen Teil oder auch gar nicht ein. Diese Beobachtung führte dazu, das Verklappen vor dem Strand durch ein Verspülen auf den Strand zu ersetzen.

Das naheliegende flächenhafte Aufspülen des Strandes bereitete Schwierigkeiten, weil wegen des Einflusses wechselnder Wasserstände sowie der Einwirkung von Brandung und Strömung ein Spülfeld im herkömmlichen Sinne nicht eingerichtet werden konnte. Die im Laufe der Zeit gesammelten Erfahrungen lehrten, daß eine Aufspülung nicht flächenhaft sein muß. Das Aufbringen des Spülgutes kann sich auf den oberen Strandbereich beschränken. Die flächenhafte Verteilung am Strand übernehmen Brandung und Strömung.

Die Aufspültechnik hat sich inzwischen weiter entwickelt. So sind in besonderen Fällen örtlich begrenzte Sandlager aufgespült oder auch ununterbrochen arbeitende Aufspülanlagen errichtet worden.

4.2 Beispiele von Strandvorspülungen

4.21 Verklappen von Baggergut im Vorstrandbereich

Der Strand von Atlantic City – östlich von Philadelphia am Atlantischen Ozean – erhielt sich früher in natürlicher Weise durch die mit der Küstentrift verbundene Sandwanderung (Beach Erosion Control, Doc. 538, 1950). Nach und nach wurde die Sandbilanz aus bisher nicht bekannten Gründen jedoch negativ, so daß der Strand abbrach – entweder hatte sich die Sandzufuhr verringert oder der Sandabtrag infolge Verstärkung der erodierenden Kräfte vermehrt oder aber beide Faktoren hatten zu der Entwicklung beigetragen. Versucht wurde, dieser Entwicklung durch Verklappen von rd. 2,7 Mio. m³ Baggergut auf dem Vorstrand in 4,5 m bis 6,0 m Wassertiefe zu begegnen.

Die erhoffte Sandvertriftung aus der Sandablagerung in Richtung auf den Strand trat nicht ein. Die aus dieser Erfahrung gezogenen Konsequenzen sind unter 4.22 a) beschrieben.

4.22 Flächenhafte Strandvorspülungen

a) Strandvorspülung in Atlantic City

Nach dem vergeblichen Versuch, die Stranderosion vor Atlantic City durch Verklappen von Baggergut im Vorstrandbereich zu beheben (s. 4.21), wurden die Möglichkeiten zur Strandwiederherstellung untersucht und vorgeschlagen,

- a) einen Leitdamm zur Ablenkung des Küstenstromes vom Badestrand sowie
- b) 5 Holz- und 1 Steinbuhne zur Stabilisierung des Strandes zu bauen und
- c) zur Aufhöhung und Erhaltung des Strandes vorzuspülen.

Ausgeführt wurde zunächst der etwa 300 m lange Leitdamm, um die Küstentrift vom Badestrand abzudrängen. Dann wurden in den südlich des Leitdammes gelegenen Strandbereich auf etwa 1800 m Länge 530 000 m³ Sand aufgespült (Beach Erosion Control, Doc. 538, 1950).

Der Bau von Buhnen wurde zunächst unterlassen, um beobachten zu können, wie sich die Vorspülung auswirken und halten würde und weil die vorliegenden Erfahrungen aus anderen Strandaufspülungen zeigten, daß Buhnen zur Erhaltung von Aufspülungen oft gar nicht erforderlich waren.

Unmittelbar nach der Aufspülung setzte eine Erosion ein, die wesentlich stärker war, als sie es sonst nach Vorspülungen bei der Einspielung des neuen Strandprofils zu sein pflegte. Daraufhin wurde unverzüglich der Bau der im oben erwähnten Gutachten empfohlenen Buhnen begonnen. Die dann errichteten 5 Holzbuhnen wirkten umgehend in der erwarteten Weise, indem sie die weitere Erosion verhinderten und eine Neubildung des Strandes förderten. – Es muß darauf hingewiesen werden, daß hier eine stärkere Küstenströmung herrscht als vor Sylt.

b) Strandvorspülung in West Haven

Durch den Bau von Küstenschutzwerken wurde die natürliche Sandzufuhr an den Strand von West Haven – rd. 50 km östlich von New York – nach und nach soweit verringert, daß

der Badestrand abzunehmen begann (Beach Erosion Control, Doc. 203, 1952). Der Strand hatte im trockenen und nassen Bereich verhältnismäßig flache Neigungen.

Es ist nur eine geringe Küstentrift vorhanden. Da dieser Küstenstreifen im Schutze der Insel Long Island liegt, betragen die maßgebenden Windstreichlängen 30–50 km. Dadurch treten nur kurzperiodische, niedrige Wellen auf, die aber in Verbindung mit der Küstentrift zu der fortschreitenden Erosion und Verschlechterung des Strandes führten.

Der Strand wurde im ganzen durch rd. 750 000 m³ Baggergut aus der Fahrrinne zum Hafen von New Haven aufgespült. Die Vorspülung mußte mit dem Bau von Buhnen gekoppelt werden. Buhnen allein hätten wegen der vorhandenen geringen Sandtrift keine ausreichende Wirkung gehabt. Außerdem hätten sie die ohnehin geringe Sandzufuhr in die leeseitig gelegenen Bereiche weiter vermindert und dort eine Erosion hervorgerufen.

Im ersten halben Jahr nach der Vorspülung hatte sich die Hochwasserlinie nicht bemerkenswert verändert. Der nasse Strand war um 25 % schmaler geworden, was darauf hinweist, daß sich die ehemalige Strandneigung wieder einstellte.

Durch die Vorspülung wurde in Verbindung mit dem Bau von Buhnen ein wirksamer Küstenschutz erreicht.

c) Strandvorspülung in Virginia Beach

Die Stadt Virginia Beach liegt an der Ostküste der Vereinigten Staaten an der Mündung der Chesapeake Bay. Ursprünglich bildeten Sanddünen von beträchtlicher Höhe die Küste von Virginia Beach. Die Erosion dieser Dünen lieferte das Material zur Erhaltung des Strandes. Durch die Entwicklung des Ortes zum Bad begann die Errichtung von Gebäuden auf den eingeebneten Randdünen und der Bau einer Betonmauer zum Schutz der Gebäude gegen die See. Dadurch wurde die natürliche Versorgung des Strandes und des Vorstrandes mit Sand stark vermindert und sogar mehr oder weniger unterbunden. Gut 20 Jahre nach Errichtung des Strandschutzwerkes lag die Hochwasserlinie fast überall am Fuße der Schutzmauer (Beach Erosion Control, Doc. 186, 1952).

Vorherrschend sind Nordost- bis Ostwinde mit der entsprechenden Richtung der Brandung. Die Wellenverhältnisse werden jedoch so stark durch die Unterwassermorphologie und die Tidenströmungen der Stromrinne der Chesapeake Bay beeinflusst, daß die maßgebenden Kräfte nicht eindeutig bestimmt werden können. Die Küstenströmungen erfahren jahreszeitlich bedingte Umkehrungen; entsprechend ändert sich die Sandtransportrichtung.

Die Hochwasserlinie ist in dem etwa 3 km langen Erosionsgebiet ständig weiter zurückgewichen. In einem Beobachtungszeitraum von 46 Jahren gingen im Jahresmittel 25 000 m³ Sand verloren.

Zur Wiederherstellung eines ausreichenden Küstenschutzes und Badestrandes wurden im Sommer 1953 rd. 1 Mio. m³ Sand aus der Stromrinne zum Rudee-See und aus dem See selbst an den Strand gespült.

Die Vorspülung schützte wirksam Bauwerke und Gebäude. Nach dem Schrifttum entsprechen die jährlichen Sandverluste etwa den erwarteten.

In der Planung zur Sanierung des Strandes war auch der Bau von Buhnen enthalten. Es sollte aber zunächst abgewartet werden, ob die eingepflanzten Buhnen tatsächlich zu bauen seien, oder ob ohne sie eine – wirtschaftlich gesehen – ausreichende Lebensdauer der Aufspülung erreicht werden kann. Auf jeden Fall ist jedoch in gewissen Zeitabständen abgetragener Sand durch Nachspülungen zu ersetzen.

d) Strandvorspülungen in Harrison County

Harrison County liegt an der Golfküste östlich New Orleans. Hier ist ein rd. 40 km langer Küstenabschnitt mit nur geringer nach Westen gerichteter Küstenströmung der Brandung des Golfes von Mexiko ausgesetzt. Der dadurch bedingte Strandabbruch sollte durch den Bau eines Stahlbetonschutzwerkes zum Stehen gebracht werden (Beach Erosion Control, Doc. 682, 1948). Die Strandabnahme schritt jedoch fort und gefährdete die Gründung des Bauwerkes.

Nach einer Instandsetzung des Bauwerkes wurde vor ihm durch Aufspülen von 4,5 Mio. m³ Sand, der 450 m vor der Uferlinie gebaggert wurde, ein 90 m breiter Strand von ungefähr 40 km Länge geschaffen. Auf den ersten 50 m vor dem Uferlängswerk hatte der vorgespülte Strand eine Höhe von 1,50 m über der mittleren Meereshöhe. Darunter erhielt er eine Neigung 1:100 bis zu der von der Natur ausgeglichenen Böschung von 1:10.

Um einen ausreichenden Küstenschutz zu erhalten, sind die ständige Unterhaltung des Uferschutzwerkes und in gewissen Zeitabständen Sandnachspülungen vorgesehen. Die jährlichen Sandverluste wurden auf etwa 25 000 m³ geschätzt.

Die Strandvorspülung konnte in diesem Bereich besonders wirtschaftlich ausgeführt werden, weil 20 km vor der Küste Inseln liegen, die eine abschirmende Wirkung ausüben. Dadurch bedingt, hat auch die nach Westen gerichtete Küstenströmung eine geringe Geschwindigkeit, und es liegen günstige Voraussetzungen für den Einsatz einer schwimmenden Spülanlage vor, wodurch die Baustelleneinrichtung billig und die Spüleistung groß ist.

Nach dem bekanntgewordenen Schrifttum hielt sich die Vorspülung gut und bot dem Uferlängswerk einen ausreichenden Schutz.

e) Strandvorspülung in Surfside Beach und Sunset Beach

Surfside Beach und Sunset Beach liegen an der Atlantikküste von New Jersey. Der Dünenstrand hatte sich durch einen starken, von Westen nach Osten verlaufenden Küstenstrom, der in großen Mengen Sand aus der Mündung des Los Angeles River und San Gabriel River verfrachtet, gebildet (Beach Erosion Control, Doc. 349, 1953).

Im Laufe der Zeit traten Strandabbrüche auf. Sie waren durch eine verminderte Sandzufuhr bedingt, deren Ursache in einer geringeren Geschiebeführung der Flüsse und in dem Bau von Wellenbrechern gesehen wurde.

Der Bau einer Reihe kurzer Buhnen im Jahre 1933 vermochte die Erosion nicht aufzuhalten. Daraufhin wurden im Jahre 1942 eine Reihe längerer Buhnen gebaut. Sie sollten das in den Jahren 1942 bis 1945 künstlich auf den Strand geförderte Material festlegen. Die Aufspülmenge betrug insgesamt 344 000 m³.

Teilweise erfüllten die Buhnen ihren Zweck, das aufgespülte Material zu halten. Doch nach wenigen Jahren war die Erosion soweit fortgeschritten, daß 1947 erneut rd. 930 000 m³ aufgespült werden mußten. Die in der Folgezeit wiederum auftretende starke Erosion führte dazu, daß schon 1951 der gleiche Zustand erreicht war, wie er vor der Aufspülung herrschte.

Die Erfahrung aus diesen beiden Aufspülungen führte zu dem Plan, zur Erhaltung des Strandes alle 5 Jahre regelmäßig 1 Mio. m³ Sand aufzuspülen. Es war ermittelt worden, daß diese Aufspülmenge etwa $6\frac{2}{3}$ Jahre vorhalten würde. Um jedoch einen gewissen Sandvorrat zu erhalten, wurde ein Aufspülintervall von 5 Jahren gewählt.

Soweit bekanntgeworden, hat sich diese Art der Stranderhaltung bewährt.

f) Strandvorspülung im Küstenabschnitt El Segundo-Ocean Park

In diesem südkalifornischen Küstenabschnitt ist ein nach Süden gerichteter Küstenstrom vorhanden, dessen Sandführung etwa 120 000 m³ (Beach Erosion Control, Doc. 277, 1952) jährlich beträgt. Auf den im Abbruch liegenden Strand wurden auf rd. 10 km Länge rd. 10 Mio. m³ Aushubboden aus einem weiten Dünengelände aufgespült. Dadurch wurde der Strand von 180 m auf 240 m verbreitert. Die Sandablagerung sollte gleichzeitig die Küstenriff so weit mit Sand anreichern, daß der leeseitig gelegene Küstenstreifen indirekt geschützt wird (Civil Engineering, 1948).

Die Vorspülung hat die in sie gesetzten Erwartungen erfüllt und sich gut gehalten. Die Sandverluste betragen für die aufgespülte Strandstrecke rd. 225 000 m³/Jahr; sie waren auf 160 000 m³/Jahr geschätzt worden. Die leeseitig gelegenen Bereiche wurden stabil oder zeigten sogar Sandanlagerung.

g) Strandvorspülung auf Norderney 1951/52

Die West- und Nordwestküste der Insel Norderney liegen im Wirkungsbereich der Brandung, deren Hauptangriffsrichtung aus Nordwesten kommt (KRAMER 1957 und 1958/59). Zusätzlich wirkt am Westkopf die starke Tideströmung des über 20 m tiefen Norderneyer Seegats. Brandung und Strömung bewirkten einen so starken Abbruch im Westen und Nordwesten der Insel, daß man 1857 mit dem Bau von Deckwerken und Bühnen begann, um die Insel zu schützen. Durch die im Laufe der Zeit immer weiter ausgedehnten und verstärkten Schutzwerke – 32 Bühnen und rd. 6 km Deckwerke – ist der Bestand des Inselsockels gesichert. Die erodierenden Kräfte der Brandung und Strömung trugen jedoch den Strand in den Bühnenfeldern allmählich weiter ab. Dadurch wurden die Schutzwerke nach und nach so weit freigelegt, daß ihre Standsicherheit nicht mehr ausreichend gewährleistet war.

Es wurden eine Reihe von Vorschlägen zur Verbesserung des Norderneyer Weststrandes gemacht. Für die Ausführung empfohlen wurde von der für die Aufstellung eines Gutachtens gebildeten „Arbeitsgruppe Norderney“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee eine Strandaufspülung. Sie wurde in den Jahren 1951/52 ausgeführt, indem rd. 1,8 Mio. m³ Sand von einer Plate auf der Rückseite der Insel in die aufzufüllenden Bühnenfelder gespült wurden. In Kauf genommen wurde, daß die Körnung des aus Wattsanden mit Tonanteilen bestehenden Spülgutes feiner als das am Strand vorhandene war, weil die Gewinnung seegangsgeschützt möglich und damit billiger war als die Gewinnung gröberer Materials aus seeganggefährdeten Gebieten.

Der durch die Vorspülung gewonnene 100 m breite hochwasserfreie Strand ging – wie erwartet – allmählich wieder verloren, und zwar zunächst schnell und dann langsamer werdend.

Die Spülverluste betragen insgesamt 31 %. Nachdem infolge des zunächst überhöhten Strandes anfangs stärkere Sandverluste aufgetreten waren, erreichten sie in den Jahren 1953 bis 1957 im Jahresdurchschnitt 53 000 m³; vorausgeschätzt worden waren 36 000 m³/Jahr.

Besonders zu bemerken ist, daß die tonigen Anteile des Spülbodens nach dem Aufspülen auf den Strand sehr bald durch Strömung und Brandung ausgewaschen und fortgetragen wurden, so daß sie den Strand nicht nennenswert verschmutzten. Es konnte auch keine Beeinträchtigung von Flora und Fauna beobachtet werden.

Insgesamt gesehen war die Vorspülung erfolgreich und stellte einen wirksamen Schutz der Bauwerke dar. Sie muß von Zeit zu Zeit erneuert oder aber in eine kontinuierliche Vorspülung übergeführt werden, wobei die jährlichen Spülmengen auf rd. 100 000 m³ geschätzt werden; sie wären also relativ gering.

h) Strandvorspülung auf Norderney 1967

Nachdem die unter g) beschriebene Strandvorspülung wieder so weit abgebaut worden war, daß der Bestand der Strandschutzwerke in den am stärksten im Angriff liegenden Bühnenfeldern gefährdet war, wurde 1967 eine zweite Strandvorspülung vorgenommen (LUCK 1970). Dabei wurden rd. 240 000 m³ Sand aufgebracht. Während sich die erste Aufspülung auf 29 Bühnenfelder erstreckte, beschränkte sich die zweite auf die 13 am stärksten ausgeräumten Felder, weil sich nach der ersten Vorspülung gezeigt hatte, daß das Material durch die Angriffskräfte der See von selbst nach Osten oder Südwesten in die anschließenden Strandbereiche vertrifft wird und diese auffüllt. Die im Vergleich zur ersten Aufspülung geringe Menge an Aufspülboden ergab sich aus der Beobachtung, daß der Strandabtrag nach der ersten Aufspülung besonders stark war, weil der Strand sehr hoch – rd 1,5 m über MThw – aufgespült worden und das Kräftespiel am Strand zunächst stark gestört war. Mit zunehmender Einstellung eines neuen, wenn auch sich allmählich durch Strandabtrag ändernden Gleichgewichtszustandes wurden die Sandverluste nach und nach geringer.

Das Spülgut wurde auf Grund eines besonders preiswerten Angebotes aus dem Vorstrand entnommen. Wegen der Nähe der Entnahmestelle zum Strand und der geringen Sandbewegung in diesem Bereich bestanden dagegen erhebliche Bedenken. Die Sandkörnung war etwas gröber als die am Strand und daher für die Vorspülung gut geeignet.

Die Beobachtung des Strandes nach der Aufspülung zeigte aber, daß sich die Lagebeständigkeit der etwas gröberen Körnung der zweiten Aufspülung gegenüber der feineren Körnung der ersten nicht meßbar unterschied. Die Sandverluste betrug nach 3 Jahren nur rd. 20 %. Allerdings ging der Sand vor allem am Deckwerksfuß und an den Bühnenflanken verloren, so daß das Ziel, die Gründung der Bauwerke durch die Aufspülung zu sichern, nicht befriedigend erreicht wurde.

Eine Sandentnahme aus dem Vorstrand, der kaum Sandzufuhr aufweist, ist zu vermeiden. Zu empfehlen ist eine kontinuierliche Sandvorspülung in dem am schwersten im Abbruch liegenden Strandbereich, von wo aus das Spülgut in die leeseitig gelegenen Bühnenfelder vertrifft wird und diese aufhört.

i) Strandvorspülung auf Baltrum

Starke Erosionserscheinungen am Ende der vorhandenen Strandschutzmauer zwangen 1965/66 zu einer Verlängerung des Deckwerks um rd. 170 m. Ausgeführt wurde ein 1:4 geneigtes Rauheckwerk, dessen Abschluß die Form eines Kegels erhielt.

Auch am Ende des neuen Deckwerks trat wiederum eine Lee-Erosion auf. Sie führte zu einem so starken Abbruch der Randdüne, daß der Ort gefährdet war und das Deckwerk um weitere 200 m verlängert werden mußte. Bis zum Baubeginn war die im Abbruch liegende Randdüne gegen weitere Sandverluste zu schützen. Aus einer Baggerung im wattseitig gelegenen Hafen von Baltrum bot sich eine Strandvorspülung mit dem dort anfallenden Baggergut an. Das gewonnene Baggergut war nur wenig feiner als das Material am Strand und damit für die Aufspülung von 21 000 m³ hinreichend geeignet.

Zur Erhöhung der Schutzwirkung konnte durch Planierraupen aus der Aufspülung ein seeseitig 1:5 geneigter Randdünenhang aufgeschoben werden. Im übrigen erhielt der Strand eine Neigung 1:50.

Die Aufspülung verhinderte vom Frühjahr bis zum Herbst 1968 weitere Abbrüche.

j) Vorspülung am Oststrand der Stadt Wyk auf Föhr

Der rd. 1,5 km lange Oststrand von Wyk litt seit Jahren unter zunehmendem Sandmangel. Der Sandabtrag wurde im wesentlichen durch die Tideströmungen der unmittelbar an Wyk vorbeiströmenden Norderaue vor allem bei höheren Wasserständen hervorgerufen. Seine Öffnung nach Osten bringt bei Ostwinden leichten Brandungsangriff, der ebenso wie die dünungsbedingten Wellen eine Sandverlagerung in Richtung auf die Stromrinne der Norderaue bringt. Durch den Strandabtrag waren Strandmauer und Bühnen erhöhten Beanspruchungen ausgesetzt. Um die Mißstände zu beseitigen, wurde der Strand 1963 aufgespült.

Der Spülsand entstammte dem Vorfeld des Südstrandes, etwa 300 bis 500 m von der Strandmauer entfernt. Das Baggergut wurde vom Eimerkettenbagger mit Schuten zum Spüler gebracht, der vor dem aufzuspülenden Oststrand lag und das Baggergut in die Bühnenfelder spülte. Die Aufspülmenge betrug innerhalb der Sollprofile insgesamt rd. 180 000 m³. Abgerechnet wurde nach Profilaufmaßen am Strand.

An der Entnahmestelle stand vorwiegend feinkörniges Material an, dessen Hauptkornanteil zu 70 % zwischen 0,12 mm und 0,25 mm lag. Durch die feine Körnung bedingt, stellte sich eine so flache Spülfeldböschung ein, daß der Böschungsfuß außerhalb des geforderten Profils vor den Bühnenköpfen lag und zum erheblichen Teil durch die Tideströmung verloren ging. Zur Verringerung der großen Spülverluste wurde zunächst die ursprünglich geplante Aufspülhöhe von NN + 2,80 m auf NN + 1,60 m herabgesetzt. Gleichzeitig wurde versucht, durch Aufschlußbohrungen gröberes Material zu finden, womit die feinkörnige Aufspülung bedeckt werden sollte, um einen höheren Strand mit größerer Lagestabilität zu erreichen.

Während der Spülarbeiten konnte vor Wyk beobachtet werden, daß die Spülgutverluste bei ablaufendem Wasser (Ebbe) wesentlich größer als bei auflaufendem Wasser (Flut) waren. Deshalb wurde, nachdem etwa 80 000 m³ Sand aufgebracht worden waren, der Tag- und Nachtbetrieb auf Tidebetrieb mit Spülung nur während der Flutzeit umgestellt.

Nachdem gröberes Material mit 60 % Kornanteil zwischen 0,25 mm und 1,0 mm aufgefunden worden war, wurde das Verspülen des feinen Sandes abgebrochen. Inzwischen waren rd. 152 000 m³ dieser Bodenart aufgespült worden. Sie wurde abschließend mit rd. 28 000 m³ der gröberen Körnung bedeckt. Der gröbere Sand und die Beschränkung des Spülbetriebes auf die Flutzeit führte zu einer wesentlichen Verringerung der Spülverluste. Die Unterwasserböschungen stellten sich von 1 : 1 bis 1 : 2 ein.

Die Vorspülung hat sich bisher gut gehalten und bietet den Strandschutzwerken den erwarteten Schutz.

k) Strandvorspülungen am Südstrand von Borkum
in den Jahren 1969 und 1970

Seit einigen Jahren werden am Südstrand von Borkum Abbrüche in einem bisher nicht gekannten Ausmaße beobachtet. Der gefährdete Bereich liegt dort, wo der mit Deckwerken und Bühnen befestigte Strand an den Bühnen 29 und 30 endet. Der Strand ist hier den Tideströmungen der Ems und dem Wellenangriff aus der vorherrschenden Windrichtung SW ausgesetzt.

Nachdem die Randdüne durch Abbrüche soviel an Substanz verloren hatte, daß die hinter ihr liegenden Inseln gefährdet waren, wurde 1966 ein uferparalleler Sandwall auf dem trockenen Strand gebaut. Nach wenigen Jahren lag auch er durch die fortschreitende Erosion des Strandes im Abbruch. Um den sofortigen Inselnschutz sicherzustellen, wurde 1969 der Sanddamm und die östlich anschließenden Randdünen auf einer Länge von ca. 350 m durch eine Vorspülung geschützt.

Das Spülgut wurde außerhalb der Bühnenstreichlinie entnommen und durch eine 400 m lange Rohrleitung von 300 mm Durchmesser vor den Sanddamm bzw. Dünenfuß gespült. Insgesamt sind auf diese Weise rd. 30 000 m³ aufgebracht worden, dessen Körnung der des Strandmaterials entsprach. Die aufgespülte Strandbreite betrug rd. 60 m bei einer Strandneigung von 1:25.

Als vorübergehende Sicherungsmaßnahme bewährte sich die Vorspülung. Sie unterlag jedoch von Anfang an den fortbestehenden Abbruchserscheinungen und mußte im Jahre 1970 erneuert werden. Das vorhergehende Nivellement ergab, daß noch rd. 30 % der Aufspülung von 1969 verblieben waren. Wegen mangelnder Haushaltsmittel konnten 1970 nur rd. 19 000 m³ auf nur 300 m Länge aufgespült werden. Entnommen wurde an der gleichen Stelle wie im Vorjahr, weil dort keine nachteiligen Folgen der ersten Entnahme festgestellt worden waren.

Die Vorspülung verhinderte Schäden am Sanddammfuß während Sturmfluten im Oktober und November, die östlich anschließenden Randdünen dagegen brachen weiter ab. Diese Erfahrungen lehren, daß nur bei ausreichender Aufspülmenge ein Erfolg erwartet werden kann.

4.23 Vorspülung örtlich begrenzter Sandlager

a) Strandvorspülung in Palm Beach südlich vom Lake Worth Inlet

Der Bau von zwei Rinnen vom Lake Worth zum Atlantik verursachte einen starken Rückgang des Strandes. Die nördliche Rinne wurde mit rd. 600 m langen Leitdämmen gesichert und sperrt damit die Sandzufuhr, die 110 000 m³ bis 180 000 m³ jährlich betrug (Beach Erosion Control, Doc. 722, 1947).

Die dann zum Schutze des Strandes gebauten Bühnen blieben dort wirkungslos, wo die Leitdämme die Sandzufuhr unterbrachen. Nach Aufspülung eines Sandlagers von rd. 200 000 m³ bewirkte die Küstenströmung eine Aufhöhung der Bühnenfelder 400 m nördlich und 2500 m südlich der Einspülstelle. Dieser erfolgreiche Vorspülversuch führte zu einer großangelegten Aufspülung von fünf Sandlagern mit insgesamt rd. 1,5 Mio. m³, die eine etwa 21 km lange Strandstrecke schützten.

b) Geplante Aufspülung eines Sandlagers im Küstenabschnitt El Segunda – Ocean Park, Kalifornien

Nach den Erfahrungen aus der unter 4.22 f) beschriebenen Strandvorspülung entstand der Plan, etwa alle 5 Jahre 600 000 m³ Sand in Form eines einzigen Lagers aufzuspülen und damit der Küstenströmung das fehlende Sandmaterial für die Erhaltung der leeseitig gelegenen Strandbereiche zuzuführen. Erwogen wurde aber auch, jeweils Sandlager luvseitig jeder im Abbruch liegenden Strandstrecke zu schaffen (Beach Erosion Control, Doc. 277, 1952). Über die Ausführung dieses Planes konnten keine Angaben gefunden werden.

4.24 Kontinuierliche Strandvorspülungen

a) Vorspülung in Durban

Intensive Baggerungen in der Hafeneinfahrt sowie der Bau von Wellenbrechern bewirkten, daß die Sandtrift längs der Ostküste von Südafrika den Strand von Durban nicht mehr

erreichte. Die mangelnde Versorgung des Strandes mit Sand führte zu starkem Abbruch des Strandes (HALL u. a. 1955).

Um weitere Strandabbrüche zu vermeiden, wurde der aus der Fahrrinne gebaggerte Boden im Strandbereich aufgespült und so der Strand zurückgewonnen. Nur im Bereich einer Uferschutzmauer war der Erfolg von kurzer Dauer. Eine feste Sandgewinnungsanlage entstand 12 Jahre später auf der gegenüberliegenden Seite der Fahrrinne. Der Sand wurde durch eine gummiausgekleidete Stahlrohrleitung, die am Boden der Fahrrinne verlegt war, zum Strandbereich vor der Uferschutzmauer gespült. Damit verringerten sich gleichzeitig die Sandeintreibungen in die Fahrrinne und somit die Baggerung. Die jährliche Leistung der Anlage betrug rd. 270 000 m³; um die gleiche Sandmenge haben sich die Baggerungen in der Hafeneinfahrt vermindert.

b) Vorspülung am South Lake Worth Inlet

Der Lake Worth wurde durch zwei Durchstiche mit dem Atlantik verbunden, um einen Wasseraustausch herzustellen. Der südliche Durchbruch „South Lake Worth Inlet“ wurde durch etwa 100 m lange Leitdämme eingefasst, um ihn gegen Sandeintreibungen zu sichern (Beach Erosion Board, Mem. 42, 1953). Auf der Südseite – Leeseite – der Leitdämme nahm durch verminderte Sandzufuhr der Strand sofort ab. Die Anlieger bauten zunächst Längswerke und Bühnen, um die Erosion aufzuhalten. Die Küstenströmung führte jedoch so wenig Sand, daß die Bühnen keine stranderhaltende oder strandbildende Wirkung zeigten und die Längswerke unterspült zu werden drohten.

Daraufhin wurde eine Förderanlage gebaut, die den auf der Nordseite der Leitdämme angelandeten Sand durch eine Rohrleitung auf die Südseite weiterbeförderte.

Die Anlage wurde 1937 in Betrieb genommen und leistete im Jahresmittel zunächst 38 000 m³ und später 60 000 m³ Sand. Dadurch erneuerte sich der Strand auf der Leeseite der Leitdämme wieder und konnte auf diese Weise erhalten werden.

c) Vorspülung in Palm Beach, Lake Worth Inlet

Die Erfahrungen aus den unter 3.23 a) beschriebenen Strandaufspülungen führten zu dem Plan, eine feste Spülanlage einzurichten, um den vom nördlichen Leitdamm aufgefangenen Sand zum südlich davon gelegenen Strand zu leiten. Über die Erfahrungen mit dieser Anlage liegen keine Nachrichten vor.

4.3 Folgerungen aus den durchgeführten Strandvorspülungen für den geplanten Versuch vor Westerland

Es ist zwischen folgenden vier Arten von Vorspülungen zu unterscheiden:

- a) Mittelbare Strandversorgung durch Verklappen von Baggergut im Vorstrandbereich
- b) Stranderhöhung durch unmittelbare Aufspülung
- c) Vorspülung örtlich begrenzter Sandlager und
- d) Kontinuierliche Strandvorspülung.

Zu a): Mittelbare Strandversorgung durch Verklappen von Baggergut im Vorstrandbereich

Das unter 4.21 beschriebene Verklappen von Baggergut hatte in Atlantic City nicht die erwartete Wirkung. Dies Verfahren zur Strandverbesserung ist nur erfolgreich, wenn die Brandungs-, Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse und ihre Einflüsse auf die Klappstelle hinreichend genau bekannt sind. Die Wirkung dieser Komponenten ist jedoch so schwer abzuschätzen, daß über die Wirksamkeit dieses Verfahrens nur örtliche Naturversuche Auskunft geben können.

Sofern dieses Verfahren der Sandzuführung vor Westerland angewendet werden sollte, müßte das Baggergut außerhalb des Riffs auf mindestens 10 m Wassertiefe verklappt werden, damit der eingesetzte Bagger genügend Kielfreiheit auch beim Verklappen hat. Beobachtungen liegen nicht vor, ob und in welchem Umfang aus dieser Wassertiefe, die etwa 2,0 km vor dem Strand bzw. 1,5 km vor dem Riff liegt, ein auf den Strand gerichteter Transport besteht. Falls ein solcher festgestellt wird, ist immer noch die Frage offen, ob er ausreicht, um dem Strand genügend Material zuzuführen. Für den Vorspülversuch vor Westerland kann dieses Verfahren wegen der vielen offenen Fragen nicht empfohlen werden.

Eine gezieltere und damit befriedigendere Anwendung dieses Verfahrens ist möglich, wenn unter Berücksichtigung der Seegangsverhältnisse im Vorstrandbereich ein Spüler eingesetzt werden könnte, der das verklappte Baggergut aufnimmt und durch eine Rohrleitung unmittelbar an die Einbaustelle spült.

Für die Vorspülung vor Westerland böte sich eine solche Lösung für Firmen mit geeigneten Hopperbaggern und Spülern an. Auf diese Weise könnten nach Norden und Süden vertriftete Sandmengen im Bereich des Vortrapptiefs oder Lister Tiefs durch Aufbaggern zurückgewonnen und dem Strand durch Vorspülung wieder zugeführt werden. Damit wäre eine Art Kreislauf erreichbar (KRAMER 1958/59). Jedoch zeigt der geologische Befund, daß in den für Hopperbagger geeigneten Wassertiefen nur sehr feine Sande vorkommen (s. 2.43).

Außerdem ist mit diesem Verfahren eine stetige Vorspülung nicht durchführbar, weil ein Spüler im Seegebiet vor Westerland wegen des Seeganges erfahrungsgemäß nicht ununterbrochen arbeiten kann und während der Herbst- und Wintermonate eingezogen werden muß. Deshalb ist dieses Verfahren für den geplanten Vorspülversuch vor Westerland ungeeignet, denn für eine Versuchsspülung muß eine hohe und gleichzeitig kontinuierliche Spülleistung gefordert werden (s. 5.53). Nur wenn diese wichtigste Voraussetzung erfüllt werden kann, wird es überhaupt möglich sein, den Einfluß der zahlreichen sonstigen Veränderlichen mit Hilfe der im Teilgutachten A vorgeschlagenen Messungen zu beurteilen.

Zu b): Stranderhöhung durch unmittelbare Aufspülungen

Durch unmittelbare Aufspülungen kann am sichersten erreicht werden, daß das Spülgut an die Bedarfsstellen gelangt und dort in der gewünschten Höhe und Flächenverteilung abgelagert wird. Es ist kein Fall bekanntgeworden, in dem eine unmittelbare Aufspülung mißlungen ist. Der zu erwartende Abtrag der aufgespülten Flächen ist jedoch recht unterschiedlich und hängt von den angreifenden Naturkräften ab.

Erfahrungen mit flächenhaften Vorspülungen zeigen, daß solche mit starken Stranderhöhungen auch einen starken Abtrag zur Folge haben, weil sie das Kräftespiel nachhaltig stören. Mit zunehmender Einstellung eines neuen Gleichgewichts wird der Strand stabiler, bis sich ein Ausgleich zwischen den angreifenden Kräften mit einer entsprechenden Strandneigung eingestellt hat.

Es sind Vorspülungen an Stränden mit und ohne Strandschutzwerken angeführt worden. Die Sandverluste von Vorspülungen an Stränden ohne Schutzwerke hielten sich in Grenzen, wenn kein oder ein nur unwesentlicher Küstenversatz vorhanden war. Mit zunehmendem Strömungseinfluß stieg jedoch die Verlustrate und damit die Häufigkeit der erforderlichen Nachspülungen.

Um die Häufigkeit der Nachspülungen zu verringern, wurden in vielen Fällen gleichzeitig Bühnen gebaut, womit eine Stabilisierung des aufgespülten Strandes erreicht werden sollte und in den meisten Fällen auch erreicht worden ist. Wenn die örtlichen Gegebenheiten es möglich erscheinen lassen, daß eine Vorspülung sich ohne Bauwerke hinreichend lange hält, sollte der Bau von Bühnen so lange hinausgezögert werden, bis aus den Erfahrungen der betreffenden Vorspülung eine eindeutige Entscheidung für oder wider den Bau von Bühnen möglich ist.

Da nach den Erfahrungen Bühnen im allgemeinen Vorspülungen günstig beeinflussen, kann ihr Vorhandensein in einem aufzuspülenden Strandbereich von Vorteil sein. Allerdings treten an ihren Flanken und Köpfen örtlich Ausspülungen auf.

Nach den Folgerungen aus den bekannten Vorspülungen liegt für die Sandzufuhr vor Westerland zunächst eine flächenhafte Vorspülung nahe. Damit würde ein unmittelbarer Schutz der Strandschutzwerke erreicht. Das Bühnensystem wird voraussichtlich keinen nennenswerten Vorteil für den Bestand der Vorspülung bieten. Mit Sand überdeckt, bleibt es unwirksam, wieder freigelegt, wird es gegen die Brandungswirkung – wie bisher – nur einen teilweisen Schutz geben und lediglich Brandungsströmungen mindern.

Zu c): Vorspülung örtlich begrenzter Sandlager

Diese Art der Vorspülung hat sich in den Fällen bewährt, in denen die Küstentrift mit Sand angereichert werden soll, damit leeseitige Strandbereiche versorgt werden.

Das Verfahren, Brandung und Strömung mit Sand anzureichern, ließe sich vor Westerland anwenden, wenn das Sandlager – zur Verhinderung von Hinterspülung – hochwasserfrei mit dem Deckwerk verbunden wird. Das bedeutet, daß das Sandlager eine bühnenartige Form erhalten müßte. Damit wäre neben der Sandanreicherung möglicherweise noch eine sandfangende Wirkung zu erreichen, womit die Vorspülung neben ihrer normal passiven auch eine aktive Aufgabe übernehmen würde. Ein besonders nachhaltiger, gezielter Eingriff in das Geschehen auf Strand und Vorstrand wäre möglich, wenn es gelingt, das bühnenförmige hochwasserfreie Sandlager bis zum Riff vorzustrecken (s. 5.3).

Zu d): Kontinuierliche Strandvorspülungen

Kontinuierliche Strandvorspülungen sind mehrfach ausgeführt worden, wenn die natürliche Sandtrift durch Baumaßnahmen unterbrochen worden war und als deren Folge der leeseitige Strandbereich wegen mangelnder Sandzufuhr abbrach. Mit diesem Verfahren wird durch Sandgewinnungsanlagen der auf der Luvseite ankommende Sand auf die Leeseite gebracht und vorgespült, womit die natürliche Küstentrift wiederhergestellt wird.

Wenn eine kontinuierliche Strandvorspülung vor Westerland angewendet werden sollte, würde das bedeuten, daß der durch Uferabbrüche in den Brandungs- und Triftbereich gelangte und dort verfrachtete Sand von seinen teilweise nicht sicher bekannten Ablegungsorten über Entfernungen bis zu 20 km zurückgepumpt werden müßte. Ein solches Verfahren wäre umständlich und teuer. Wirtschaftlicher erscheint eine Bodenentnahme aus dem Wattgebiet im Schutz der Insel, wo geeigneter Spülboden in kürzerer Entfernung gewonnen werden kann.

Die Gutachtergruppe kommt zu dem Ergebnis:

Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten und der bisherigen Erfahrungen mit Strandvorspülungen erscheint vor Westerland eine lagerartige Sandvorspülung am günstigsten.

5. Vorschläge zur Sandvorspülung vor Westerland

5.1 Einpassung der Sandvorspülung in das natürliche Geschehen

Die Entwicklung und Veränderung der geplanten Vorspülung wird durch das natürliche Geschehen (s. 2.4), insbesondere durch Brandungs- und Sandströmungen, bestimmt. Deshalb sollte unbedingt angestrebt werden, daß das vorhandene und nicht zu ändernde – jedenfalls nicht mit den gegenwärtigen wirtschaftlichen Mitteln – Brandungsgeschehen in einer solchen Art durch die Sandvorspülung beeinflusst wird, daß von dem eingespülten Sand sowenig wie möglich nach der Aufspülung verlorengeht. Außerdem sollte versucht werden, noch zusätzlich durch die Form der vorgespülten Strandfläche – Spülkörper genannt – Sand aus den Brandungsströmungen – Zusatzsand genannt – zu gewinnen. Im folgenden wird deshalb als Spülsand der Sand bezeichnet, der durch die Rohrleitung transportiert wird. Der Spülkörper besteht dann aus der Spülsandmenge abzüglich des Spülverlustes.

In den weiteren Überlegungen muß davon ausgegangen werden, daß es verlässliche Verfahren für eine quantitative Bestimmung der wandernden Sandmengen derzeit noch nicht gibt, daß aber qualitative theoretische Modelle vorhanden sind, auf die sich diese Überlegungen stützen können.

5.2 Vorspülung in der Form einer Stranderhöhung und -verbreiterung

Vom Marschenbauamt Husum ist diese Lösung untersucht und ein entsprechender Entwurf (MBA Husum 1967) aufgestellt worden. Ausgegangen wird darin von einem mittleren jährlichen Sandverlust von $14 \text{ m}^3/\text{afd.m}$ Uferstrecke. Die Vorspülung soll so bemessen werden, daß eine 2,5 km lange Uferstrecke eine Sandmenge erhält, die bei gleichbleibender jährlicher Verlustrate von $14 \text{ m}^3/\text{afd.m}$ nach 15 Jahren aufgebraucht ist, so daß sich eine Vorspülmenge von $525\,000 \text{ m}^3$ Sand ergibt. Für die Vorspülung wird eine Mindestleistung von $4000 \text{ m}^3/\text{Tag}$ gefordert. Das Spülgut soll nach dem Entwurf unmittelbar vor der Ufermauer, dem Deckwerk und dem nördlichen Tetrapodenwall auf den Strand gespült werden, wobei die Spülausläufe in Abständen von 95 m bis 100 m zu verlegen sind. Es wird ausdrücklich auf die den Sand verteilende Wirkung der Wellen nach den Erfahrungen auf Norderney hingewiesen (MBA Husum 1967).

In einem neueren Bericht (MBA Husum 1969) wird aus dem Vergleich der Lagen der – 7,0 m-Linie und der + 4,0 m-Linie in den Jahren 1953 und 1967 für einen 2,4 km langen Küstenabschnitt vor Westerland ein Materialbedarf von $1\,700\,000 \text{ m}^3$ Sand genannt, um einen ausgeglicheneren Strandzustand durch eine Sandvorspülung wiederherzustellen.

Die Frage ist, ob die Strandentwicklung der vergangenen rd. 20 Jahre auf die nächsten 15 Jahre extrapoliert werden kann. Zu erwarten ist, daß eine 2,5 km lange Vorspülung einen um so größeren Strandvorsprung darstellt, je weiter die anliegenden Uferstrecken zurückgehen, entsprechend stärker wird auch der Brandungsangriff der Strandbrandung werden. Dadurch werden auf dem trockenen und auf dem nassen Strand, insbesondere bei Sturmfluten, stärkere Veränderungen als auf den anliegenden Uferstrecken zu erwarten sein (s. 4.3).

Bei Sturmflutlagen kann durch eine genügend hohe Vorspülung an der Ufermauer und an den Deckwerken erreicht werden, daß die schädlichen Einflüsse der Reflexionen an diesen Bauwerken ausgeschaltet oder vermindert werden; eine Höhe von 3,0 m bis 3,5 m über MThw wäre angebracht. Auf jeden Fall stellt eine solche Vorspülung einen wirksamen Schutz des Fußes der Längswerke dar. Dieser Schutz ist besonders am nördlichen Ende der Ufermauer und auf der anschließenden Deckwerksstrecke dringend erforderlich, weil dort z. T. freistehende Fußspundwände vorhanden sind.

Wenn der Sand aber nur unmittelbar an der Ufermauer und am Deckwerk als künstliche Strandaufhöhung eingebracht wird, so wird einmal erhöhter Abbruch erzeugt (s. 4.3), zum anderen wird die Möglichkeit ausgeschlossen, Zusatzsandmengen aus dem natürlichen Sandtransport einzufangen, weil lediglich die Strandbrandungszone seawärts verschoben wird. Außerdem ist eine Wirkung auf das Gesamtsystem aus Riff- und Strandbrandung nicht zu erwarten, auch dann nicht, wenn die vorhandenen Bühnen als Stützwerke für eine weiter seawärts reichende Vorspülung genutzt werden. Die Erklärung ist, daß gerade bei den besonders transportwirksamen Sturmweatherlagen die Bühnen nicht die volle Breite der Strandbrandungszone erfassen, sondern der Brechpunkt seawärts des Bühnenkopfes liegt.

5.3 Vorspülung als Sandbühne oder Sandhöft

5.31 Wechselwirkung zwischen Vorspülung und Seegang an einer Sandbühne

Der Eingriff in das Gesamtbrandungsgeschehen verfolgt das Ziel, die natürlichen Sandtransportvorgänge zu beeinflussen und mit dem Spülkörper Zusatzsand zu gewinnen. Der Grundgedanke ist ein Spülkörper aus Sand, der vom Strand her quer durch die Rinne bis zum Riff hin vorgespült wird (Abb. 9) und in seiner Ausgangsform die Gestalt und Wirkung einer sehr flachen Bühne hat. Diese idealisierte Grundform wird als Sandbühne bezeichnet.

Während des Baues wirken Wellen auf den Spülkörper. Im Gegensatz zu den Bühnen normaler Bauart (Einwand-, Kasten- und selbst Flachbühnen) tritt bei einem derartig flachen Sandkörper nicht allein Wellendiffraktion (Zerstreuung), sondern im erheblichen Maße auch Wellenrefraktion (Beugung) ein, weil die Abmessungen der Sandbühne und ihrer Böschungen ein Mehrfaches der auftretenden Wellenlängen betragen. Dadurch werden die Brandungserscheinungen völlig anders als bei Strandbühnen herkömmlicher Bauart.

Die Abbildung 10 zeigt schematisch die Wellen- und Brandungsverhältnisse am Spülkörper im Bauzustand; der Spülkörper ist durch zwei Höhenschichtlinien angedeutet. Der Wellenangriff ist normal zum Strand, es herrscht also kein Längstransport in der Strandbrandung, die, vom Sandkörper unbeeinflusst, zu beiden Seiten der Sandbühne aufläuft. An der Sandbühne selbst ist die Kopf- und die Flankenbrandung zu unterscheiden. In der Kopfbrandung treten größere Wellenhöhen als in der gleichzeitigen Strandbrandung auf, weil auf dem Böschungskegel die Wellenenergie durch Refraktion konzentriert wird (Prinzip der Sammellinse). Dagegen weist die Flankenbrandung geringere Wellenhöhen auf. Bei dem Wellenangriff normal zum Strand ist nur Refraktion, keine Diffraktion vorhanden.

Auf jeden Fall tritt durch die Kopfbrandung Abbruch am Bühnenkopf auf, dessen Stärke mit der Wellenhöhe zunimmt. Durch die Flankenbrandungen entstehen landwärts gerichtete Brandungsströmungen, die das vor Kopf erodierte Material landwärts verfrachten. Da die Wellenhöhen an den Flanken zum Lande hin kleiner werden, bleibt dieses Material irgendwann als Anlandung an den Flanken liegen (Abb. 10).

Durch den senkrechten Wellenangriff wird also dem Spülkörper kein Material entzogen, sondern es findet nur eine landwärtige Verlagerung statt. Jedoch werden bei diesem Wellenangriff auch keine Zusatzmengen aufgefangan.

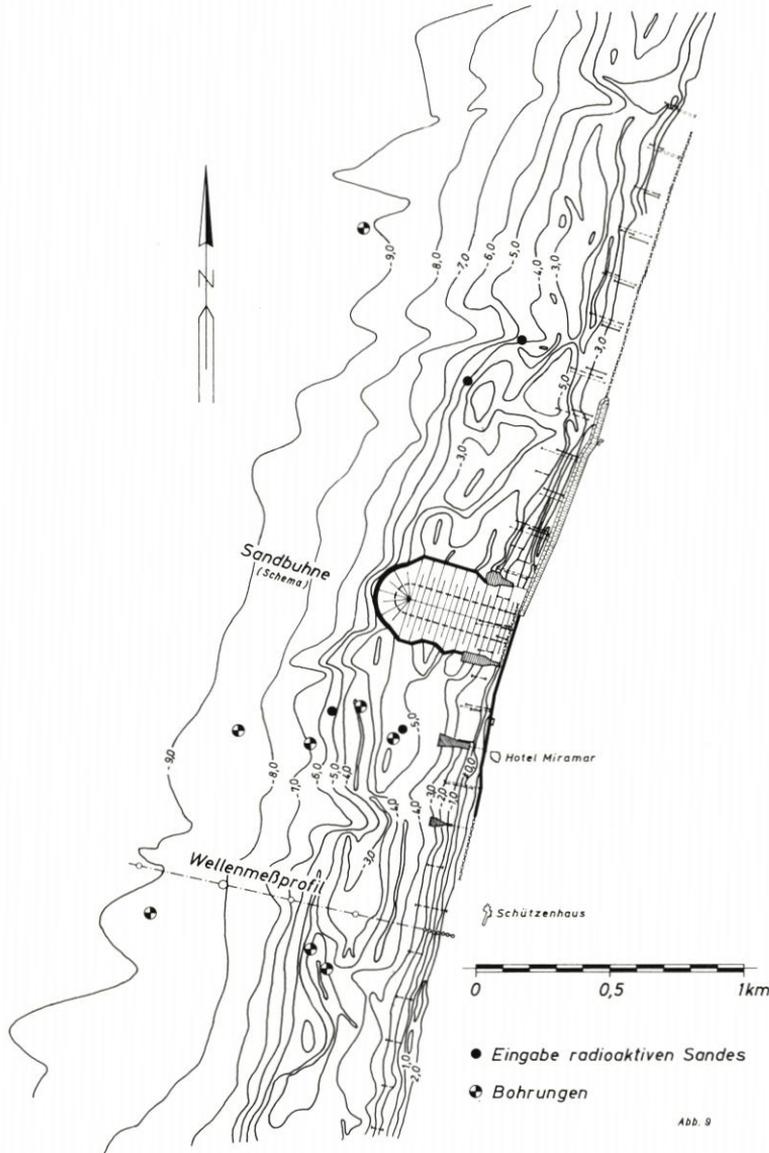


Abb. 9. Hauptuntersuchungsgebiet mit Schema der Sandbühne

Zusatzsand, der nicht aus dem Spülkörper stammt, ist aber in der bekannten Weise auf der Luvseite der Sandbühne bei schrägem Wellenangriff (Abb. 11) zu erwarten, wenn die Bühne weit genug aus der Strandbrandung herausragt. Außerdem wird, besonders an der Luvseite, Sand vom Bühnenkopf durch die Flankenbrandung landwärts getragen, wo sich an

der luvseitigen Bühnenwurzel zwei Brandungsströme treffen. Der Punkt des härtesten Wellenangriffes ist vom Kopf zur luvseitigen Flanke verschoben; dagegen ist die leeseitige Flanke weitaus geringeren Wellenkräften ausgesetzt, weil zur Refraktion die Diffraktion hinzutritt, so daß auch hier landwärtiger Transport herrscht. Am leeseitigen Strand ist eine Lee-Erosion möglich, wird aber nicht in der gleichen Stärke wie bei einem festen Bühnenbauwerk zu erwarten sein, weil von der Seeflanke Sand zugeführt wird.

Auch schräger Wellenangriff führt zum Spülkörper nur zu landwärtigem Sandtransport, doch wird dabei durch das Absperren des Strandbrandungsstromes außerdem Zusatzsand eingefangen.

Der Spülkörper wird aber bereits während der Vorspülung einer ständigen Wechselwirkung mit den Wellenkräften unterliegen. Alle Wellenrichtungen haben die einheitliche Tendenz, den Kopf der Sandbühne abzutragen und landwärts zu verlegen. Gleichzeitig treten an deren Wurzel und den anschließenden Flankenstrecken Auflandungen ein, die teils aus dem Spülkörper bestritten werden, teils aus eingefangenen Zusatzsandmengen herrühren können.

5.32 Umwandlung der Sandbühne in ein Sandhöft

Wird die Sandbühne ohne weitere Vorspülung vor Kopf sich selbst überlassen, so tritt durch die beschriebenen Wellenwirkungen eine allmähliche Umwandlung in einen weniger vorspringenden, flacheren Sandkörper (Abb. 12) – nachstehend als Sandhöft bezeichnet – ein, dessen Höhenschichtlinien sich etwa wie GAUSSsche Glockenkurven verhalten. Im weiteren Verlaufe wird dessen Ausdehnung entlang des Strandes immer länger, während der Vorsprung und seine Höhe abnehmen. Wie schnell diese Umwandlung vor sich geht, hängt neben der Körnung des Sandes vor allem vom Wellenklima ab. Auf jeden Fall verläuft dieser Prozeß um so langsamer, je größer die Sandmasse zu Anfang war. Gleichfalls wird die Umbildung am Anfang schneller vor sich gehen als späterhin, wenn das Sandhöft sich in seiner Form bereits den Wellenwirkungen – und umgekehrt die Wellen sich auch der Form des Höftes – angepaßt hat (s. 4.3).

Während senkrechten Wellenangriffes ist der landwärtige Sandtransport an den Flanken des Sandhöftes schwach, weil im Gegensatz zur Sandbühne durch die Refraktion die Wellen nahezu senkrecht auf die Höhenschichtlinien treffen (Abb. 13). Durch schrägen Wellenangriff kann der Sand um das Sandhöft herumtransportiert werden, weil alle Brandungsströmungen in gleicher Richtung laufen (Abb. 14), ebenfalls im Gegensatz zur Sandbühne (Abb. 11). Sowohl beim senkrechten als auch beim schrägen Wellenangriff zieht sich die Strandbrandungszone um das gesamte Sandhöft herum und sorgt mit ihrem Sandtransport für eine ausgeglichene Sandbilanz (Abb. 13 und 14). Auf dem Leehang kann möglicherweise von einer bestimmten Seegangsrichtung an Material seewärts der Spitze des Ufervorsprunges angelagert werden (u. U. als Sandhaken), womit dem Abbau der Spitze auf natürlichem Wege entgegengewirkt würde.

Mit länger andauerndem Seegang aus nur einer Richtung wird das Sandhöft asymmetrisch verformt, wobei die luvseitige Flanke länger als die leeseitige wird. Ein Wechsel der Wellenrichtung fordert dann wieder einen Teil des um die Höftspitze transportierten Sandes in die Gegenrichtung, so daß von einer Pendelsandmenge gesprochen werden kann (Abb. 15). Die Analogie zu den strömungserzeugten vertikalen Transportkörpern ist unverkennbar. Günstig ist auch hier die stabilisierende Wirkung, die dadurch entsteht, daß ein Teil des Sandes aus dem Ferntransport (Verlagerung) in den Nahtransport (Umlagerung des Sandhöftes als Transportkörper) übergeht (LÜDERS 1929, FÜHRBÖTER 1967).

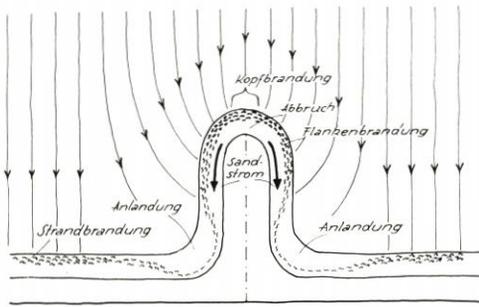


Abb. 10. Brandung und Sandumlagerung im Bauzustand (schematisch). Wellenangriff normal zum Strand

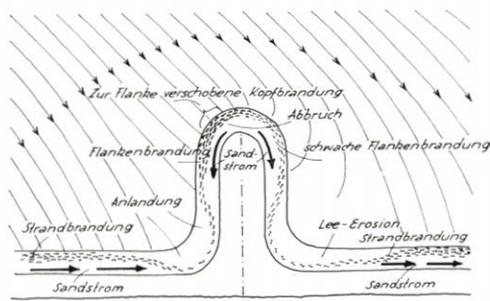


Abb. 11. Brandung und Sandumlagerung im Bauzustand (schematisch). Wellenangriff schräg zum Strand

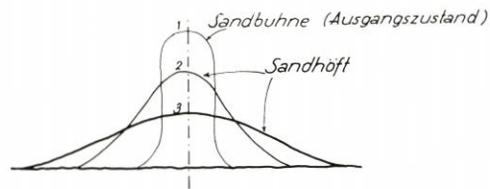


Abb. 12. Umwandlung der Sandbühne in ein Sandhöf durch Wellenkräfte (schematisch)

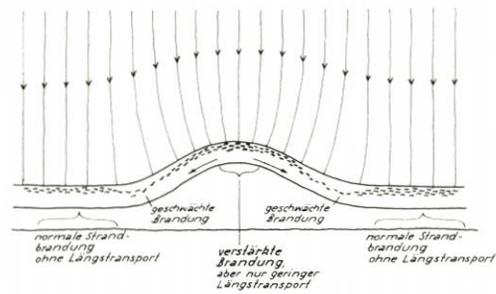


Abb. 13. Brandung und Längstransport an einem Sandhöf bei Wellenangriff normal zum Strand (schematisch)

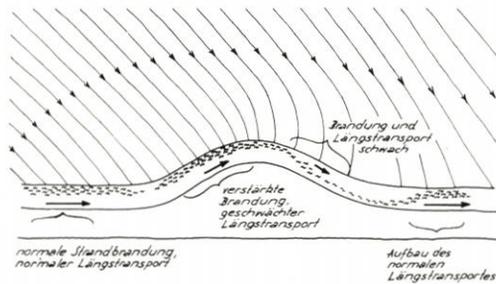


Abb. 14. Brandung und Längstransport an einem Sandhöf bei schrägem Wellenangriff (schematisch)

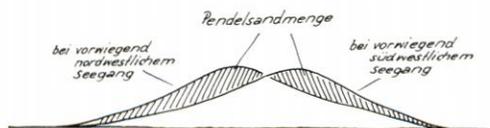


Abb. 15. Umbildung eines Sandhöfes mit der vorherrschenden Seegangsrichtung (schematisch)

Die Stabilität, d. h. die Lebensdauer eines solchen Sandhöftes ist um so größer, je mehr der langzeitige Mittelwert der Seegangsrichtungen und -energien normal zum Strand liegt. Sie kann erhöht werden, wenn die Sandbuhne bis an das Riff vorgespült werden kann, weil dort in der Riffbrandung bereits ein gesättigter Transportstrom besteht und daher eine Verminderung des Abbruches am Kopfe denkbar ist. Nach der Umwandlung der Sandbuhne in ein Höft wird die Riffbrandung an der Höftspitze unmittelbar in die Strandbrandung übergehen. Da bei schrägem Wellenangriff auf der Leeseite der Höftspitze durch Diffraktion und Refraktion ein Teil der Wellenenergie auf die leeseitige Flanke gelangt, ist es möglich, daß auf diese Weise der Sandstrom unter der Riffbrandung „angezapft“ wird und weitere Zusatzmengen gewonnen werden, die dann als Sandhaken auftreten könnten.

Genaue Vorhersagen sind hier noch nicht möglich, weil einmal das Brandungsgeschehen im Naturmaßstab nur ungenügend erforscht ist und zum anderen die Wechselbeziehung zwischen Brandung und Riff noch nicht eindeutig geklärt sind (s. 2.44). Hierzu gehört besonders die Frage, ob – im langzeitigen Mittel gesehen – das Riff von der See her ständig mit neuem Sand genährt wird oder nicht.

Der Vorspülungsversuch kann zu wertvollen Erkenntnissen zu diesen Fragen führen.

5.4 Verbindung von uferparalleler Strandvorspülung und Sandhöft

Zwischen dem Vorschlag einer uferparallelen Strandvorspülung als künstliche Strandverbreiterung und -erhöhung (MBA Husum 1967) und dem einer Vorspülung als Sandhöft besteht kein Widerspruch. Mit beiden Verfahren wird das gleiche Ziel angestrebt, durch künstlichen Strand den Fuß der Uferschutzwerke zu sichern.

Ein zusätzliches Risiko von der Spültechnik her besteht nicht, weil die Sandbuhne vom trockenen Strand her wie ein gewöhnliches Spülfeld aufgebaut wird und daher der Antransport der Rohre, der Vortrieb der Spülleitung usw. unter üblichen Arbeitsbedingungen vor sich gehen kann. Für die Entwicklung der vorgesehenen Sandbuhne bzw. des Sandhöftes gibt es zwei einander entgegengerichtete Möglichkeiten:

- a) Der Sand wird durch die Wellenkräfte so schnell verteilt, daß es nicht möglich ist, die Sandbuhne über ein bestimmtes Maß durch die Brandungszone vorzutreiben.
- b) Es treten so geringe Veränderungen, insbesondere an den Flanken der Sandbuhne nahe der Wurzel auf, daß ein Schutz der seitlichen Uferstrecken nicht erreicht wird.

Ob und welches dieser Extreme eintritt, hängt entscheidend von den Wetterlagen während und nach der Vorspülung ab. Jedoch kann erwartet werden, daß es sich schon wenige Wochen nach Beginn der Vorspülung abzeichnen wird, in welcher Richtung die Entwicklung verläuft, damit entsprechende Entscheidungen (Teilgutachten C) getroffen werden können.

Der große Vorteil eines Spülverfahrens ist, daß während der Bauausführung, also der Vorspülung, jederzeit Änderungen des Spülplanes möglich sind, während bei massiven Bauwerken eine Änderung der Konstruktion während des Baues im allgemeinen erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Von diesem Vorteil sollte unbedingt Gebrauch gemacht werden.

Wenn der unter a) erwähnte Fall eintritt, daß der Aufbau eines Spülkegels in der Brandungszone nicht möglich ist, so kann die Aufspülung von diesem Punkt her unbedenklich fortgesetzt werden. Dabei wäre dann mit den im Teilgutachten A beschriebenen Verfahren fortlaufend zu prüfen, wo der verfrachtete Sand abgelagert wird. Erst wenn sich zeigt, daß der Sand in Bereiche abtreibt, in denen er nicht erwünscht ist, müßte der Einspülpunkt verlegt werden.

Es ist jedoch unwahrscheinlich, besonders bei einer Vorspülung in den Sommermonaten,

daß ununterbrochen ungünstige Westwindlagen mit dem entsprechenden Seegang auftreten. Jede Seegangsberuhigung sollte ausgenutzt werden, um die Sandbühne vorzutreiben.

Die Möglichkeit, daß die Wellenkräfte den Aufbau einer Sandbühne verhindern, kann ausgeschlossen werden, indem die Spülleistung so bemessen wird, daß zwar nicht ständig, aber doch vorherrschend der Auftrag durch das Spülgerät den Abtrag durch die Wellen überwiegt. Die Spülleistung muß größer als der Abtrag durch die Naturkräfte sein, wofür eine Bemessung im folgenden Abschnitt (s. 5.5) vorgeschlagen wird.

Im anderen Extremfall könnte es geschehen, daß der Vortrieb der Sandbühne, vielleicht durch ruhiges Wetter begünstigt, so schnell vor sich geht, daß keine Anlandungen und Umlagerungen auftreten. Dann sind Wetterlagen abzuwarten, in denen ein Längstransport und damit Anlandungen auftreten. Um diese Zeit zu überbrücken, kann auf dem trockenen Strand am Fuße der Deckwerke der Sand aufgespült werden, der zu deren unmittelbarem Schutz notwendig ist.

Von den wellenerzeugten Umlagerungen werden nur die Bereiche des Strandes betroffen, die bei normalen Wetterlagen von den Wellen erfaßt werden (s. 2.46). Im oberen Bereich des trockenen Strandes werden nennenswerte Umlagerungen nur durch Sturmfluten hervorgerufen. Hier muß auf jeden Fall zusätzlich zur Strandbühne im Sinne der Stranderhöhung und -verbreiterung des Entwurfes (MBA Husum 1967) aufgespült werden. Diese Vorspülung sollte aber nach der Erstellung der Sandbühne vorgenommen werden, nach Möglichkeit sogar nach der Umbildung der Sandbühne in ein Sandhöft (Abb. 12), damit durch einen flachen Vorstrand ein Schutz für die künstliche Aufhöhung besteht. Wenn diese natürliche Entwicklung sich einstellt und ausgenutzt wird, genügen wesentlich geringere Sandmengen für den unmittelbaren Schutz der Deckwerke.

5.5 Sandmenge und Spülleistung

5.51 Sandmengenschätzung für die Sandbühne

Der Querschnitt der Sandbühne muß dem Spülverfahren angepaßt werden. Als Kronenhöhe wird $NN + 3,0$ m vorgeschlagen, am Deckwerk etwas höher, um hier bei sehr hohen Sturmfluten einen Durchbruch durch Brandungslängsstrom zu unterbinden. Das Sand-Wassergemisch gelangt zunächst auf den Überwasserspülstrand und breitet sich vor Kopf in der bekannten Spülkegelform aus, wobei die Neigung von Korngröße und Konzentration abhängig ist. Große Körnungen und hohe Konzentrationen ergeben steilere, kleinere Körnungen und Konzentrationen flachere Böschungen. Diese Neigungen liegen etwa zwischen 1 : 20 bis 1 : 50, was aber nur für den Überwasserspülstrand gilt. Unterhalb des mit der Tide wechselnden Wasserspiegels stellen sich bei ruhigem Wasser Böschungen zwischen 1 : 3 und 1 : 6 ein (Arbeitsausschuß Ufereinfassungen 1970). Strömungs- und Wellenangriffe erzeugen entsprechend flachere Böschungsneigungen. Hier wird sich die mittlere Neigung des vorhandenen trockenen und nassen Strandes einstellen, wenn das Kornmaterial der Aufspülung dem des Einbauortes entspricht. Die Neigung (s. 2.46) liegt am trockenen Strand auf 1 : 17, am nassen Strand auf 1 : 15. Eine Neigung von 1 : 20 kann daher mit ausreichender Sicherheit als ungünstigster Richtwert bei den vorhandenen Sandkörnungen angenommen werden.

Wird vorausgesetzt, daß auch für den Spülstrand oberhalb der Wasserlinie eine solche Neigung erreichbar ist, so ergibt sich für den Querschnitt des Sandkörpers ein flaches Dreiecksprofil mit der Krone auf $NN + 3,0$ m und Böschungen 1 : 20 bis auf die jeweilige Sohle.

Wenn die unruhige und zeitlich veränderliche Morphologie zwischen Ufermauer und Riff-

kamm (Abb. 1) durch eine mittlere Tiefe von NN — 4,0 m ersetzt wird, so ergibt sich ein Regelquerschnitt von 7 m Höhe über der Sohle und eine Fußbreite von $2 \times 7 \times 20 = 280$ m. Die erforderliche Sandmenge beträgt dann

$$280 \cdot \frac{7}{2} = 980 \text{ m}^3/\text{ld.m.}$$

Wird weiterhin eine mittlere Entfernung von 400 m zwischen Ufermauer und Riff angenommen, so ist der Massenbedarf des Spülkörpers

$$400 \cdot 980 = 392\,000 \text{ m}^3, \text{ d. h. rd. } 400\,000 \text{ m}^3.$$

Damit ist aber nur das Material erfaßt, das im Spülkörper abgelagert wird. Darüber hinaus ist der Spülverlust zu berücksichtigen, der sich aus dem Feinanteil des Spülsandes ergibt.

Die Überschlagsrechnung zeigt, daß der Massenbedarf einer solchen Sandbühne im Rahmen dessen liegt, was für die Vorspülversuche im ersten Entwurf (MBA Husum 1967) vorgesehen wurde. Eine genauere Ermittlung ist sinnleer, nicht nur, weil die Morphologie sich ständig ändert, sondern weil die — positiven und negativen — Materialumsätze am Spülkörper während seines Aufbaues entscheidend von den dann herrschenden Wetterlagen abhängen. Wird aber zunächst angenommen, daß während der Vorspülung keine Sandumlagerung durch Seegang entsteht und die Einspüleleistung $6600 \text{ m}^3/\text{Tag}$ (ohne Spülverluste) beträgt (s. 5.53), so kann die Bühne in einer Zeit von

$$\frac{400\,000}{6\,600} = \text{rd. } 60 \text{ Tagen} = 2 \text{ Monaten}$$

erstellt werden.

5.52 Gesamtpülmenge

Die exakte Angabe einer optimalen Gesamtpülmenge ist nicht möglich, weil unbekannt ist, wie die künftige Entwicklung nach dem Eingriff in das Brandungsgeschehen verlaufen wird. Die aus den Abbrüchen der letzten Jahrzehnte ermittelten Werte von $525\,000 \text{ m}^3$ nach dem Entwurf (MBA Husum 1967) und von $1\,700\,000 \text{ m}^3$ nach dem Bericht (MBA Husum 1969) stellen aber insofern wertvolle Unterlagen dar, weil sie Angaben über die Größenordnung der verlagerten Sandmassen enthalten.

Im vorhergehenden Abschnitt wurden für den Spülkörper des Sandhöftes rd. $400\,000 \text{ m}^3$ ermittelt, ohne den unvermeidlichen Spülverlust. Hinzu kommt das Material, das unmittelbar vor den Deckwerken auf den Teil des Strandes aufgespült werden muß, der nur bei Sturmfluten von den Wellen erfaßt wird. Nach Überschlagsrechnungen erscheint es sinnvoll, ebenfalls rd. $400\,000 \text{ m}^3$ Sand für diese Stranderhöhung anzusetzen. Diese Mengen können vermindert werden, wenn es gelingt, durch das Einfangen von Zusatzsand bereits einen natürlichen Schutz zu schaffen, was durch die Untersuchung während des Vorspülens geprüft werden muß.

Vorgeschlagen wird daher, von den im Entwurf von 1967 angegebenen $525\,000 \text{ m}^3$ Sand auszugehen, aber als reine Ablagerungsmasse im Spülkörper. Für die Entnahme — und damit für die Abrechnung — muß ein Zuschlag gemacht werden, der dem zu erwartenden Spülverlust entspricht. Bei Entnahme aus dem durch Bohrungen erschlossenen Wattengebiet (Abb. 16) östlich des Rantum-Beckens werden schätzungsweise $900\,000 \text{ m}^3$ Sand gebaggert werden müssen, um die Masse des Spülkörpers zu erreichen.

Um die Bauleistung wirtschaftlich optimieren zu können, muß auch während der Spülarbeiten über die Spülmengen entschieden werden können. Für die Ausschreibung wäre daher vorzuschlagen:

- a) 900 000 m³ Sand werden im Abtrag (entspricht ungefähr 600 000 m³ + Spülverlust) als garantierte Mindestleistung ausgeschrieben.
- b) In einer Zusatzposition werden die Preise für weitere je 100 000 m³ Sand im Abtrag eingeholt.
- c) In einer weiteren Zusatzposition wird der Preis dafür eingeholt, daß der Auftragnehmer bis zu 9 Monaten die Baustelle stilllegt. Die monatlichen Kosten sind anzugeben, um ggf. verlängern zu können.

Hiermit kann die Bauleistung flexibel der Entwicklung angepaßt werden (Teilgutachten C).

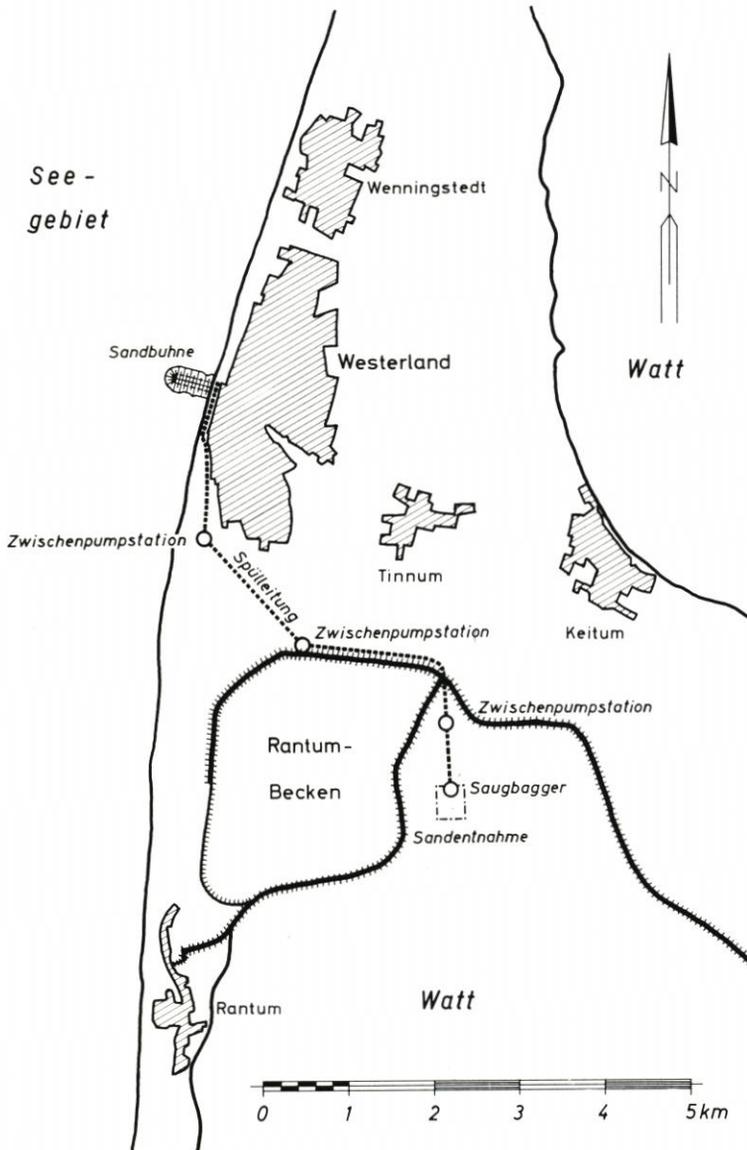


Abb. 16. Lageplan mit Spüleinrichtung

5.53 Erforderliche Spüleistung

Von äußerster Wichtigkeit ist, daß

- a) kontinuierlich gespült wird und
- b) eine bestimmte tägliche Mindestspüleistung erbracht wird.

Dies ist einmal dadurch begründet, daß – wie bereits ausgeführt – die Spüleistung im zeitlichen Mittel immer stärker als der Sandabtrag durch Naturkräfte sein muß. Zum anderen verlangt der Versuchscharakter der Sandvorspülung nach einer stetigen Sandzugabe, um in der Vielzahl der variablen Parameter diese wichtige Ausgangsgröße konstant zu halten.

Am nassen Strand im Profil 0 vor der Westerländer Ufermauer ist eine Strandsenkung von 2,6 m in zwei Tagen festgestellt worden (s. 2.46), also von rechnerisch 1,3 m/Tag. Wird dieses extreme Maß – nur um eine Vorstellung von den zu erwartenden Massen zu geben – auf den Kopf der vorgeschlagenen Sandbuhne mit rd. 280 m Fußbreite und auf einer angenommenen Länge der Brandungszone von rd. 100 m angewendet, so ergibt sich ein möglicher Abtrag von rd. 40 000 m³ Sand am Kopf der Buhne an einem Tag, ein Wert, der nur von der Größenordnung her zu verstehen ist. Jedoch braucht nicht verlangt zu werden, daß der Bagger in der Sandentnahme im Dauerbetrieb gegen eine solche Umlagerung arbeiten muß, die nur unter extremen Bedingungen auftreten kann.

Wenn davon ausgegangen wird, daß die für die Spülung vorgeschlagenen 900 000 m³ Sand in 3 Monaten gefördert werden sollen, so ergibt sich eine Tagesleistung im ununterbrochenen Betrieb von 10 000 m³ Sand im Abtrag, was rd. 6600 m³/Tag im Auftrag nach Abzug des Spülverlustes ergibt. Für das Gerät bedeutet dies eine Stundenleistung von 500 m³ Sand bei 20 Stunden Drehzeit.

Das ist eine Leistung, die von vorhandenen Unternehmergeräten erbracht werden kann, so daß diese Forderung durchaus realistisch ist. Damit kann in etwa einer Woche der Verlust einer kurzen Schlechtwetterlage ausgeglichen werden. Ein echter Verlust würde es ohnehin nicht sein, weil nach den Ausführungen in Abschnitt 5.31 dieser Sand auf jeden Fall vom Kopf der Sandbuhne an den Strand gelangt und damit zur Stranderhöhung und -verbreiterung beiträgt. Unbedingt verlangt werden muß, daß auch an Schlechtwettertagen ununterbrochen eingespült wird, damit vor Kopf den Wellen stetig neues Material dargeboten und damit der Abbruch vermindert wird.

In der Ausschreibung ist daher dringend eine Mindestleistung im Abtrag von

10 000 m³ Sand/Tag

im ununterbrochenen Spülbetrieb zu verlangen. Hiervon hängt der Erfolg oder Mißerfolg des Großversuches ab (s. 4.3). Der Auftragnehmer hat nachzuweisen, daß er diese Leistung mit Sicherheit erfüllen kann. Je mehr sie überboten wird, um so vorteilhafter ist das für den Vorspülvorgang.

5.6 Spülbetrieb

5.61 Ausführung der Spülarbeiten

Da die geplante Vorspülung dem Schutze des Fußes der Längswerke dienen soll, ist es naheliegend, an der Stelle zu beginnen, wo dieser Schutz am nötigsten ist, nämlich am nördlichen Ende der Ufermauer an der Anschlußstelle zum Schrägdeckwerk. Hier sollte auch die Wurzel der Sandbuhne angelegt werden. Dabei können die beiden nördlichen Flachbuhnen vorteilhaft zur Sicherung der Flanken des Spülkörpers verwendet werden. Die Darstellung

der Sandbuhne (Abb. 9) kann im übrigen nur schematisch verstanden werden, weil durch die Wellenkräfte bereits während des Baues Veränderungen zu erwarten sind. Immerhin aber gibt die Abbildung eine Vorstellung von den Ausmaßen des Baukörpers, besonders wenn der über $NN \pm 0$ m liegende Teil mit den vorhandenen Flachbuhnen verglichen wird.

Zunächst wird ein Spülrohrauslauf unmittelbar auf die Utermauer zu legen sein, bis sich ein Spülkegel gebildet hat, dessen Höhe auf etwa $NN + 3,5$ m oder besser noch auf $NN + 4,0$ m liegt. Auf diesem Spülkegel wird dann die Rohrleitung in der Achse der vorgeschlagenen Sandbuhne allmählich seewärts vorgestreckt, wobei zunächst das Bühnenfeld gefüllt wird (Abb. 9).

Wenn in den Sommermonaten vorgespült wird, ist es nicht nötig, die Sandbuhne sofort auf die Kronenhöhe von $NN + 3,0$ m zu bringen. Wichtiger ist, die Sandbuhne so schnell wie möglich vorzutreiben, um möglichst schon während des Vortriebes Zusatzsandmengen zu gewinnen. Soweit betriebliche Erfahrungen nicht dagegensprechen, sollte versucht werden, die Sandbuhne auf einer Breite von 100 m über MThw seewärts vorzustrecken. Wie bereits erwähnt, ist die Böschung auf dem Überwasserspülstrand nicht nur von der Körnung, sondern auch von der Konzentration des Sand-Wasser-Gemisches und damit von dem eingesetzten Spülgerät abhängig. Angestrebt werden sollte, die Rohrleitung auf einer Höhe von etwa $NN + 2,0$ m zu verlegen, damit bei Sommersturmfluten die Arbeiten auf dem Spülfeld wetterunabhängig bleiben. Das bedeutet, die Rohrleitung erst dann zu verlängern, wenn der Spülkegel vor dem Auslauf die Kote $NN + 2,0$ m erreicht hat. Günstig wird sich beim Vortrieb der Rohrleitung in der Achse der Sandbuhne die allgemeine Erfahrung auswirken, daß in der Nähe des Spülauslaufes zunächst die gröberen, mit zunehmender Entfernung davon die feineren Kornfraktionen auf dem Überwasserstand abgelagert werden. Im Korngefüge erhält die Sandbuhne damit einen Querschnitt, in dem zur Achse hin die Körnung gröber wird, was vorteilhaft für die Widerstandskraft gegen den Wellenangriff ist.

Bei schrägem Wellenangriff (Abb. 11) wird am Kopf der Sandbuhne starker luvseitiger Abtrag eintreten. Als Gegenmaßnahme kann entweder mit Stichleitungen oder einer Verschwenkung des Endes der Spüleleitung gegen die Wellenrichtung das Spülmaterial genau an die Stelle gebracht werden, wo der stärkste Abtrag liegt und wo das Material am dringendsten benötigt wird. Das soll aber nur vorübergehend geschehen, im ganzen gesehen sollte darauf geachtet werden, daß die Krone der Buhne ungefähr in die vorgeschlagene Richtung weist (Abb. 9).

Die Wetterlagen während der Vorspülung werden bestimmen, welche Böschungsneigungen sich an den Flanken sowohl in der Wasserwechselzone als auch unter MTnw ausbilden. Es ist unrealistisch, hier mit einer formalen Forderung einen bestimmten Sollquerschnitt für die Bauausführung zu verlangen, denn nur durch eine Rückkopplungsbeziehung zwischen Einbauergebnis und Einbauausführung kann eine Optimierung des Vorspülverfahrens erreicht werden, wozu die Veränderungen ständig zu überwachen sind.

5.62 Überwachung des Vorspülvorganges

In der Ausschreibung ist zu verlangen, daß in der Vorspülzone in einem Quadratnetz von 50 m bis zur seewärtigen Grenze des nassen Strandes Festpunkte (Betonstähle, Gasrohre o. ä.) eingesetzt und täglich vermessen werden, damit jederzeit eine genaue Information darüber vorhanden ist, welcher Baufortschritt erreicht worden ist und wie sich die Vorspülung verhält.

Das gilt besonders für die Erfassung der Zusatzsandmengen, die durch die vorgeschlagene Form der Vorspülung als Sandbuhne eingefangen werden sollen. Diese werden unschwer zu erkennen sein, wenn sie sich an den landseitigen Flanken der Sandbuhne, weit entfernt vom

Rohrauslauf, in der Art ansammeln, wie es bei Strandbuhnen der Fall ist und auch in jüngster Zeit an der Großbuhne aus Tetrapoden vor Hörnum beobachtet werden konnte. Eine deutlichere Trennung von Spül- und Zusatzsand wäre möglich, wenn Naturtracer eine Unterscheidung erlauben würden, worüber weitere Untersuchungen (Teilgutachten A) Auskunft geben können. Denkbar ist auch, daß Unterschiede in der Nulleffektstrahlung bestehen, die mit Hilfe der Gamma-Strahlenspektrometrie sichtbar gemacht werden können und damit auch bei Gemischen die Herkunft der Anteile erkennen lassen. Hierzu werden rechtzeitige Voruntersuchungen empfohlen.

Damit wird aber die tägliche Vermessung in dem 50-m-Gitter nicht überflüssig. Nach Bedarf ist sogar an einen engeren Gitterabstand zu denken. Die nach dem Teilgutachten A verlangten Luftbildaufnahmen sollen die ständigen Kontrollen der Vorspülung unterstützen.

Auf vorübergehend mögliche Wasser- und Strandverschmutzungen ist bereits im Abschnitt 3.2 hingewiesen worden.

5.63 Überlegungen zur Formgebung des Sandhöftes

Wenn es bei günstigen Wetterlagen gelingt, die ungefähr 400 m Entfernung von der Ufermauer bis zum Riff mit einem Sandkörper zu durchdämmen, der bei etwa 100 m Breite bei MThw eine Kronenhöhe von NN + 2,0 m aufweist, ist die schon erwähnte Erhöhung auf etwa NN + 3,0 m in der Achse anzustreben, um diesen Sandkörper auch bei Sturmfluten wellenhydraulisch wirksam zu machen. An der Ufermauer sollte die Kronenhöhe wenigstens NN + 3,5 m, besser NN + 4,0 m betragen, wobei die Neigung der Böschung bis auf NN + 3,0 m hinunter wenigstens 1 : 50 betragen sollte. Möglicherweise bringt eine Abböschung der Kronenhöhe von NN + 3,0 m vor der Ufermauer bis auf NN + 2,0 m am Kopf der Sandbuhne auf dem Riff hydraulische Vorteile. Dann kann auf der Krone der Sandbuhne bei schweren Sturmfluten eine Schwallbrecherbrandung entstehen, die bei starker Wasser-Luft-Wechselwirkung eine nur geringe Wasser-Sohle-Wechselwirkung hat. Dazu liegen jedoch genauere Forschungsergebnisse noch nicht vor.

Am Riff würde die seeseitige Böschung des Bühnenkopfes in den seeseitigen Hang des Riffes übergehen. Welche Brandungsform auftritt und welche abtragenden Wirkungen entstehen, kann z. Z. noch nicht vorausgesagt werden. Immerhin verdient es Beachtung, daß sandige Wattflächen unter schwerer Brandung nicht nur stabil bleiben, sondern sogar durch diese Brandung erzeugt werden. Vielleicht erweist es sich als nützlich, den Kopf der Sandbuhne sogar etwas höher oder breiter als deren Querschnitt in der Rinne auszuführen. Das sind jedoch Fragen, die nur durch den Vorspülversuch selbst zu klären sind.

Wenn die Sandbuhne erstellt ist und es sich abzeichnet, ob und in welcher Zeit eine natürliche Umbildung in ein Sandhöft eintritt (Abb. 12) und welche Stabilität diesem zuzumessen ist, so kann darüber entschieden werden, wo und in welchem Maße eine unmittelbare Vorspülung vor den Längswerken als Fußsicherung notwendig ist.

6. Schlußbetrachtung

Ausgehend von den natürlichen Gegebenheiten am Strand und Vorstrand von Sylt und unter Berücksichtigung der andernorts gewonnenen Erfahrungen mit Strandvorspülungen ist hier ein Vorschlag für die Sandvorspülung vor Westerland entwickelt worden, von dem eine optimale Wirkung erwartet werden kann. Durch die Spülung eines Sandlagers in Form einer

Sandbuhne soll erreicht werden, daß über die künstliche Sandzufuhr hinaus Sandmengen aus dem natürlichen Sandtransport aufgefangen und am Strand abgelagert werden.

Die erwartete Umbildung der Sandbuhne in ein Sandhöft durch die Brandungskräfte und der daraus resultierende uferparallele Transport des erodierten Sandes soll die angrenzenden Strandstrecken mit Sand versorgen, um auch dort eine genügende Eindeckung der Inselfschutzwerte mit Sand zu erreichen. Diese punktförmige Vorspülung wird als das mengenmäßig wirksamste und damit wirtschaftlichste Verfahren angesehen, um durch künstliche Sandzufuhr dem natürlichen Sandverlust zu begegnen.

Sollte sich während der Vorspülung herausstellen, daß der Aufbau eines Sandhöftes in den geplanten Abmessungen nicht möglich ist, so kann das Vorspülverfahren umgestellt und das Sandmaterial unmittelbar in die unter Sandmangel leidenden Bühnenfelder eingespült werden, wobei dann jedoch nicht erwartet werden kann, daß Zusatzsand aus dem natürlichen Transport aufgefangen wird.

Die im Teilgutachten A „Untersuchungs- und Meßtechnik“ vorgeschlagenen Messungen und Beobachtungen, die nach den Planungen der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Schleswig-Holstein im vollen Umfange ausgeführt werden sollen, geben die Möglichkeit, während der Vorspülung bei ständiger Beratung durch die Gutachtergruppe im Teilgutachten C „Steuerung der Einspültechnik“ den Einspülvorgang – wenn erforderlich – abzuändern. Dann können auch die Fragen erörtert werden, die in diesem Teilgutachten wegen fehlender Erfahrungen noch offenbleiben müssen.

Schriftenverzeichnis

- Arbeitsausschuß Uferneimfassungen: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Uferneimfassungen“, 4. Auflage 1970.
- Beach Erosion Bulletin: Beach Erosion Bulletin, Vol. 8, Nr. 3, 1. 7. 1954.
- Beach Erosion Board Mem. 42: A Study of Sand Movement at South Lake Worth Inlet, Florida. Beach Erosion Board Technical Memorandum 42, Okt. 1953.
- Beach Erosion Control Doc. 722: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 13. 2. 1947 Palm Beach, Florida, House Document 722, 80. Congress, 2. Session.
- Beach Erosion Control Doc. 682: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 8. 3. 1948, Harrison County, Mississippi; House Document 682, 80. Congress, 2. Session.
- Beach Erosion Control Doc. 538: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 30. 1. 1950; Atlantic City, New Jersey; House Document 538, 81. Congress, 2. Session.
- Beach Erosion Control Doc. 203: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 1952, New Howen, Harbor-Housatonic River, Connecticut; House Document 203, 83. Congress, 1. Session.
- Beach Erosion Control Doc. 277: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 5. 6. 1952, Appendix II-Coast of California, Point Mugu to San Pedro Breakwater; House Document 277, 83. Congress, 2. Session.
- Beach Erosion Control Doc. 186: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 22. 8. 1952, Virginia Beach, Virginia; House Document 186, 83. Congress, 1. Session.
- Beach Erosion Control Doc. 349: U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Control Study, 3. 11. 1953, Auaheim Bay Harbor, California; House Document 349, 83. Congress, 2. Session.
- Civil Engineering: Civil Engineering, Juli 1948, Vol. 18, No. 7, Los Angeles; 41 000 000 Hyperion Project, Ends Beach Contamination.
- CORDES: Aufbau und Bildungsbedingungen der Schwermineralseifen bei Skagen (Dänemark), Meyniana, Bd. 16, 1966:
- DIEZT: Geologische Karte von Deutschland 1 : 25 000, Blätter Sylt-Nord und Sylt-Süd mit Erläuterungen. Kiel 1952.

- EURATOM: Entwicklung und Untersuchung eines radioaktiven Indikatorverfahrens zur Messung der Kinetik, der Erosion und des Sandtransportes an sandigen Brandungsküsten. EUR 2167.d, 1965.
- FÜHRBÖTER: Zur Mechanik der Strömungsriffel. Mitteilungen des Franzius-Institutes, H. 29, 1967.
- HALL u. a.: HALL, M. ASCE, WATTS, J. M. ASCE. „Beach rehabilitation by Fill and nourishment.“ Wiedergewinnung und Erhaltung eines Strandes durch Auffüllung und künstliche Sandzufuhr, 1955.
- HENSEN: Über den Wert der Kenntnis von der wahren Gestalt einer Flußsohle. Die Deutsche Wasserwirtschaft H. 1, 1948/49.
- HOFFMANN: Bericht über die Bohrungen vor der Westküste der Insel Sylt im Sommer 1969. Kiel 1970.
- KÖSTER, R.: Dreidimensionale Kartierung des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln, in: Sandbewegungen im Küstenraum, S. 25-33, Wiesbaden 1971.
- KRAATZ: Strand- und Küstenveränderungen an der Westküste Sylts und deren Beeinflussung durch technische Maßnahmen. Bericht 21/66 der Vorarbeitenstelle Nordfriesland, MBA Husum, 1966.
- KRAMER: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1957, Band IX.
- KRAMER: Die Strandaufspülung Norderney 1951-1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jahrgang 7, 1958/1959.
- LAMPRECHT: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste von Sylt. Mitteilungen des Franzius-Institutes, H. 8, 1955.
- LAMPRECHT: Uferveränderungen und Küstenschutz auf Sylt. Die Küste, Jahrgang 6, H. 2, 1957.
- LUCK: Bericht über die zweite Strandaufspülung am Weststrand von Norderney. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1968, Band XX.
- LÜDERS: Entstehung und Aufbau von Großrücken mit Schillbedeckung in Flut- bzw. Ebbitrictern der Außenjade. Senckenbergiana, H. 3, 1929.
- MBA Husum: Entwurf für die Strandaufspülung vor Westerland. Husum, den 12. 10. 1967.
- MBA Husum: Bericht über die Strand- und Vorstrandverhältnisse im Bereich der Küstenschutzwerke vor Westerland. Husum, den 15. 1. 1969.
- NACHTIGALL: Über die Unterwassermorphologie vor Rantum und Kampen auf Sylt. Meyniana, Bd. 18, 1968.
- REINEKE: Die Konzeption des technischen Küstenschutzes an der Ostsee zwischen Trave und Swine. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, H. 4, 1966:
- ZENKOVIC: Processes of Coastal Development. Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1967.

Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog

Von K. LÜDERS, A. FÜHRBÖTER und W. RODLOFF

Summary

In the North West of the Island Langeoog before the Eastern North Sea coast of Germany, since 1940 heavy beach and dune erosion was observed, with strong acceleration after 1968. The loss of the whole barrier dune had to be feared at last.

By an expert team of the KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE (Coastal Board North and Baltic Sea) the different components of the erosion process were analysed, also in connection with the Coastal inlet between the islands. No longterm morphological trend in the behaviour of the coast line development could be detected, however.

The reason of the strong erosion after 1960 was explained by a local change in the surf regime where the normal spilling breaking was approaching the dunes and causes reflection at the seaward slopes of the dunes which becoming formed into cliffs. An artificial beach nourishment together with a framework of sandfilled plastic hoses was recommended; the experiences till today are verificating this concept because no further dune erosion occurred in the winter 1971/72.

Inhalt

I. Vorbemerkung	65
II. Über die Schutzwürdigkeit des Pirolatales	66
III. Zur Mechanik des Dünenabbruchs	67
IV. Morphologische Untersuchungen	69
A. Dünen- und Strandentwicklung	69
B. Seegat Accumer Ee, Hauptstromrinne	70
C. Langeooger Balje, Wattgebiet	75
D. Barre des Seegats Accumer Ee, Platenwanderung, Platenanlandung	81
E. Vorstrand, Strand, Randdüne	85
V. Bauliche Sicherung des Pirolatales	92
A. Vorschläge des Wasser- und Schiffsamtes Norden	92
B. Empfehlungen der Gutachter	95
C. Ablauf und Stand der Bauarbeiten bis März 1972	99
VI. Beurteilungen und Empfehlungen	102
A. Beurteilung der bisherigen Wirkung des Schlauchlängswerkes vor dem Pirolatal	102
B. Beurteilung der künftigen Dünen- und Strandentwicklung	107
C. Empfehlungen für weitere Sicherungsvorkehrungen	109
VII. Zusammenfassung	109
VIII. Schriftenverzeichnis	110

Anschriften der Verfasser:

FÜHRBÖTER, ALFRED, Dr.-Ing., o. Professor an der TU Braunschweig, 33 Braunschweig, Spielmannstr. 12a

LÜDERS, KARL, Dr.-Ing., Regierungsdirektor a. D., 3 Hannover, Menschingstr. 7

RODLOFF, WALTER, Dr.-Ing., Regierungsbaudirektor a. D., 23 Kronshagen/Kiel, Birkenweg 8

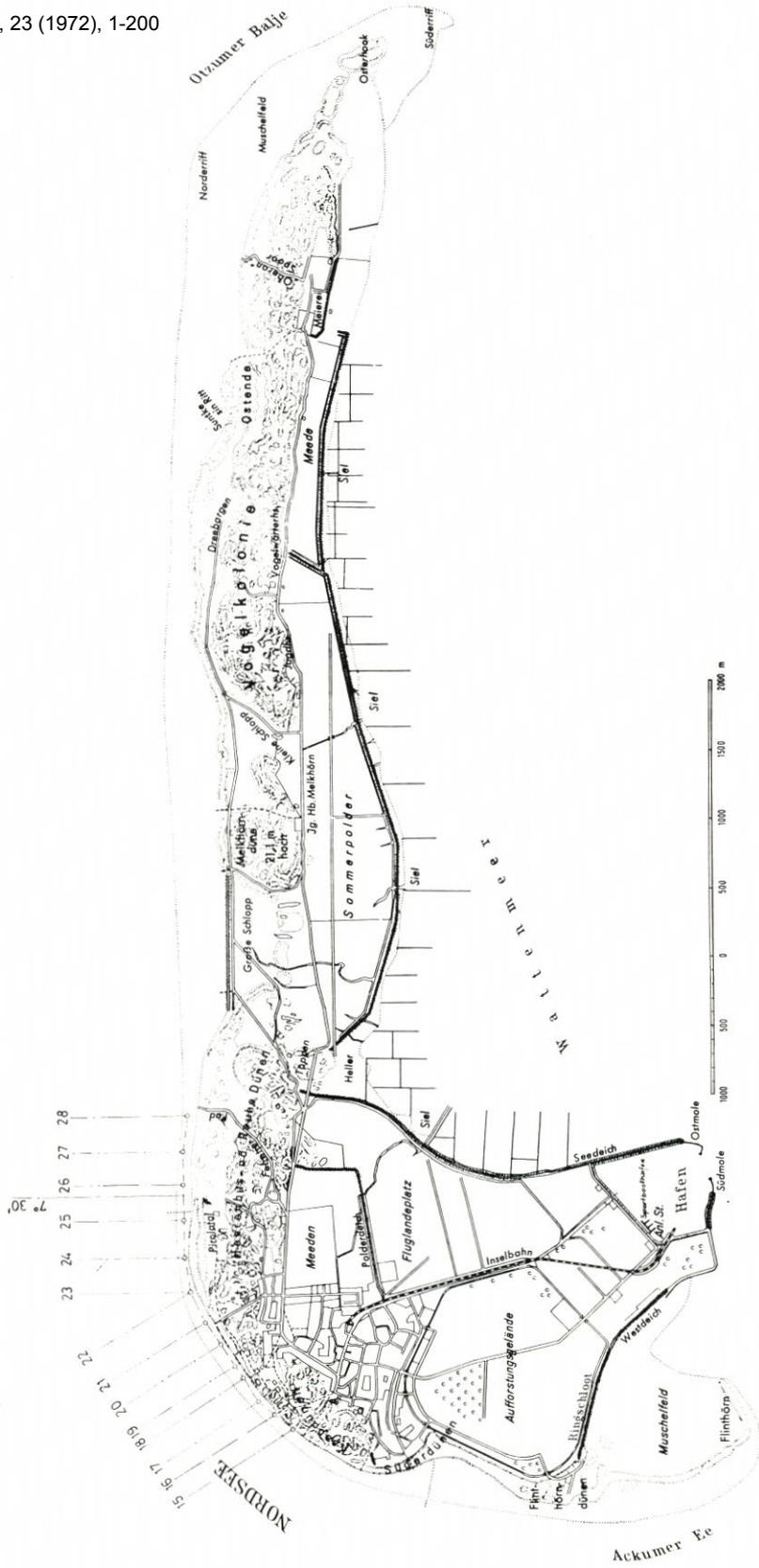


Abb. 1. Langeoog, Übersichtsplan (Entwurf WSA Norden)

I. Vorbemerkung

Die zur ostfriesischen Inselkette gehörende Insel Langeoog wird im Westen durch das Seegat Accumer Ee und im Osten durch die Otzumer Balje begrenzt (Abb. 1). Die Insel ist bei mittlerem Tidehochwasser (MThw) 19,7 km² groß, rund 11 km lang und im Mittel 1,5 km breit. Massive Strand- und Dünenchutzwerke waren wegen der seit langer Zeit ausgeglichenen Sandbilanz (Abbruch, Anwachs) bisher nicht erforderlich gewesen.

Etwa seit 1940 sind im Bereich des Pirolatales, einem im Schutz der hohen Randdüne nordöstlich von der Ortslage Langeoog gelegenen Dünentales, Strand- und Dünenverluste eingetreten, die über die normalen Veränderungen früherer Zeiten hinausgingen. Seit 1968 verstärkten sich die Abbrüche und erweiterten sich auch in westlicher Richtung. Im Winter 1969/1970 entstand am seeseitigen Fuß der Randdüne eine bis 3 m hohe Steilkante (Abb. 2).

In der Folgezeit nahm der Strand- und Dünenabbruch Ausmaße an, die befürchten ließen, daß mit dem gänzlichen Verlust der Randdüne und damit mit der Überflutung des Pirolatales bei Sturmflut gerechnet werden mußte, wenn nicht schnellstens Sicherungsvorkehrungen getroffen würden. Vom Wasser- und Schiffsamt (WSA) Norden waren Untersuchungsberichte und verschiedene Bauentwürfe zur Sicherung der Insel Langeoog (23, 24, 25) erarbeitet worden.



Abb. 2.
Steilkante der Randdüne vor dem Pirolatal auf Langeoog.
(Photo: WSA Norden, 28. 3. 1970)

Auf Veranlassung des Niedersächsischen Ministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten wurde der Küstenausschuß Nord- und Ostsee gebeten, eine Gutachtergruppe für die Ausarbeitung einer Stellungnahme zu den Bauentwürfen einzusetzen. Der vom Küstenausschuß gebildeten Gutachtergruppe gehörten an:

o. Professor Dr.-Ing. A. FÜHRBÖTER, Braunschweig, Regierungsdirektor a. D. Dr.-Ing. K. LÜDERS, Hannover (zugleich Sprecher der Gutachtergruppe), und Regierungsbaudirektor a. D. Dr.-Ing. W. RODLOFF, Kiel.

Das Gutachten wurde in zwei Teilen erstattet. Wegen der Gefahrenlage, in der sich seit 1970 die Randdüne vor dem Pirolatal befand, sollte die gutachtliche Beurteilung eines sofort

auszuführenden Schutzwerkes für die Randdüne vorrangig erstellt werden, damit diese Arbeiten noch im Laufe des Jahres 1971 ausgeführt werden konnten. Diese Beurteilung ist in der Hauptsache im 1. Teil des Gutachtens enthalten, der im April 1971 abgeschlossen wurde. Im 2. Teil, der im Juli 1972 fertiggestellt wurde, sind die grundlegenden Untersuchungen über das Naturgeschehen im Seegatgebiet der Accumer Ee behandelt, die Aufschluß über die Frage geben, ob in den letzten Jahrzehnten morphologische oder hydrodynamische Änderungen im Ablauf der Sandzuwanderung nach der Insel Langeoog erkennbar sind, die für die seit 1940 bereits zweimal eingetretenen starken Strand- und Dünenabbrüche im Nordwesten der Insel verantwortlich zu machen sind. Außerdem wurden die bisherige Wirkung des im 1. Teil des Gutachtens vorgeschlagenen und im Jahre 1971 ausgeführten neuartigen Sicherungswerkes vor der Randdüne des Pirolatales sowie die künftige Entwicklung des Nordwest-Strandes von Langeoog gutachtlich beurteilt.

Nachstehend sind die technischen Ausführungen der beiden Gutachtenteile zusammengefaßt dargestellt.

II. Über die Schutzwürdigkeit des Pirolatales

Wie die Untersuchungen des WSA Norden (23) zeigen, befindet sich der Dünengürtel nördlich des Pirolatales in den letzten Jahren in beschleunigtem Abbruch. Es hängt vor allem von den Sturmflut-Wetterlagen der nächsten Jahre ab, mit welcher Geschwindigkeit der Abbruch fortschreiten wird. Wenn die Tendenz der vergangenen Jahre anhält, ist in etwa 5 Jahren damit zu rechnen, daß die Randdüne bis auf Reste von der Brandung aufgearbeitet sein wird. Das Pirolatal läge dann offen zur See, seine tiefsten Stellen würden bei sehr hohen Sturmfluten (über NN + 3 m) überflutet werden. Die Größe der Überschwemmungsfläche ist für den Ruhespiegel NN + 4,0 m zu 27 ha ermittelt worden. Die in den Herrenhusdünen vorhandenen Trinkwasserbrunnen würden dadurch unbrauchbar werden, sonst aber befinden sich in dem betroffenen Gebiet keinerlei Bauten oder Anlagen, die unmittelbar bedroht sein würden. Auch für den Ort Langeoog ergäbe sich selbst dann noch keine Gefahr, wenn sich der hochwasserfreie Strand noch weiter in das Gebiet des heutigen Pirolatales verlagerte. Immerhin wurde der Ort zu einer Zeit zum Seebad, als das jetzige Pirolatal noch flacher trockener Strand war. Erst 1891 bildeten sich die ersten Vordünen auf diesem Gebiet.

Würde die jetzige Randdüne vor dem Pirolatal aufgegeben werden, so ließe sich der Inselchutz durch sturmflutsichere Sanddämme in geziemender Entfernung vom Strande mit geringem Aufwand herstellen, denn diese Dämme brauchten nur gegen Überflutung aber nicht gegen Wellenbelastung bemessen zu werden.

Mit diesem Verfahren wäre der Vorteil verbunden, daß der jetzt vorhandene Strand im natürlichen Zustand bliebe; seine landseitige Begrenzung würde dann ein flaches Kliff bilden. Es könnte sogar eintreten, daß hier bei geeigneten Wetterlagen wieder Dünen entstehen, während die jetzt vorhandene steile und hohe Abbruchswand eine neue Dünenbildung erschwert.

Ob und wann die gegenwärtig zurückweichende Strandlinie zum Stehen kommt oder ob, bei vermehrter Sandzufuhr vom Riffgebiet her, der Abbruchprozeß von selbst wieder rückgängig wird, kann heute noch nicht beantwortet werden. Die Auswertung der historischen Karten läßt es aber unwahrscheinlich erscheinen, daß das gesamte Gebiet des Pirolatales zum tidebeeinflussten Gebiet wird und daß dann die Herrenhusdünen gefährdet werden (Abb. 1).

Es darf das Pirolatal in seiner jetzigen Gestalt nicht allein von kommerziellen Wertvorstellungen her gesehen werden. Es stellt mit seiner windgeschützten Lage in unmittelbarer Orts- und Seenähe und mit seinem reichhaltigen Pflanzenbewuchs einen Landschaftsteil der Insel

von hohem schutzwürdigem Umweltwert dar. Damit verändert sich die Aufgabe. Ein bebautes Pirolatal könnte nach seinem finanziellen Wert gemessen und die Schutzmaßnahmen diesem Wert angepaßt bzw. unterlassen werden. Hier aber geht es um die Aufgabe, ein Erholungsgebiet zu erhalten.

Daraus folgt, daß die noch vorhandenen Randdünen den Abbruchkräften entzogen werden müssen, und zwar durch Maßnahmen, die von der Seeseite auszugehen haben. Eine Anschüttung der Dünen von der Landseite her würde das Landschaftsbild stören und im übrigen so gut wie nutzlos sein, weil dem fortbestehenden Abbruch immer neue Sandmassen entgegen gestellt werden müßten.

Es geht hier darum, in irgendeiner Weise das Kräftespiel am Fuß des Kliffs, d. h. in erster Linie die Auswirkungen der Brandung, so zu beeinflussen, daß der weitere Abbruch mit Sicherheit aufgehalten wird. Dabei sollte aber auch daran gedacht werden, daß der heute noch vorhandene Strand vor den Dünen, der wegen der Ortsnähe ebenfalls als Erholungsgebiet anzusehen ist, erhalten bleibt.

III. Zur Mechanik des Dünenabbruchs

Es muß zwischen „normaler Strandbrandung“ und „Kliffbrandung“ unterschieden werden.

Mit Strandbrandung ist eine Brandung gemeint, bei der nach dem Brechen der Welle die Rest-Energie in einem Auflaufschwall verbleibt, der als Wellenauflauf seine kinetische in potentielle Energie umsetzt, bis die Bewegung auf der Böschung zum Stillstand kommt und der Rücklauf des Wassers einsetzt. Ein Teil der Energie wird dann wieder als kinetische Energie reflektiert, während die restliche Energie durch Vermischungsturbulenz, Sohlereibung und Versickerung umgewandelt wird.

In der eigentlichen Brecherzone wird zwar der Großteil der ankommenden Wellenenergie umgewandelt, hier liegt aber die Sohle noch unter einem schützenden Wasserpolster, während in der Wellenauflaufzone hohe Schubspannungsgeschwindigkeiten erreicht werden. Die damit verbundenen Sandbewegungen halten sich im Auf- und Abwärtstransport etwa das Gleichgewicht, bei schrägem Auf Lauf tritt allerdings eine Längsversetzung hinzu. Immer aber verteilt sich die Rest-Energie auf die verhältnismäßig große Fläche, die von dem Wellenauflauf beansprucht wird.

Ganz anders werden die Verhältnisse, wenn der Auflaufschwall durch ein Kliff plötzlich gebremst wird. Es tritt hier eine Reflexion auf, bei der auf die Kliffwand nicht nur erhöhte Drücke ausgeübt werden, sondern bei der in der Zone zwischen der Brecherlinie und dem Kliff erheblich mehr Wellenenergie umgesetzt werden muß als bei der ungestörten Strandbrandung, bei der zur Energieumwandlung eine größere Fläche zur Verfügung steht. Höhere Turbulenz und damit ein höheres Transportvermögen sind die Folge. Bei schrägem Wellenangriff wird ein Teil der überschüssigen Energie in einen starken Längsstrom vor dem Kliff umgesetzt, der erhebliche Erosionen hervorruft.

Diese Konzentration der Energieumwandlung verstärkt sich um so mehr, je näher der Brechpunkt an den Kliffuß rückt.

Bei erhöhten Wasserständen kann es vorkommen, daß die Wellen unmittelbar am Kliffuß branden und mit Druckschlägen und Spritzwasser ihre ganze Energie unmittelbar am Kliff umsetzen. In diesem Falle erreicht die Erosion ihr Maximum.

Bei noch höheren Wasserständen dagegen kann es eintreten, daß die Wellen vor dem Kliff nicht mehr brechen, sondern daß sich vor dem Kliff eine stehende Welle (*Clapotis*) bildet. Hier wird dann die Wellenenergie nicht mehr in andere Energieformen umgesetzt, sondern seewärts

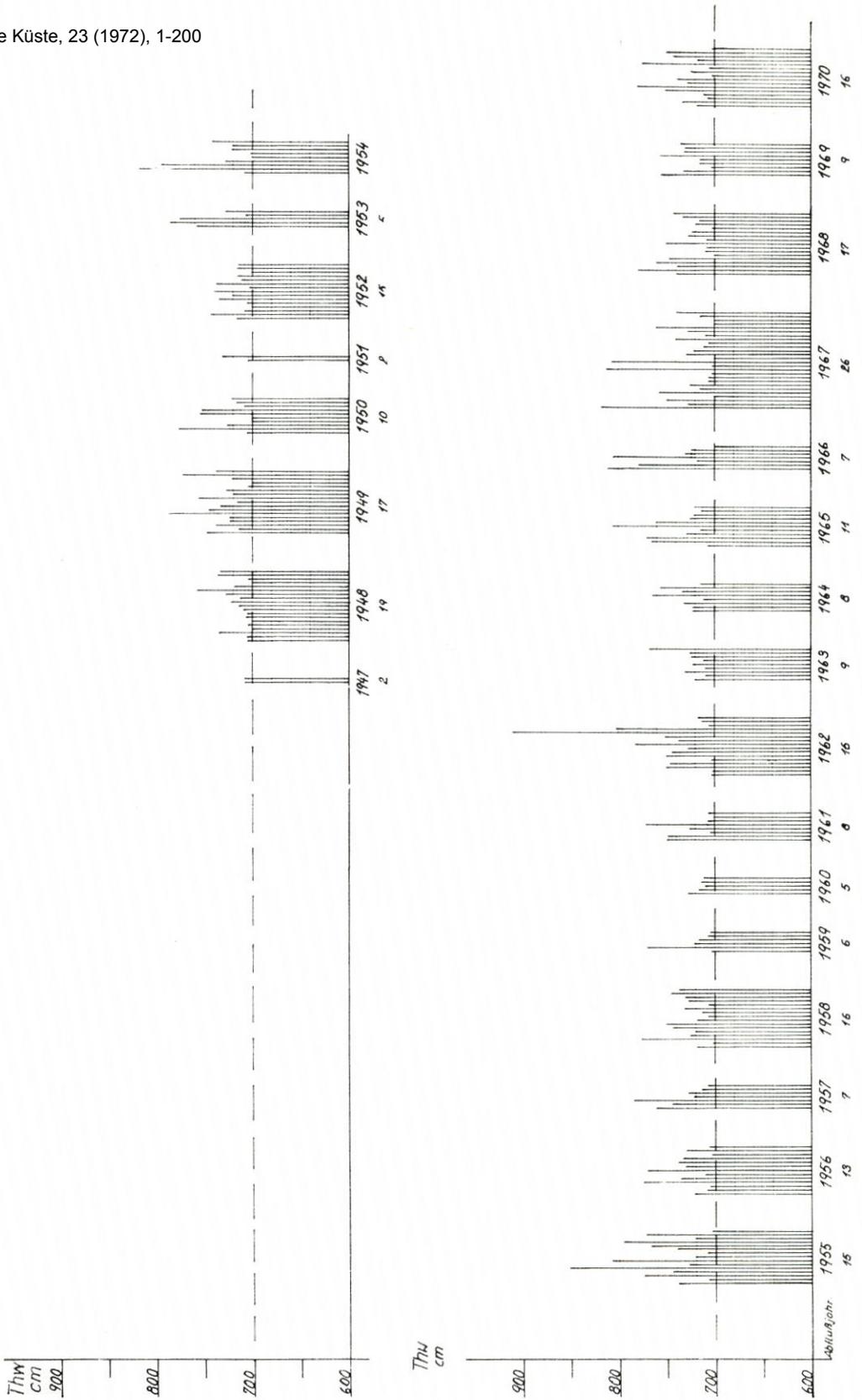


Abb. 3. Sturmflurstatistik (Thw \geq 700 cm) 1947/1970 am Pegel Norderney (Auswertung: WaWiAmt Aurich)

zurückgeworfen. Zwar treten auch hierbei starke Abbrüche am Kliff sowie in einer Zone von etwa einem Viertel der Wellenlänge vor dem Kliff auf, wo der erste Schwingungsknoten liegt, der mit hohen Orbitalgeschwindigkeiten verbunden ist, dennoch ist der Abbruch nicht so stark wie beim Brechen der Wellen am Kliff. So erklärt es sich, daß eine extrem hohe Sturmflut mit Vollreflexion an der Kliffwand nicht so abbruchwirksam ist wie eine Reihe mittlerer Sturmfluten, bei denen die Wellen unmittelbar am Kliff branden.

Wie aus der Zusammenstellung des Wasserwirtschaftsamtes Aurich auf Abbildung 3 hervorgeht, sind am Pegel Norderney, der annähernd auch die Verhältnisse für Langeoog wiedergibt, 68 Sturmfluten in den Jahren von 1967 bis 1970 mit Scheitelwasserständen von NN + 2,0 m und darüber verzeichnet worden. In dem gleichen Zeitraum von 1963 bis 1966 waren es dagegen nur 35 Sturmfluten. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die in den letzten Jahren festgestellte Beschleunigung des Abbruchs der Randdüne vor dem Pirolatal auch mit der erhöhten Häufigkeit mittlerer Sturmfluten zusammenhängt.

Auf jeden Fall ist aber – gleiche Seegangsverhältnisse vorausgesetzt – an einer Dünenkliffküste der strandparallele Sandtransport aus den genannten Gründen größer als bei einem Strand, auf dem die Wellen ungestört ausbranden können. Wenn erst einmal der erste Ansatz zu einer Kliffbildung vorhanden ist, wird der Abbruch stark beschleunigt.

Es ist die gleiche Erscheinung, die überall dort beobachtet wird, wo Längswerke den Wellenauflauf begrenzen; eine Strandabnahme findet selbst dort statt, wo die Vorstrandneigung unverändert bleibt. Die Strandabnahme vor dem Kliff hat aber wiederum zur Folge, daß höhere Wellen an das Kliff gelangen können, wodurch der Abbruch weiter verstärkt wird.

Abschließend ist zu bemerken, daß ein hohes und steiles Kliff auch bei trockenem Strand und geeigneter Windrichtung eine natürliche Regeneration der Düne vom Strand her erschwert, weil der Sand die hohe Wand nicht überwinden kann. Eine genügend flache Außenböschung, am besten mit Bewuchs, ist die günstigste Voraussetzung für den Anwachs.

IV. Morphologische Untersuchungen

A. Dünen- und Strandentwicklung

In den letzten 25 Jahren ist der Nordweststrand der Insel Langeoog zweimal von starken Abbruchserscheinungen betroffen worden. In den Jahren nach 1945 befand sich eine etwa 1 km lange Abbruchstrecke im Gebiet westlich des Langeooger Wasserturms (Abb. 4). Damals erreichte der Rückgang des Randdünenfußes in den 8 Jahren von 1947 bis 1955 bei Meßprofil 13 rund 150 m, d. s. im Jahresdurchschnitt fast 20 m (4). Die folgenden Jahre brachten dem Weststrand infolge Platananlandungen jedoch wieder so starke Sandzufuhren, daß sich die Dünen schon bald regenerierten; auf ein seinerzeit in Aussicht genommenes massives Dünendeckwerk konnte verzichtet werden.

Die zweite Abbruchphase entwickelte sich nach dem Jahr 1960 auf einer Länge von mehr als 2 km vor der Randdüne des Pirolatales im Bereich der Meßprofile 20 bis 28 mit allmählicher Ausdehnung nach Südwest bis zum Profil 15 (9, 23). In den Jahren 1968 bis 1970 verstärkten sich die Strand- und Dünenabbrüche ständig und verursachten einen Rückgang des Randdünenfußes in den Profilen 23 bis 27 (Abb. 4) von mehr als 13 m im Jahresdurchschnitt. Der größte Dünenverlust trat beim Profil 25 mit 21,5 m im Jahresmittel ein. Er war also noch etwas größer als der vorerwähnte Abbruch bei Profil 13 in den Jahren 1947/1955.

Solche von Zeit zu Zeit wiederkehrenden Abbruchs- und Anlandungsperioden werden maßgeblich von dem Naturgeschehen im Gebiet des westlich der Insel gelegenen Seegats ge-

steuert. Es erhebt sich, besonders im Hinblick auf die außergewöhnlich starken Abbrüche vor dem Pirolatal seit 1960, die Frage, ob im Gebiet der Accumer Ee in den letzten Jahrzehnten Veränderungen der bisherigen morphologischen und hydrologischen Verhältnisse aufgetreten oder zu erwarten sind, die sich zu einer dauernden Gefährdung des Westens der Insel Langeoog entwickeln könnten.

Der besorgniserregende starke und schnell zunehmende Abbruch der Randdüne vor dem Pirolatal war, wie im Abschnitt III ausgeführt ist, durch eine sich seit 1967/68 herausgebildete Kliffbrandung verursacht worden, die, wenn kein Schutzwerk an dieser Strandstrecke erstellt würde, in kurzer Zeit die völlige Zerstörung der Randdüne herbeiführen müßte. Um dieser

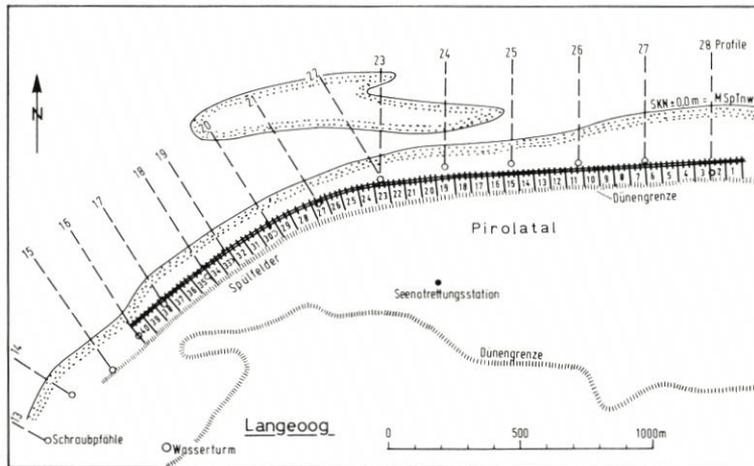


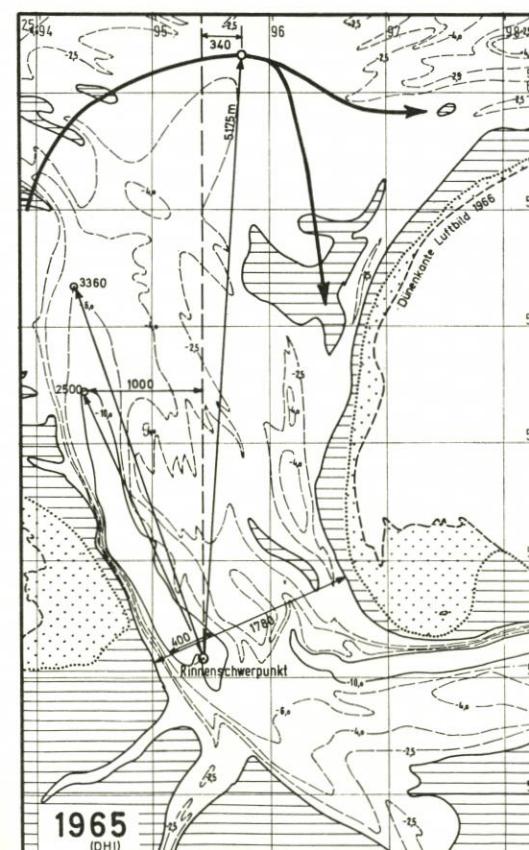
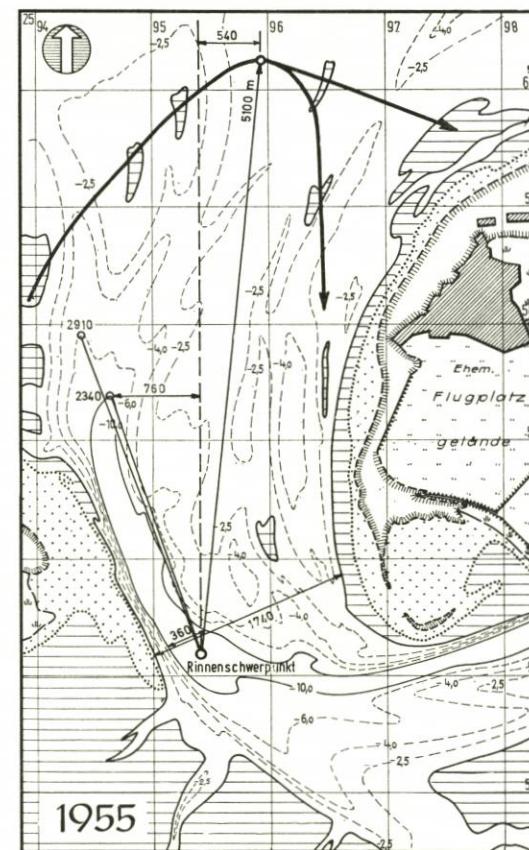
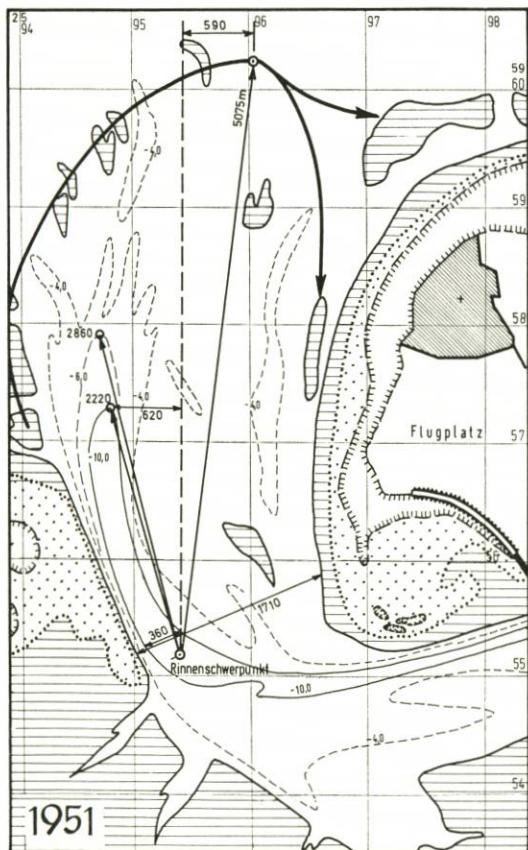
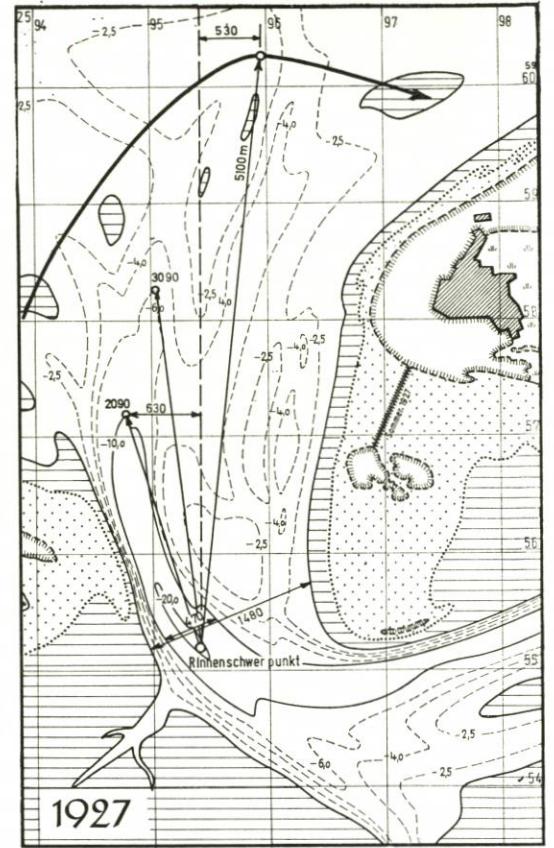
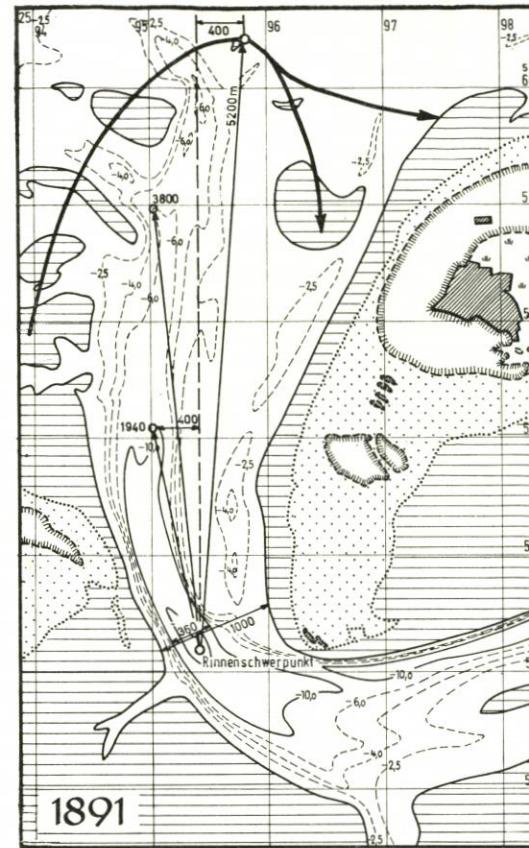
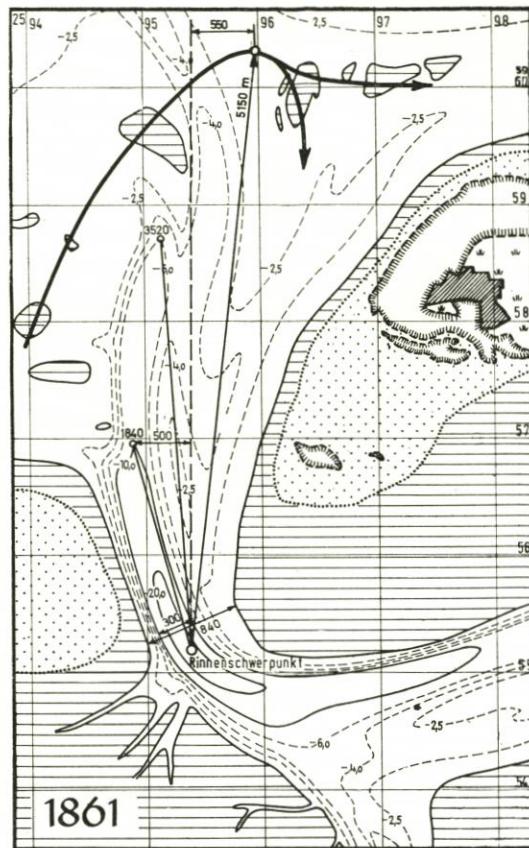
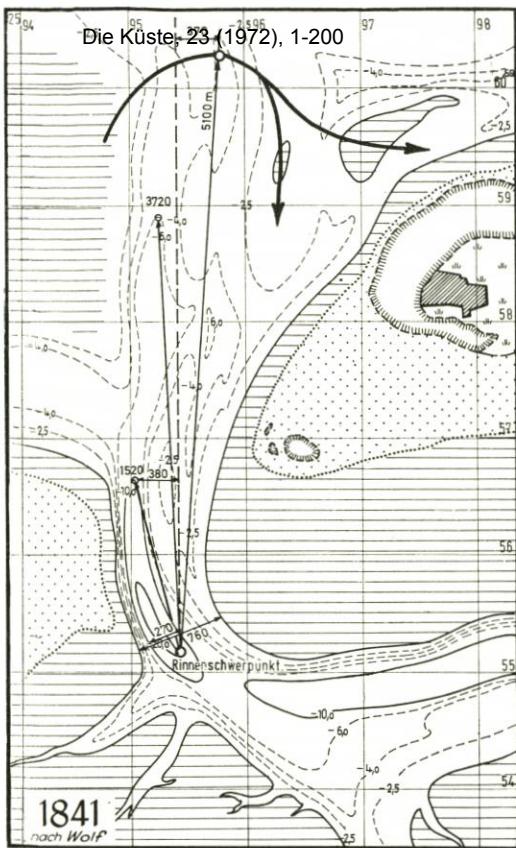
Abb. 4. Schlauchwerk auf dem Strand vor der Randdüne des Pirolatals auf Langeoog (Übersichtsplan)

Gefahr zu begegnen, wurde als „aktiver Küstenschutz“ der Bau eines Schlauchlängswerkes in 50 m Entfernung seawärts vom steilen Dünenfuß in Verbindung mit einer Aufhöhung der zwischen der Düne und dem Längswerk liegenden Strandfläche durch Sandaufspülung empfohlen. Hierdurch sollte künstlich ein naturähnlicher Strand vor der Randdüne gewonnen werden, auf dem auch bei erhöhten Tiden die Wellen ausbranden können (Strandbrandung), ohne den Dünenfuß zu erreichen oder ihn wesentlich anzugreifen. Die Sandaufspülungen sollten, falls notwendig, von Zeit zu Zeit wiederholt werden, bis die Sandzufuhr von Natur aus wieder „gesunde“ Strand- und Dünenverhältnisse herbeigeführt hat. Ob sich die Erwartung einer Regeneration des Strandes und der Dünen erfüllen oder ob infolge einer Veränderung der die Sandzufuhr verursachenden Kräfte der Strand- und Dünenabbruch vor dem Pirolatal fortbestehen wird, wurde in einer Sonderuntersuchung geprüft, deren Ergebnisse nachstehend nur zusammengefaßt dargestellt werden können. Ein ausführlicherer Bericht hierüber soll in Kürze noch veröffentlicht werden (18).

B. Seegat Accumer Ee, Hauptstromrinne

1. Seegat Accumer Ee

Wie die bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreichenden Vermessungen der Accumer Ee zeigen und wie aus Veröffentlichungen und Untersuchungsberichten bekannt ist, weist die



Erklärung:

- | | | | |
|--|------------------------------|--|--------|
| | Ort | | Heller |
| | Dünen | | Deiche |
| | hochwasserfreier Strand | | |
| | Strand zwischen MTnW u. MThw | | |

Tiefenlinien: Die Tiefen beziehen sich auf SKN±0,0m
=NN-1,5m

- | | | |
|--|----------------------|--------------------|
| | +2,5 m (MThw) | Maßstab
 |
| | ±0,0 m (MSPnW) | |
| | -2,5 m -4,0 m -6,0 m | |
| | -10,0 m u. -20,0 m | |

Abb. 5. Entwicklung des Westteils von Langeoog: Vergleich der Tiefenpläne von 1841 bis 1965 (Entwurf: Forschungsstelle Norderney)

Accumer Ee eine für die Seegaten der ostfriesischen Inselkette ungewöhnliche Lagebeständigkeit auf. Nach den heutigen Erkenntnissen ist diese Erscheinung auf das Größenverhältnis der Wattgebiete südöstlich und südwestlich des Seegats, auf die Länge der Insel Langeoog und die Staffelung der ostfriesischen Inselkette zurückzuführen (11).

Infolge der seit Jahrhunderten bestehenden stabilen Lage der Accumer Ee benötigte die Insel Langeoog zur Sicherung ihres Bestandes bisher keine massiven Dünen- und Strandschutzwerke, wengleich auch hier, wie auf den anderen ostfriesischen Inseln, in mehrjährigen Abständen Dünen- und Strandverluste auftraten, die sich jedoch von Natur bald ausglich, wenn der Insel durch Platananlandungen wieder größere Sandmengen zugeführt wurden. In solchen Zeiten entstanden auf Langeoog nicht selten sogar beachtliche Gewinne an Strand- und Dünenflächen.

Daß sich die Accumer Ee, insbesondere seit der Mitte des 19. Jahrhunderts, trotz ihrer Lagebeständigkeit verändert, vor allem verbreitert hat, läßt schon ein Vergleich der in Abbildung 5 zusammengestellten Vermessungspläne des Seegats eindeutig erkennen. Besonders augenfällig tritt die Entstehung des Flinthörn-Gebietes am Südwestende der Insel Langeoog und dessen weiteres Anwachsen nach Süden in Verbindung mit einem Zurückweichen nach Osten in Erscheinung. Hierdurch hat das 1841 noch verhältnismäßig enge Seegat eine fortlaufende beträchtliche Erweiterung erfahren.

Die Breitenentwicklung an der engsten Stelle des Seegats zwischen den SKN ± 0 m Tiefenlinien auf den westlichen (Baltrumer) und der östlichen (Langeooger) Seite von 1841 bis 1965 ist in die Vermessungspläne (Abb. 5) zahlenmäßig eingetragen und in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die engste Stelle des Seegats hatte im Jahre 1941 eine Breite von 760 m. Bis 1890 war die Breitenzunahme stetig, jedoch mit 4 bis 5 m/Jahr verhältnismäßig gering. Dann verstärkte sie sich zunehmend und erreichte zwischen 1910 und 1920 mit 15 m/Jahr ihr Maximum. Danach schwächte sie sich sehr schnell ab; seit 1960 liegt sie auf 3 m/Jahr.

Der Verlauf der Ganglinie läßt für die nahe Zukunft eine wesentliche Breitenzunahme des Seegates nicht erwarten. Es könnte u. U. ein Stillstand oder sogar eine rückläufige Entwicklung eintreten, wenn der Flinthörnhooken infolge stärkerer Sandzufuhren wieder nach Westen anwachsen sollte.

Infolge der außergewöhnlich starken Breitenzunahme der Accumer Ee von 1841 (760 m) bis 1965 (1780 m) um 1020 m = rd. 135 % ist die Möglichkeit einer Veränderung der Stromkraftverhältnisse des Seegats und damit einer Beeinflussung der Sandzufuhr nach der Insel

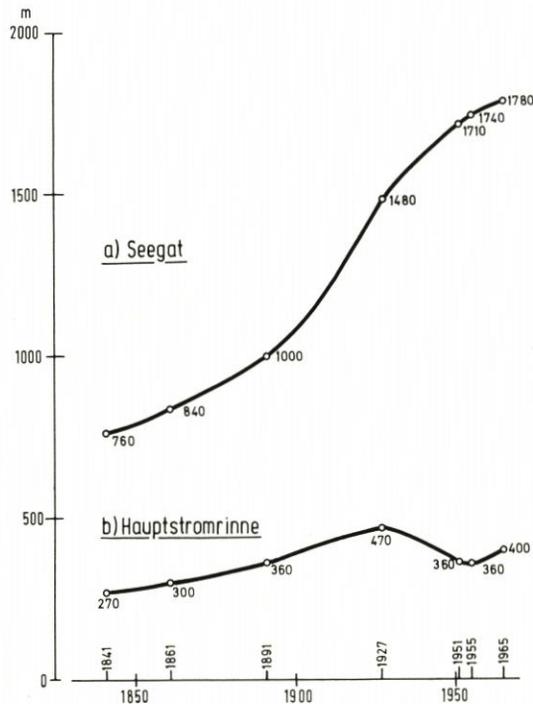


Abb. 6. Breitenentwicklung der Accumer Ee und der Hauptstromrinne (1841 bis 1965) an der engsten Stelle des Seegats (Lage des Profils s. Abb. 5)

Langeoog nicht auszuschließen. Nach allgemeiner Auffassung besteht zwischen der Seegatbreite und der Versorgung der östlich vom Seegat liegenden Insel mit Sand folgender Zusammenhang:

a) Breiterwerdendes Seegat

Schwächung der Ebbeströmung und damit der Hauptstromrinne des Seegats.
Schwächung der Stromkraftverhältnisse des Seegats und dadurch Abflachung des Platingürtels.
Verlagerung des Platananlandegebietes auf der Insel nach Westen.
Im Nordwesten der Insel allgemein gesunde Strand- und Dünenverhältnisse.

b) Schmälerwerdendes Seegat

Verstärkung der Ebbeströmung und damit Vergrößerung der Hauptstromrinne des Seegats.
Zunahme der Stromkraftverhältnisse des Seegats und dadurch seewärtige Verlagerung des Platingürtels.
Verlagerung des Platananlandegebietes auf der Insel nach Osten.
Strand und Dünen im Nordwesten der Insel leiden unter Sandmangel.

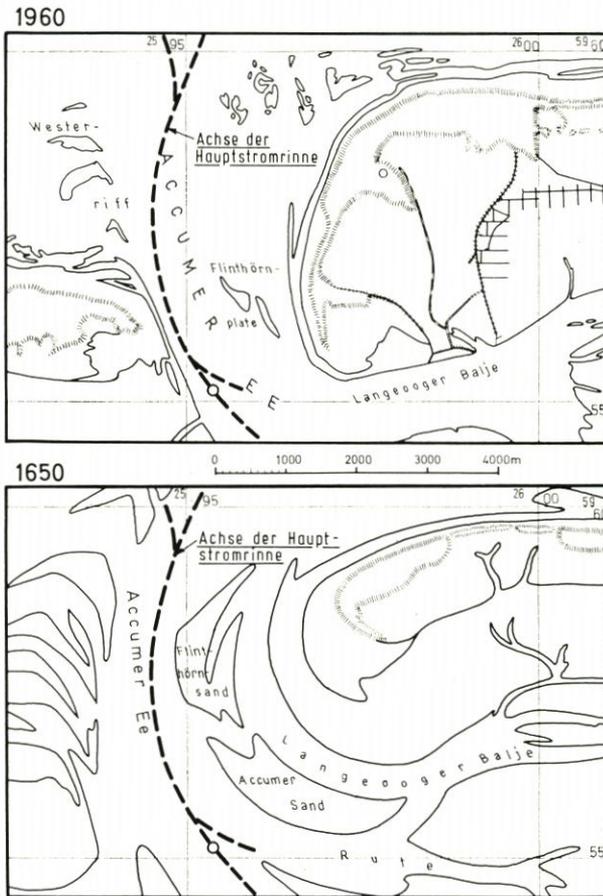


Abb. 7. Lage der Achse der Hauptstromrinne in der Accumer Ee 1960 und 1965

Inwieweit diese Folgenkette auf die Verhältnisse in der Accumer Ee zutrifft, ist in der oben erwähnten Untersuchung (18) mit den nachstehend beschriebenen Ergebnissen geprüft worden.

2. Hauptstromrinne

Lage und Form der Hauptstromrinne werden in erster Linie vom strömenden Wasser bestimmt. Wenn also die festgestellte starke Verbreiterung des Seegats Accumer Ee eine wesentliche Herabsetzung der Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge hat, dann müßte sich diese in der Lage des Bettes der Hauptstromrinne, in ihrer Breiten- und Längenentwicklung bemerkbar machen.

Zur Lage des Rinnenbettes: Bereits 1929 haben GAYE/WALTHER (22) festgestellt, daß die Hauptrinne der Accumer Ee ihre nach Norden gerichtete Lage seit langer Zeit nahezu unverändert beibehalten hat. Dies ist auch in späteren Veröffentlichungen und Untersuchungsberichten immer wieder bestätigt worden, so z. B. von BACKHAUS (1), KRAMER/HOMEIER (4), HOMEIER (8) und HOMEIER/LUCK (9).

Neben der Lagebeständigkeit der Achse der Hauptstromrinne gibt es nach den Untersuchungen von KRAMER/HOMEIER (4) noch einen anderen ausgeprägt lagebeständigen Punkt in dieser Seegatrinne, den sogen. „Rinnenschwerpunkt“. Dessen unveränderte Lage wurde für Zeit von 1840 bis 1956 nachgewiesen. Wie die Vermessungspläne ausweisen, sind auch in den Jahren nach 1956 nennenswerte Veränderungen der Lage der Achse der Hauptstromrinne und des Rinnenschwerpunktes nicht eingetreten.

Die beiden morphologischen Festpunkte (Lagebeständigkeit des Bettes und des Rinnenschwerpunktes der Hauptstromrinne) geben eine Handhabe für die Nachprüfung, ob die heutige Lage der Hauptstromrinne schon früher, also vor 1840, in ähnlicher Form bestanden hat. Für diese Betrachtung lassen sich die von der Forschungsstelle Norderney bearbeiteten „Topographische Karte 1 : 25 000“ (7) und „Historische Karte“ (8) verwenden. Die Achse der Hauptstromrinne nach der in der Topographischen Karte dargestellten Peilung aus dem Jahre 1958 und die Lage des Rinnenschwerpunktes sind in Abbildung 7 in die Kartenskizzen von 1960 und 1650 in gleicher geographischer Lage eingetragen. Die Darstellung zeigt, daß sich das Seegatgebiet der Accumer Ee schon 1650, also vor mehr als 300 Jahren, in fast der gleichen Lage wie heute befunden hat. Hieraus kann man schließen, daß die Seegatverbreiterung auf die Lage der Hauptstromrinne keinen feststellbaren Einfluß ausgeübt hat.

Zur Breitenentwicklung der Hauptstromrinne: Die Rinnenbreite an der engsten Seegatstelle (Abb. 5) hat im Profil zwischen den Tiefenlinien SKN — 10 m von 1841 bis 1927 stetig zugenommen (Abb. 6, Ganglinie b), und zwar von 270 m Breite (1841) auf 470 m Breite (1927); d. i. eine mittlere Zunahme von 200 m = rund 75 %. In dieser Zeitspanne hatte sich die Seegatbreite fast verdoppelt (von 760 m auf 1480 = rund 95 %, Abb. 6, Ganglinie a). Nach 1927 trat vorübergehend eine Breitenabnahme der Stromrinne ein, die bis zum Jahre 1955 den Betrag von 110 m erreichte. Anschließend hat die Rinnenbreite abermals zugenommen; 1965 betrug sie bereits wieder 400 m, also Zunahme 48 % gegenüber 1841.

Ein Vergleich der in Abbildung 6 untereinander gezeichneten Ganglinien der Seegatbreite und Rinnenbreite zeigt, daß offensichtlich eine wechselseitige Beziehung zwischen Breitenzunahme des Seegats und Breitenabnahme der Stromrinne im Seegat Accumer Ee nicht besteht. Vielmehr haben sich in der betrachteten Zeitspanne von fast 125 Jahren Seegatbreite und Stromrinnenbreite unabhängig voneinander verändert.

Die Längenentwicklung der Hauptstromrinne in nördlicher Richtung ist anhand der Entfernung der nördlichen Scheitel der Tiefenlinien SKN — 6 m und — 10 m vom Rinnenschwerpunkt (Abb. 5) untersucht worden. Die gemessenen Entfernungen sind in Abbildung 8 graphisch aufgetragen. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, hat der nördliche Scheitel der SKN — 10 m Tiefenlinie seit 1841 eine beträchtliche Verlagerung nach Norden erfahren. In den

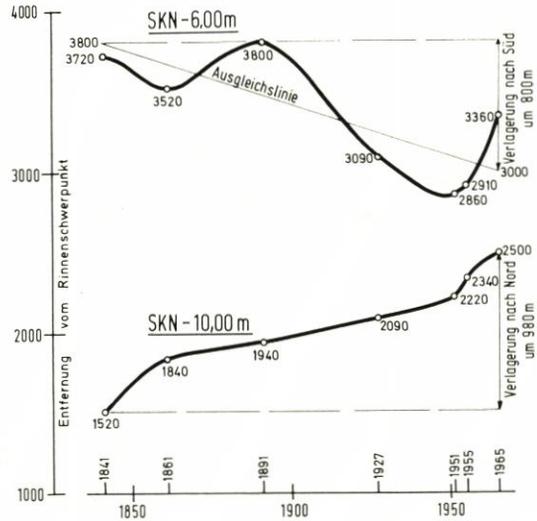


Abb. 8. Entfernung der Tiefenlinien SKN — 6 m und — 10 m (von 1841 bis 1965) am Nordende der Hauptstromrinne vom Rinnenschwerpunkt (vgl. Abb. 5)

ersten 20 Jahren (1841–1861) hat sich die Entfernung um $320 \text{ m} = 16 \text{ m/Jahr}$ stark vergrößert. Anschließend ist sie bis etwa 1940 nur wenig (300 m in 80 Jahren $= 3,75 \text{ m/Jahr}$), ab 1940 aber wieder verstärkt angewachsen. Die durchschnittliche Vergrößerung der Entfernung des Scheitels dieser Tiefenlinie vom Rinnenschwerpunkt errechnet sich von 1841 (1520 m) bis 1965 (2500 m) zu 980 m in 124 Jahren $= 7,9 \text{ m/Jahr}$.

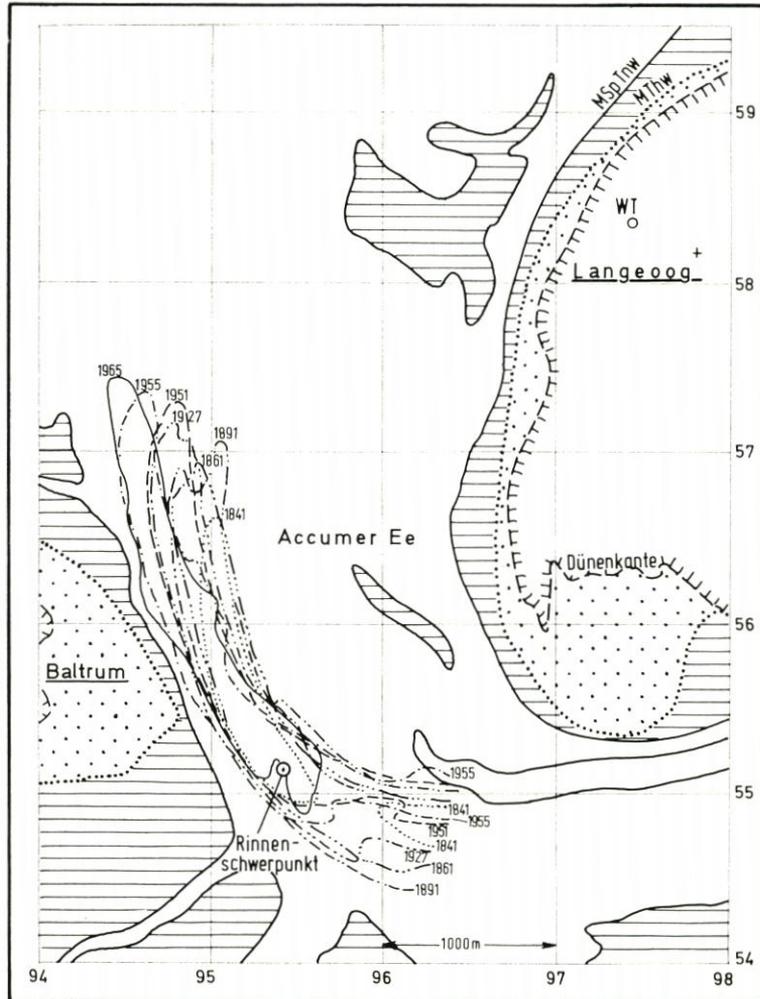


Abb. 9. Lageveränderungen der Tiefenlinie SKN — 10 m in der Hauptstromrinne der Accumer Ee von 1841 bis 1965

Im Vergleich hierzu hat die SKN — 6-m-Tiefenlinie eine völlig andere Entwicklung durchgemacht (Abb. 8, obere Kurve). Der Scheitel dieser Tiefenlinie liegt bereits im Einflußgebiet der Platen. Bei ihm wechseln Zeiten des Vorstoßes nach Norden mit Zeiten der Verlagerung nach Süden ab, offenbar je nach Lage des Wanderweges der Platen. Ab 1955 stößt die Linie wieder nordwärts vor und erreicht 1965 eine Lage wie etwa 1915. Es ist wahrscheinlich, daß die Nord-

verlagerung noch einige Zeit andauert. Im Durchschnitt hat sich die Tiefenlinie SKN — 6 m um rund 800 m nach Süden verschoben.

Mit der stetigen Ausdehnung der Tiefenlinie SKN — 10 m nach Norden ist gleichzeitig eine Drehung des tiefen Stromrinnenbettes nördlich vom Rinnenschwerpunkt nach Westen eingetreten, wie die in Abbildung 9 übereinandergezeichneten Rinnenlagen in den Jahren seit 1841 zeigen. Das Maß der Westverlagerung und der Gang dieser Erscheinung sind auf Abbildung 10 graphisch dargestellt. Von 1841 bis etwa 1900 hat sich die Lage des Scheitels der — 10-m-Linie im Durchschnitt kaum verändert; dann aber setzt die Westverlagerung mit ständig zunehmender Stärke ein. Insgesamt beträgt sie seit 1841 rund 620 m.

Die Ursachen dieser Entwicklung sind den morphologischen Veränderungen im Westen und Südwesten der Insel zuzuschreiben. Die einschneidendste Auswirkung hat die Entstehung des Flinthörn-Hakens ausgeübt, die zu Anfang des 19. Jahrhunderts begann und sich mit der Bildung der Flinthörndünen seit 1891 wirksam fortsetzte. Aber auch die seit 1926 ausgeführten Bauanlagen im Flinthörngebiet (Bau des Flinthörndeiches 1926/1930, Bau des Polderdeiches 1932/1933, Aufspülung des Flugplatzgeländes 1937 sowie andere Deichbauten) haben die Auswirkung des Flinthörn-Hakens auf die Seegatrinne der Accumer Ee unterstützt und verstärkt. Den Zusammenhang zwischen Flinthörn-Entstehung und Seegatrinne-Veränderung veranschaulicht die Übereinanderzeichnung der Karten von 1841 und 1965 (Abb. 11). Diese Darstellung zeigt ferner, daß im südlichen Gebiet der Accumer Ee Veränderungen eingetreten sind, die insbesondere die Langeooger Balje betreffen (s. Abschnitt IV C).

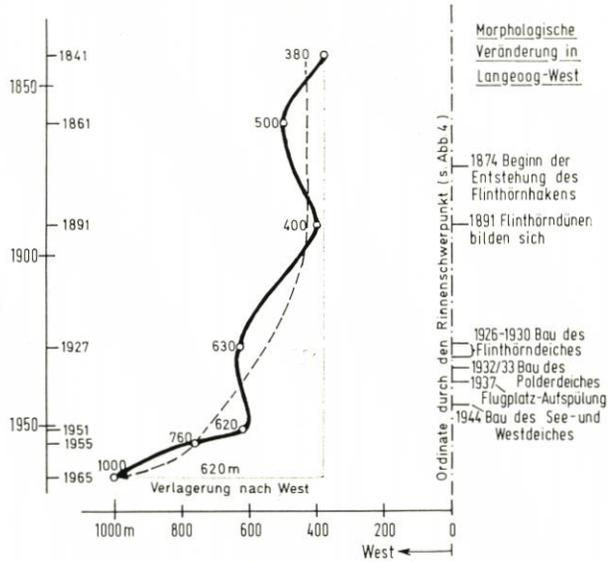


Abb. 10. Entfernung der Tiefenlinie SKN — 10 m (von 1841 bis 1965) am Nordende der Hauptstromrinne von der Ordinate durch den Rinnenschwerpunkt (vgl. Abb. 5) und Hinweise auf die morphologischen Veränderungen im Westen der Insel Langeoog

C. Langeooger Balje, Wattgebiet

1. Langeooger Balje

Die Langeooger Balje weist nicht die Lagebeständigkeit auf wie die Hauptstromrinne der Accumer Ee. Ihre Achse hat sich südwärts vom Flinthörn-Haken seit 1841 um rund 300 m nach Norden verlegt (Abb. 11). Wo 1965 die südliche SKN — 10-m-Tiefenlinie der Balje verläuft, lag 1841 etwa ihre nördliche — 10-m-Linie; das bedeutet, daß sie sich um ihre volle Breite an den Flinthörn-Haken herangeschoben hat. Wenngleich sich aus dieser Veränderung zunächst noch

keine nachteilige Wirkung auf das Seegat Accumer Ee erkennen läßt, ist es doch geboten, diesen Vorgang durch Vermessung unter Kontrolle zu halten.

Das gleiche gilt für den Übergangsbereich zwischen der Langeooger Balje und der Hauptstromrinne der Accumer Ee. In diesem Gebiet kommt es von Zeit zu Zeit zu einer Barrenbildung, wie die in Abbildung 12 zusammengestellten Tiefenkarten zeigen. Derartige Barren sind

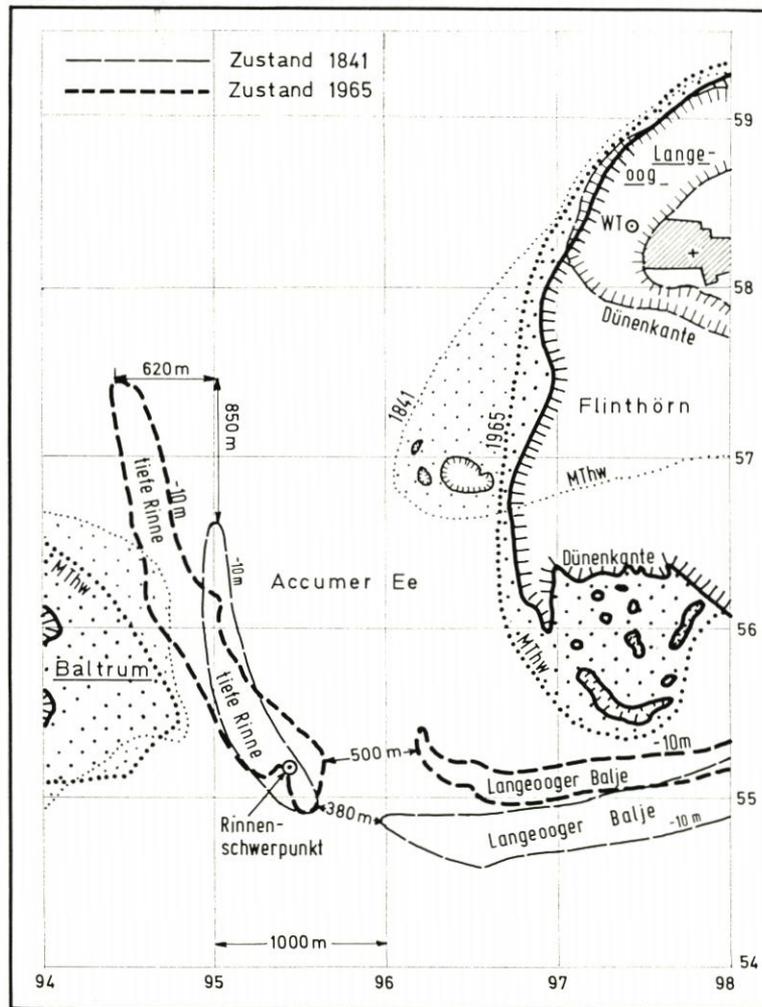


Abb. 11. Lageveränderung der Tiefenlinie SKN — 10 m in der Hauptstromrinne der Accumer Ee und in der Langeooger Balje 1841 und 1965 als Folge der Flinthörn-Entstehung

im Laufe der Zeit von der Strömung stets wieder durchbrochen worden. Eine ähnliche Entwicklung deutet die Peilung von 1972 an, indem die Breite der Barre, die 1965 noch rund 500 m betrug, im Jahre 1972 bereits auf 200 m zurückgegangen ist. Es steht zu erwarten, daß die SKN — 10-m-Tiefenlinie zwischen der Hauptstromrinne und der Langeooger Balje in einiger Zeit wie früher ohne Unterbrechung wieder durchläuft. Die Befürchtung von LUCK/HOMEIER (9),

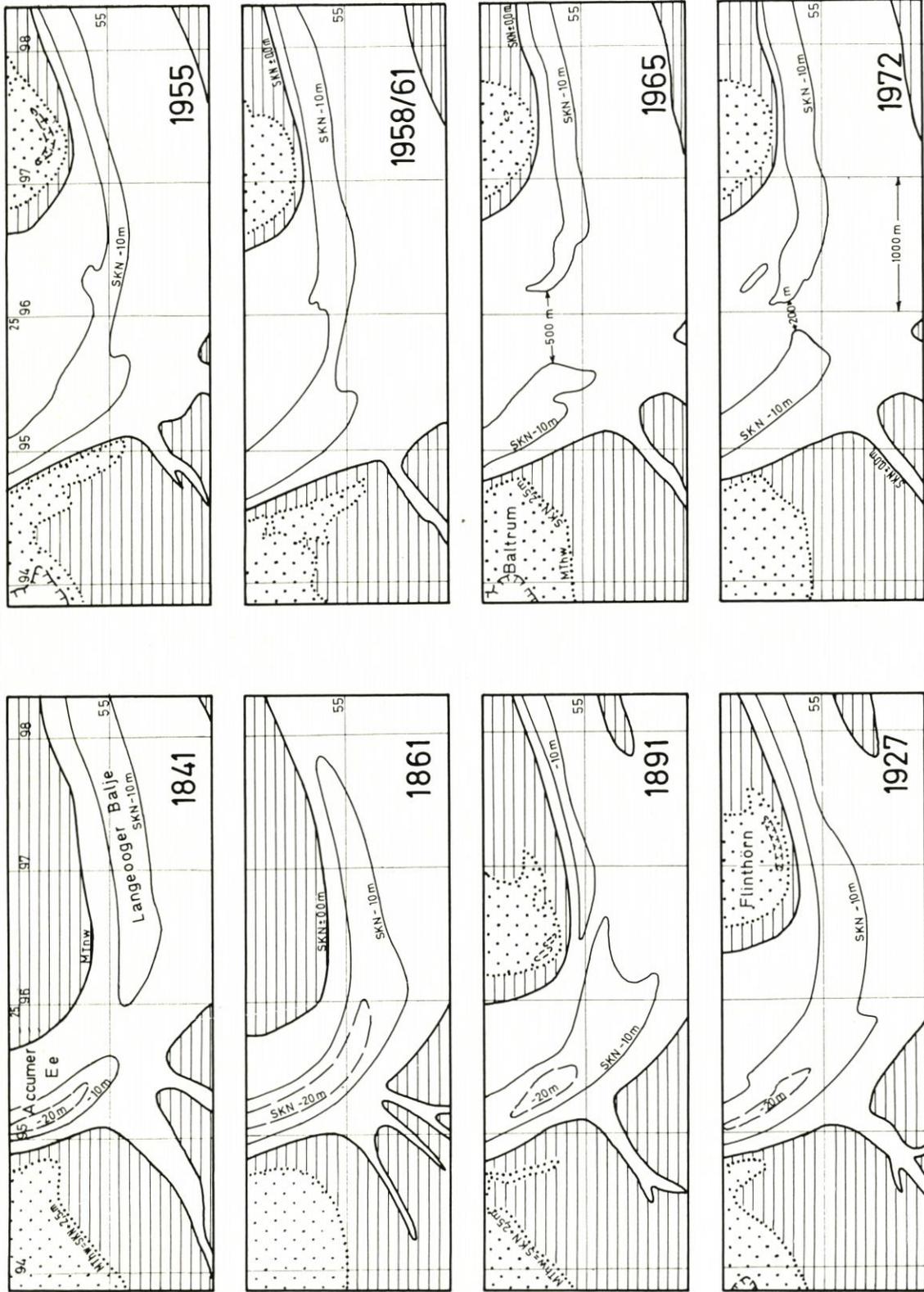


Abb. 12. Entwicklung des Barrengbietes zwischen der Hauptstromrinne der Accumer Ee und der Langooger Balje von 1841 bis 1972

daß sich hier seit 1955 eine Entwicklung abzeichne, die auf eine Spaltung der Hauptstromrinne und damit auf eine Schwächung des Ebbestromes im Seegat hinausläuft, kann nicht geteilt werden.

Die Hauptstromrinne in der Accumer Ee ist im Tideablauf überwiegend dem Ebbestrom zugeordnet, während der Flutstrom neben der Hauptstromrinne noch eine, in manchen Jahren auch zwei Nebenrinnen benutzt. Ein Überspringen der Ebbeströmung aus der jetzigen Hauptstromrinne in eine ostwärts gelegene Nebenrinne ist bei den seit Jahrhunderten stabilen morphologischen Verhältnissen nicht zu erwarten. Dennoch sollte aber die Entwicklung durch Terminvermessungen und Luftaufnahmen, wie bisher, weiter beobachtet werden.

2. Wattgebiet

Für die Morphologie eines Seegats sind in erster Linie das ihm zugehörige Wattgebiet und sein Wasserraum von entscheidender Bedeutung. Der Wattwasserraum kann sich durch natürliche und künstliche Verlagerungen der Grenzen des Wateinzugsgebietes und durch andere natürliche Einflüsse ändern, wie Aufhöhung des Watts durch Sand und Schlack, säkulare Wasserstandsbewegungen und meteorologisch bedingte Einflüsse auf die Tidewasserstände.

Zu den *natürlichen* Veränderungen der Grenzen des der Accumer Ee zugeordneten Wattgebietes ist festzustellen, daß die zwischen Baltrum und dem Festland etwa in nordsüdlicher Richtung verlaufende geographische Wasserscheide sich nach der bereits zitierten „Historischen Karte“ von 1650 bis 1860 um rund 2,5 km ostwärts verlagert hat. In der gleichen Zeitspanne hat auch die zwischen Langeoog und dem Festland in nord-südlicher Richtung verlaufende Wasserscheide eine Verlagerung nach Osten von 1,2 km erfahren. Diese Maßangaben können, da die historischen Karten bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts einen quantitativen Aussagewert nur eingeschränkt besitzen, lediglich die Entwicklungstendenz aufzeigen.

Die aus den Karten nach 1860 festzustellenden Veränderungen sind dagegen zuverlässig. Hiernach ist bei der Wasserscheide südlich von Baltrum seit 1860 eine rückläufige, d. h. westwärts gerichtete Verlegung eingetreten, deren Maß bis 1960 rund 400 m beträgt. Die Langeooger Wasserscheide hat sich von 1860 bis 1960 jedoch praktisch kaum noch verändert.

Über die Größe der Wateinzugsgebiete hat die Forschungsstelle Norderney auf Anfrage mitgeteilt, daß das Einzugsgebiet der Accumer Ee von $86 \pm 2 \text{ km}^2$ (1860) auf $88,6 \pm 0,2 \text{ km}^2$ (1960) angewachsen sei. Diese an sich geringfügige Vergrößerung ist wohl infolge der Westverlagerung der Baltrumer Wasserscheide dem Baltrumer Wateinzugsgebiet zuzuschreiben.

Die geographische Wattwasserscheide ist keine feste Grenze. Bei Westwinden findet ein Wasseraustausch über diese Scheide hinweg in das östlich gelegene Watt statt. Dadurch wird die Größe des Wasserraums dieser Wattgebiete im allgemeinen aber kaum beeinflusst, weil über die westlich gelegene Wattwasserscheide ein entsprechender Ausgleich angenommen werden kann.

Nach BACKHAUS (1) haben sich seit 1800 die Inseln Baltrum um 850 m und Langeoog um 1100 m verlängert; verbreitert haben sie sich nur an wenigen Stellen. Die größte Breitenzunahme hat Langeoog durch die Bildung des Flinthörnakens erhalten.

Dieser Fluthaken im Westen Langeoogs hat sich aus einer in Höhe des MThw rund 500 m breiten, um 1800 entstandenen Anlandung durch Schwenken nach Süden bei gleichzeitigem Abbruch im Nordwesten allmählich entwickelt (Anl. 6b in [4]). Seine südlichste Lage hatte der Flinthörnaken 1891 erreicht; seine westliche Begrenzung ist bis zu diesem Zeitpunkt gegenüber dem Jahre 1800 nur unwesentlich ostwärts verlagert. Von 1891 bis 1955 ist sie um rund 500 m nach Osten zurückgewichen, wobei die von der MThw-Linie umgrenzte Fläche etwa

gleich groß geblieben ist. Der Flächenzuwachs der Insel Langeoog gegenüber dem Jahre 1700 und damit die Verkleinerung des Wateinzugsgebietes ergibt sich nach dem Stande von 1891 zu rund 2 km².

Zu den *künstlichen* Veränderungen der Grenzen des Wateinzugsgebietes ist folgendes festzuhalten:

An der Festlandküste befinden sich vor den Hauptdeichen mehr oder weniger breite, im allgemeinen auf NN + 1,5 m bis NN + 2,0 m aufgelandete Vorländer. Bei mittleren und gering erhöhten Tiden (z. B. MThw + 0,4 m) tragen diese Flächen nicht zur Vergrößerung des Wateinzugsgebietes bei, weil die Vorlandkante meist als Steilkante ausgebildet ist. Sie sind jedoch im Laufe der Zeit durch Landgewinnung verbreitert und zum Teil durch Sommerbedeckung oder durch Vorziehen der Hauptdeichlinie der Überstauung bei hohen Tiden teilweise oder ganz entzogen worden.

Auf Langeoog sind 1937 der mittlere und südöstliche Teil des Flinthörnhakens sowie die östlich davon gelegene Wattfläche für den Bau eines Flugplatzes und Hafens künstlich durch Aufspülung verändert worden. Hiervon waren rund 570 000 m² normaler Wattflächen betroffen. Die übrigen vom Flugplatz in Anspruch genommenen Flächen lagen schon vor der Aufspülung so hoch, daß der Wattwasserraum durch die Aufspülung kaum nachteilig beeinträchtigt wurde.

Aus dem gleichen Grunde hatten auch die künstlich geförderten Dünen zwischen dem Ort Langeoog und den Flinthörndünen keinen Einfluß mehr auf die Größe des Wattwasserraumes.

Nach Angaben der Forschungsstelle Norderney hat sich das etwa 90 km² große Wateinzugsgebiet des Seegats Accumer Ee als Folge der natürlichen und künstlichen Veränderungen in der Zeit von 1750 bis 1860 um im Mittel 13 km² verkleinert, in der Zeit von 1860 bis 1960 um im Mittel 2,2 km² vergrößert.

Alle natürlichen und künstlich geförderten Veränderungen spielen sich auf dem „hohen“, über NN gelegenen Watt und auf dem in Ufernähe auf MThw auslaufenden nassen Strande ab. Bei normalen Tiden wirken sich die Veränderungen des Wattwasserraumes nur gering aus. Das gilt auch allgemein für den Flinthörnhaken.

Für den Abfluß des Tidewassers aus dem Watt ist der Flinthörnhaken dagegen von besonderer Bedeutung. Seit 1891 ist der Abfluß über das rund 2 km breite Watt bei normalen Tiden in ganzer Breite und, soweit es auf dem Flinthörnhaken zu Dünenbildungen gekommen war, auch bei Sturmfluten zum Teil eingengt gewesen. Durch die erwähnten, im Jahre 1937 ausgeführten künstlichen Veränderungen ist der Abfluß bei Sturmflut nun in voller Ausdehnung des Flinthörnhakens unterbunden worden. Infolgedessen wird unter den heutigen Verhältnissen der Ebbestrom aus dem Watt der Hauptseegatrinne stärker gebündelt zugeführt als früher. Auf diese Weise ist einer Spaltung der Hauptstromrinne, auch wenn sie sich hätte ausbilden wollen, entgegengewirkt worden.

Zu den Änderungen des Wasserraumes durch verschiedene andere natürliche Einflüsse wird folgendes ausgeführt: L. VAN BENDEGOM (3) hat festgestellt, daß für das Vorhandensein von Watten ein Meeresspiegelanstieg (säkulare Wasserstandshebung) und eine materialtransportierende Tideströmung Voraussetzung seien.

Für den Jadebusen hat LÜDERS (17) auf Grund von Messungen für die Zeitspanne von 1887 bis 1934 (47 Jahre) gefunden, daß die Aufhöhung des Watts in dieser Zeit 14 cm, d. s. im Mittel rund 3 mm/Jahr, betragen hat; dagegen hat sich das MThw nur 10 cm, d. s. im Mittel rund 2,1 mm/Jahr, angehoben. Für den Jadebusen zeichnete sich demnach die Tendenz einer zunehmenden Verlandung ab.

Nimmt man an, daß ähnliche Verhältnisse auch für das landwärts von Langeoog und Baltrum gelegene Watt zutreffen, dann würden die Auflandungen durch Wattsedimente die

Vergrößerung des Wattwasserraumes als Folge säkularer Wasserstandshebungen überwiegen. Diese Veränderungen sind jedoch unbedeutend, zumal sie sich über sehr lange Zeiten erstrecken; kurzfristig eintretende Querschnittsveränderungen können sie also nicht bewirken.

Der im Verlauf dieser Entwicklung durch den Flutstrom auf das Watt beförderte Sand kann entweder aus den Platen unmittelbar in die Flutströmung der Accumer Ee gelangen oder er kann auf der Westseite Langeoogs durch hier anlandende Platen gewissermaßen auf Depot gelagert und von hier allmählich abgetragen und auf die Wattflächen transportiert werden. Solche Platanenlandungen sind, abgesehen von der bereits erwähnten großen Anlandung um das Jahr 1800, nach dem Untersuchungsbericht der Forschungsstelle Norderney aus den Platengruppen „B“ 1956 und „D“ 1970 entstanden (Anl. 5 und 7 in [9]).

Bezüglich der meteorologisch bedingten Veränderungen des Wattwasserraumes ist zu bemerken, daß längere Westwindwetterlagen eine Anhebung der Wasserstände von entsprechender Dauer und umgekehrt länger dauernde Ostwindwetterlagen entsprechende Perioden niedriger Wasserstände bewirken können. Bei angehobenen Wasserständen etwa bis 0,6 m über MThw, die verhältnismäßig häufig eintreten, wird der Wattwasserraum merkbar vergrößert.

Nach LUCK/HOMEIER (9) hat sich das Watteinzugsgebiet der Accumer Ee in der Zeit von 1950 bis 1965 um rund 4 km² (gemessen in Höhe des MThw) vergrößert. In der gleichen Zeit vergrößerte sich der Querschnitt des Seegats Accumer Ee unter MTnw um 2900 m² bei insgesamt 13 200 m².

Die Wattoberfläche liegt bei den Wattwasserscheiden im allgemeinen nicht höher als Normal Null. Bei MThw (NN + 1,24 m) ist die darüber befindliche Wasserschicht also 1,24 m dick. Eine Überschlagsrechnung ergibt: Für ein etwa 90 km² großes Watteinzugsgebiet ist der Wattwasserraum 138 Mio. m³ groß. Die Vergrößerung des Watteinzugsgebietes um 4 km² bringt einen Zuwachs an Wattwasserraum um rd. 5 Mio. m³, d. s. 3,6 ‰. Die Querschnittsvergrößerung der Accumer Ee kann durch diese geringe Erhöhung der Wassermenge kaum verursacht worden sein.

Demgegenüber ergeben sich bei angehobenen Wasserständen als Folge meteorologischer Einflüsse zusätzliche Wassermengen:

bei 0,2 m Anhebung über MThw: 18 Mio. m³, d. s. zusätzlich 13 ‰

bei 0,4 m Anhebung über MThw: 36 Mio. m³, d. s. zusätzlich 26 ‰

Um eine Beziehung zwischen den Querschnittsveränderungen der Accumer Ee und den unterschiedlichen Wasserräumen herzustellen, bedarf es eines Maßstabes für die Häufigkeit und Dauer überhöhter Wasserstände; dieser aber fehlt. Jedoch zeigt schon eine Überschlagsrechnung, daß die durch meteorologische Einflüsse bedingte Veränderung des Wattwasserraumes wesentlich wirkungsvoller ist als alle vorher betrachteten im Watt möglichen Veränderungen. Die meteorologisch bedingten Veränderungen können dabei eine Größenordnung erreichen, die ausreicht, um wirksame Veränderungen am Seegatquerschnitt und in der Lage der Hauptstromrinne der Accumer Ee herbeizuführen.

Wie die „Historische Karte“ erkennen läßt, hatte die Accumer Ee in Höhe des Rinnenschwerpunktes (Abb. 13) bis zum Jahre 1750 eine große Breite, die durch das Vorrücken der Uferlinie der Insel Baltrum nach Osten und die Ausdehnung des Flinthörnhakens nach Süden sowie vorübergehend nach Westen stark verkleinert worden ist (vgl. Abschnitt IV B 1). Im Jahre 1965 hat sie ihre ursprüngliche Breite (1780 m) fast wieder erreicht (Abb. 5 und 6). Diese Verbreiterung ist auf das Zurückweichen des Flinthörnhakens nach Osten und die Ausräumung des westlich vorgelagerten Watts zurückzuführen. Die Veränderungen im Querschnitt des Seegats von 1841 bis 1955 sind in Anlage 10, Profil 3, des Berichtes der Forschungsstelle Norderney (4) dargestellt.

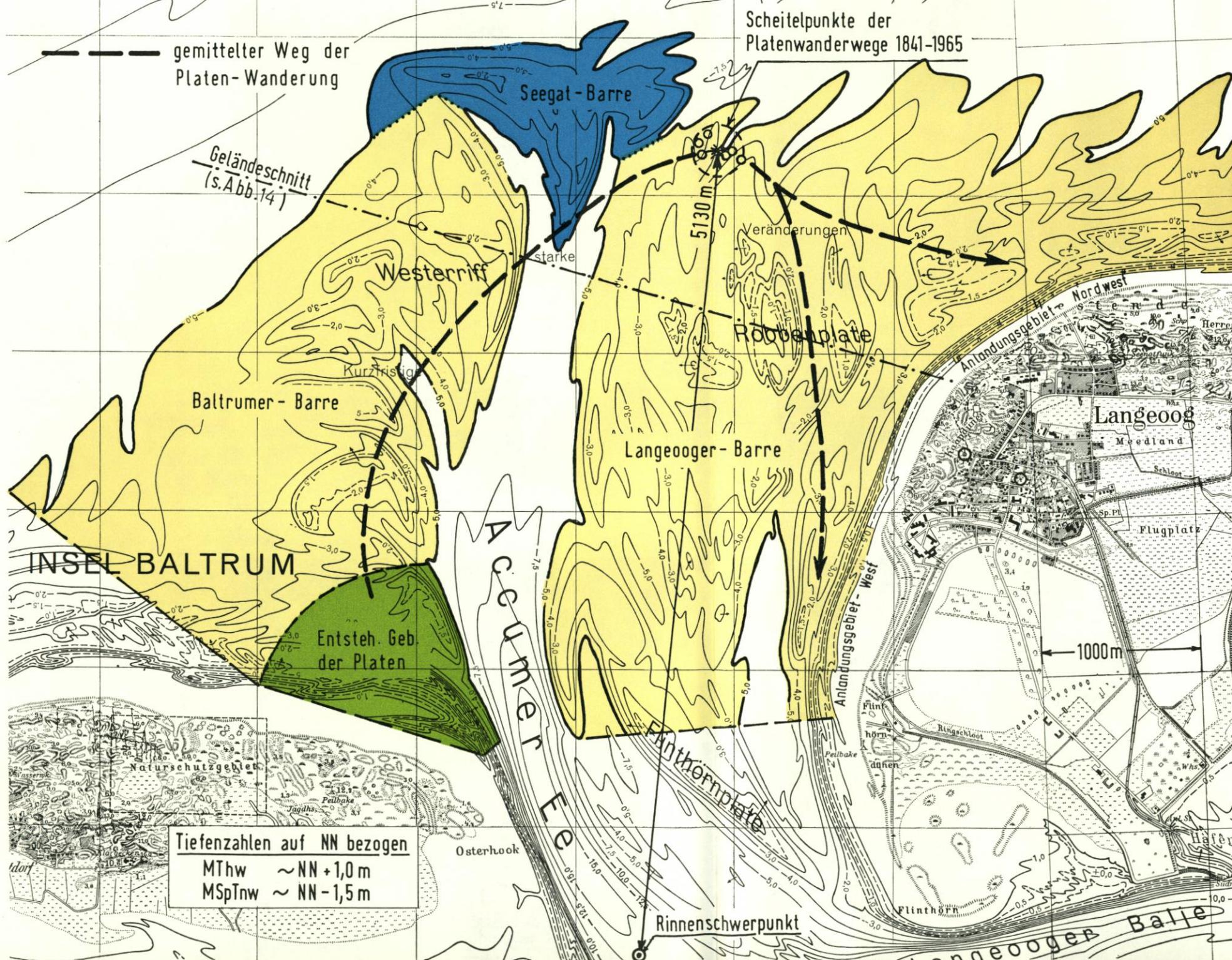


Abb. 13. Gliederung der Barre des Seegats Accumer Ee (Unterlage: „Topographische Wartkarte“ N. 6 der Forschungsstelle Norderney)

Die vorübergehend starke Einengung der Accumer Ee wurde durch eine große Platananlandung auf der Westseite von Langeoog verursacht. Aus der weiteren Entwicklung kann der Schluß gezogen werden, daß das Wateinzugsgebiet der Accumer Ee noch groß genug und so gestaltet ist, daß sich ihr Querschnitt immer wieder auf das ursprüngliche und ausreichende Maß einstellt.

WALTHER (21) hat für die Seegaten der Ostfriesischen Inseln die zugehörigen Wateinzugsgebiete angegeben (Abb. 23 in [21]). Für den Bestand eines Seegats und seine Lage ist die Größe des jeweils östlich des Seegats befindlichen Teiles des Wateinzugsgebietes von maßgebender Bedeutung (vgl. Tabelle).

Seegat	mittlere Wasserflächen der Wateinzugsgebiete	
	gesamt	östlicher Teil
<i>Norderneyer Seegat</i> (Juist/Norderney)	65,68 km ²	21,18 km ² = 32,3 %
<i>Wichter Ebe</i> (Norderney/Baltrum)	16,86 km ²	6,25 km ² = 37,0 %
<i>Accumer Ee</i> (Baltrum/Langeoog)	51,70 km ²	44,15 km ² = 85,4 %
<i>Otzumer Balje</i> (Langeoog/Spiekerooog)	42,20 km ²	28,75 km ² = 68,1 %

Dieser Vergleich zeigt, daß die Accumer Ee von den aufgeführten Seegaten hinsichtlich der Größe des östlichen Wateinzugsgebietes für die Inselhaltung am günstigsten ausgestattet ist. Solange sich an diesen Verhältnissen nichts Wesentliches ändert, werden sich auch die morphologischen Verhältnisse im Seegat Accumer Ee nicht nachteilig für die Insel Langeoog entwickeln.

D. Barre des Seegats Accumer Ee, Platanwanderung, Platananlandung

1. Barre des Seegats Accumer Ee

Die seewärtige Begrenzung der Accumer Ee wird — wie bei allen ostfriesischen Seegaten — von einer Sandbarre gebildet, die sich, seeseitig ausbuchtend, vom Ostende der Insel Baltrum nach dem Nordweststrand der Insel Langeoog erstreckt. Die Barre (in Verbindung mit der Platanwanderung auch Riffbogen oder Riffgürtel genannt) ist nach Ausweis der Tiefenvermessungen seit der Mitte des 19. Jahrhunderts weitgehend festliegend.

Das Barrengbiet der Accumer Ee kann in drei Abschnitte gegliedert werden (Abb. 13). Ihr westlicher Abschnitt, die „Baltrumer Barre“, erstreckt sich von Baltrum Ost in Richtung Nord-Ost etwa 4 km seewärts bei einer mittleren Breite von rund 2 km, gemessen zwischen den Tiefenlinien NN — 5 m (= SKN — 3,5 m). Den nördlichen Abschnitt bildet die „Seegat-Barre“, deren größte Breite in West-Ost-Richtung 2 km beträgt; in Nord-Süd-Richtung ist sie maximal 1,5 km lang. Die östliche Begrenzung der Accumer Ee bildet die den Nordweststrand der Insel Langeoog bogenförmig umfassende „Langeooger Barre“. Sie geht in den Inselsockel über. Ihre Breite, senkrecht zum Strand gemessen, beträgt 2 bis 2,5 km.

Im Querschnitt hat die Barre der Accumer Ee zwischen den Tiefenlinien NN — 5 m eine

fast ebene Krone. Auf dieser vollzieht sich die durch Strömung und Brandung verursachte, entlang der niedersächsischen Küste von West nach Ost gerichtete Sandverfrachtung, die für den Bestand der Inselkette von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Zur Beurteilung der Frage, ob die seit etwa 1960 vor dem Pirolatal eingetretenen Strand- und Dünenabbrüche mit einer Änderung der Sandzuführung nach der Insel Langeoog zusammenhängen, ist die westlich von Langeoog im Gebiet der Accumer Ee seit 1841 durch Peilpläne belegte Wanderung und Anlandung der Platen mit nachstehenden Ergebnissen untersucht worden (18).

2. Platenwanderung

Im Gebiet der Accumer Ee geht die Sandwanderung, wie auch bei den anderen ostfriesischen Seegaten, in Form von „Platen“ vor sich. Diese entstehen am Ostende der Insel Baltrum aus den im Verlauf der allgemeinen West-Ost-Sandverfrachtung sich dort stauenden Sandmassen (Abb. 13). Wenn die Sandansammlung in diesem „Platentstehungsgebiet“ so groß geworden ist, daß ein seewärtiger Vorsprung entsteht, dann werden Teile davon durch Tideströmung und Brandungswirkung vom Inselstrand abgetrennt. Die losgelösten Sandmassen wandern unter der Wirkung der Wasserkräfte in geschlossener Form als Einzelplatten oder auch Platengruppen auf der Krone der seeseitig ausbuchtenden Barre entlang, so das Seegatgebiet mit seinen starken Strömungen und großen Wassertiefen umgehend.

Die Höhen der wandernden Platen erreichen über der Krone der Sandbarre auf der „Baltrumer“ und „Langeooger Barre“ in der Regel 3 bis 3,5 m (Abb. 14), sie erreichen und überschreiten zum Teil mit ihrer Oberfläche die Höhe des MSP_{Tnw} (= Seekartennull). Auf der exponiert liegenden „Seegat-Barre“ sind die Platen flacher; ihre Kronen liegen dort etwa 0,5 m unter SKN.

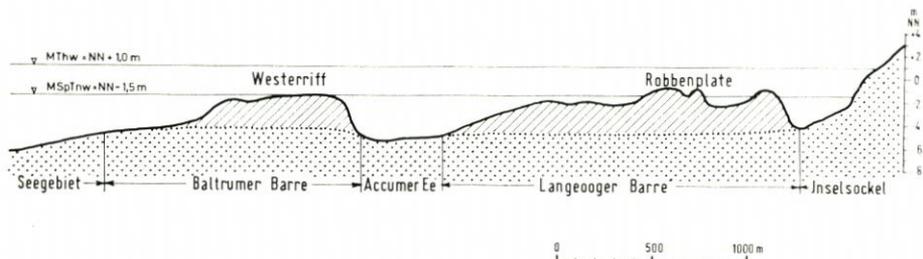


Abb. 14. Geländeschnitt durch das Barrengbiet der Accumer Ee (Lage des Schnittes s. Abb. 13)

Um eine Vorstellung von der Größe der wandernden Sandmengen zu ermitteln, wurde der Inhalt einer auf dem Westerriff (Abb. 13) liegenden Plate überschläglich ermittelt. Bei einem Querschnitt von rund 2000 m² errechnet sich ihr Sandinhalt zu etwa 1 Mio. m³.

Auf der Barre wandern die Platen zunächst in Richtung Nord. Im Gebiet des Westerriffs im nördlichen Teil der „Baltrumer Barre“ schwenken sie allmählich nach Nord-Ost und überwandern die „Seegat-Barre“ in östlicher Richtung. Nach Überquerung des Mündungsgebietes der Accumer Ee in die See gabelt sich fast regelmäßig der Wanderweg in einen östlichen und einen südlichen Ast, die nach den Langeooger Anlandungsgebieten am Nordwest- bzw. Südstrand führen (Abb. 13).

Die aus den Peilungen der Jahre 1841 bis 1965 festgestellten mittleren Wanderwege der Platen, deren Kronenhöhe auf SKN oder höher liegt, sind in Abbildung 5 im einzelnen und in

Abbildung 15 übereinandergezeichnet dargestellt. Auffällig in dieser Abbildung ist zunächst die gebündelte Lage der gemittelten Wanderwege. Auf der „Baltrumer Barre“ beträgt die Wegbreite etwa 600 m. Im weiteren Verlauf wird sie geringer und erreicht im Nordwesten der

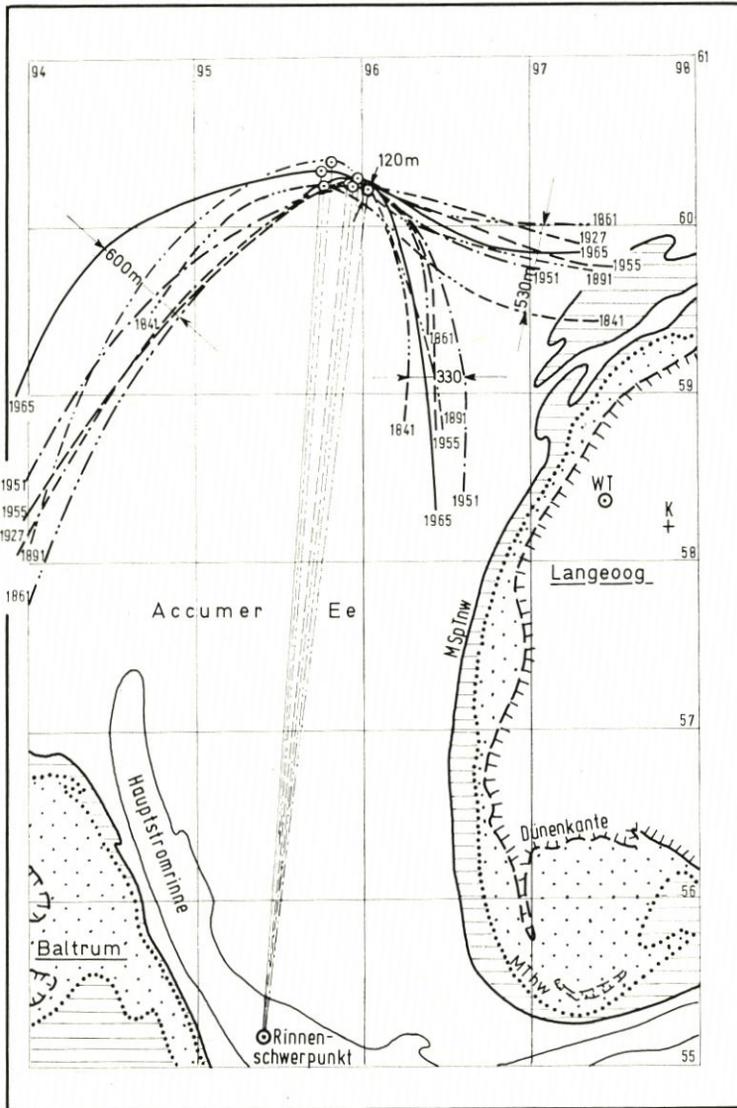


Abb. 15. Mittlere Lage der Platenwanderwege im Gebiet der Accumer Ee von 1841 bis 1965

„Langeooger-Barre“ mit 120 m ihren kleinsten Wert. Unmittelbar südöstlich dieser Stelle liegt die erwähnte Gabelung der Wanderwege. Der nach Osten abzweigende Wegeast ist etwa 530 m, der nach Süden verlaufende etwa 330 m breit.

In den betrachteten 120 Jahren (1841 bis 1965) sind die mittleren Wanderwege innerhalb der genannten Wegebreiten in den einzelnen Jahren zwar unterschiedlich verlaufen, indem sie

sich teilweise kreuzen, parallel verlaufen oder sich überdecken, sie lassen aber keine systematische Veränderung der Platenwanderung erkennen. Der zu beobachtende unterschiedliche Verlauf der einzelnen Wanderwege wird wahrscheinlich in erster Linie durch wechselnde meteorologische Einwirkungen (Wellenrichtung, Brandungsstärke) bestimmt.

Eine zweite auffällige Erscheinung ist die gebündelte Lage der Scheitelpunkte der Platenwanderwege auf einer nur etwa 6 ha großen Fläche im nordwestlichen Zipfel der „Langeooger Barre“ (Abb. 13 und 15). Die graphische Auftragung der Entfernungen der Wegescheitel vom Rinnenschwerpunkt sowie ihre Verlagerungen in West-Ost-Richtung, bezogen auf die Ordinate durch den Rinnenschwerpunkt (Abb. 16) ergibt, daß die Scheitelpunkte geringfügig um eine

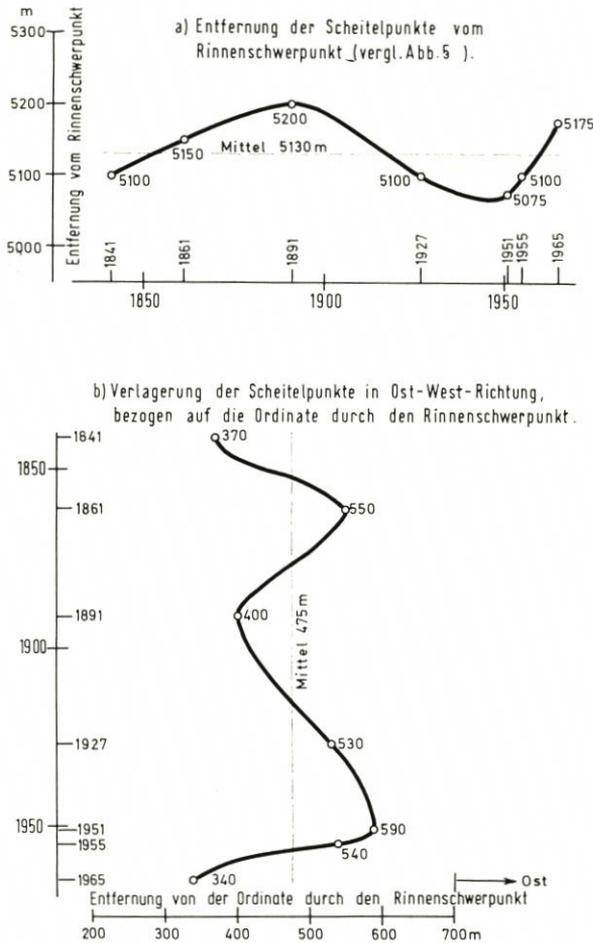


Abb. 16. Lageveränderung der Scheitelpunkte der Platenbögen von 1841 bis 1965

mittellage pendeln. Von der gemittelten Entfernung vom Rinnenschwerpunkt (5130 m) sind die maximalen Abweichungen nordwärts 70 m (i. J. 1891) und südwärts 55 m (i. J. 1951). In der West-Ost-Richtung weichen die Lagen der Scheitelpunkte maximal 115 m nach Osten (i. J. 1951) und 135 m nach Westen (i. J. 1965) von der gemittelten Entfernung (475 m) ab.

Diese Untersuchungen zeigen, daß die Scheitelpunkte der Platenwanderwege ebenso wie die mittleren Platenwanderwege im Gesamt-mittel in der betrachteten 120jährigen Zeitspanne grundsätzlich unverändert geblieben sind. Hieraus kann gefolgert werden, daß auch die Sandverfrachtung allgemein im Gebiet der Accumer Ee keinen Wandel erfahren hat.

3. Platenanlandung

Ist eine Plate oder Platen-gruppe auf ihrer Wanderung in den Bereich der Gabelung des mittleren Wanderweges im Nordwesten der „Langeooger Barre“ gelangt, dann wird ihr weiterer Weg je nach den Auswirkungen der gerade zu dieser Zeit vorherrschenden Witterungs-

verhältnisse, also nach der Größe der Tidebewegung und Strömungsstärke sowie der Wellenrichtung und Riffbrandung, unterschiedlich beeinflusst. Unter normalen Witterungsbedingungen wird die Plate erfahrungsgemäß zum größten Teil dem Anlandegebiet am Nordweststrand von Langeoog zugeführt (Abb 13). Es kann aber auch bei geänderten Wetterlagen eine Spal-

tung der Plate eintreten, so daß ein Teil des Sandes in südlicher Richtung auf die Robbenplate zu weiterverfrachtet wird. Andererseits kann sogar fast die gesamte Plate nach dem Anlandungsgebiet-West wandern und dem Flinthörnaken eine starke Sandzufuhr bringen.

Ob die hier skizzierten Vorgänge allein von den wetterbeeinflussten Wasserkräften gesteuert werden oder ob noch andere Kräfte (Stau, Reflexion) wirksam sind, ist nicht bekannt. Diese z. B. für die Planung des baulichen Schutzes einer Insel wichtige Frage müßte durch weitere Forschungen erkundet werden.

Aus der Beschreibung der Platenwanderung nach der Insel Langeoog hin ergibt sich, daß es auch bei an sich günstigen Sandanlandungsverhältnissen, wie sie für Langeoog bestehen, an den verschiedenen Strandstrecken immer wieder zu Sandmangelzeiten kommen kann, deren Folge Strand- und Dünenabbrüche sind, die, wie bereits erwähnt, sogar zur teilweisen oder völligen Zerstörung von Randdünen führen können, besonders dann, wenn infolge einer stärkeren Strandabnahme und Aufsteilung des Strandes die bisher auf der Strandebene auslaufende Strandbrandung sich in eine Kliffbrandung umwandelt.

Die bei der Annäherung und Anlandung einer größeren Plate an den Strand vor sich gehenden morphologischen Umgestaltungen sind im Abschnitt IV E 1 an Hand von Strandpeilungen näher untersucht worden.

E. Vorstrand, Strand, Randdüne

1. Vorstrand und Strand

Die Entwicklung des Vorstrandes und des Strandes ist im Bericht des WSA Norden (23) für die Meßprofile Nr. 15 bis 28 (Abb. 4) dargestellt. Hierfür sind die Messungen der Jahre 1950, 1968 und 1970 verwendet worden. Sie vermitteln nur ein Augenblicksbild des Vorstrandes (Meeresboden) und des Strandes. Lage und Form der Riffe sind bei jeder Peilung verändert. Entsprechend der Verlagerung des Strandes in Richtung Land verschieben sich die Riffe im allgemeinen im gleichen Sinne und umgekehrt. Strandwälle, die von der Brandung auf dem Strand aufgeworfen werden, sind von Messung zu Messung unterschiedlich geformt und höher oder niedriger angeordnet.

Nach dem Untersuchungsbericht (23) sind die Verhältnisse östlich Profil 28 normal, d. h. Strand und Düne sind hier „gesund“. Um die im Abbruch befindliche Strecke mit der „gesunden“ vergleichen zu können, wurden zusätzlich die Profile Nr. 29, 30 und 31 untersucht. Sie sind mit den Meßergebnissen aus den Jahren 1954, 1961 und 1969 dargestellt worden und daher nicht unmittelbar mit den Profilen 15 bis 28 vergleichbar. Dennoch können sie für die hier vorzunehmende Auswertung verwendet werden, weil sie innerhalb des gleichen Zeitraumes von 1950 bis 1970 aufgemessen wurden.

Die Profile 28, 29, 30 und 31 erfassen einen Küstenabschnitt von rd. 3000 m Länge. Er ist ebenso lang wie der Küstenabschnitt zwischen Profil 15 und 28. Der gegenseitige Abstand der Profile 28 bis 31 beträgt rd. 1000 m. Alle Profile sind von einer am Strand mit Schraubpfählen vermarkten Standlinie aus eingemessen und aufgetragen worden. Die Station 300 befindet sich etwa dort, wo die MTnw-Linie den Meeresboden schneidet. Seewärts dieser Station liegt der Vorstrand; er ist auf 500 m Länge bis zur Station 800 dargestellt. Landwärts befinden sich der nasse und der trockene Strand, der von der Randdüne begrenzt wird. Der Dünenfuß, die Grenze zwischen Strand und Randdüne, liegt für die Profile 19 bis 28 des Meßjahres 1970 im Mittel auf der Höhe NN + 2,0 m. Es sei hier erwähnt, daß er inzwischen als Auswirkung des

Längsschlauchwerkes in Verbindung mit der Sandaufspülung auf NN + 3,0 m angewachsen ist (Mitt. des WSA Norden).

Auf eine rechnerische Auswertung der Peilergebnisse wird hier aus folgenden Gründen verzichtet: Für die Beurteilung von Entwicklungstendenzen sind die aus älteren und neueren Peilplänen entwickelten Zeit/Weg-Pläne nicht geeignet, weil die Peilpläne auf wenig vergleichbaren Grundlagen beruhen (ältere: Handlotungen, jüngere: Echolotungen), weil sie nur ein Augenblicksbild zur Zeit der Aufnahme vermitteln und weil die Peilungen allein aus der Beschickung der Wasserstände auf Bezugspegel Fehler in der Größenordnung $\pm 0,5$ m aufweisen.

Die Richtigkeit dieser Auffassung bestätigt die 1971 erschienene Arbeit von WETZEL und LUCHT (28). Danach streuen die Einzelwerte der Tiefenangaben älterer mit dem Handlot vermessener Karten zwischen + 4 dm und - 5 dm. Nach Einführung des Echolotes im Jahre 1937/38 änderte sich die Höhenlage der Gewässersohle sprunghaft um 2 dm. Bei Messungen mit dem Handlot erhielt man verständlicherweise nur Einzelpunkte. Das Zeichnen der Tiefenlinien läßt dabei den Vorstellungen des Kartographen meist einen weiten Spielraum. Der Vergleich älterer mit jüngeren, mit dem Echolot aufgenommenen Karten liefert, insbesondere bei flachgeneigtem Grund, keine brauchbaren Werte.

WETZEL und LUCHT empfehlen außerdem, die Lotungen auf keinen Bezugspegel zu beschicken, der einen größeren Abstand als 5 km, im Watt 4 km, von den Peilpunkten hat. Nur dann kann der Meßfehler kleiner als 1 dm gehalten werden.

Vom Pegel Langeoog bis zur 10-m-Tiefenlinie außerhalb der Seegatbarre ist eine Entfernung von 12 km zu überbrücken. Zwischen den genannten Punkten befindet sich die Accumer Ee und die Barre. Die sich hier ergebenden Tidewellenlinien werden für die Höhenbestimmung der Meßpunkte gebraucht. Das gleiche gilt für alle Peilungen außerhalb der Barre. Es werden daher zusätzliche Pegel aufzustellen sein, wenn die Messungen vergleichbar sein sollen (vgl. hierzu die von RODLOFF [20] für die Eider, die Norderhever und die Piep gemachten Ausführungen).

Wegen der Ungenauigkeiten, die den Peilergebnissen anhaften, sollen hier die Entwicklungstendenzen des Strandgebietes nach morphologischen Gesichtspunkten untersucht werden.

Das Verhalten des „gesunden“ Vorstrandes und Strandes soll zuerst betrachtet werden. Aus den Unterlagen des WSA Norden ergibt sich, daß der Vorstrand etwa 1 : 400 bis 1 : 500 geneigt ist. Bei Station 800 liegen die größten Wassertiefen bis 2,5 m unter MTnw. Bei Profil 31 steigt der Meeresboden im Bereich der Station 600 noch einmal bis zur MTnw-Linie auf. Die Neigungen des Vorstrandes sind daher in diesem Bereich steiler als oben angegeben.

Der nasse und der trockene Strand sind stark bewegt; Anwachs und Abtrag wechseln miteinander ab. Die Werte jüngerer Messungen liegen vielfach über denen älterer. Die Uferlinie im Profil 29 hat sich in der Zeit von 1954 bis 1961 um 40 m seewärts, in der Zeit von 1961 bis 1969 um 80 m bzw. um 55 m landwärts verlagert.

Mit nach dem Augenmaß eingetragenen Ausgleichslinien kann die Strandneigung auf 1 : 80 bis 1 : 100 abgeschätzt werden. Auf der Höhe NN + 1,8 m bis NN + 2,1 m geht der so geneigte Strand in eine fast waagerechte Strandebene über, die etwa 230 m bis 275 m breit ist. Der Dünenfuß liegt im Mittel auch hier auf NN + 2,0 m.

Die „gesunden“ Profile 29 bis 31 sind dadurch gekennzeichnet, daß auch ihre Uferlinie im Laufe der Zeit großen Veränderungen unterliegt. Alle künftigen Beobachtungen und Messungen sollten darauf gerichtet sein, diesen Schwankungsbereich zu erfassen.

Der Vorstrand der Profile 15 bis 28 ist stark bewegt. Er weist im Bereich der Stationen 600 bis 800, aber auch teilweise 500 bis 700, Riffe auf, die sich zum Teil über die MTnw-Linie erheben. In manchen Jahren fehlen aber die Riffe in diesem Strandbereich. Größere Wassertiefen

als 2,5 m unter MTnw werden nirgends erreicht. Im allgemeinen ist die Wassertiefe geringer als bei den „gesunden“ Profilen 29 und 30. Mit einer landwärtigen Verlagerung des Strandes wandern die Riffe in gleichem Sinne. Zeichnet man nach Augenmaß Ausgleichslinien ein, dann ergeben sich Neigungen von 1 : 600 bis 1 : 1000. Eine Ausräumung des Vorstrandes ist nirgends zu erkennen.

Um eine Aussage über die Veränderungen im Bereich des nassen und des trockenen Strandes machen zu können, sind in die Profile 15 bis 28 nach Augenmaß Ausgleichslinien eingezeichnet worden. Die nachstehende Tabelle 1 gibt einen Überblick.

Tabelle 1

Übersicht über die Neigungen des trockenen und des nassen Strandes

Profil Nr.	Profilmessungen		
	1950	1968	1970
15	1 : 40	1 : 50	1 : 60
16	1 : 50	1 : 60	1 : 50
17	1 : 60	1 : 45	1 : 45
18	1 : 70	1 : 45	1 : 45
19	1 : 80	1 : 50	1 : 50
20	1 : 80	1 : 45	1 : 50
21	1 : 55	1 : 50	1 : 50
22	1 : 50	1 : 45	1 : 45
23	1 : 50	1 : 50	1 : 50
24	1 : 50	1 : 50	1 : 50
25	1 : 55	1 : 50	1 : 50
26	1 : 60	1 : 55	1 : 55
27	1 : 80	1 : 55	1 : 55
28	1 : 80	1 : 60	1 : 60

Die Profile 27 und 28 können als Übergangsprofile bezeichnet werden. Alle übrigen Profile haben Strandneigungen von etwa 1 : 50. Eine Ausnahme bilden die Profile 20, 19 und 18, die für das Jahr 1950 geringere Strandneigungen erkennen lassen.

Aus der vorliegenden neuesten Peilung vom 6. 7. 1971 geht hervor, daß der Abstand der MTnw-Linie (NN - 1,35 m) von der MThw-Linie (NN + 1,25 m) maximal 150 m (bei Geerk sin Spoor und bei Profil 27) und minimal 100 m (bei Profil 22/23) beträgt. Dem entsprechen bei dem Tidehub von 2,6 m Strandneigungen zwischen 1 : 60 und 1 : 40. Als Mittelwert kann für die Tidewechselzone des Untersuchungsgebietes eine Strandneigung von 1 : 50 angenommen werden. Dies stimmt gut überein mit Messungen an der amerikanischen Ost- und Westküste, die im Technical Report No 4, Shore Protection, Planning and Design durch die U.S. Army CERG 1966 veröffentlicht sind. Dort wurde die mittlere Strandneigung bei einer mittleren Korngröße von 0,2 mm zu 1 : 50 festgestellt.

Die Profile 16 und 17 sowie die Profile 20 bis 27 lassen für das Jahr 1970, zum Teil bereits für das Jahr 1968, an ihrem landseitigen Ende Ausräumungen von 0,2 m bis 0,5 m Tiefe bei 50 m bis 80 m Länge erkennen. Diese Vertiefungen liegen für die Profilvereihe 16 bis 23 oberhalb des Tidehalbwassers, bei der Profilvereihe 24 bis 27 reichen sie sogar noch 0,5 m tiefer. Über die Entstehung derartiger Ausräumungen vgl. Abschnitt III. In diesen Ausräumungen bestehen die gegenüber früheren Zeitabschnitten größeren Rückgangswerte des Strandes.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Größe des Rückganges, wie sie aus den Profilen ermittelt wurde. Da die Profile jedoch nur ein Bild zum Zeitpunkt der Messung vermitteln, stellen die Werte keine absoluten Größen dar.

Daß derartige Verschiebungen nicht ungewöhnlich sind, zeigen Vermessungen aus den Jahren 1921 bis 1928 aus dem Gebiet des Hauptbadestrandes (Blatt 11 in [22]). Nach diesen Vermessungen schwankte von 1921 bis 1925 im damaligen Profil 3 die Uferlinie (= MHW-Linie) um rd. 150 m, im Profil 14 von 1925 bis 1927 um rd. 100 m. Bemerkenswert ist, daß auch der Dünenfuß diesen Bewegungen folgte, und zwar im Profil 3 mit maximal 70 m und im Profil 14 mit maximal 60 m.

Tabelle 2
Übersicht über die Verlagerung der Uferlinie

Profil Nr.	Verlagerung der Uferlinie		Bemerkungen
	1950-1968	1968-1970	
15	+ 10 m	- 10 m	+ = Verlagerung seewärts
16	+ 30 m	- 60 m	
17	- 25 m	- 30 m	- = Verlagerung landwärts
18	- 60 m	- 10 m	
19	- 20 m	+ 25 m	
20	- 25 m	- 25 m	
21	- 30 m	- 40 m	
22	- 65 m	- 35 m	
23	- 55 m	- 35 m	
24	- 100 m	- 6 m	
25	- 90 m	- 45 m	
26	- 50 m	- 40 m	
27	- 85 m	- 40 m	
28	- 70 m	0 m	

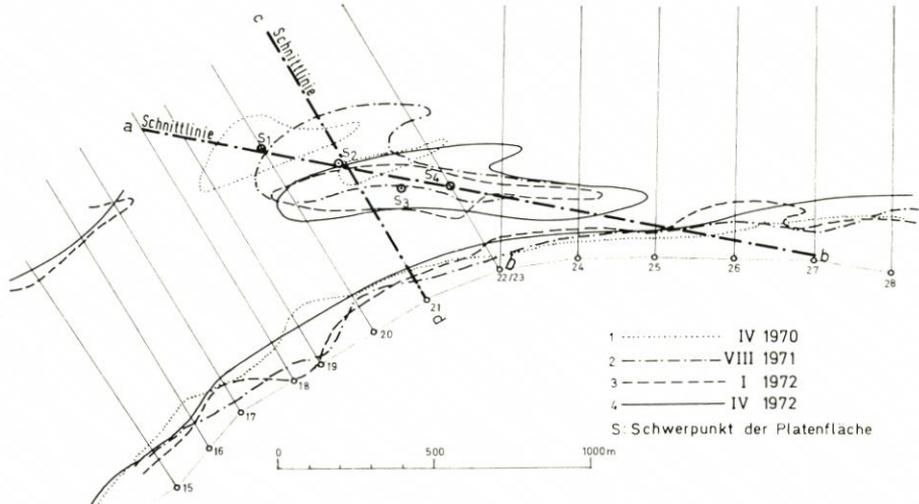


Abb. 17. Platananlandungsvorgang: Veränderungen der Tiefenlinie SKN ± 0 m einer anlandenden Plate und am Inselstrand (Unterlage: Strandpeilungen des WSA Norden am Langeooger Nordwest-Strand)

Die Möglichkeit einer baldigen Änderung dieser ungünstigen Verhältnisse von Natur aus, die z. B. durch Anlandung einer größeren Plate hätte eintreten können, war zu Beginn des Jahres 1970 noch nicht sicher erkennbar gewesen. Zwar lagen nach der Strandpeilung vom

April 1970 (Abb. 17) nordwestlich vom Profilpfahl 21 in rund 350 bis 500 m Entfernung von der Inselstrandlinie zwei kleinere Platen, von denen aber nicht vorhergesehen werden konnte, wann und vor allem an welchem Strandabschnitt sie anlanden würden, da dies von den jeweiligen herrschenden Witterungsverhältnissen abhängig ist.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung sind diese Platen auf den Strand vor dem Pirolatal zugewandert und befinden sich inzwischen im Stadium ihrer Anlandung. Dieser Vorgang ist durch vier in kurzzeitigen Abständen ausgeführte Strandpeilungen des WSA Norden festgehalten und verfolgt worden. Die sich hierbei vor dem neuen Längsschlauchwerk abspielenden Auswirkungen auf die Strandentwicklung werden nachstehend im einzelnen beschrieben.

In Abbildung 17 sind die Umrisse der über SKN sich erhebenden Fläche der anlandenden Plate und die entsprechenden SKN-Linien am Strande (Strandlinien) nach den Strandpeilungen vom April 1970, August 1971, Januar und April 1972 übereinandergezeichnet dargestellt. Für jede Platenfläche ist nach dem Augenmaß deren Schwerpunkt festgestellt worden (S 1 bis S 4 in Abb. 17).

Die Veränderungen der Plate und des Strandes während des Anlandungsvorganges wurden anhand von Längs- und Querschnitten untersucht.

Die Längsschnitte durch das Anlandungsgebiet sind in der Schnittlinie a—b als Ausgleichslinie der Flächenschwerpunkte in der Hauptwanderrichtung der Plate aufgezeichnet (Abb. 18). Diese Linie bildet mit der Inselstrandlinie einen Winkel von 15°, d. h. die Plate landet sehr flach an den Strand an.

Die Querschnitte werden in der Schnittlinie c—d (Abb. 17), die in der Meßlinie durch den Profilpfahl 21 liegt, genommen. Diese Schnittlinie verläuft quer zum Inselstrand und ebenfalls im Bereich der oben genannten Flächenschwerpunkte. Die Querschnitte sind in Abbildung 19 aufgetragen.

Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, daß die in Wanderrichtung landwärts von der Plate liegende Strandbalje gegen den Inselstrand geschoben und hierbei immer mehr verflacht und zugeschüttet wird. Die größte Rinnentiefe hat von 1970 bis 1972 von SKN — 2,2 m auf SKN — 0,1 m, die Rinnenbreite bei MSpTnw in derselben Zeit von rund 1100 m auf 225 m abgenommen. Die über SKN liegende Platenfläche ist höher und gleichzeitig erheblich größer geworden. Am Inselstrand hat sich die Strandlinie im Verlauf der Platanlandung um 160 m seewärts verlagert; das Ufer hat also an dieser Stelle, soweit die Aufzeichnungen ausgewertet werden konnten, einen stetigen Anwachs erfahren.

Die Flächenschwerpunkte S 1 bis S 4 der in Richtung der Längsschnittlinie a—b wandernden

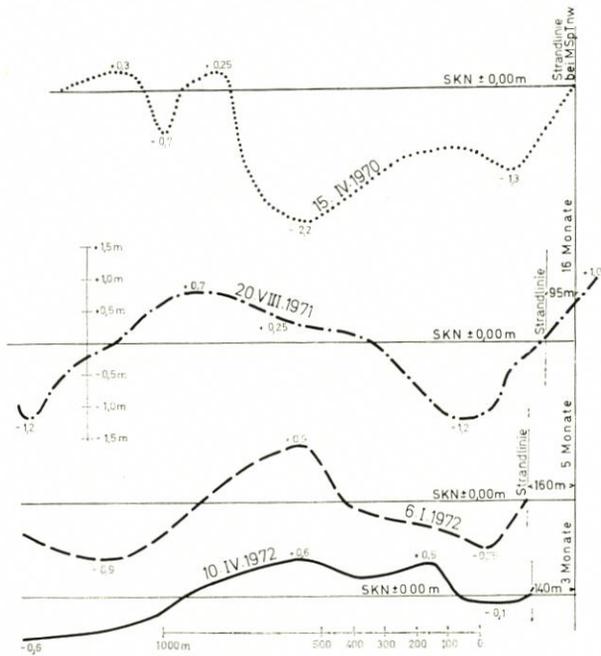


Abb. 18. Längsschnitte in der Schnittlinie a—b in Abb. 17

Plate bewegen sich mit fast gleichbleibender Geschwindigkeit auf den Instelstrand zu (Abb. 17); ihre mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit beträgt rund 600 m in 2 Jahren, d. s. 25 m/Monat.

Ähnliche Geschwindigkeiten weisen auch die Scheitelpunkte der wandernden Plate auf (Abb. 18).

Abbildung 19 zeigt die Veränderungen der Plate, Strandbalje und Inselstrandlinie auf der quer zum Strand liegenden Schnittlinie c-d. Die auf diese Linie projizierten Flächenschwerpunkte der Plate S 1 bis S 4 haben sich in den zwei Jahren von 1970 bis 1972 um 400 m der Insel geöhert. Dabei hat die Breite der parallel zum Inselstrand verlaufenden Strandbalje von 340 m (1970) auf 200 m (1972) abgenommen, ohne jedoch wesentlich an Tiefe zu verlieren (Abb. 19). Die Inselstrandlinie hat sich gegenüber der ersten Peilung vom August 1971 um 40 m landwärts verlagert (Strandabbruch; Lee-Erosionswirkung der anlandenden Plate). Bis zur nächsten Peilung (Januar 1972) ist der Abbruch jedoch schon wieder bis auf 20 m ausgeglichen. Dieser Prozeß der Anlandung geht ständig weiter. Bei der Peilung vom April 1972 kann man bereits erkennen, daß sich die Strandlinie etwa 10 m seawärts verlagert hat (Anwachs) gegenüber der Peilung

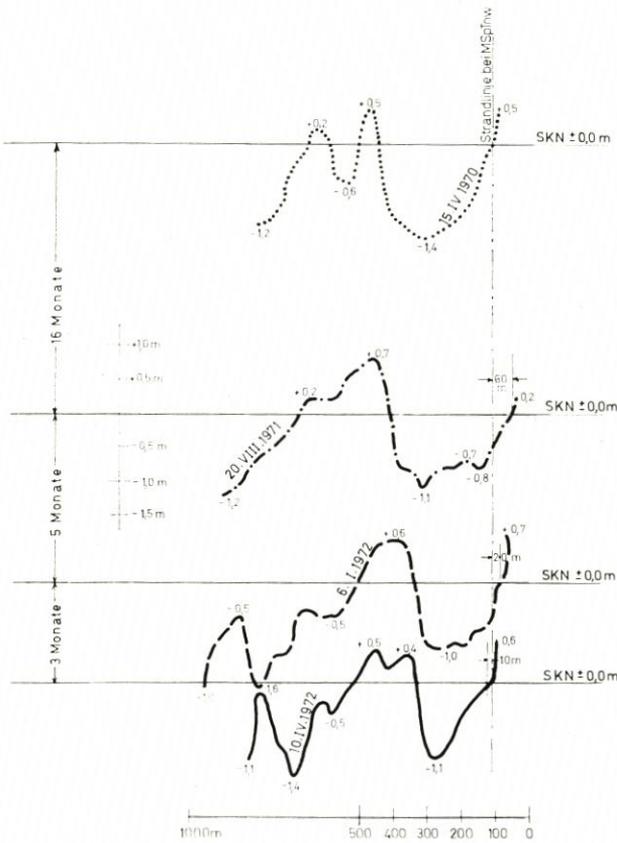


Abb. 19. Querschnitte in der Schnittlinie c-d in Abb. 17

von 1970. Hieraus kann gefolgert werden, daß von nun an das uferparallele Gebiet der Strandbalje flacher werden wird.

Nach den Peilungen vom Januar und April 1972 (Abb. 19) hat die Masse der Plate den Schnitt c-d bereits durchwandert. Andererseits läßt die Abbildung 17 erkennen, daß sich zu dieser Zeit nordwestlich der Profile 15 bis 17 bereits das Herankommen einer neuen Plate abzeichnet.

2. Randdüne vor dem Pirolatal

Bei den im Abbruch befindlichen Randdünen nördlich des Pirolatales handelt es sich um verhältnismäßig junge Bildungen, die erst im Laufe des 20. Jahrhunderts entstanden sind. Dies geht aus dem Vergleich der historischen Karten hervor. Die Herrenhusdünen sind bereits in der Karte von HORST 1738 angegeben (Abb. 20), während die nördlich davon gelegenen Gebiete nur mit „Der Strand“ bezeichnet sind.

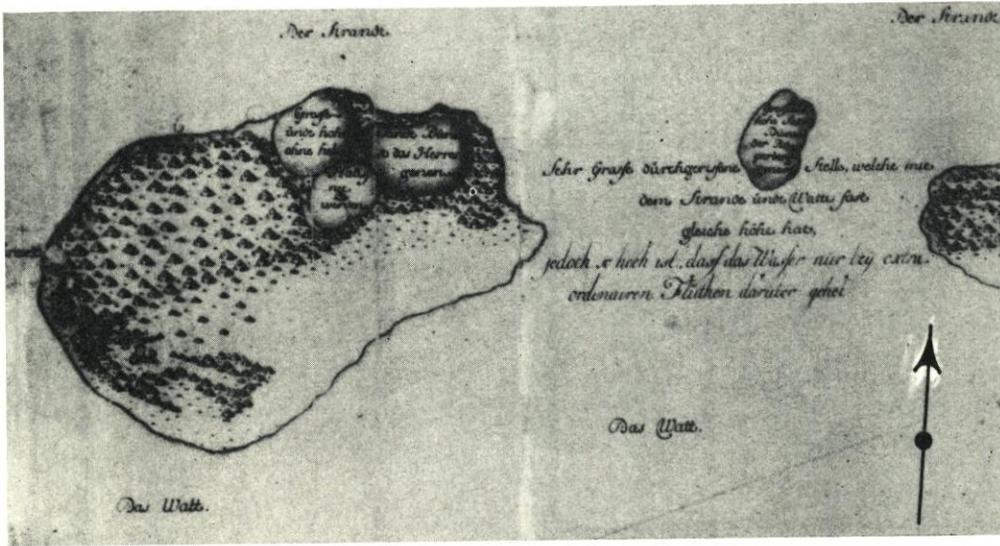
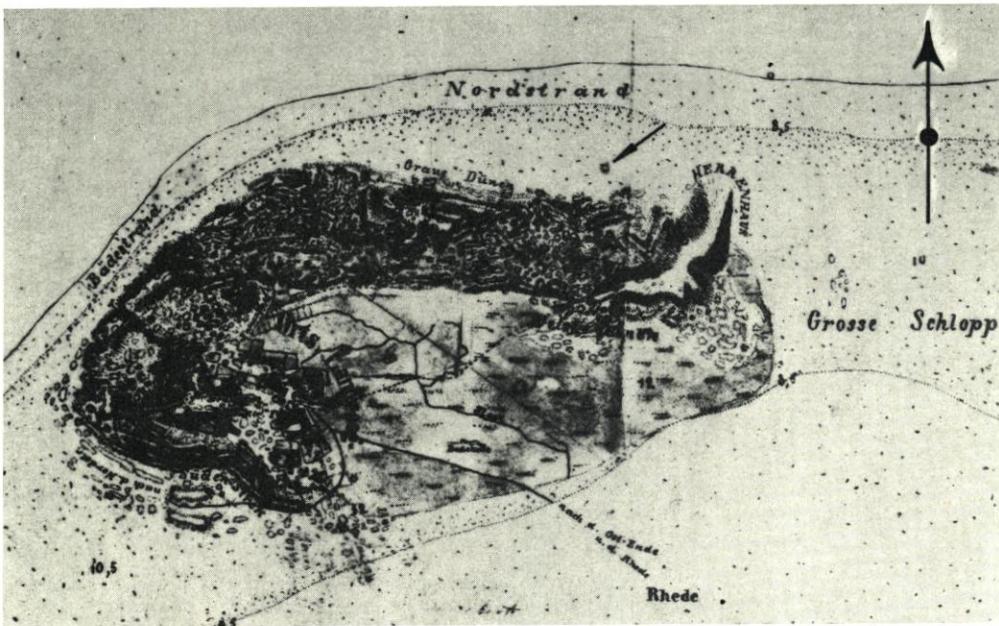


Abb. 20. J. HORST: Langeoog-West im Jahre 1738 (Reproduktion: Forschungsstelle Norderney)



gelegen hat, denn die punktierte Linie auf Kote 8,5 (Fuß) wird an einer anderen Stelle der Karte mit „mittlerer höchster Wasserstand“ bezeichnet. Die Fläche zwischen der punktierten und der ausgezogenen Linie stellt den nassen Strand dar.

Die preußische Landesaufnahme von 1891 (Abb. 22) bringt einen weiteren wesentlichen Fortschritt in der Kartographie mit sich; entsprechend genauer werden Einzelheiten des heutigen Pirolatales mitgeteilt, das 1891 mit zahlreichen mehr oder weniger hohen Vordünen bedeckt ist. Es muß dahingestellt bleiben, ob sich diese Dünen erst in den 31 Jahren nach der Aufnahme von 1860 gebildet haben oder ob sie in Ansätzen schon damals vorhanden waren, ihrer geringen Höhe wegen aber nicht eingezeichnet worden sind. Auf jeden Fall geht aus der Aufnahme von 1891 hervor, daß die höchsten Kuppen innerhalb des Pirolatales auf NN + 3,8 m und NN + 5,0 m lagen. Am nördlichen Rand des Pirolatales, wo sich jetzt die Randdünenkette befindet, ist nur ein flacher Hang oberhalb der MThw-Linie angedeutet.

Ein Vergleich mit dem heutigen Zustand, der durch die Höhenschicht-Linien auf Blatt 5 des Entwurfs zur Sicherung der Insel Langeoog des WSA Norden (24) beschrieben wird, zeigt, daß von den morphologischen Formen von 1891 so gut wie nichts wiedererkannt werden kann. Insgesamt gesehen hat sich das Pirolatal durch Sandflug auf etwa NN + 3,0 m in der Talsohle aufgehöhht und ist mit zahlreichen Einzeldünen bedeckt. Am deutlichsten ist aber die starke Veränderlichkeit der Morphologie in dem hohen Randdünen Gürtel ausgedrückt, der sich in der Zeit nach 1891 gebildet hat und der jetzt wieder seit rund 20 Jahren im Abbruch liegt (23). In dem o. g. Höhenschichtlinien-Plane werden für die Kuppen dieser nördlichen Randdünen Höhen zwischen 10 m und 15 m angegeben, die Breite des Dünen Gürtels beträgt z. Z. noch rund 50 m.

Dieser Dünen Gürtel hat sich in einer Zeitspanne aufgebaut, in der ein breiter trockener Strand vorhanden war (Blatt 5, 6, 7 in [22]), der einen landwärtigen äolischen Transport ermöglichte. Mit dem Rückgang dieses trockenen Strandes verminderte sich auch die Sandzufuhr und damit der Dünenanwachs.

Die Auswertung der historischen Karten zeigt also, daß von 1738 bis 1860 die Fläche des Pirolatales trockener Strand war, wobei sich die Lage der MThw-Linie von 1860 nicht wesentlich verändert hat. Von 1860 bis 1891 haben sich dann auf der ganzen Fläche des Pirolatales Vordünen gebildet, während die heutige Randdüne auch 1891 noch nicht bestand. Diese ist erst im Laufe des 20. Jahrhunderts gebildet worden.

Ein weiteres Ergebnis der Auswertung der Karten aus den Jahren 1738, 1841 und 1961 zeigt die Abbildung 23, in der die Dünengebiete übereinandergezeichnet dargestellt sind. Für die hier zu untersuchende Strecke beim Pirolatal (Profile 21 bis 27) ergibt sich, daß der Dünenfuß in der Zeit von 1738 bis 1841 auf großer Länge maximal um 180 m landwärts verlegt worden ist (Abbruch). In den Jahren von 1841 bis 1961 ist dieser Dünenabbruch mehr als wettgemacht worden. Zu diesem Ergebnis kommt man, wenn man die Karte von HORST (1738) in der in Abbildung 23 dargestellten Weise mit den neueren Karten kombiniert. Abbruch und Anwachs nicht nur des Strandes, sondern auch der Düne gleichen sich, über lange Zeiträume gesehen, aus. Für Befürchtungen, daß sich die jüngsten Abbrüche nicht wieder ausgleichen werden, besteht nach den vorstehenden Ausführungen also kein Grund.

V. Bauliche Sicherung des Pirolatales

A. Vorschläge des Wasser- und Schifffahrtsamtes Norden

Seit einigen Jahren werden Versuche unternommen, sandgefüllte Kunststoffgewebe in den Küsten- und Inselfchutz einzuführen. Es handelt sich meist um schlauchartige Gebilde mit



Abb. 22. Kgl. Preussische Landesaufnahme: Der Westteil der Insel Langeoog im Jahre 1891 (Reproduktion der Forschungsstelle Norderney)

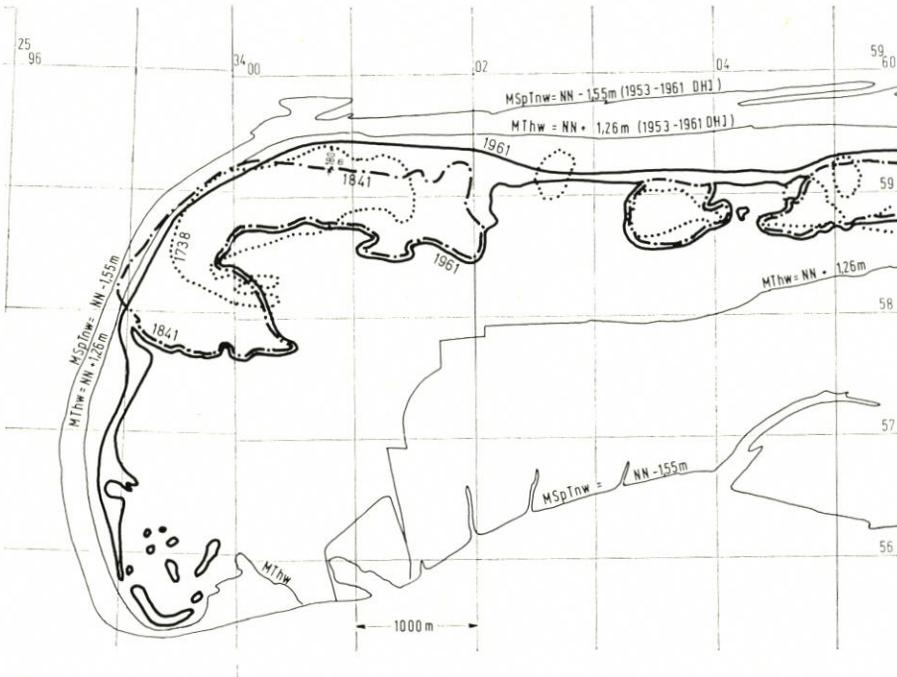


Abb. 23. Dünengebiete auf Langeoog-West nach Karten aus den Jahren 1738 (HORST), 1841 u. 1961 [7]

Durchmessern von einem Meter und darüber, die entweder mechanisch oder hydraulisch mit einem Sand-Wasser-Gemisch von einer Rohrleitung her gefüllt werden. Die Wirkungsweise dieser Strukturen ist einfach und folgt dem Prinzip einer Strandbauweise: Das Füllmaterial (Sand oder Kies) liefert die nötige träge Masse, die den Wellenangriffen entgegenzuhalten ist, während das (leichte und damit sonst wirkungslose) Kunststoffgewebe dieses Füllmaterial zusammenhält und es gegen die wellenerzeugten Strömungen schützt.

Zwischen dem Füllmaterial und der Kunststoffumhüllung muß eine gegenseitige Anpassung vorhanden sein, in der Art, daß die Maschenweite des Kunststoffgewebes so gewählt werden muß, daß das Füllmaterial auch bei Porenwasser-Überdruck nicht durch das Gewebe austreten kann. Übertriebene Forderungen brauchen hier nicht gestellt zu werden, weil ein mit rolligem Material (Sand oder Kies) gefülltes Kunststoffgewebe immer durch den Erddruck auf Zug beansprucht sein sollte – es liegt an der Wahl des optimalen Füllungsgrades (etwa 70 bis 80 % des geometrischen Inhalts), daß diese Bedingung eingehalten wird. Wichtiger als die Wasserdurchlässigkeit ist die Reißfestigkeit des Kunststoffgewebes. Gerade bei Sturmfluten kann durch Treibholz, das oft Nägel enthält, eine erhebliche örtliche Reißbelastung auftreten, die um Größenordnungen die Belastung übertrifft, die Wellendruck und wellenerzeugte Strömungen aufbringen können.

Abgesehen von der Funktion dieses Längswerkes, worauf anschließend eingegangen wird, ist von dieser speziellen Belastungsart ein Entwurf nach Blatt 8 in (24) dem Entwurf (25) vorzuziehen. Der erstgenannte Entwurf sieht zwischen dem 1,5 m hohen Längswerk aus fünf Kunststoffgewebe-Schläuchen und dem Kliffuß (Dünenfuß) einen 2 m breiten Zwischenraum vor, in dem sich bei Sturmflutbedingungen (die Längswerkkrone liegt auf NN + 3,0 m) Treibzeug ansammeln kann, ohne längere Zeit das Kunststofflängswerk zu belasten. Der Entwurf vom Februar 1971 (25), wo das ebenfalls aus fünf Kunststoffgewebe-Schläuchen bestehende Deckwerk mit einer Kunststoffgewebe-Plane unmittelbar an den Dünenfuß angeschlossen werden soll, würde dagegen eine dauernde Belastung aller Kunststoffgewebeflächen durch dieses Treibzeug bedeuten, das bei jedem Wellenauf- und -ablauf über das Gewebe scheuern würde.

Deshalb sollte grundsätzlich ein Kunststofflängswerk so gebaut werden, daß das Treibzeug nach einmaligem Überwurf durch die Wellen zur Ruhe kommt. Die Erfahrungen mit den Tetrapoden-Längswerken auf Sylt haben gezeigt, welche Treibzeugmengen sich während nur einer Sturmflut ansammeln können. Bei einem Kunststoffgewebewerk ist mit einer baldigen Zerstörung zu rechnen, wenn solches nagelbewehrte Treibzeug die empfindlichen Kunststoffhäute mit jedem Wellenaufwurf neu angreift. Besser ist es, wenn es einmal über das Längswerk geworfen wird und dann, schwimmend oder anlandend, zwischen dem Längswerk und dem Kliff den Wellenkräften entzogen wird.

Die Funktion eines Längswerkes besteht darin, daß die Umwandlung der Wellenenergie vor dem Kliffuß seewärts verlagert wird. Das bedeutet aber auch, daß die Erosionserscheinungen, die sich gegenwärtig vor dem Kliff abspielen, dann auf den Bereich vor dem Längswerk verlagert werden, aber mit dem wichtigen Unterschied, daß das Längswerk im Gegensatz zu dem Kliff den Brandungsströmungen kein neues Abbruchmaterial liefern kann. Der Strand vor dem Längswerk muß also schmaler und tiefer werden, das um so mehr, je stärker das Längswerk in das Brandungsgeschehen eingreift, d. h. je öfter es vom Wellenaufwurf erreicht wird. Bühnen können diesen Vorgang nur verzögern, aber nicht aufhalten.

Bei der Anlage eines Längswerkes – ob mit oder ohne Bühnen – muß also in Rechnung gestellt werden, daß die Strandverhältnisse vor dem Längswerk verschlechtert werden. Dies ist in um so größerem Maße der Fall, je mehr durch das Längswerk die Brandungs- und die Wellenaufwurfzone eingeengt werden und um so mehr das Längswerk Reflexion erzeugt.

Deshalb ist auf einer guten Fußsicherung des Längswerkes zu bestehen. Diese müßte sich

(vgl. Abschn. III) auf mindestens 0,5 der Wellenlänge erstrecken und flexibel genug sein, um den Strandumlagerungen folgen zu können. Diese können Beträge um mehrere Meter erreichen. Wenn diese Fußsicherung, wie in den beiden Entwürfen (24 und 25) aus Kunststoffgewebematten bestehen sollen, so muß darauf geachtet werden, daß diese genügend wasserdurchlässig sind, um beim Wellenablauf Porenwasser-Überdruck unter der Matte zu vermeiden. Für eine ausreichende Beschwerung muß gesorgt werden, die auf ganzer Fläche wirksam ist. Wo unbeschwertes Gewebe den Wellenangriffen ausgesetzt wird, besteht immer die Gefahr, daß die Bahnen in Flatterschwingungen geraten.

Wenn diese Gesichtspunkte beachtet werden, die die Standfestigkeit des Längswerkes selbst betreffen, so kann mit Sicherheit erwartet werden, daß die Entwürfe des WSA Norden einen wirksamen Schutz des Dünenfußes bewirken werden. Da es sich um eine Übergangslösung handeln soll, ist die zu erwartende begrenzte Lebensdauer nicht von Nachteil, im Gegenteil könnten dabei wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die für weitere Anwendungen solcher neuen Bauweisen von Bedeutung sein können.

Nachteilig ist, daß durch ein Längswerk unmittelbar am Dünenfuß das gegenwärtige Brandungsgeschehen, also die Kliffbrandung mit ihrer strandvermindernden Wirkung, nicht verändert wird; eher ist mit einer noch stärkeren Strandabnahme vor dem Längswerk zu rechnen, weil kein Abbruchmaterial von der Düne mehr zugeführt wird. Es ist zweifelhaft, ob die vorgesehenen Bühnen eine entscheidende Abwehr gegen die Strandabnahme bieten können. Die Folge wäre, daß schon bei normalen Tiden der Deckwerksfuß die meiste Zeit von der Brandung erreicht wird. Da ein Durchwandern der reflexionsüberlagerten Wellenauflaufzone lästig und bei höheren Wasserständen und bei örtlichen Kolken auch gefährlich ist, würden Strandwanderer gezwungen, den Strandweg zu verlassen und den Dünenweg zu wählen. Der Schutz der Randdüne und damit des Pirolatales würde mit dem Verlust einer natürlichen Strandstrecke bezahlt werden.

Bevor eine solche Entscheidung gefällt wird, sollte zunächst nach Mitteln gesucht werden, die einen Schutz der Randdüne mit weniger nachteiligen Nebenwirkungen erreichen können.

B. Empfehlungen der Gutachter

Es soll davon ausgegangen werden, daß im gegenwärtigen Zustand der Dünenfuß im Mittel auf NN + 2,0 m liegt und daß der davorliegende Strand eine mittlere Neigung von 1 : 50 aufweist (vgl. Abschn. IV E 1).

Wie die festgestellten Abbruchserscheinungen zeigen, ist der Dünenfuß zu niedrig und der Strand zu steil. Schon bei wenig erhöhten Wasserständen geht die normale Strandbrandung in die Kliffbrandung mit ihren nachteiligen Wirkungen über. Um dieses zu vermeiden, müßte der Strand vor dem Dünenfuß soweit erhöht und verbreitert werden, daß auch bei Sturmflut eine natürliche Strandbrandung vor dem Dünenfuß besteht, die Wellenenergie also wieder auf großer Fläche abgebaut wird und nicht auf dem schmalen Streifen am Kliffuß (vgl. Abschn. III).

Eine solche Strandaufhöhung kann im Spülverfahren hergestellt werden. Selbstverständlich ist bei dem festgestellten derzeitigen Sandmangel damit zu rechnen, daß ein Teil des aufgespülten Sandes wieder mit den Wellen ostwärts vertrifft wird. Daß trotzdem eine ständige Vorspülung, bei der diese Verluste durch stetige Zuführung neuen Materials ausgeglichen werden müssen, wirtschaftlich sein kann, soll folgende Überschlagsrechnung zeigen.

Im Bericht des WSA Norden (23) wurde für die letzten Jahre eine Erosionsrate von 77 m³/lfd.m für den Strand des Abbruchsgebietes ermittelt. Für den Vorschlag einer ständigen

Vorspülung soll der ungünstigere Betrag von $100 \text{ m}^3/\text{Ifd. m}$ für die rund 2000 m lange Abbruchsstrecke in Rechnung gestellt werden.

Angenommen werde zunächst, daß diese $100 \text{ m}^3/\text{Ifd. m}$ auf ganzer Strecke so eingebracht werden, daß der Strand auf etwa 100 m Breite um ungefähr 1 m aufgehöhht wird. Auf diesem künstlichen Strand wird sich eine annähernd natürliche Brandung ausbilden, die aber, auch bei Windfluten, den Kliffuß nicht mehr erreichen kann.

Als ungünstigste Annahme werde weiterhin angenommen, daß der jetzt bestehende Sandverlust von $100 \text{ m}^3/\text{Ifd. m}$ in den folgenden Jahren durch die Aufspülung neu gedeckt werden muß. Dies ergibt eine jährliche Spülmenge von

$$100 \cdot 2000 = 200\,000 \text{ m}^3/\text{Jahr.}$$

Geht man davon aus, daß diese Spülungen außerhalb der Badesaison vorgenommen werden, dann stehen überschläglich 200 Arbeitstage jährlich zur Verfügung. Das gibt eine Tagesleistung von

$$200\,000 : 200 = 1000 \text{ m}^3/\text{Tag.}$$

Bei achtstündiger Arbeitszeit würde das für den Spüler eine Stundenleistung von

$$125 \text{ m}^3/\text{Std. an Sand}$$

erfordern.

Die Bohrungen der Forschungsstelle Norderney zeigen, daß unmittelbar am östlichen Ende der Abbruchsstrecke im nördlichen Teil des Niederungsgebietes des Großen Schlopps bis zu etwa 15 m Tiefe Feinsande anstehen, die dem Strandmaterial in der Korngröße entsprechen. Es müßte allerdings noch geprüft werden, ob dieses Material mit einem Grundsauger gewonnen werden kann; da aber in dem Bohrbericht nur wenige sehr dünne Kleieinlagen erwähnt werden, scheint dieses wahrscheinlich. Somit könnte dieses Material mit einer maximalen Spülentfernung von

$$\text{rd. } 2000 \text{ m}$$

dem westlichen Ende der Abbruchsstrecke zugeführt werden, von wo her durch den östlich gerichteten Küstenlängstransport eine Verfrachtung über die gesamte Abbruchsstrecke gewährleistet ist.

Überschlagsrechnungen zeigen, daß die Förderung von 125 m^3 je Stunde über 2000 m Spülentfernung (Feinsand mit einer mittleren Korngröße von rd. 0,2 mm) wirtschaftlich mit einer Rohrleitung von

$$\text{rd. } 250 \text{ mm Lichtweite}$$

durchgeführt werden kann, wobei mit einem Mischungsverhältnis Sand : Wasser von 1 : 4 (das durch einen Grundsauger ohne weiteres erreicht werden kann) ein Energieaufwand von

$$\text{rd. } 2 \text{ kWh/m}^3$$

erforderlich ist, bei 0,12 DM/kWh also

$$\text{rd. } 0,24 \text{ DM/m}^3$$

vom Energieaufwand her. Mit Lohnkosten, Reparaturen, Verlegung der Rohrleitung usw. kann also an Betriebskosten mit

$$\text{rd. } 0,5 \text{ DM/m}^3$$

gerechnet werden, bei $200\,000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ demnach mit

$$\text{rd. } 100\,000 \text{ DM/Jahr für } 200\,000 \text{ m}^3 \text{ Spülmenge.}$$

Es wird sich dabei um einen einfachen Grundsauger handeln, der, in Pontonform zerlegbar,

von nur einem Mann (Baggerführer) betrieben wird. Dieser Grundsauger wird zwei in Reihe geschaltete Pumpen aufweisen müssen ($H_{\text{man}} = \text{rd. } 90 \text{ m WS}$), seine Anschaffungskosten werden z. Z. 250 000 DM nicht überschreiten, während die (schwimmende und auf Land liegende) Rohrleitung auf etwa 200 000 DM zu veranschlagen ist, so daß insgesamt für die Anschaffungskosten einer solchen ständigen Spülanlage rd. 500 000 DM vorzusehen wären.

Mit einem Betrag von 1 000 000 DM ließe sich also die Spülanlage beschaffen und 5 Jahre lang betreiben, wobei in diesem Zeitabschnitt jedem lfd. m der 2000 m langen Abbruchstrecke 500 m³ Sand zugeführt würden. Diese verhältnismäßig geringen Kosten erklären sich daraus, daß die Spülanlage und der Spülbetrieb ganz an die vorliegenden Verhältnisse angepaßt werden. Bei größeren maximalen Spülentfernungen als 2000 m würden die Kosten für Anschaffung und Betrieb annähernd linear zunehmen; bei 4000 m Spüleleitung wären also rd. 2 000 000 DM für die Anlage und einen fünfjährigen Betrieb erforderlich.

Von den Kosten her ist also eine ständige Vorspülung wirtschaftlich durchaus zu vertreten.

Die Funktion der Aufspülung soll eine Dünenfuß-Erhöhung sein, nicht eine Strandaufspülung. Es ist also darauf zu achten, daß das Material unmittelbar am Dünenfuß bleibt und nicht seewärts verteilt wird. Hierzu kann ein Längswerk aus sandgefüllten Kunststoffgewebeschläuchen (ähnlich den Entwürfen des WSA Norden) verwendet werden, das der Aufspülung als Fußsicherung dient. Dieses Längswerk würde aber nicht am Kliffuß liegen, sondern in einem so weiten Abstände davor, daß auf den aufgespülten Flächen eine natürliche Strandbrandung auch bei erhöhten Wasserständen herrscht. Es wird eine Entfernung von 50 m vor dem Kliffuß vorgeschlagen.

Bei einer mittleren Kliffußhöhe von NN + 2,0 m und einer Strandneigung von 1:50 liegt der Strand in dieser Entfernung auf etwa NN + 1,0 m, wird also bei MThw noch überflutet. Wenn ein Schlauchwerk von 1 m Höhe (Durchmesser) verwendet wird, liegt seine Kronenhöhe etwa auf NN + 2,0 m, also bereits auf der Höhe des jetzigen Kliffußes. Verwendet man für die Aufspülung eine ähnliche Körnung wie die des vorhandenen Strandmaterials (Feinsand), so stellt sich der Spülstrand bei ungehindertem Spülwasserabfluß ebenfalls auf etwa 1:50 ein. Wird vom Dünenfuß her aufgespült, entsteht zwischen dem Kliffuß und dem Längswerk eine 50 m breite flache Berme, die zur Düne hin auf NN + 3,0 m ansteigt. Auf dieser Berme können bei Sturmflut die Wellen ungestört ausbranden, nur bei sehr hohen Sturmflutwasserständen wird der Kliffuß von dem Wellenaufbau erreicht. Während aber im derzeitigen Zustand eine Sturmflut mit einem Wasserstand von NN + 3,0 m vor dem Kliffuß 1 m tiefes Wasser mit den entsprechenden Wellenhöhen und Strömungen erzeugt, wird nach dem Bau dieser Berme bei diesem Wasserstand gerade noch der Kliffuß von den ausbrandenden Wellen erreicht. Wie Abbildung 3 zeigt, sind Sturmfluten mit höheren Scheitelwerten als NN + 3,0 m verhältnismäßig selten. Es kann erwartet werden, daß mit einer Bermenhöhe auf NN + 3,0 m der Abbruch der Dünenkante zum Stehen kommt.

Da die Berme nur bei Sturmfluten vom Wasser erreicht wird, in der übrigen Zeit aber trockenliegt, ist mit Sandflug bei geeigneten Winden zu rechnen. Es sollte versucht werden, durch Sandfangzäune auf der Berme Vordünen zu gewinnen, die zwar bei Sturmflut zum Teil wieder zerstört werden, jedoch den Sandhaushalt günstig beeinflussen werden.

Die Rohrleitung muß unmittelbar im Kliffuß in einer Höhe von NN + 4,0 m oder NN + 4,5 m verlegt werden; sie kann aufgeständert werden. Es besteht dann die Möglichkeit, vor dem Dünenfuß gegebenenfalls noch höher als NN + 3,0 m aufzuspülen. In bestimmten Abständen sind in der Rohrleitung Abzweigstücke vorzusehen, von wo aus mit leichten Zweigleitungen der Sand an jede erwünschte Stelle gebracht werden kann. Da diese Endleitungen keinem großen Druck mehr ausgesetzt sind, können dünnwandige Rohre mit Schnellschlußkupplungen verwendet werden.

Die Rohrleitung wird zweckmäßigerweise mit dem Längswerk vorgestreckt werden. Zum Aufspülen der Berme werden

$$1 \cdot 50 \cdot 2000 = 100\,000 \text{ m}^3$$

Sand benötigt, also die Hälfte der vorgesehenen Jahresmenge.

Obwohl bei diesem Vorschlag das Längswerk nur einen Geländevorsprung von 1 m Höhe auf dem Strand darstellt, ist auch hier damit zu rechnen, daß durch Reflexionen der Strand vor dem Längswerk ausgeräumt und das Längswerk durch Unterspülung gefährdet wird. Daher wird vorgeschlagen, auch vor dem Längswerk so weit aufzuspülen, daß der Strand auf der Höhe der Oberkante dieses Längswerkes zu liegen kommt. Es ist zwar damit zu rechnen, daß die Einspülverluste hier größer als auf der Berme werden, es kann dann aber nach Errichtung der Berme die ganze jährliche Spülmenge von 200 000 m³ für diesen Zweck verwendet werden. Da dieses mehr als die mittlere jährliche Erosionsrate ist, muß es möglich sein, einen solchen Strand vor dem Längswerk zu erhalten. Das Längswerk würde dann nur bei Sturmflut in Funktion treten und den Bermenfuß halten, wenn der Strand vor dem Längswerk ausgeräumt wird.

Wenn das Längswerk erst einmal in Sand eingebunden liegt, wird die Gefahr sowohl der Beschädigung durch Treibzeug als auch der mutwilligen oder fahrlässigen Beschädigung vermindert.

Das Längswerk kann aus zwei nebeneinanderliegenden und miteinander verbundenen Schläuchen bestehen, die auf einer Gewebematte verlegt werden. Diese sollte landseitig etwa 5 m verlängert und seeseitig noch etwa 1 m tief eingegraben werden, um auch bei starken Strandhöhenänderungen eine Unterspülung zu verhindern.

Es muß damit gerechnet werden, daß bei freiliegendem Längswerk und bei schrägem Wellenauflauf Längsströmungen entstehen, die Erosionsrinnen sowohl vor dem Längswerk als auch auf der Berme hinter dem Längswerk erzeugen können. Gegen diese Längsströmungen können kurze Abweiser aus Schläuchen oder Säcken vorgesehen werden. Solche Querwerke von etwa 10 m Länge in rund 20 m Abstand sollten auch vom Längswerk her in das Bermenfeld reichen. Ihre Höhe sollte die gleiche wie die des Längswerkes sein.

Es kann aber auch daran gedacht werden, auf Querwerke ganz zu verzichten und die Fußsicherung des Längswerkes durch immerwährende neue Vorspülungen zu bewerkstelligen. Ein Versuch könnte zeigen, ob dies möglich ist. Es brauchten dann Querwerke nur an den Stellen angelegt zu werden, wo große örtliche Erosionen dies notwendig erscheinen lassen.

Die Vorspülungen seeseitig des Längswerkes brauchen nicht gleichmäßig auf ganzer Länge ausgeführt zu werden, es genügt, wenn in bestimmten Abständen das Material eingebracht wird, dessen Verteilung dann die Wellen vornehmen. Bei dem überwiegenden östlichen Transport wird besonders das westliche Ende des Abbruchgebietes mit Sand zu versorgen sein. Es ist möglich, daß wenige Eingabestellen auf dieser Strecke zur Versorgung der ganzen Abbruchstrecke ausreichen.

Die Aufspülung seewärts des Längswerkes wird sich in ihrer Neigung den angreifenden Wellen anpassen. Sie stellt eine weitere Sicherung des Dünenfußes durch die verringerte Wassertiefe und die damit verbundene seeseitige Verschiebung der Brandungszone dar. Jedoch kann bei Sturmflut und bei ausgeräumtem Strand vor dem Längswerk die Berme allein den Schutz des Dünenfußes übernehmen.

An der Entnahmestelle ist darauf zu achten, daß die Süßwasserlinse der Insel möglichst ungestört bleibt. Deshalb sollte die Entnahme so dicht wie möglich an die Randdüne gelegt werden, wo ohnehin schon die Süßwasserlinse geringe Mächtigkeit hat. Zur wirtschaftlichen Forderung ist eine Entnahmetiefe von 10 bis 15 m vorzusehen. Wenn nicht genügend Seewasser als Grundwasser zuläuft, muß eine zusätzliche Pumpstation Seewasser anliefern.

Der entstehende Baggersee sollte von Anfang an so geplant und angelegt werden, daß er später als Badesee o. ä. genutzt werden kann. Wegen seiner großen Tiefe wird er ein Salzwassersee bleiben, der aber nach Beendigung der Baggerarbeiten sehr klares Wasser aufweisen wird, weil Wellenbewegungen nicht bis zur Sohle reichen können. Der Wasserspiegel wird sich etwa auf der Höhe des Tidehalbwassers einstellen.

Mit der ständigen Vorspülung kann eine sehr flexible Küstenverteidigung erreicht werden, bei der das Material gezielt dort eingebracht wird, wo es gerade benötigt wird. Wenn günstige Wetterlagen den Strand stabil bleiben lassen, kann die Vorspülung vorübergehend eingestellt werden. Dagegen kann nach lebhafter Sturmfluttätigkeit durch Zwei- oder sogar Dreischichtenbetrieb die Leistung verdoppelt oder verdreifacht werden.

Wenn wider Erwarten die Berme auf NN + 3,0 m nicht ausreichen sollte, um den Dünenfuß gegen weiteren Abbruch zu schützen, so könnte durch ein weiteres Längswerk auf der Berme oberhalb des ersten Längswerkes die Berme auf NN + 4,0 m am Dünenfuß erhöht werden, wodurch mit Sicherheit der Dünenfuß geschützt wird. Außerdem könnte empfohlen werden, eine 1 : 6 geneigte Böschung durch eine Verbindung von Kunststoff- und Faserwerkbauweise zu erstellen. Eine ähnliche Bauweise (verankerte Strohballen) wurde auf Langeoog bereits 1944 zum Schutz einer Randdüne am Flinthörn angewandt. Mit einer solchen flachen durch Strohballen geschützten Böschung werden die schädlichen Reflexionen auf ein Mindestmaß herabgesetzt.

Wenn späterhin doch noch ein massives Deckwerk errichtet werden müßte, kann mit der Spülleitung das erforderliche Material für den Unterbau des Deckwerkes herangeschafft werden, ohne daß die Düne angegriffen wird.

Zunächst aber sollte die Wirkung der längswerkgeschützten Berme abgewartet werden.

C. Ablauf und Stand der Bauarbeiten bis März 1972

1. Das Kunststoffgewebe-Schlauchwerk

Das aus sandgefüllten Kunststoffgewebe-Schläuchen bestehende Werk hat den Zweck, die zur Sicherung des Dünenfußes vor der Randdüne des Pirolatales aufzuspülende Sandfläche besonders an ihrer Seeseite zu stabilisieren (s. S. 97).

Mit dem Bau des Längswerkes wurde am 7. Juli 1971 am östlichen Ende der insgesamt 2500 m langen Baustrecke begonnen (Abb. 4). Das etwa 50 m vor dem Dünenfuß verlegte Längswerk aus Zwillingschläuchen (1 m Ø, Abstand von Schlauchmitte bis Schlauchmitte 1,30 m) ist in Abständen von durchschnittlich 60 m durch insgesamt 41 Riegel (60 m lang) an den Dünenfuß angeschlossen. Zur Abweisung möglicherweise auftretender Längsströmungen am Schlauchwerk selbst sind außerdem 80 Querwerke von 10 m Länge in Abständen von 20 m angeordnet. Einen fertiggestellten noch nicht mit Sand überspülten Teil dieses Schlauch-Längswerkes am östlichen Beginn der Baustrecke zeigt Abbildung 24.

Die für das Längswerk insgesamt benötigten Schlauchlängen betragen nach Angabe des WSA Norden:

Zwillingschläuche	2500 lfd. m
Einzelschläuche	900 lfd. m
Riegel (60 m lang)	2460 lfd. m
Querwerke (10 m lang)	1600 lfd. m
zusammen	7460 lfd. m

Hiervon waren bis Anfang März 1972 eingebaut:

Zwillingsschläuche	1900 lfd. m
Einzelschläuche	900 lfd. m
Riegel (60 m lang)	2300 lfd. m
Querwerke (10 m lang)	1460 lfd. m
zusammen	6560 lfd. m

Abb. 24.
Das Schlauchwerk auf
dem Strande vor der
Randdüne des Pirola-
tales auf Langeoog bei
Riegel 10, s. Abb. 4
(Photo: WSA Norden,
28. 9. 1971)



2. Sandeinspülung

Von der Gutachtergruppe war empfohlen worden, die Rohrleitung für das Einspülen des Sandes entsprechend dem Baufortschritt des Schlauchwerkes vorzustrecken, damit das Schlauchwerk möglichst schnell mit Sand überdeckt werden konnte, um es vor Beschädigung durch Wasser- und Wellenangriff zu schützen. Dementsprechend war vom WSA Norden als Termin für den Abschluß der Sandeinspülungsarbeiten der 11. 12. 1971 festgesetzt worden, also etwa 2 Wochen nach dem geforderten Abschluß der Schlauchverlegungsarbeiten, deren Fertigstellungstermin der 30. 11. 1971 war.

Schon vor Beginn der eigentlichen Spülarbeiten verursachten die Baustelleneinrichtung, der Transport des Baggers nach der Sandentnahmestelle im Großen Schlopp im Osten des Pirolatales (Abb. 25) sowie das Aufstellen der vom Baggerort bis zum Westende der Baustelle 3300 m langen Spülrohrleitung mit Einbau einer Zwischenpumpstation beträchtliche Zeitaufwendung, so daß mit der Sandeinspülung erst am 7. 10. 1971 begonnen werden konnte. So waren Teile des Schlauchwerkes wegen der fehlenden Sandeinbettung längere Zeit den Wasserkräften unmittelbar ausgesetzt. Die hierauf zurückzuführenden Beeinträchtigungen werden in Abschnitt XVI noch behandelt.

Der Sand wird in 40 etwa 50×60 m große Felder eingespült, die auf der Strandfläche zwischen Dünenfuß und Schlauchlängswerk von den 41 Riegeln gebildet werden (Abb. 4). Als erste wurden die im Gebiet der tiefsten Strandlage befindlichen Spülfelder 12 bis 16 mit Sand überspült, um hier für die Randdüne möglichst schnell einen Schutz zu schaffen. Daß diese Überlegung richtig war, haben die Windfluten im Oktober und November 1971 gezeigt. An-

schließend wurden dann die Spülfelder westlich (Nr. 17 bis 20) und östlich (Nr. 12 bis 6) beschickt.

Bei den leichten Sturmfluten am 16./17. November 1971 mit Wasserständen von 1,59 m und 1,43 m über MThw brach die Spülrohrleitung. Bis zur Beseitigung des Bruches wurden die östlich liegenden Felder Nr. 1 bis 7 aufgespült. Ab 9. Dezember 1971 konnte der Spülbetrieb wieder weiter nach Westen verlegt werden; dort wurde in die Felder 19 und 20 (zum zweitenmal) und weiterhin in die Felder 21 und 22 eingespült.

Ab 23. Dezember 1971 wurde der Spülbetrieb durch eine Winterpause unterbrochen, die sich wegen des inzwischen eingetretenen Frostwetters bis zum 24. Februar 1972 ausdehnte. Mit

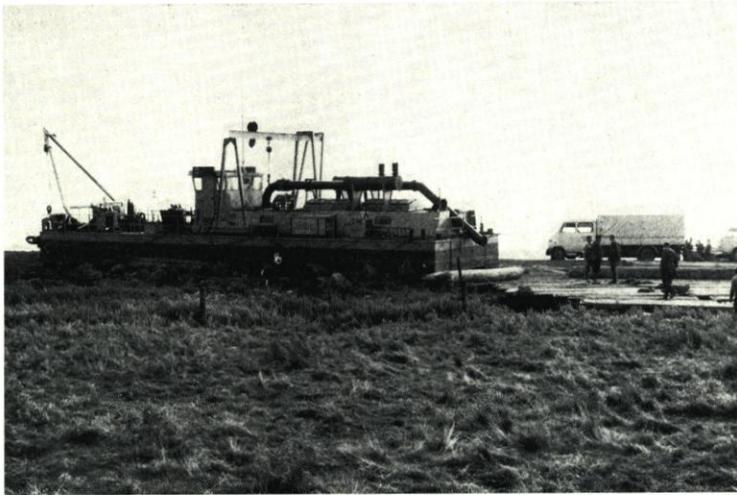


Abb. 25.
Transport des Spülbaggers über Land auf luftgefüllten Gummischläuchen nach der Sandentnahmestelle im Großen Schlopp im Nordosten des Pirolatales (Photos: WSA Norden, 28. 9. 1971)

Wiederbeginn der Spülarbeiten am 25. Februar 1972 wurde der Sand in die westlichen Felder 22 bis 26 gepumpt. Die nachstehende Tabelle 3 gibt eine Übersicht über den Spülbetrieb vom 7. 10. 1971 bis zum 10. 3. 1972.

Tabelle 3

Monat	Zahl der Spültage	beschickte Spülfelder Nr.:	Zahl der beschickten Spülfelder
Oktober 71	19	12, 13, 14, 15, 16	5
November 71	22	1, 2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20	13
Dezember 71	16	3, 4, 5, 6, 7, 9, 19, 20, 21, 22	10
Januar 72	—	kein Spülbetrieb	
Februar 72	3	22, 23	2
März 72	7	24, 25, 26	3
	67 Spültage		33

In der Zeitspanne vom 7. 10. 1971 (Beginn des Spülbetriebes) bis zum 10. 3. 1972 (Ende der Berichtszeit) ist an 67 Tagen gespült worden. Die eingespülte Sandmenge gibt das WSA

Norden mit rund 270 000 m³ einschließlich Spülverluste an, das sind im Durchschnitt 4000 m³ je Spültag.

Bis Anfang März 1972 sind von den insgesamt 40 Spülfeldern 17 Felder einmal und 8 Felder zweimal mit Sand überspült worden, 15 Felder haben noch keine Sandeinspülung erhalten.

Nachtrag betr. Beendigung der Bauarbeiten:

Der Bau des Schlauchwerkes wurde am 14. 6. 1972 fertiggestellt; die Aufspülerarbeiten sind am 15. 7. 1972 für dieses Jahr abgeschlossen worden. Nach Mitteilung des WSA Norden wurden insgesamt rd. 550 000 m³ Sand an den Strand gespült, wovon schätzungsweise 50 000 bis 80 000 m³ bei Windfluten verdriftet worden sind.

VI. Beurteilungen und Empfehlungen

A. Beurteilung der bisherigen Wirkung des Schlauchlängswerkes vor dem Pirolatal

Die in West-Ost-Richtung verlaufende Sandwanderung auf dem etwa 1:500 geneigten Vorstrand von Langeoog wird durch das Dünensicherungswerk (durch Schläuche stabilisierte Aufspülung einer Brandungsberme) nicht beeinflusst. Auch ist es keineswegs so, daß der Abbruch der Randdüne für den Sandhaushalt der im Angriff liegenden Strandstrecke eine nennenswerte Rolle spielt; die Abbruchmenge ist um Zehnerpotenzen geringer als die in der Brandungszone in Bewegung befindliche Sandmenge. Dabei ist die Brandung auf dem Vorstrand im wesentlichen durch die Morphologie (Lage und Höhe) der Riffkörper bedingt, die sich am Westende der Insel aus den anlandenden Platen aufbauen. Die Riffplatten und Riffkörper können die Wellenenergie durch Refraktion und Diffraktion am Strand sowohl verstärken als auch vermindern sowie die Wellenrichtung stark beeinflussen.

Da die Wellenhöhe stärker mit der Windgeschwindigkeit zunimmt als der Windstau auf dem Ruhewasserspiegel, kann hinter Riffkörpern, die die Höhe des MThw erreichen oder überschreiten, das bekannte Paradoxon auftreten, daß bei schweren Sturmfluten die Wellenhöhen in der Strandbrandung geringer sind als bei leichten Sturmfluten, weil die hohen, aus der offenen See einlaufenden Wellen einen erheblichen Teil ihrer Energie durch die Riffbrandung verlieren.

Immerhin haben die Wellenbeobachtungen des WSA Norden gezeigt, daß am Strande von Langeoog schon bei leichten Sturmfluten (Windfluten) Wellen bis zu 2 m Höhe auftreten können:

Datum	Wind	Wasserstand über MThw	Wellenhöhe
16. 11. 71	W 8	1,59 m	1,7 m
17. 11. 71	W 9	1,43 m	2,0 m

Nach dem Längsnivellement vom 8. 3. 1972 des WSA Norden weist die Oberkante des Schlauchwerkes im Mittel Höhen zwischen NN + 1,5 m und NN + 2,0 m auf. An einzelnen Stellen (so zwischen den Riegeln 23 und 24, s. Abb. 4) liegt sie sogar unter NN + 1,0 m, also noch unter dem MThw = NN + 1,24 m. Der Zwillings Schlauch liegt somit bei fast jeder normalen Tide schon im Bereich der Brandung.

Bei der Erstellung des Gutachtens war davon ausgegangen worden, daß das Schlauchwerk

(Höhe = 1,0 m) auf dem NN + 1,0 m hohen Strande errichtet wird, also eine Kronenhöhe von NN + 2,0 m hat. Mit einer Neigung der aufzuspülenden Berme inselwärts des Schlauchwerkes von 1 : 50 wurde erstrebt, daß der zu schützende Dünenfuß auf mindestens NN + 3,0 m liegen sollte. Obwohl wegen des tiefliegenden Strandes die Kronenhöhe des Schlauchwerkes streckenweise niedriger als NN + 2,0 m war, hat sich bei den allerdings extrem wenigen und leichten Sturmfluten des Winters 1971/72 gezeigt, daß schon eine geringe Anhebung der Strandhöhe, bedingt sowohl durch das Schlauchwerk wie auch durch die Sandaufspülung, eine beachtliche Verminderung des Dünenabbruches herbeiführte.

Bereits nach Fertigstellung einiger Abschnitte des Längswerkes zeichnete sich an diesen Strecken eine Zunahme des Sandvolumens auf dem Strande ab. Wie erwartet, ergab sich auch landwärts des Schlauchwerkes eine Zunahme des Sandbestandes, in dem der durch überschlagende Wellen in die Felder zwischen Längswerk und Randdüne transportierte Sand nicht mehr mit dem Wellenrücklauf auf den Vorstrand zurückgelangen konnte. Dieser hinter dem Längswerk abgelagerte Sand weist zunächst ein großes Porenvolumen auf, das sich z. B. auch in einer schlechten Begehbarkeit äußert. Bei der Besichtigung der Baustelle durch die Gutachter im November 1971 blieb es unklar, wieweit dieser Sand durch äolischen oder hydraulischen Transport in diese als Spülfelder vorgesehenen Flächen gelangt war.

Als überraschendes Ergebnis ist die Tatsache zu verzeichnen, daß das Reflexionsverhalten des nahezu kreisförmigen Profils des seewärtigen Zwillings Schlauches erheblich von dem einer senkrechten Wand abweicht. Gerade dadurch, daß sich die aufgetretenen Hochwasser höhenmäßig nur wenig vom MThw unterschieden, kam die Außenseite des Zwillings Schlauchwerkes im Mittel zweimal am Tage unmittelbar mit den brechenden, wenn auch nicht sonderlich hohen Wellen in Berührung. Bei einer vergleichbaren senkrechten Wand wären mit Sicherheit starke Erosionen vor diesem Geländesprung die Folge gewesen, wie aus zahlreichen Modell- und Naturuntersuchungen bekannt ist; dies läßt sich auch theoretisch (durch das Strömungsfeld der stehenden Welle vor einer senkrechten Wand) begründen.

Da das Schlauchwerk in den wellenaktiven Monaten November und Dezember zum größten Teil noch keine Vorspülung besaß, konnte der bemerkenswerte Effekt beobachtet werden, daß sich vor dem etwa 1 m hohen abrupten Geländesprung, der durch den Zwillings Schlauch gebildet wird, im allgemeinen eher Ablagerungen als Erosionen einstellten (von den gleich zu behandelnden Kolken abgesehen). Wieweit dies durch die gerade in diesen Monaten vorherrschenden Wasserstände, Wellenhöhen und -perioden begünstigt wurde, läßt sich z. Z. noch nicht beurteilen. Sicher scheint aber zu sein, daß das Reflexionsverhalten einer halbkreisförmigen Wand oder zumindest das damit verbundene Verhalten von Feststoffbewegungen vor einer solchen Wand aus bisher noch nicht genügend bekannten hydromechanischen Gründen wesentlich günstiger als das einer senkrechten Wand ist. Es muß aber hier vor Verallgemeinerungen und zu großem Optimismus auch in bezug auf zukünftige Anwendungen gewarnt werden; so sind Bedingungen vom Wellenangriff und den damit verbundenen Wasserständen her denkbar, bei denen diese Einflüsse von stärkeren, in negativer Richtung (Erosion vor dem Schlauchwerk) wirkenden Faktoren überlagert werden können.

Unklar bleibt nach den wenigen Erfahrungen des extrem milden Winters 1971/72, ob die 10 m langen Querwerke notwendig waren. Dies wird sich erst beurteilen lassen, wenn eine schwere Sturmflut das Längswerk belastet, bei der sich der Brechpunkt der Strandbrandung unmittelbar über dem Schlauchwerk befindet. Auch die Wellenrichtung spielt hier eine wichtige Rolle. Manches deutet darauf hin, daß die Querwerke entbehrlich sind, weil das Halbkreisprofil des Schlauchwerkes nicht das Reflexionsverhalten einer senkrechten Wand zeigt. Bei Seegang zur Tidehochwasserzeit haben sich (zumindest bei dem Wellenklima des Winters 1971/72) sogar negative Effekte (örtliche Kolkungen) ergeben.

Auf jeden Fall hat der Winter 1971/72 mit seiner geringen Sturmfluthäufigkeit den Beweis erbracht, daß ein freiliegendes, noch nicht eingespültes Längswerk aus Kunststoffschläuchen unter den Bedingungen der deutschen Nordseeküste erheblichen, z. T. nicht vorhersehbaren Einflüssen aus den Naturverhältnissen ausgesetzt ist. Als positiv für die neuartige Bauweise – mindestens neuartig auf einem brandungsbedingten Strand wie dem Nordweststrand von Langeoog – soll hier nur verzeichnet werden, daß die Eis- und Frostzeiten, auch der Eisgürtel vor und am Längswerk, keine erwähnenswerten Beschädigungen der Kunststoffschläuche ergaben. Auch die befürchteten Beschädigungen durch Treibzeug usw. traten nicht auf, was allerdings mit der Einschränkung versehen werden muß, daß es sich bei dem Winter 1971/72 um einen sehr milden Winter bezüglich der Sturmfluthäufigkeit gehandelt hat.

Auch die im wesentlichen in der Sommersaison an den völlig freiliegenden Schlauchwerken erwarteten Schäden durch mutwillige oder fahrlässige Beschädigungen haben sich als gering erwiesen, woran wahrscheinlich die Informations-Druckschrift der Gemeinde Langeoog, die vom WSA Norden angeregt und gestaltet wurde (26), tatkräftigen Anteil hatte.

Als ausgesprochen gefährlich haben sich die hydrostatischen Druckunterschiede erwiesen, die unter natürlichen Bedingungen dann auftreten, wenn das zur Flutzeit sich in den noch nicht aufgespülten Feldern zwischen Längsschlauch und Düne angesammelte Wasser bei Ebbe wegen der wasserundurchlässigen Schlauchumrandung nicht schnell genug wieder ablaufen kann. Zwischen diesem zurückgehaltenen Wasser und dem Außenwasser kann der Wasserstandsunterschied solche Beträge annehmen, daß unter dem Längswerk ein hydraulischer Grundbruch eintritt.

Dies entsteht nach den Gesetzen der DARCYschen Filterströmung einfach dadurch, daß der (durch Durchlässigkeit = k -Wert, Druckunterschied und Sickerweg bedingte) Strömungsdruck größer als das auftriebsgeminderte Gewicht der seeseitigen Sandschicht wird.

Wahrscheinlicher und mit den Erfahrungen besser übereinstimmend ist aber die Erklärung der Entstehung solcher örtlichen Kolke dadurch, daß es sich um sog. „Fox-Channel-Erosions“ handelt, bei denen eine durchlässige Schicht (Kiesablagerung o. ä.) den Anlaß zu einer Durchströmung, damit einer starken Erosion ergibt, bis es zu einem turbulent durchströmten Kanal unter dem Längswerk kommt, in den das Längswerk einbricht. Diese Fälle sind im Winter 1971/72 mehrfach aufgetreten (Abb. 26).

Eine Vorhersage solcher Grundbrüche ist unmöglich, da sie die Kenntnis der Bodenschichtung Punkt für Punkt unter dem Längsschlauchwerk voraussetzen würde.

Allein aus der Tatsache, daß diese örtlichen Kolke (Unterspülungen) nicht nur naturbedingt durch erhöhte Tiden, sondern auch bei den Aufspülarbeiten auftraten (so beobachtet von der Gutachtergruppe bei der Ortsbesichtigung am 2. 3. 1972), geht hervor, daß bereits bei einem Geländevorsprung von 1 m Höhe und bei der hier vorhandenen Korngröße (im Mittel 0,2 mm) und Lagerungsdichte des Strandmaterials vor dem Nordweststrand von Langeoog diese Gefahr des örtlichen Grundbruches gegeben ist. Diese Gefahr des örtlichen Grundbruches (Fox-Channel-Erosion) ist aber in dem Augenblick im wesentlichen gebannt, wenn die Fläche landwärts des Schlauchwerkes aufgespült ist, weil dann die Sickerströmung durch den aufgespülten und im allgemeinen dadurch festgelagerten Boden nicht den „Nachschub“ liefern kann, den die turbulente Strömung in einem örtlich erweiterten Erosionskanal verlangt, im Gegensatz zu der großen Wasserreserve in einem nicht sandgefüllten Feld.

Nach Abschluß der Spülarbeiten sollte daher aufmerksam geprüft werden, ob auch dann bei erhöhten Tiden oder bei ablaufenden Sturmfluten Grundbrüche der bisher beobachteten Form auftreten. Besondere Berücksichtigung verlangt dabei die Feststellung, ob in den einzelnen Feldern zwischen Schlauchlängswerk und Düne durch eventuelle Erosion „Wasserreserven“ in Form von nicht porengelagerten freien Wassermassen vorhanden sind, die zu einem örtlichen Grundbruch führen können.

Positiv kann vermerkt werden, welche erstaunlichen Verformungen die sandgefüllten Kunststoffschläuche bei diesen örtlichen Grundbrüchen aufgenommen haben (Abb. 27). In dieser extremen Flexibilität wird einer der Hauptvorteile der neuen Kunststoffbauweisen gesehen.

Aus dem bisher Ausgeführten geht hervor, daß an einer Brandungsküste bereits ein durch einen 1 m hohen Schlauch gebildeter Geländesprung erhebliche Probleme in bezug auf seine

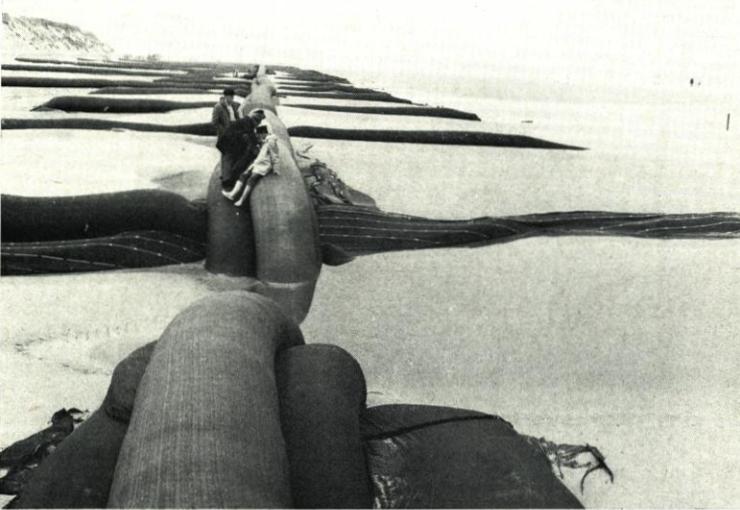


Abb. 26.
Versackung des Längs-
schlauches infolge Kolk-
bildung beim Spülfeld
14, s. Abb. 4



Abb. 27.
Verformung eines
Schlauches, der durch
Brandung vom Zwill-
ingsschlauch herun-
tergeschlagen wurde
(Photo: Teget, Han-
nover, 19. 11. 1971)

Erhaltung (nicht auf seine Funktion) aufwirft. Da im Mittelabschnitt der zu schützenden etwa 2,5 km langen Uferstrecke die Strandhöhen so niedrig waren, daß die Sollhöhe von NN + 2,0 m am Längswerk durch den verlegten Zwillingschlauch allein nicht erreicht werden konnte, wurde auf diesen noch ein Einzelschlauch von ebenfalls 1 m Durchmesser gelegt, wodurch in diesem Bereich ein künstlicher Geländesprung von sogar 2 m Höhe entstand. Diese Strecke war nicht nur bei erhöhten Tiden in vermehrtem Maße örtlichen Grundbrüchen aus-

gesetzt, sondern es wurde bei den Herbststurmfluten des Jahres 1971, besonders aber bei der Windflut vom 16./17. 11. 1971, der aufgelegte dritte Schlauch teils seewärts, teils landwärts von seiner aus dem Zwillings Schlauch gebildeten Unterlage geworfen (Abb. 27), wobei es wiederum für die Flexibilität des Kunststoffmaterials spricht, daß die z. T. erheblichen Verformungen dieses Schlauches von dem Schlauchmantel aufgenommen wurden. Die durch die doppelte Höhe des Geländesprunges bedingte Häufigkeit von örtlichen Grundbrüchen ist aus dem Vorstehenden leicht zu erklären.

Das Abwerfen des oberen Schlauches ist mit Sicherheit auf Wellenkräfte zurückzuführen. In einer neueren Arbeit von JEN und LIN (13) werden die Wellenkräfte beschrieben, die sich aus Versuchen auf ein Längswerk mit Halbkreisquerschnitt ergeben. Die Böschungsneigung betrug bei den Versuchen 1 : 15. Die Ergebnisse können zwar nicht unmittelbar auf die Belastung des oberen Schlauches des hier betrachteten Drillingslängswerkes übertragen werden, auch ist die Böschungsneigung aus i. M. 1 : 50 bei Langeoog von der in den o. a. Untersuchungen verschieden. Von der Größenordnung her aber ist doch von Interesse, daß bei der Wellenauflaufströmung Drücke auf den Halbkreisquerschnitt gemessen wurden, die in der Größenordnung von $2 \cdot H\gamma$ je lfd. m lagen, also 4 m WS bei 2,0 m Wellenhöhe wie am 17. 11. 1971. Beim Wellenrücklauf wurden Unterdrücke an der Oberfläche und seewärts gerichtete resultierende Kräfte festgestellt.

Diese Ergebnisse vermitteln eine Vorstellung von der Größenordnung der angreifenden Wellenkräfte. Die je nach Wellenphase landwärts (Wellenauflauf) wie auch seewärts (Wellenrücklauf) wirkenden Kräfte werden außer durch die Trägheit nur durch die Reibung der Schläuche mit ihrer Unterlage aufgenommen. Die statistischen Verhältnisse für die parallel verlegten und miteinander verbundenen Zwillingschläuche liegen dabei wesentlich günstiger als für den dritten Schlauch, der ohne Verbindung auf dem Zwillings Schlauch liegt. Auch mit der Filterunterlage ist die Reibung Kunststoff/Sand wesentlich größer anzusetzen als die von Kunststoff gegen Kunststoff. Hierzu kommt der Einfluß des Hebelarmes. So zeigen die Erfahrungen des Herbstes 1971 in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von JEN und LIN, daß ein Drillings Schlauchwerk von 2 m Höhe bei einem Brandungsangriff von 2 m hohen Wellen nicht stabil sein kann, wenn nicht besondere konstruktive Vorkehrungen getroffen werden können.

Abschließend sei noch auf Strandhöhenmessungen kurz eingegangen, die vom WSA Norden an vier Stellen (Profil 17, 21, 25 und 27; s. Abb. 4) vor dem Längswerk täglich ausgeführt worden sind. Die Deutung dieser Messungen ist dadurch erschwert, daß sich das Längswerk noch im Bau befand und Einflüsse der Aufspülung in benachbarten Feldern nicht auszuschließen sind. Die Frost- und Ostwindlagen im Januar und Februar 1972 ließen ebenfalls keine Aufschlüsse über das Verhalten des Schlauchwerkes und der bereits ausgeführten Vorspülungen zu.

Als auffallendes Ergebnis haben die Strandhöhenmessungen gezeigt, daß die einzige nennenswerte Windflut dieses Winters an allen Profilen gleiche Strandhöhen (auf etwa NN + 1,25 m) erzeugt hat, und zwar unabhängig davon, ob ein Längswerk bereits vorhanden war oder nicht. Es ist bekannt, daß Sturmfluten eine solche nivellierende Wirkung auf Strände ausüben, während stärkere örtliche Profilierungen eher bei wenig erhöhten Sturmtiden mit kurzer und steiler Brandung auftreten (30). So sind die starken Strandveränderungen, die Ende März 1972 beobachtet wurden, nichts Ungewöhnliches; es kann die natürliche Strandentwicklung auf dem Vorstrand durch das Längswerk nicht beeinflußt werden, wie sie z. B. als Lee-Erosion einer anlandenden Plate auftritt (vgl. Abschnitt IV E 1).

B. Beurteilung der künftigen Dünen- und Strandentwicklung

Wie auf Seite 97 ausgeführt, sollte das empfohlene Schlauchwerk in Verbindung mit einer Sandaufspülung vor dem Fuß der Randdüne dem Zwecke dienen, die beschriebene Kliffbrandung von der gefährdeten Düne auszuschalten und die Brandung dafür auf einer etwa 50 m breiten erhöhten Berme zwischen dem Längswerk und dem Dünenfuß als natürliche Strandbrandung auslaufen zu lassen. Dabei sollte die Oberkante des 1 m hohen Längswerkes auf NN + 2,0 m gelegt werden, so daß bei einer aufgespülten Neigung der Brandungsberme von 1 : 50 der Dünenfuß auf NN + 3,0 m liegen würde.

Obwohl das inzwischen fertiggestellte Schlauchwerk im Mittel nur eine Oberkante auf NN + 2,0 m bis 1,5 m oder noch niedriger aufweist, haben die Erfahrungen des Winters 1971/72 gezeigt, daß auch die niedrige Berme bisher ihre Funktion erfüllen konnte, denn an

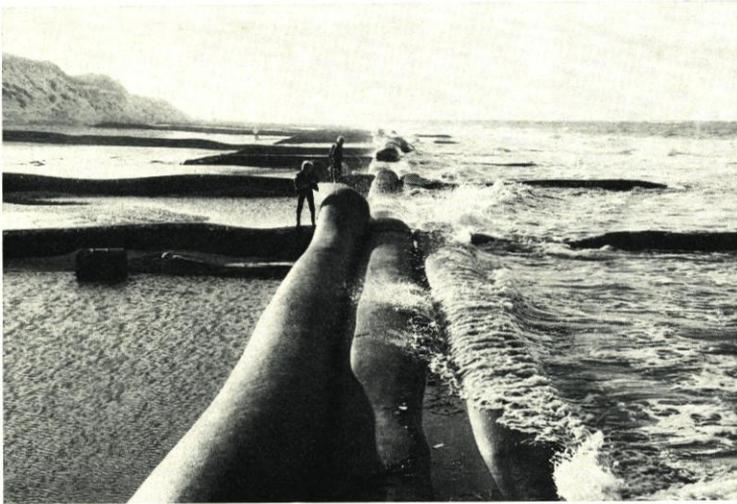


Abb. 28.
Brandung zur Tidehochwasserzeit am Schlauchlängswerk. Der Fuß der Randdüne (im Hintergrund) wird von den Brandungswellen nicht erreicht (Photo: WSA Norden, 26. 10. 1971)

den Stellen, wo die Längsschläuche bereits eingebaut waren, wurden selbst beim Fehlen der Sandeinspülung keine Dünenabbrüche mehr festgestellt, im Gegensatz zu den noch völlig ungeschützten Stellen (Abb. 28).

Selbstverständlich wird es – wie auf allen Nordseeinseln – bei sehr hohen Sturmfluten auch bei einer solchen Brandungsberme noch zu Dünenabbrüchen kommen können. Diesen kurzzeitigen Abbrüchen steht aber die natürliche Regeneration durch Sandwehen und Platanlandungen entgegen. Ob die gegenwärtige Höhe der Brandungsberme ausreichend ist, um dieses Gleichgewicht zu erhalten oder sogar zur positiven Seite hin zu verschieben, kann z. Z. noch nicht sicher gesagt werden, viele Anzeichen sprechen jedoch dafür. Es wird daher empfohlen, das Längswerk zunächst in seiner jetzigen Höhe und Lage zu belassen und zumindest einen weiteren Winter abzuwarten. Ferner wird empfohlen, den Dünenfuß auf ganzer Länge sorgfältig einzumessen und in wenigstens 120 m Abstand durch Schraubpfähle zu vermarken. An diesen Pfählen sollten Strandhöhenmessungen ausgeführt werden. Diese brauchten nicht täglich (wie die bisherigen Messungen) vorgenommen zu werden, sondern in größeren Zeitabständen, vor allem aber unmittelbar nach Sturmfluten, deren Wellenauflauf den Fuß der Randdüne erreichten. Der Vergleich mit den früher ausgeführten Messungen der Geschwindigkeit des Dünenrückganges (Anl. 2 in [23]) kann die schon jetzt feststellbare Wirkung des Schlauchwerks in Verbindung mit der Aufspülung der Brandungsberme überzeugend zeigen.

Mit der Frage der notwendigen Höhe der Brandungsberme ist die Frage ihrer Stabilität gegen Wellen- und Strömungsangriff verbunden. Auch hierzu wird empfohlen, das Verhalten des 1971/72 eingespülten Sandes im nächsten Winter zu verfolgen. Dazu müßte nach Ende der Badesaison, auf jeden Fall jedoch vor den ersten Herbststurmfluten 1972, der Sandkörper auf der Aufspülstrecke genau aufgemessen werden. Zweckmäßig wäre das Aufmaß feldweise auszuführen, und zwar so, daß der Sandkörper vor dem Längswerk getrennt von dem zwischen Längswerk und Dünenfuß vermessen wird. Als Bezugshorizont wäre NN \pm 0 m zu wählen. Dieses Aufmaß wäre nach Sturmfluten, spätestens aber zu Ende des Winters 1972/73 zu wiederholen. Im Gegensatz zu den Sandstandsmessungen, die nur örtliche Vorgänge wiedergeben können, kann der Vergleich dieser Flächenaufmaße besser das Gesamtverhalten des Spülkörpers wiedergeben.

Auf dem vor dem Längswerk liegenden Strande mit seinen wechselnden Seegangsverhältnissen treten stärkere Umlagerungen auf als in den durch das Schlauchwerk geschützten Spülfeldern. Diese Strandveränderungen sind ungefährlich, solange das Schlauchwerk nicht unterspült wird und absackt, womit Brandungsberme und Düne ihre Fußsicherungen verlieren würden. Nach den bisherigen Erfahrungen besteht diese Gefahr nicht; sie kann bei wenig erhöhten Tiden mit kurzem Seegang eher auftreten als bei hohen Sturmfluten, die den Strand etwa auf der Höhe des MThw ausgleichen.

Nach der auf Seite 89 ff. dargestellten Entwicklung scheint in naher Zukunft eine reichliche Sandzufuhr aus Platananlandungen bevorzuzustehen, die vor allem eine Verbesserung der Sandverhältnisse seewärts des Längswerks erwarten läßt. Dabei kann es, wie die regelmäßig eintretenden Lee-Erosionserscheinungen östlich der anlandenden Platen zeigen, durchaus auch vorübergehend zu einer kurzzeitigen Verschlechterung der Strandverhältnisse kommen.

Für den Sandkörper zwischen Längswerk und Düne, der die Brandungsberme bildet und den eigentlichen Schutz des Dünenfußes darstellt, wird der Vergleich der Aufmaße vor und nach dem kommenden Winter zeigen, ob und in welchem Ausmaß Sand verlorengegangen ist. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten:

1. es tritt eine Sandabnahme ein, die besonders in örtlichen Erosionen bestehen kann, aber die Funktion der Brandungsberme wird davon nicht betroffen, d. h. der Dünenfuß wird nicht angegriffen, oder
2. durch die Sandabnahme setzt auch der Dünenabbruch wieder ein.

Im ersten Falle braucht zunächst nichts unternommen zu werden, weil anzunehmen ist, daß sich in den Spülfeldern wieder ein Gleichgewichtszustand einstellt, der von selbst stabil bleibt. Nur dann, wenn Unterspülungen des Längswerkes auftreten sollten, müßten dagegen sofort bauliche Vorkehrungen getroffen werden.

Für den zweiten Fall würde das Aufmaß eine Sandmenge ergeben, die ersetzt werden muß; hierzu wird auf die Ausführungen Seite 96 verwiesen. Es wäre dann an eine ständige weitere Aufspülung zu denken, wobei aber die dazu erforderliche stationäre Spülanlage wesentlich kleinere Leistungen, Maschinensätze und Rohrleitungslichtweiten als die jetzige haben kann. An der jährlich zu spülenden Sandmenge kann die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens geprüft werden. Dabei sollte nur der Sandvorrat in den Feldern zwischen Düne und Längswerk ergänzt werden; eine seeseitige Vorspülung ist wegen der hohen Spülverluste nicht zu empfehlen.

Sollte sich aber eine weitergehende Sicherung des Dünenfußes als notwendig herausstellen, so wird im Zusammenhang mit der Aufspülung ein weiteres Längswerk vorgeschlagen, das etwa in der Mitte zwischen dem jetzigen Zwillingschlauch und der Düne liegen sollte (s. S. 99). Damit soll einmal eine zweite Brandungsberme vor der Düne geschaffen, zum anderen ein zu hoher Geländesprung verhindert werden (s. Abschnitt VI A, S. 106).

Ein solches Längswerk sollte ebenfalls eine Höhe von etwa 1 m aufweisen und könnte

z. B. aus der auf Seite 99 beschriebenen Böschung aus Strohballen, aber auch aus einem Zwillingschlauch mit entsprechender Unterlage bestehen. Auf Querwerke und Riegel kann hier verzichtet werden. Bei der Höhe des jetzigen Längswerkes und bei der Neigung der (davor dann zu wiederholenden) Aufspülung von 1 : 50 liegt die Unterkante dieses Längswerkes auf etwa NN + 2,5 m, so daß die zweite Brandungsberme dann die Höhe NN + 3,5 m haben würde; sie kommt also nur bei hohen Sturmfluten unter Wasser. Hiermit wird mit Sicherheit eine weitere fortlaufende Zerstörung der Düne zu verhindern sein. An zusätzlichem Spülsand für diese zweite Berme würden nur $25 \cdot 2000 = 50\,000\text{ m}^3$ benötigt.

Diese weiteren Sicherungsmöglichkeiten sollten aber nur dann erwogen werden, wenn die Notwendigkeit dazu besteht.

C. Empfehlungen für weitere Sicherungsvorkehrungen

Um das weitere Verhalten des Schlauchwerkes in Verbindung mit der Aufspülung der Brandungsberme zu verfolgen, wird empfohlen, das auf Seiten 107/108 beschriebene Ausmaß des Sandkörpers auf der Aufspülfläche auszuführen. Außerdem sollten die Veränderungen der Lage sowie das Verhalten des Fußes der Randdüne mit Hilfe eingemessener Markierungspfähle verfolgt werden.

Veränderungen der Morphologie des Seegatgebietes der Accumer Ee und des ihm zugeordneten Watteinzugsgebietes sollten weiterhin durch Terminvermessungen (Peilungen) und Luftaufnahmen überwacht werden.

Auf der Fläche der Brandungsberme sollte schon jetzt Dünengewinnungsarbeiten ausgeführt werden, um die Randdüne möglichst bald wieder in ihren früheren Zustand zu bringen.

VII. Zusammenfassung

A. Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchung der verschiedenen Komponenten des Naturgeschehens im Gebiet des Seegats Accumer Ee unter Benutzung morphologischer Deutungsmethoden hat keine Anhaltspunkte für eine grundsätzliche Änderung der bisher bestehenden Verhältnisse einschließlich der Sandzuführung nach der Insel Langeoog ergeben.

Als Ursache des etwa seit 1960 eingetretenen beschleunigten Abbruchs der Randdüne vor dem Pirolatal konnte die Umbildung der normalen Strandbrandung in eine Kliffbrandung, also eine örtlich bedingte und begrenzte Erscheinung, herausgestellt werden. Die inzwischen mit dem Schlauchwerk in Verbindung mit der Aufspülung einer 50 m breiten Berme vor der Randdüne gewonnenen Erkenntnisse haben dies bisher voll bestätigt.

B. Bauliche Bemerkungen über die neuartige Bauweise: Schlauchwerk als Stabilisierung einer mit Sand aufgespülten Brandungsberme.

Auf Seite 98 wurde auf die Möglichkeit hingewiesen, daß der Strand vor dem Längswerk infolge von Reflexionserscheinungen vertieft und das Bauwerk dann bei Unterspülung (Kolkbildung) gefährdet werden könnte. Daher war empfohlen worden, auch seeseitig des Längswerkes Sand aufzuspülen, und zwar bis Oberkante Schlauchwerk. Nach den jetzt vorliegenden Erfahrungen ist eine gefahrbringende Erosion des Strandes unmittelbar entlang der Außenseite der halbkreisförmigen Schläuche überraschenderweise nicht eingetreten, wobei allerdings darauf hinzuweisen ist, daß der sturmarme Winter 1971/72 keine starke Brandungsbelastung für das

Schlauchwerk gebracht hatte. Sollten sich auch künftig bei stärkerer Brandung an der seeseitigen Schlauchseite keine Erosionserscheinungen einstellen, dann könnte bei den weiteren Unterhaltungsarbeiten (Sandnachspülungen) auf eine Sandaufspülung vor dem Längswerk verzichtet werden.

Wenngleich die vorstehend beschriebene Kolkbildung infolge Erosion des seeseitig vom Schlauchwerk gelegenen Strandes bisher an keiner Stelle eingetreten ist, haben sich dennoch aus anderer Ursache an verschiedenen Stellen des Längswerks zum Teil erhebliche Kolke gebildet, die zur Versackung der Schläuche und zu größeren Sandverlusten der Fläche zwischen Längswerk und Dünenfuß geführt haben. Der Ausgangspunkt dieser Kolkbildungen war stets das bei fallendem Tidewasser hinter dem Längswerk in den Spülfeldern stehengebliebene Wasser gewesen, das sich infolge des hydrostatischen Druckunterschiedes eine Vorflut unter den Schläuchen nach See zu suchte. Die hierdurch entstandenen Schäden wären wahrscheinlich weitgehend vermieden worden, wenn die Spülfelder mit dem Baufortschritt des Längswerkes rechtzeitig mit Sand aufgespült worden wären.

Die auf Seite 98 empfohlenen 10 m langen und in etwa 20 m Abstand angeordneten Abweiser (Querwerke) am Längsschlauch haben bisher nur eine unbedeutende Schutzwirkung gezeigt. Offenbar sind die 60 m langen Spülfelder zwischen den Riegelwerken für das Entstehen von Erosionsrinnen durch strömendes Wasser zu kurz. Sollten weitere Beobachtungen dies bestätigen, könnte bei Anwendung der Schlauchbauweise an anderen Küstenstellen auf Querwerke teilweise oder ganz verzichtet werden.

Zur grundsätzlichen Anordnung des Sicherungswerkes vor dem Pirolatal, wie sie auf Seite 97/98 vorgeschlagen und später auch ausgeführt wurde, sei noch bemerkt, daß die gewählten Lage- und Höhenabmessungen nach den bisherigen Erfahrungen mit diesem Bauwerk die beabsichtigte Wirkung haben. Bereits nach Fertigstellung der ersten Strecken des Schlauchwerkes hörte an diesen Stellen der bis dahin stetig fortschreitende Abbruch des Fußes der Randdüne auf. Die aufgespülte Brandungsberme hat, soweit entsprechender Wellenauflauf eingetreten war, die Kliffbrandung in eine Strandbrandung umgewandelt. Zu irgendwelchen Änderungsvorschlägen in der Gesamtanordnung dieses Sicherungswerkes besteht daher zur Zeit kein Anlaß.

Der zum Schutz der Randdüne und des Pirolatales zunächst geplante Bau eines massiven Deckwerkes, dessen negative Auswirkungen (z. B. Lee-Erosion) erwiesen sind, braucht unter Berücksichtigung der seit langer Zeit unverändert bestehenden morphologischen Verhältnisse der Insel, des Seegats Accumer Ee und seines Watteinzugsgebietes sowie der gegenwärtig günstigen Entwicklung der Strandverhältnisse im Nordwesten der Insel Langeoog nicht weiter verfolgt zu werden, so daß auf die seinerzeit in Aussicht genommene gutachtliche Beurteilung eines solchen Bauwerkes verzichtet wird.

VI. Schriftenverzeichnis

1. BACKHAUS, H.: Die ostfriesischen Inseln und ihre Entwicklung. – Schriften der Wirtschaftswissenschaftlichen Gesellschaft zum Studium Niedersachsen, N. F. Bd. 12, Oldenburg 1943.
2. BÄHR, M.: Die Entwicklung des Vorfeldes zwischen Hever und Elbe seit dem Ende des 16. Jahrhunderts. – Dienstberichte des Wasser- und Schiffsamtes Tönning, 1961 und 1963 (unveröffentlicht).
3. BENDEGOM, L. VAN: Einige Betrachtungen über die Bildung und Umbildung von Watten. – Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Mai 1950.
4. Forschungsstelle Norderney: Die Strandentwicklung im Westteil von Langeoog seit Beginn des 18. Jahrhunderts. – Dienstbericht vom Sept. 1956, Bearbeiter: Kramer und Homeier.

5. Forschungsstelle Norderney: Stellungnahme zur Strandentwicklung im Westteil von Langeoog. – Dienstbericht vom 29. März 1956, Bearbeiter: Kramer.
6. Forschungsstelle Norderney: Strommessungen zur Frage des Schutzes der Inseln Langeoog und Spiekeroog in der Accumer Ee und Otzumer Balje. – Dienstbericht 1961, Bearbeiter: Homeier.
7. Forschungsstelle Norderney: Topographische Wattkarte 1 : 25 000 Nr. 6, Norderney 1962.
8. Forschungsstelle Norderney: Historische Karte 1 : 50 000 Nr. 6 mit Beiheft. – Bearbeiter: Homeier, Norderney 1963.
9. Forschungsstelle Norderney: Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge im Bereich der Accumer Ee als Grundlage für die Beurteilung der Strand- und Dünenentwicklung im Westen und Nordwesten Langeoogs. – Jahresbericht 1970 (Bd. XXII) der Forschungsstelle Norderney, Norderney 1971, Homeier, H., und Luck, G.
10. GAYE, J.: Entwicklung und Erhaltung der ostfriesischen Inseln. – Zentralblatt der Bauverw. 1934.
11. GAYE, J., und WALTHER, FR.: Die Wanderung der Sandriffe vor den ostfriesischen Inseln. – Die Bautechnik 1935.
12. HOMEIER, H.: Die Entwicklung des Westteils von Langeoog seit Beginn des 18. Jahrhunderts. – Jahresbericht 1956 (Bd. VII) der Forschungsstelle Norderney, Norderney 1956.
13. JEN, Y., und LIN, P.-H.: Plunging Wave Forces on a Semi-Circular Cylinder. – XII. Coastal Engineering Conferences Washington 1970, Proceedings Vol. III.
14. KATTENBUSCH, E., und LUCK, G.: Serienbefliegung der Riffbögen vor den ostfriesischen Inseln. – Deutsche Gewässerkundl. Mitt., H. 6, 1968.
15. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arb.-Gruppe Küstenschutz: Der Inselchutz auf den ostfriesischen Inseln Memmert, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog und Spiekeroog. – Bilanzbericht vom 29. 11. 1953, Bearbeiter: Thilo.
16. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Gutachtergruppe Langeoog, FÜHRBÖTER, LÜDERS und RODLOFF: Gutachten über die Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog (1. Teil). – 1971, nicht veröffentlicht.
17. LÜDERS, K.: Der Jadebusen und seine Bedeutung für Wilhelmshaven. – Werft Reederei Hafen, 18 (1937), H. 10.
18. LÜDERS, K.: Über rezente morphologische Entwicklungen im westlich der Insel Langeoog gelegenen Seegat „Accumer Ee“. – Zur Veröffentlichung in Vorbereitung.
19. POPPEN, H.: Die Sandbänke an der Küste der Deutschen Bucht der Nordsee. – Ann. der Hydrographie 40 (1912), H. VI bis VIII, Hamburg 1912.
20. RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. – Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 34, Hannover 1970.
21. WALTHER, FR.: Die Gezeiten und Meeresströmungen ins Norderneyer Seegat. – Die Bautechnik 1934.
22. Wasserbauamt Norden: Schutzbauten zur Erhaltung der ostfriesischen Inseln in den Jahren 1900 bis 1928. – Dienstbericht 1929, Bearbeiter: Gaye und Walther.
23. Wasser- und Schiffsamt Norden: Untersuchung über die Strand- und Dünenabbrüche auf Langeoog. – Dienstbericht 1970, Bearbeiter: Schwitters; nicht veröffentlicht.
24. Wasser- und Schiffsamt Norden: Entwurf zur Sicherung der Insel Langeoog. – Dienstbericht 1971, Bearbeiter: Franzius; nicht veröffentlicht.
25. Wasser- und Schiffsamt Norden: Sicherung des Vorstrandes und der Randdüne auf der Insel Langeoog mit Kunststoffgewebe-Schläuchen. – Dienstbericht 1971, Bearbeiter Franzius; nicht veröffentlicht.
26. Wasser- und Schiffsamt Norden: Informationsdruckschrift über die Arbeiten zur Dünen-sicherung vor dem Pirolatal auf Langeoog. – Gemeinde und Kurverwaltung Langeoog und Wasser- und Schiffsamt Norden, Norden 1971.
27. Wasser- und Schiffsamt Norden: Erfahrungsbericht über die Strand- und Dünen-sicherungsarbeiten auf Langeoog. – Dienstbericht 1971, Bearbeiter: Franzius.
28. WETZEL, G. und LUCHT, F.: Vergleichende Untersuchung der angewendeten Beschickungs-verfahren in den Küstengewässern der Deutschen Bucht und im Wattenmeer. – Zwischen-bericht DFG „Sandbewegung im Küstenraum“, 1971.
29. WITTE, H.-H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. – Die Küste, H. 19, 1970.
30. ZENKOWICH, V. P.: Processes of Coastal Development. – Engl. Ausg. Oliver and Boyd, London 1967.

Untersuchungen zur Pendelbewegung von Tideripplern im Heppenser Fahrwasser (Innenjade)¹

Von Johannes Ulrich

Summary

Systematic surveys, which were carried out in the area of the Heppenser Fahrwasser (Inner Jade, German Bight) from 1968 until 1971, resulted in new insights concerning short-term tidal oscillations at large-scale sand ripples. These motion processes were repeatedly studied on the same track during two tidal periods (September 14, 1970 and July 8, 1971). The motions of the ripples fixed on numerous echograms were subject to statistical analysis.

Inhalt

1. Vorbemerkung	112	4.1 Rippelformen	117
2. Problemstellung	113	4.2 Langfristige Umlagerungen	118
3. Vermessungs- und Auswertungsmethode	113	4.3 Kurzfristige Pendelbewegungen	119
4. Morphologische Ergebnisse	117	5. Schlußbemerkung	120
		6. Zusammenfassung	120
		7. Schrifttum	120

1. Vorbemerkung

Im Rahmen einer großräumigen Bestandsaufnahme der für die Sandbewegungsvorgänge im deutschen Nordsee-Küstenbereich typischen Bodenformen konnten zahlreiche Gebiete mit relativ hohen Sandrippeln ermittelt und kartiert werden (J. ULRICH, 1973). Ein großer Teil von ihnen liegt in den durch Gezeitenströme besonders stark beeinflussten Mündungstrichtern der großen Flüsse, wodurch deren Fahrwasserrinnen ständigen Veränderungen unterworfen sind. Um diese Reliefänderungen der Gewässersohle zu erfassen, sind regelmäßig zu wiederholende, engabständige Vermessungsarbeiten erforderlich, deren kontinuierliche Durchführung sich vor allem in stark befahrenen Gebieten als außerordentlich schwierig erweist.

Besonders die Messung kurzzeitiger Bewegungsvorgänge, die sich innerhalb weniger Stunden oder während einer Tide abspielen, ist in einem verkehrsreichen Gewässer nur schwer möglich. Außerdem werden die Hauptfahrwasser zumeist durch Bagger- und Schütтарbeiten mehr oder weniger beeinflusst, so daß die naturgegebenen Verhältnisse gestört sind. Aus diesen Gründen wurde ein Testfeld ausgewählt, das sich für Untersuchungen über Bewegungsvorgänge bei Sandrippeln besonders gut eignete, aber dennoch abseits vom Hauptschiffahrtsverkehr gelegen ist, nämlich das in einem Seitenarm der Innenjade gelegene Heppenser Fahrwasser (Abb. 1). Größere Seegangsstörungen treten hier relativ selten auf, und mit Baggerarbeiten oder mit der Verklappung von Material brauchte in diesem Gewässer bisher nicht gerechnet zu werden. Ferner scheiden hier Störfaktoren wie die Oberwasserführung in Flußmündungen, die mit Abflussschwankungen verbunden sein kann, aus, so daß die Untersuchungen im Gegensatz zu denen in der Unterelbe (H. GÖHREN, 1971) oder im Bereich des Rio Paraná (T. STÜCKRATH, 1969) unter den „vereinfachten“ Bedingungen im reinen Gezeitenstromrhythmus erfolgen konnten. Die Wassertiefen betragen hier etwa 8—12 m (unter SKN), Bezugspunkt war der in unmittel-

¹) Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Günter DIETRICH (Kiel) zum Gedenken.

barer Nähe des Untersuchungsgebietes (1000 m vom Zentrum des Testfeldes entfernt) gelegene Pegel Voslapp.

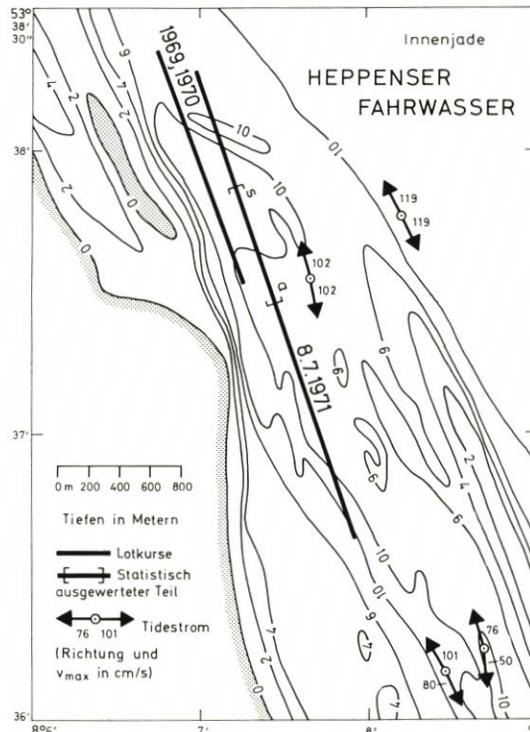
2. Problemstellung

Schon die Auswertung der Vermessungsergebnisse des Deutschen Hydrographischen Instituts und des Wasser- und Schiffsamtes Wilhelmshaven sowie die eigenen Lotungsergebnisse von 1968/69 aus dem Bereich des Heppenser Fahrwassers ließen eine besondere Häufung verschiedenartiger Riesen- und Großrippeln erkennen, deren Kämme quer zur Fahrwasser-richtung lagen. Über Form und Gefüge dieser stellenweise bis zu 3 m hohen Rippeln liegen bereits Untersuchungen von F. WUNDERLICH (1969) vor. Ein Vergleich der Echogramme einiger deckend liegender Längskurse aus den Jahren 1968/69 führte zu der Vermutung, daß bei den einzelnen Rippeln zumindest ein Teil der Sedimente Umlagerungserscheinungen ausgesetzt ist und daß möglicherweise Pendelbewegungen der Rippelkämme im Gezeitenrhythmus auftreten, die mit Hilfe einer geeigneten Vermessungsmethode erfolgreich untersucht werden können. Es handelt sich hierbei um zwei Phänomene, nämlich:

- die langfristigen Umlagerungs- (bzw. Auf- und Abbau-) Vorgänge und
- die kurzfristigen Pendelbewegungen und Umformungen der Rippeln oder ihrer Kämme.

3. Vermessungs- und Auswertungsmethode

In Ermangelung eines optimalen, aber auch kostspieligen lottechnischen Verfahrens (z. B. mit Hilfe fest installierter Geräte zur kontinuierlichen Messung der Sedimentbewegung am Boden sowie der ortsfesten Beobachtung von Einzelrippeln und ihrem Verhalten im Tidestrom) wurden die Vermessungsarbeiten mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nach der herkömmlichen Methode der Echolotung vom fahrenden Schiff aus vorgenommen, und zwar im Rahmen der hierbei möglichen technischen und navigatorischen Genauigkeiten. Durch die bereitwillige Unterstützung des Wasser- und Schiffsamtes Wilhelmshaven konnte das Seezeichenfahrzeug „Kurt Burkwitz“ für die Untersuchungen benutzt werden. Das Schiff besitzt eine moderne 210-kHz-Atlas-Echolotanlage (ATLAS-DESO 10, AN 1021, Öffnungswinkel des Schwingers 10°). Die Ablesegenauigkeit der Echogramme kann bei einwandfreien Aufzeichnungen (bei ruhiger See) optimale Werte von ± 5 cm erreichen.



Außer zahlreichen einzelnen Peilfahrten fanden zwei jeweils eintägige Meßfahrten im Bereich des Heppenser Fahrwassers statt, deren Ergebnisse nachfolgend analysiert werden sollen.

Bei der ersten Fahrt am 14. 9. 1970 wurde in der Zeit von 8.16 Uhr bis 17.30 Uhr ein bereits 1969 mehrfach abgelotetes Profil systematisch (kontinuierlich) während einer Tide vermessen. Hierbei sind insgesamt 32 Kurse alternierend auf der etwa 3 km langen Lotlinie gefahren worden, wobei die Navigation während dieser ersten Fahrt lediglich mit DECCA-Ortung erfolgen konnte, so daß ein Teil der Profile wegen zu großer Kursabweichung (± 100 m) für eine exakte Auswertung nicht brauchbar war. Doch die Analyse der deckend (oder nahezu deckend) liegenden Kurse erbrachte immerhin erste Erkenntnisse zur Frage der langfristigen Bewegungsvorgänge, da ein exakter Vergleich zu einem am 16. Oktober 1969 auf dem gleichen Peilkurs gefahrenen Profil gegeben war (Abb. 2 oben).

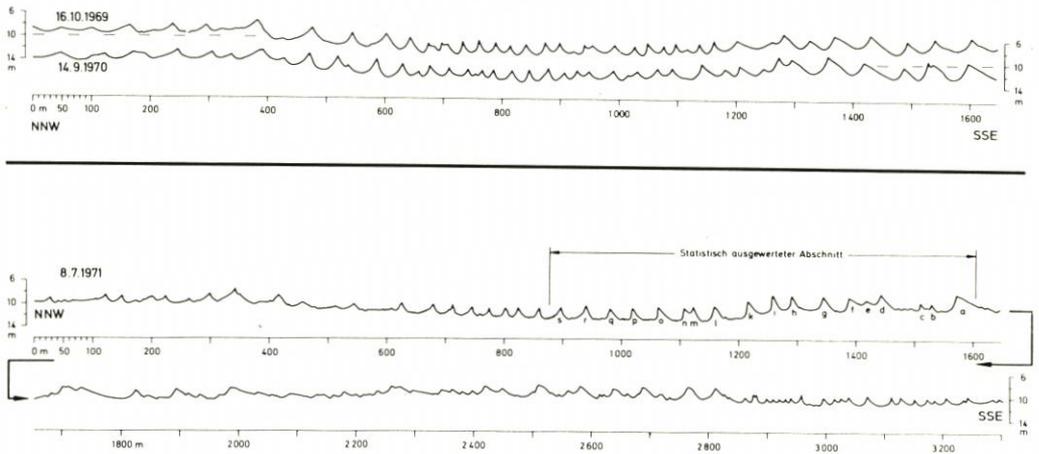


Abb. 2 (oben). Vergleich zweier Echolotprofile aus den Jahren 1969 und 1970 in einem ausgewählten Abschnitt des Heppenser Fahrwassers (unten). Echolotprofil des gesamten am 8. 7. 1971 in kontinuierlichen Wiederholungen während einer Tide gefahrenen Vermessungskurses (Profil Nr. 11, vgl. Abb. 5)

Auf Grund der im Jahre 1970 gesammelten Ergebnisse, die hier auszugsweise in 8 entzerrten Echolotprofilen wiedergegeben sind (Abb. 3), führte das gleiche Schiff am 8. Juli 1971 eine zweite konzentrierte Vermessung auf einem nahezu parallel verlaufenden Kurs in unmittelbarer Nähe durch (Lage s. Abb. 1). Hierbei wurde eine etwa 3,3 km lange Strecke in der Zeit von 6.38 bis 18.26 Uhr insgesamt 59mal während einer Tide abgelotet (Pegelstände s. Abb. 6). Als zusätzliches Navigationsmittel wurde diesmal ein optisches Peilverfahren mit Hilfe von zwei verankerten Radarbojen verwendet. Da die tidestrombedingten Schwoibewegungen der Bojen etwa in Kursrichtungen erfolgten, konnten die damit verbundenen Positionsfehler bei der Auswertung vernachlässigt werden.

Die durch geringe Stromversetzungen dennoch zeitweise auftretenden seitlichen Abweichungen von der Lotlinie wurden für die gesamte Strecke und ihre einzelnen Abschnitte statistisch erfaßt. Es stellte sich heraus, daß immerhin 38,5 % der Lotstrecke Abweichungen von höchstens ± 4 m aufweisen. Bei nur 18,5 % lagen die Werte über ± 20 m. Auf Grund dieser Berechnungen wurde ein besonders gut geeigneter Abschnitt zur statistischen Analyse hinsichtlich der Formveränderungen einzelner Rippeln ausgewählt (Lage dieses Testabschnittes s. Abb. 1).

Es sei hier erwähnt, daß durch die in stetem Wechsel gegenläufig gefahrenen Kurse keine Verfälschungen bei den Aufzeichnungen beobachtet wurden, so daß auch die jeweiligen Gegen-

HEPPENSER FAHRWASSER

Nach Lotungen durch S.F. „Kurt“ Burkowitz am 14.9.1970

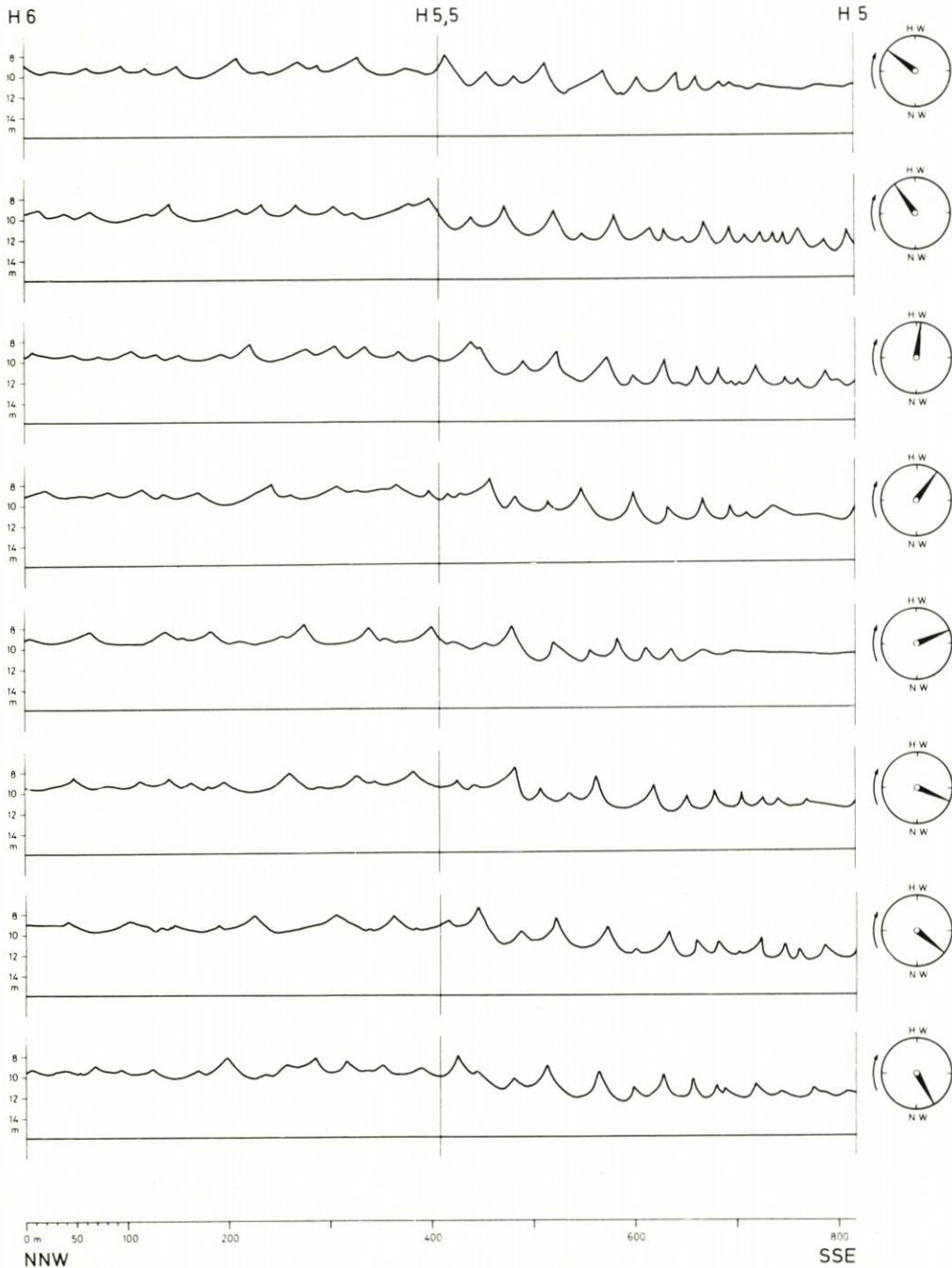
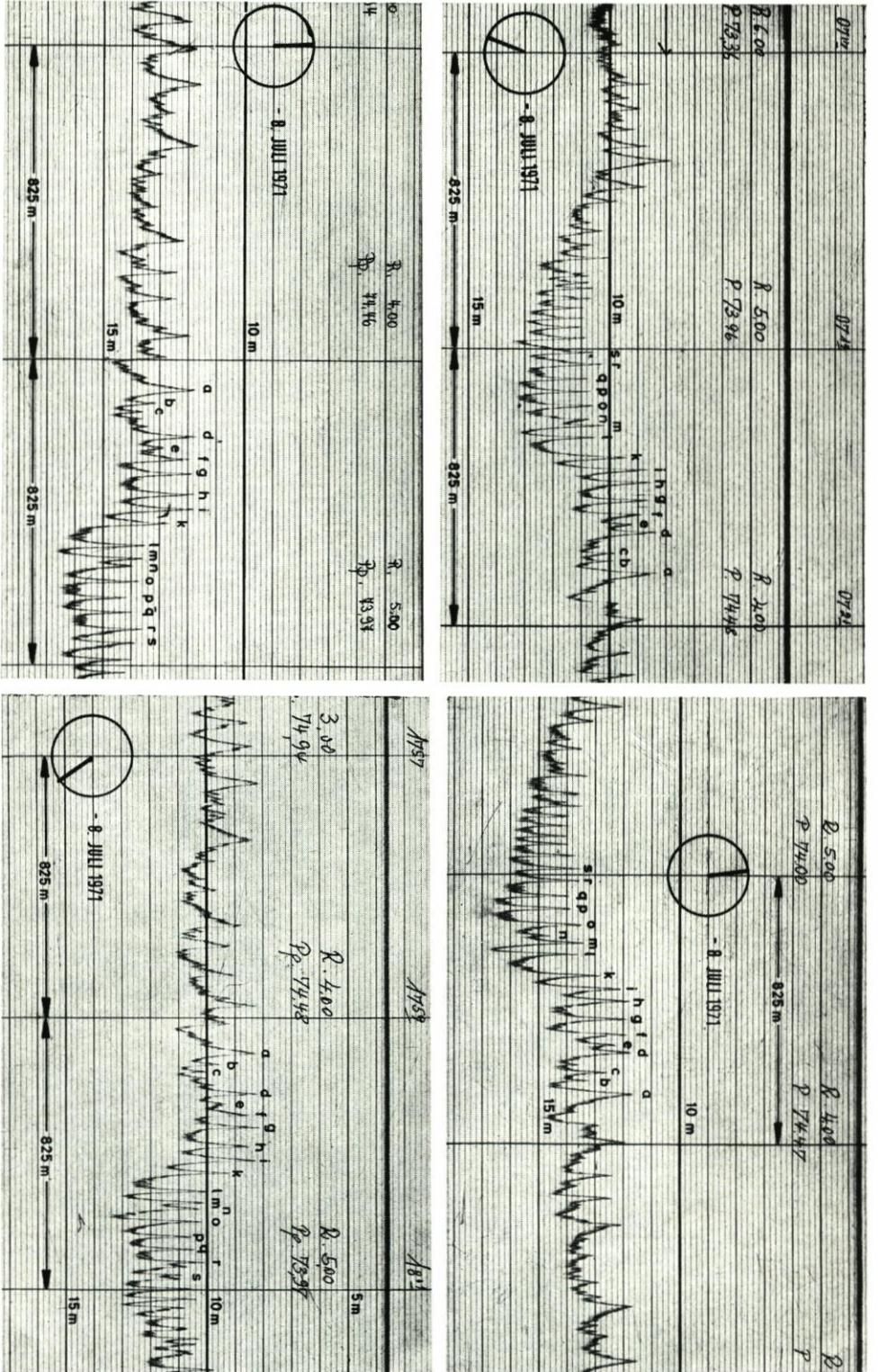


Abb. 3. Ausgewählte Echolotprofile der Vermessungsfahrt vom 14. 9. 1970 während einer Tide (Kurs s. Abb. 1)

Abb. 4. Ausschnitte aus Originalenohogrammen mit tideabhängigen Sandrippeln aus dem Heppenser Fahrwasser (Profile Nr. 4, 30, 31 und 37, vgl. Abb. 5), registriert mit dem Atlas-Echolot von S.F. „Kurt Burkowicz“ am 8. 7. 1971



kurse voll in die Analyse einbezogen werden konnten. Um Wind- und Stromversetzungen während der Meßfahrt möglichst kleinzuhalten, mußte eine relativ hohe Fahrtgeschwindigkeit (ca. 11 kn) eingehalten werden, wodurch trotz maximalen Papiervorschubs im Echogramm eine ziemlich enge Scharung der Rippeln zustande kam (Abb. 4 a-d).

Dennoch lassen die sehr klaren Aufzeichnungen bei detaillierter Betrachtung Formveränderungen bei den Rippelprofilen eindeutig erkennen. Daß solche Veränderungen im Rahmen eines tidebedingten Sandtransportes zu erwarten sind, ergibt sich bereits aus früheren Untersuchungen über die Sedimentbewegungen und die hydrographischen Verhältnisse im Bereich der Innenjade (W. KRÜGER 1922, M. GILLBRICHT 1956, F. WUNDERLICH 1969) sowie aus den Strömungsmessungen, die vom WSA Wilhelmshaven in diesem Gebiet durchgeführt wurden (Abb. 1). Bei der Tiefenlage der Gewässersohle von 8-12 m wurde im Heppenser Fahrwasser 3 m über Grund ein repräsentatives 14tägiges mittleres Maximum der Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/sec gemessen.

Für die morphologische Auswertung und die zeichnerische Darstellung in Echotprofilen war lediglich eine Beschickung nach dem jeweiligen Wasserstand (Pegel Voslapp) erforderlich. Die Messungen am 8. 7. 1971 erfolgten zur Zeit einer Springtide bei einem Tidenhub von

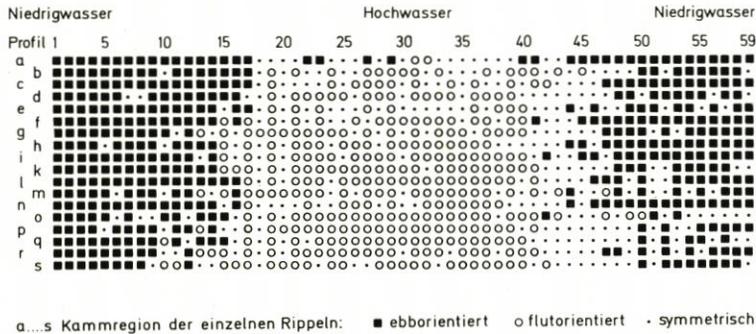


Abb. 5. Statistische Darstellung der Pendelbewegungen einzelner Sandrippeln in einem ausgewählten Abschnitt (a bis s) des Heppenser Fahrwassers (Lage s. Abb. 1)

3,80 m. Ortsschallgeschwindigkeit und Schwingertiefenlage sind von vornherein in den Registrierungen berücksichtigt. Die Lotprofile wurden im Maßstab 1 : 5000 bei 10facher Überhöhung dargestellt. Für die statistische Analyse der Teilstrecke a bis s wurden die Echogramme sämtlicher 59 Kurse benutzt (Abb. 5), da infolge der deckenden Lage der Lotlinien die Vergleichbarkeit der während einer Tide erfolgten Lotungen gegeben war und die Identität der einzelnen Riesen- und Großrippeln von Profil zu Profil feststand. Daher konnten Form- und Neigungsveränderungen über die gesamte Tide hinweg bei den Rippeln verfolgt werden.

4. Morphologische Ergebnisse

4.1 Rippelformen

Bei den im Heppenser Fahrwasser auftretenden Tiderippeln handelt es sich um symmetrische und asymmetrische Riesen- und Großrippeln im Sinne der von H. E. REINECK et al. (1971) veröffentlichten Einteilung der Rippeln. Stellenweise sind ihnen kleinere Rippeln aufgesetzt oder zwischengeschaltet. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß diese nur im Echogramm erkenn-

bar werden, wenn sie Höhen von zumindest 10 cm erreichen. Nach der o. a. Rippelnomenklatur gelten sie dann jedoch bereits als Großrippeln. Riesenrippeln mit Höhen von über 2 m bis zu 2,60 m und einer Länge von ca. 75 m treten vor allem im SSE-Teil des Lotabschnittes auf. Bei den meisten der statistisch ausgewerteten 18 Einzelrippeln handelt es sich um etwa 2 m hohe asymmetrische Riesenrippeln mit z. T. sehr steilen Leehängen in der Kammregion ($> 30^\circ!$) und Kammabständen von 30 bis 60 m.

Zwischen ihnen (in der Sohlenregion) treten zumeist kleinere Großrippeln dichtgedrängt auf. Ihre Länge beträgt nur etwa 1–2 m, ihre Höhe 10 bis 30 cm²⁾. Ob es sich hierbei um wandernde Großrippeln ähnlich den kürzlich von J. H. J. TERWINDT (1971) an den Flanken von Sandwellen beobachteten „Mega-Strömungsrippeln“ handelt oder ob diese Rippeln ihre Lage generell beibehalten, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Ebenso mußte auf eine weitergehende Analyse der einzelnen Rippeln bzw. auf eine Mittelwertbildung aus einer Spektralverteilung der Höhen und Längen unter Verwendung der Gleichungen von A. FÜHRBÖTER (1967) wegen der stark gerafften Darstellung der Rippelprofile im Echogramm hier verzichtet werden.

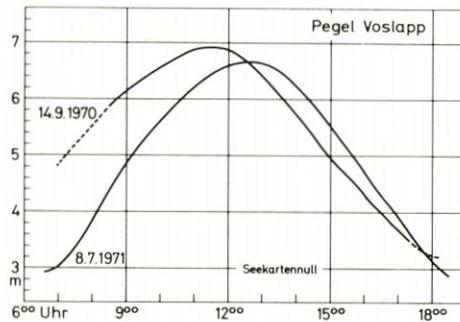


Abb. 6. Pegelkurven während der Vermessungszeiten am 14. 9. 1970 und am 8. 7. 1971 (Pegel Voslapp)

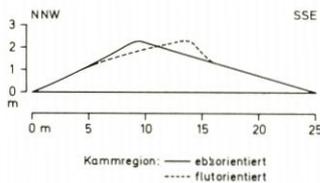


Abb. 7. Schematische Darstellung der Pendelbewegung eines Rippelkammes im Flut- und Ebbstrom, den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsgebiet entsprechend

4.2 Langfristige Umlagerungen

Vergleicht man die Vermessungsergebnisse im Zeitraum mehrerer Jahre miteinander, so sind keine großräumigen Verlagerungserscheinungen bei den Riesenrippeln erkennbar. Selbst kleinräumige Bewegungen von Rippeln konnten nur stellenweise beobachtet werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß es in den letzten Jahren keine außergewöhnlichen Sturmfluten gab, die möglicherweise zu größeren (oder zumindest meßbaren) Umlagerungen und zur

Wanderung von Rippeln hätten führen können. Auch ein detaillierter Vergleich der Echolotprofile eines im Jahresabstand wiederholt abgefahrenen Peilkurses läßt keine langfristigen Verlagerungsvorgänge erkennen. Die beiden Lotprofile vom 16. 10. 1969 und vom 14. 9. 1970 (Abb. 2 oben) zeigen keine wesentlichen Unterschiede. Das Rippelfeld ist in seiner Gesamtheit erhaltengeblieben, aber auch die einzelnen Riesen- und Großrippeln behielten ihre Lage und ihre Form generell bei.

Diese Befunde entsprechen den Untersuchungsergebnissen von W. KRÜGER (1922), nach denen sich seit 1859 keine Verschiebung der größeren Unterwasserbänke in der Innenjade feststellen ließ, während die Außenjade wiederholt starken Veränderungen unterworfen war (H. GÖHREN 1965).

²⁾ Länge und Höhe der Rippeln wurden auf Grund der von J. C. HARMS (1969) gegebenen Begriffsbestimmungen festgelegt.

Um die langfristigen Rippelbewegungsvorgänge auch über extreme Sturmflutperioden hinweg zu erfassen, sind allerdings regelmäßige Vermessungsarbeiten mit engabständigen Lotkursen erforderlich, und zwar über Jahrzehnte hinweg. Im Heppenser Fahrwasser erscheint jedoch die Durchführung solcher Vergleichsmessungen wegen der geplanten Umgestaltung der Gewässersohle durch technische Projekte in naher Zukunft nicht mehr sinnvoll.

4.3 Kurzfristige Pendelbewegungen

Die statistische Auswertung der 59 Echogramme vom 8. 7. 1971 hat – zumindest für den ausgewählten ca. 800 m langen Abschnitt – einige eindeutige Erkenntnisse zur Frage der Pendelbewegung von Rippeln innerhalb einer Springtide erbracht. Die mittlere Höhe der einzelnen, in jedem Profil wiederzufindenden Riesen- bzw. Großrippeln beträgt etwa 2 m, ihre mittlere Länge – die hier oft dem Kammabstand entspricht – ca. 45 m. Daher ist $\frac{L}{H} = 22,5$ der Rippelprofil-Durchschnittswert. In Abbildung 4 sind die Formveränderungen, die nur die Kammregion (d. h. etwa das obere Drittel des Sandrippelkörpers) betreffen, erkennbar. Sämtliche Rippelkämme führen eine „horizontale“ Pendelbewegung aus, wobei die Kammspitzen eine Strecke von etwa 5 m während einer Tide zurücklegen. Diese sedimentären Umlagerungen führen zu einer Umkehr der Neigungsverhältnisse im Tidestromrhythmus (vgl. Abb. 7). Die Rippeln nehmen bei ablaufendem Wasser eine ebborientierte Form an, die sie über die Niedrigwasserphase hinweg beibehalten. Das „Umschlagen“ der Kämme zur Flutstromrichtung hin erfolgt bei den einzelnen Rippeln (a bis s) zu verschiedenen Zeiten während des auflaufenden Tidestromes. Symmetrische Formen treten hierbei seltener (kurzzeitiger) auf als bei dem entgegengesetzten Vorgang, d. h. beim Kentern von Flut- zu Ebborientierung. In dieser Ebbstromphase gibt es eine relativ lange Symmetriesituation bei den Kämmen der meisten Rippeln (vgl. Abb. 5, Profile Nr. 42 bis 46).

Betrachtet man die Häufigkeit des Auftretens von Ebb- bzw. Flutorientierung bei den Rippelkämmen des Testabschnittes, so läßt sich eine größere Häufigkeit der Flutorientierung im NNW des Abschnittes erkennen. Ein Vergleich mit der bathymetrischen Situation (Abb. 1) und den vier Echogrammausschnitten (Abb. 4 a–d) zeigt, daß die zu mehr als 50 % flutorientierten Rippeln (Rippel m bis s) in einem Teilgebiet mit etwas (rund 2 m) größerer Wassertiefe liegen, wo offenbar die Ebbstromwirkung auf die Bodensedimente weniger stark ist. Demgegenüber behält der (etwas separat) im SSE gelegene Rippel a seine Ebborientierung sogar über die Hochwasserphase hinweg weitgehend bei.

Die statistischen Auswertungsergebnisse lassen ferner erkennen, daß die Form der Rippeln im allgemeinen nicht genau den augenblicklichen Strömungsbedingungen entspricht. Wie bereits H. G. DILLO (1960) feststellte, hängt die Rippelform stets von der Einwirkungsdauer und der Größe früher vorhandener Strömungsgeschwindigkeiten ab. Es sei schließlich darauf hingewiesen, daß die Vermessungskurse auf Grund der seit 1968 auf 121 Lotprofilen gesammelten Erfahrungen quer über die hier annähernd parallel verlaufenden Rippelkämme gelegt wurden. Weitergehende detaillierte Aussagen über das Relief des submarinen Testfeldes, d. h. über Form und Ausdehnung der Rippeln sowie über den Verlauf der Rippelkämme zu beiden Seiten der Lotlinie und deren sedimentäre Umlagerungen sind auf Grund dieser linienhaften Lotungen mit einem Schiff nicht möglich. Hierfür sind engabständige synoptische Vermessungsarbeiten mit mehreren Schiffen, möglichst unter Verwendung moderner Flächenecholote, erforderlich. Lediglich die flächenhafte Ausdehnung des Rippelfeldes konnte auf Grund der Vermessungsergebnisse des Deutschen Hydrographischen Instituts erfaßt werden (siehe Rippeltypenkarte Nr. 15 in J. ULRICH 1973).

5. Schlußbemerkung

Diese Untersuchungen waren nur möglich auf Grund der Weiterentwicklung der modernen Lotungstechnik. Die hier angewandte Vermessungsmethode läßt sich ohne weiteres auch in anderen, ähnlichen Testfeldern (z. B. Lister Tief) durchführen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die Unterstützung, die diesen Arbeiten im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ gewährt wurde, besonders gedankt.

Auch dem Wasser- und Schiffsamt Wilhelmshaven gebührt Dank für die Durchführung der Vermessungsarbeiten mit dem Seezeichenfahrzeug „Kurt Burkowitz“; Herrn Kapitän MEESMANN und den Besatzungsmitgliedern des Schiffes sei für die stets gewissenhafte Durchführung der viel Geduld erfordernden Vermessungsarbeiten ein besonderer Dank ausgesprochen.

6. Zusammenfassung

Systematische Vermessungsarbeiten im Heppenser Fahrwasser, die in den Jahren 1968 bis 1971 mit dem Seezeichenfahrzeug „Kurt Burkowitz“ durchgeführt wurden, erbrachten neue Erkenntnisse über die kurzfristigen Pendelbewegungen bei Tiderippeln. Die Untersuchungen erfolgten im wesentlichen auf zwei Kursbahnen (Abb. 1). Für den langfristigen Vergleich wurden hier zwei positionsdeckend liegende Profile aus den Jahren 1969 und 1970 ausgewählt (Abb. 2 oben); die kurzfristigen Bewegungsvorgänge wurden durch wiederholtes Abfahren des gleichen Kurses jeweils während einer Tide am 14. 9. 1970 (Abb. 2 oben und Abb. 3) und am 8. 7. 1971 (Abb. 2 unten) erfaßt. Die aus den Echogrammauswertungen resultierenden Formänderungen wurden statistisch analysiert (Abb. 5).

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Der langfristige Vergleich der Profilformen und der topographischen Lage der Tiderippeln ergab keine Hinweise auf signifikante Bewegungsvorgänge im Untersuchungszeitraum (1968 bis 1970). Wesentliche Tiefenänderungen konnten nicht beobachtet werden.
2. Kurzfristige Pendelbewegungen konnten in der *Kammregion* (d. h. im oberen Drittel) sämtlicher Riesen- und Großrippeln des statistisch ausgewerteten Abschnittes im Zeitraum einer Springtide beobachtet werden. Nur selten kam es zu einer völligen Umkehr der Luv- und Leehänge der Rippeln auch unterhalb der Kammregion.
3. Die Profilform der Rippeln unterliegt hier einem ständigen Wechsel von ebborientierter Asymmetrie über Symmetrie zu flutorientierter Asymmetrie entsprechend dem Tideablauf.
4. Die Pendelstrecke der Kammspitzen beträgt etwa 5 m.

7. Schrifttum

1. DILLO, H. G.: Sandwanderung in Tideflüssen. Mitteil. Franzius-Inst. Grund- u. Wasserbau 17 (1960), 135-253.
2. GOEHREN, H.: Beitrag zur Morphologie der Jade- und Wesermündung. Die Küste 13 (1965), 140-146.
3. GOEHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamburger Küstenforsch. 19 (1971).
4. FÜHRBÖTER, A.: Zur Mechanik der Strömungsriffel. Mitteil. Franzius-Inst. Grund- u. Wasserbau 29 (1967).
5. GILLBRICHT, M.: Die Hydrographie des Jadebusens und der Innenjade. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 4 (1956), 153-170.
6. HARMS, J. C.: Hydraulic Significance of Some Sand Ripples. Geol. Soc. Am. Bull. 80 (1969), 363-396.

7. KRÜGER, W.: Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens, ihre Entstehung und ihr Zustand. Jber. Hafenbautechnische Ges. 4 (1922), 268-284.
8. REINECK, H. E., SINGH, I. B., und WUNDERLICH, F.: Einteilung der Rippeln und anderer mariner Sandkörper. Senckenberg. marit. 3 (1971), 93-102.
9. STÜCKRATH, T.: Die Bewegung von Großriffeln an der Sohle des Rio Paraná. Mitteil. Franzius-Inst. Grund- u. Wasserbau 32 (1969), 267-293.
10. TERWINDT, J. H. J.: Sandwaves in the southern Bight of the North Sea. Marine Geol. 10 (1971), 51-67.
11. ULRICH, J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. (In Vorbereitung, 1973.)
12. WUNDERLICH, F.: Studien zur Sedimentbewegung. 1. Transportformen und Schichtbildung im Gebiet der Jade. Senckenberg. marit. 1 (1969), 107-146, Senckenberg am Meer, No. 279.

Untersuchung zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort

Von Peter Wieland

Summary

The muddy shallows, spreading out to a 15 km wide region off the Schleswig-Holstein North Sea coast, comprise sand ridges, in some places of their seaward zone, which have been heaped up by sea forces and reach above the mean highwater level. Such an outside sand is "Blauort". It lies 10 km northwest of the Büsum seaside resort and, with the high-water level being normal, covers an area of 55 ha.

Tourism being increasingly interested in the Schleswig-Holstein west-coast, a plan has been established to erect a tourist center with multi-storeyed buildings in "Blauort". On the basis of the present investigation, the realizability of this project was to be judged from the view of the present and future geomorphological conditions.

It has been proved by the result attained that the muddy shallows and, in particular, "Blauort" are subject to extraordinary dynamic forces leading to a permanent displacement of material, which occurs in a long evolutionary process, with the relief being deformed and the volume remaining constant. "Blauort" itself was formed about 45 years ago, then followed a heightening up to + 2.05 m NN, a displacement eastward averaging 37 m per year; whereupon ensued another flattening. Similar phases of formation and disintegration of small sand islands, occurring at variable rhythms, are demonstrable in the same area, as far back as historical periods.

After the construction of buildings, this process will continue just as before. Moreover, natural forces will be negatively changed by this artificial intervention. It is to be regarded as likely therefore that the muddy shallows with "Blauort", which are important to coast protection, and the tourist center designed to be set up there will be destroyed. Such a project must therefore not be realized.

Inhalt

1.0 Örtlichkeit	122	5.0 Veränderungen des Wattsockels .	138
2.0 Aufgabe	124	5.1 Fläche	
3.0 Grundlagen	124	5.11 Jüngere Zeit .	138
4.0 Veränderungen des Außensandes .	128	5.12 Ältere Zeit .	141
4.1 Fläche		5.2 Profil	144
4.11 Jüngere Zeit .	128	5.3 Volumen	144
4.12 Ältere Zeit .	132	5.4 Zusammenfassung	146
4.2 Profil	133	6.0 Zusammenfassung und Folgerung .	147
4.3 Volumen	134	7.0 Begriffe	148
4.4 Zusammenfassung	135	8.0 Literaturnachweis	148

1.0 Örtlichkeit

Norderdithmarschen westlich vorgelagert erstreckt sich ein Watt etwa in der Form eines spitzen Dreiecks. Es wird flankiert von den Wattströmen „Eider“ im Norden und „Piep“ mit „Norderpiep“ im Süden. In der Mitte, im Bereich der größten seewärtigen Flächenausdehnung von rd. 15 km, ist dieses Watt west-ostwärts noch einmal bis nahe an die Küste heran durch das „Wesselburener Loch“ gespalten (Abb. 1).

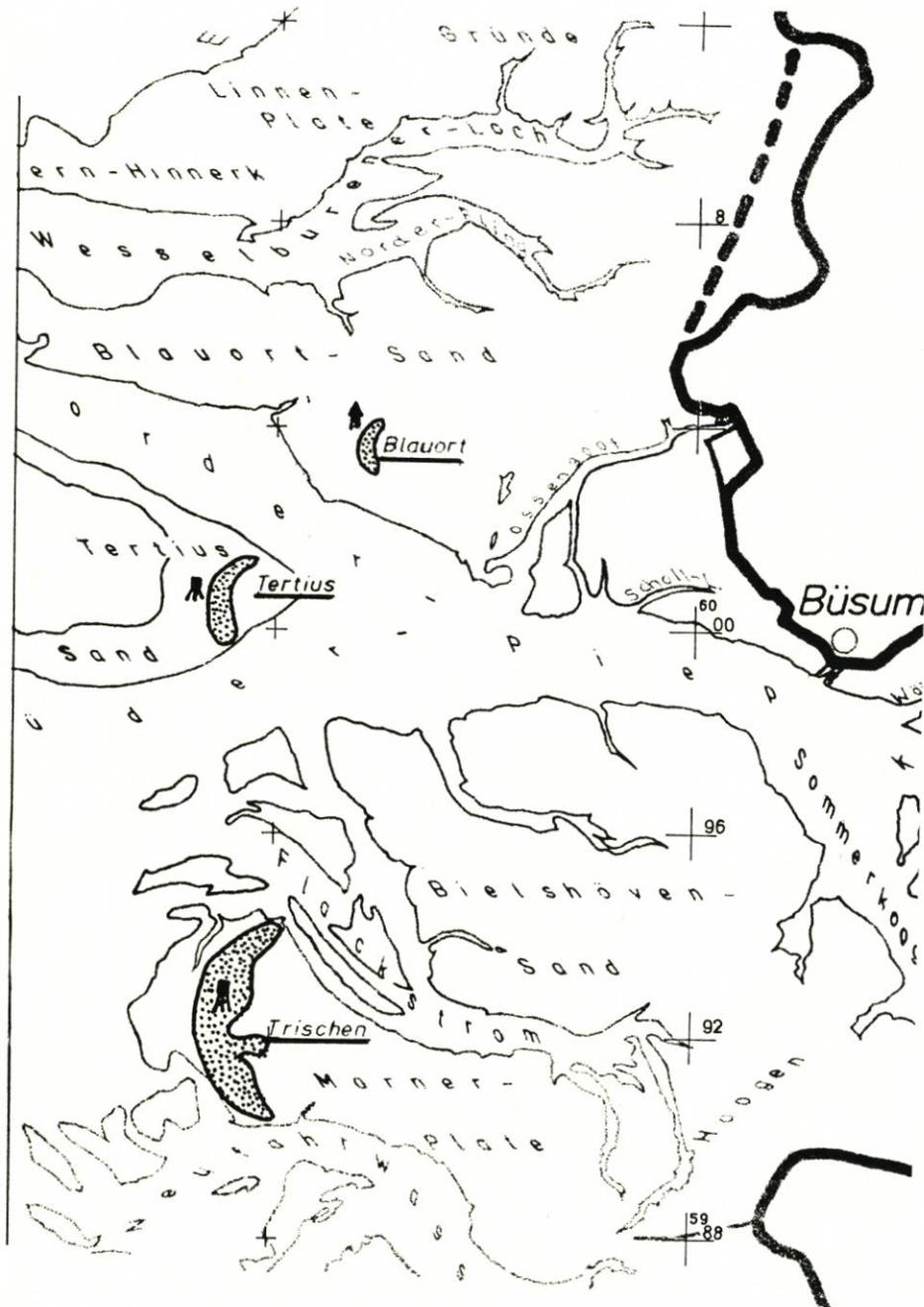


Abb. 1. Übersichtskarte der Dithmarschen vorgelagerten Watten und Außensände und der dieses Gebiet gliedernden Priele

Der südliche Teil dieses Watts trägt bis zu dem nahe vor Büsum nordost-südwestlich verlaufenden „Ossengot“ den Namen „Blauortsand“. Östlich davon schließt sich das „Büsumer Watt“ an.

Die bis in die Meldorfer Bucht reichende „Piep“ gabelt sich westlich Büsum in Luftlinie 11 km Entfernung in das Ebbegat „Norderpiep“ und das Flutgat „Süderpiep“, die ihrerseits den „Tertius-Sand“ umschließen. Unmittelbar in Höhe dieser Stromgabelung trägt das Watt „Blauortsand“ den über MThw hinausragenden Außensand (I) „Blauort“. Er gleicht der Form einer Niere mit landwärts gerichteten Enden und ist ohne Bewuchs. Die hochwasserfreie Fläche ist heute reichlich 50 ha groß. Von der Festland-Siedlung „Hirtenstall“ im Hedwigenkoog ist „Blauort“ rd. 7 km entfernt und zu Fuß, mit Wattwagen oder mit Trecker über das relativ feste Sandwatt erreichbar (Abb. 1 u. 4).

2.0 Aufgabe

Im Zuge des Erschließens der schleswig-holsteinischen Nordsee-Küstenlandschaft für den Fremdenverkehr plant ein Unternehmen, ein Ferienzentrum aus ein- und mehrgeschossigen Gebäuden und einem Hafen im Dithmarscher Wattengebiet zu errichten. Attraktiver Standort dafür soll der hochwasserfreie Außensand „Blauort“ sein.

Bevor ein solches Projekt gedanklich weiterverfolgt wird, muß geprüft werden, ob die Entwicklungstendenz des Watts seine Realisierung überhaupt zuläßt. Nachfolgende Untersuchung soll diese Frage beantworten helfen. Sie soll Aufschluß geben über die bisherige und künftig zu erwartende geomorphologische Entwicklung des Außensandes „Blauort“.

Zum eindeutigen Erfassen des Entwicklungsprozesses werden nebeneinander die historischen und aktuomorphologischen Veränderungen getrennt zunächst für den über das gewöhnliche Wattniveau ragenden Wattrücken (II) und dann für den eigentlichen Wattsockel (III) analysiert und daraus die Synthese gebildet.

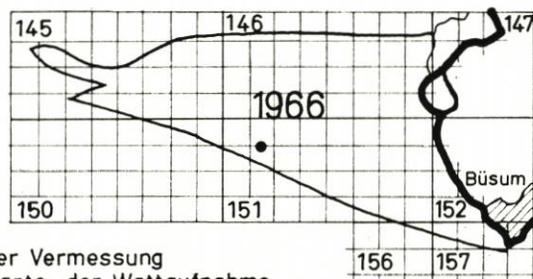
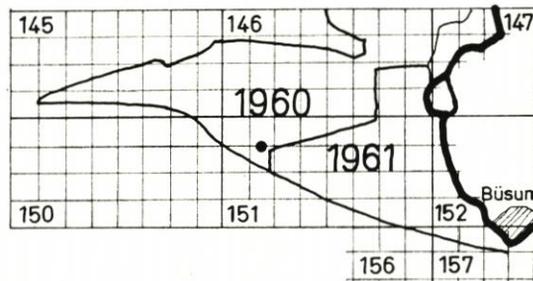
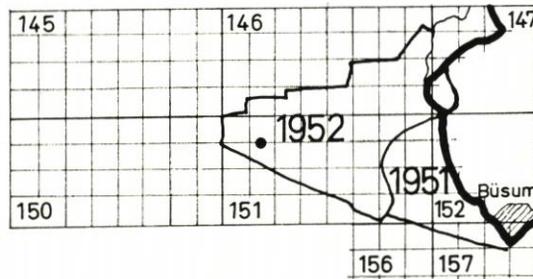
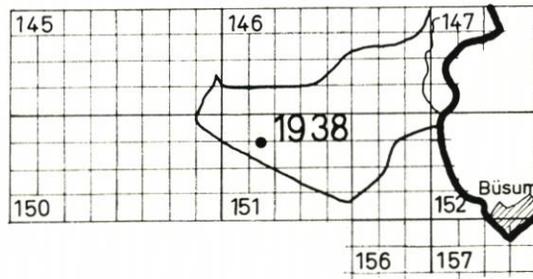
3.0 Grundlagen

Zum Deuten der Entwicklung in jüngerer Zeit liegen die Ergebnisse terrestrischer und nautischer Vermessungen in Form von Wathhöhenkarten im Maßstab 1 : 10 000 vor.

Das Watt „Blauortsand“ ist in seiner südlichen Hälfte und westwärts bis reichlich in Höhe des Außensandes „Tertius“ im Jahre 1938 erstmals vermessen worden. Eine Wiederholungsmessung erfolgte 1952 vom gleichen Gebiet. Der gesamte „Blauortsand“ bis zum „Wesselburener Loch“ im Norden, bis zum Wattrand (IV) im Westen, einschließlich dem „Büsumer Watt“, ist danach in zwei weiteren Vermessungen 1960/1961 und 1966 lage- und höhenmäßig aufgenommen worden (Abb. 2). Ergänzend wurden im Herbst 1969 Höhe und Flächenumfang des bei SoMThw nicht überflutenden Teils von „Blauort“ sowie zusätzlich ein West-Ost-Profil von der „Norderpiep“ bis zum „Neumannsloch“ (Abb. 6) terrestrisch vermessen. Außerdem sind bei zwei Befliegungen 1936 und 1958 Luftbildaufnahmen hergestellt worden.

Zum Erfassen der jüngsten Entwicklung in zwei Profilen der „Norderpiep“ sind neben eigenen Lotungsergebnissen Seekarten des DHI herangezogen worden.

Die in diesem Rahmen interessierenden Winddaten entstammen dem Windschreiber Büsum, die Tidewasserstände sind den Aufzeichnungen der Seepegel „Blauort-Norderpiep“ und „Büsum-Hafenmole“ entnommen worden.



1966 = Jahr der Vermessung
 151 = Grundkarte der Wattaufnahme
 M. 1:10000
 • = Ungef. Lage von „Blauort“

Abb. 2. Flächenmäßige und zeitliche Übersicht der Wattvermessungen nordwestlich von Büsum



Abb. 3. Luftbildaufnahme vom Wattgebiet „Blauortsand“ aus dem Jahre 1936. Ungef. Maßstab 1 : 57 000. Anfangsphase der Bildung des Außensandes „Blauort“



Abb. 4. Luftbildaufnahme vom Wattgebiet „Blauortsand“ aus dem Jahre 1958. Ungef. Maßstab 1 : 53 000. Der sich deutlich abzeichnende nierenförmige Außensand „Blauort“ wurde mehrere hundert Meter ostwärts verlagert

4.0 Veränderungen des Außensandes

4.1 Fläche

4.11 Jüngere Zeit

Der Außensand „Blauort“ zeichnet sich auf der Luftbildaufnahme von 1958 auf dem Wattkomplex nördlich der „Norderpiep“ als weiße, nierenförmige Fläche deutlich ab (Abb. 4). Die helle Farbe gegenüber den Grautönungen des umliegenden Watts ist ein Beweis für die hier vorhandene intensivere Entwässerung. Wegen des Flächenumfangs und des Fehlens tangierender, tieferer Priele ist eine höhere Sandaufschüttung zu vermuten, die längere Zeit als die umliegenden Flächen nicht überflutet wird, also größtenteils über MThw zu reichen scheint.

Die topographische Wattaufnahme von 1960, also aus vergleichbarem Zeitraum, bestätigt die Vermutung. Der Top (V) des Außensandes erreicht eine Höhe von + 2,05 m NN (Abb. 5, 6 u. 14). Durch Bezug zum Büsumer Tideschreibpegel auf Grundlage der dort errechneten mittleren Tidekurve der Jahresreihe 1956/65 wurde für den gleichen Zeitraum die entsprechende Kurve mit Hilfe der Aufzeichnungen des Seepegels (VI) „Blauort-Norderpiep“ ermittelt (Abb. 5). Ihr entsprechen der am 22. 5. 1969 registrierte Flutast und der am 8. 6. 1968 registrierte Ebbeast. Danach liegt das MThw bei + 635 cm PN = + 1,35 m NN. Im Hinblick auf das geplante Erholungszentrum interessiert in erster Linie das während der Saison auftretende mittlere Tidehochwasser. Daher wird das SoMThw als maßgebend betrachtet. Es liegt auf + 640 cm PN oder 1,40 m über NN. Der Top von „Blauort“ liegt also im Jahre 1960 = 65 cm über SoMThw.

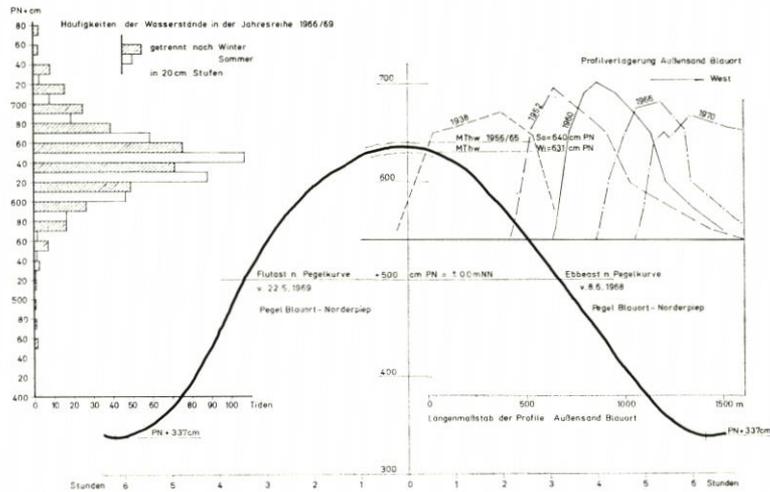


Abb. 5. Mittlerer Verlauf der Tidekurve am Seepegel Blauort-Norderpiep mit Angabe der in 20 cm gestuften Wasserstandshäufigkeiten und der Profilverlagerung des Außensandes „Blauort“ 1938-1970

Zu dieser Zeit begrenzt die + 1,4 m Isohypse (VII) eine relativ hochwasserfreie Fläche von 51,9 ha (Abb. 6 u. Tabelle 3). In der Abbildung 6, eine fotografische Verkleinerung der Wathöhenkarte 1 : 10 000, sind die durch das SoMThw begrenzten Flächen des jeweiligen Zustandes in den Jahren 1938, 1952, 1960, 1966 und 1969 besonders markiert. Dadurch wird die Flächenverlagerung sichtbar. Zur Ermittlung ihres Ausmaßes wurde ungefähr durch die Flächenmitten

eine Achse gelegt. Danach wanderte der jeweilige Schnittpunkt mit der SoMThw-Linie auf ihr von 1938 bis 1969 im Mittel 37,4 m pro Jahr:

Tabelle 1 – Blauort

Vermessungs-jahr	Zeitraum in Jahren	Wanderung			
		SoMThw-Linie m	m/Jahr	Top (H max.) m	m/Jahr
1938	14	510	36,4	260	18,6
1952					
1960	8	240	30,0	230	28,8
1966	6	220	36,7	330	36,7
1969	3	190	63,4	180	60,0
Insgesamt:	31	1160	37,4	1000	32,2

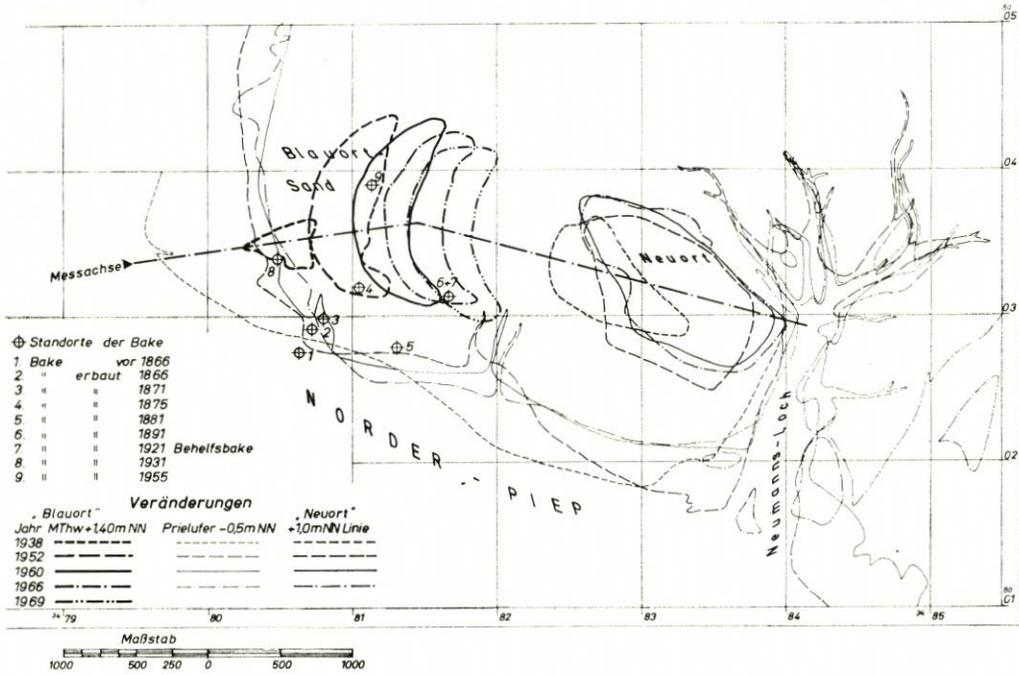


Abb. 6. Flächenhafte Verlagerung des durch die SoMThw-Linie begrenzten Außensandes „Blauort“ und des unter MThw liegenden Wattrückens „Neuort“ von 1938 bis 1969. Zeugen dieser Entwicklung sind auch die verschiedenen Standorte der Bake

Ende 1969 verlief die SoMThw-Linie, bezogen auf die Schnittachse, insgesamt 1160 m weiter östlich als im Sommer 1938. Das Zeit-Wegdiagramm (Abb. 9) zeigt zwischen 1938 und 1969 eine nahezu kontinuierliche Verlagerung von durchschnittlich 34,3 m pro Jahr. Von 1966 bis 1969 stieg die Wanderungsgeschwindigkeit mit durchschnittlich 63,4 m pro Jahr um fast das Doppelte an. Ein ähnliches Verhalten zeigt der Top.

Umgekehrt entwickelte sich der Flächenumfang innerhalb der SoMThw-Linie. Er nahm von 1938 bis 1952, wo er gleich 100% gesetzt wird (Abb. 11 u. Tab. 3), von 17 ha auf 46,4 ha um 63,3% zu, also um mehr als das Eineinhalbfache. Von 1960 bis 1969 schwankt der Umfang zwischen 44 ha und 55,5 ha, mit dem niedrigsten Wert im Jahre 1966, insgesamt aber von 1952 bis 1969 im Mittel um rd. 11,75% zunehmend.

Diese Veränderungen sind in ähnlicher Form, jedoch in ganz anderen Größenordnungen (Tabelle 2) bei der rund 12 km südlich von „Blauort“ gelegenen Insel „Trischen“ (Abb. 1 u. 7) wiederzufinden.

Tabelle 2 - Trischen

Vermessungs- jahr	Zeitraum in Jahren	Wanderung der + 1,5 m NN-Höhenlinie auf der Gitterlinie 59 ⁰² (Gauß-Krüger)		Flächen- veränderung km ²
		m	m pro Jahr	
1885				11,444
	21	1150	54,8	
1906				7,592
	31	450	14,5	
1937				5,338
	16	500	31,2	
1953				3,919
	6	120	20,0	
1959				3,588
	8	180	22,5	
1967				3,106
Insgesamt:	82	2400	29,2	rd. — 27,1 %

Die Nord-Südausdehnung der Insel „Trischen“ ist zwar etwa fünfmal so groß wie die von „Blauort“ eine größtenteils bewachsene Düneninsel vorliegen (9); dennoch genügt dieser Anharrende südliche, so daß die auf nur der einen genannten Gitterlinie ermittelte Wanderungsgeschwindigkeit lediglich ein Anhalt sein kann, außerdem haben wir hier im Gegensatz zu „Blauort“ eine größtenteils bewachsene Düneninsel vorliegen (9); dennoch genügt dieser Anhalt für den Nachweis einer gewissen Parallelität der Verlagerung. Dagegen ist eine Größenabnahme bei Blauort im Vergleich zu Trischen nicht feststellbar.

Die Veränderung der durch das SoMThw begrenzten Fläche des Außensandes „Blauort“ läßt einen morphologischen Entwicklungsprozeß vermuten, der ungefähr Anfang der dreißiger Jahre einsetzte und in dessen Verlauf es zu einer Aufhöhung des Watts „Blauortsand“ an seinem südwestlichen Rand unmittelbar an der „Norderpiep“ kam. Zu dieser Annahme bestärkt das Luftbild aus dem Jahre 1936 (Abb. 3), auf dem im Gegensatz zum Luftbild von 1958 (Abb. 4) im Winkel der Gitterlinie 34⁸⁰/60⁰³ (GAUSS-KRÜGER) erst Andeutungen einer geringflächigen Aufhöhung zu erkennen sind. Die Verlagerung des Außensandes spiegelt sich außerdem deutlich wieder in dem wiederholt notwendig gewordenen Umsetzen der „Blauorter“ Rettungsbake (Abb. 8 u. 16).

Interessant ist eine zeitlich etwa gleich verlaufende, im Top sich um MThw bewegende Wattaufhöhung nahe dem Westufer des „Neumannsloch“, die als „Neuort“ bezeichnet ist (Abb. 6). Die Fläche innerhalb der + 1,0 m NN-Linie wächst hier ähnlich der relativ hochwasserfreien Fläche von „Blauort“ mit einer Vergrößerung um reichlich das Doppelte bis 1960 (Abb. 11).

Um die Entwicklungstendenz in dem gesamten durch „Piep“-„Norderpiep“, „Neumannsloch“ und „Blauorter Priel“ begrenzten Teilgebiet des Wattes „Blauortsand“ kennenzulernen,

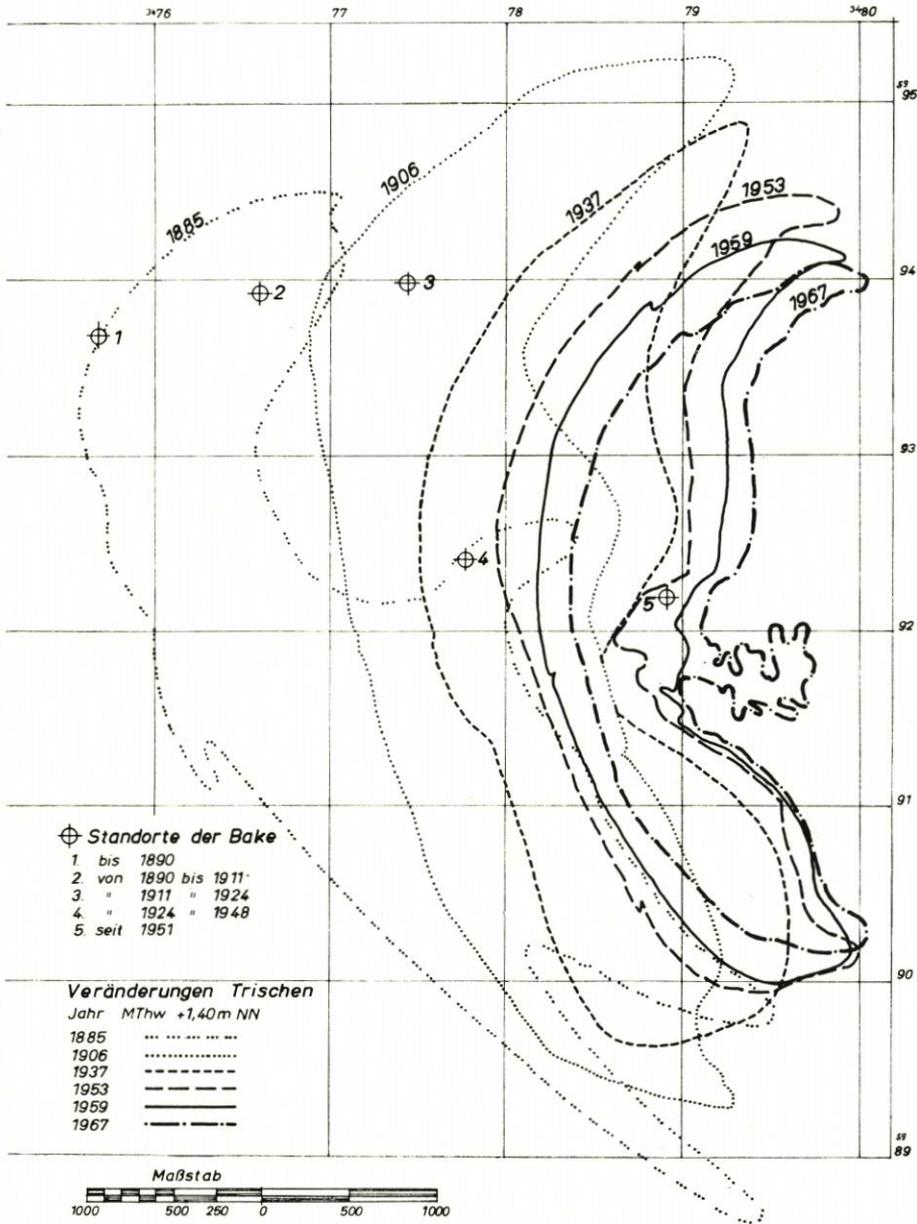


Abb. 7. Flächenhafte Verlagerung der durch die MThw-Linie begrenzten Insel Trischen von 1885 bis 1967. In gleichem Maße wurde die Rettungsbake mehrfach versetzt

wurde die mit der +0,7 m NN-Höhenlinie begrenzte Basisfläche aus zeitlich verschiedenen Wattaufnahmen ermittelt. Diese Fläche nahm im betrachteten Zeitraum von 1952 bis 1966 von 344,2 ha auf 372,7 ha um insgesamt 8% zu (Abb. 11 u. Tab. 3). Auch hier verlief die Zunahme zunächst bis 1960 schneller, von da ab langsamer. Im selben Zeitabschnitt hatte im Gesamtgebiet, einschließlich „Büsumer Watt“, diese Basisfläche bis 1960 um 9% abgenommen, bis

1966 jedoch den ursprünglichen Umfang wieder erreicht. Wenn auch Ermittlungen für den vorausgegangenen Zeitabschnitt von 1938 an sowie für die jüngste Zeit fehlen, so ist wegen des stetigen Wachstums der Basisfläche des Außensandes „Blauort“ und des Wattrückens (II) „Neu-

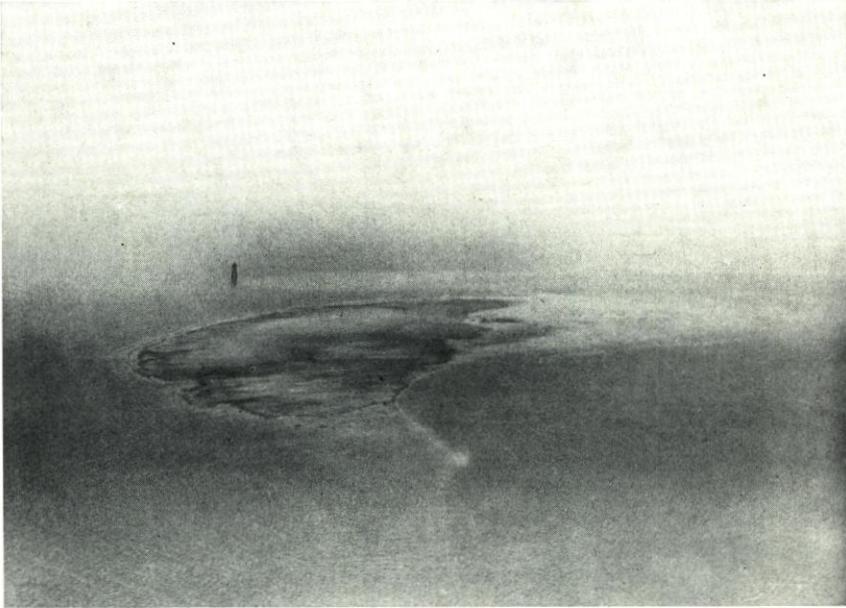


Abb. 8. Der Außensand „Blauort“ bei Hochwasser. Deutlich erkennbar die Sichelform und im Hintergrund die bereits im Westen zurückgelassene Rettungsbake. Unverkennbar zeigt sich hier die Dynamik der Watten. (Aufnahme: Wieland 1972)

ort“ für dieses Teilgebiet zwar eine Materialzunahme deutbar, wobei die Entwicklung parallel zu der durch das SoMThw begrenzten Fläche verläuft, bezogen auf das Gesamtgebiet ist sie aber vermutlich kaum bedeutend.

4.12 Ältere Zeit

Wenn man von der „Landcarte von dem alten Nordfrieslande“ von J. MEYER, Husum, absieht, der den Zustand von 1240 darstellend westlich der heutigen Küstenlinie Norderdithmarschens mehrere große bewohnte Inseln zeigt, sind die ersten Angaben über das Vorhandensein von Inseln ähnelnden Aufhöhungen, die bei „gewöhnlichem“ Hochwasserstand nicht überflutet werden, für das hier zu betrachtende Wattgebiet zwischen „Piep“ und „Wesselburener Loch“ auf der „Karte des Raumes Neuwerk–Pellworm“ von STEENERSEN aus dem Jahre 1784 zu finden. Das darauf mit „Isern Heinrich“ bezeichnete Watt zwischen Küste und „Blauen Orth“ liegt nach der zugehörigen Erklärung „so hoch, daß die obersten Gründe davon bey ordinärer Fluth nicht unter Wasser kommen“ (1). Zu dieser Zeit erscheint „Blauen Orth“ noch nicht als Insel. Als solche ist „Blauortsand“ mit „Kleiner Blauort Sand“ und „Büsumhenrichsand“ erstmals 1841 von dem Kopenhagener C. C. ZAHRTMANN auf seiner Karte „Helgoländer Bucht“ als Kette hochwasserfreier Inseln entlang der „Piep“ dargestellt. Auf seiner Karte „Binnen Helgoland“ von 1846 ist „Blauort Sand“ etwa 2×3 km groß, mit einer Baake ver-

sehen und liegt ungefähr an der Stelle des entsprechenden heutigen Außensandes (Abb. 13). Der „Kleine Blauort Sand“ ist unverändert geblieben, während an Stelle des „Büsumhennrichsand“ der nun bei mittlerem Hochwasserstand überflutende „Büsumer Hinnerk“ getreten ist. Etwa östlich des „Blauort Sand“ erscheint eine nur wenig kleinere hochwasserfreie Insel namens „Koes Hinnerk Sand“. Auf einer dänischen Seekarte aus demselben Jahr, nämlich der „Skort over Sønderjyllandes Vestkyst“, zeigt sich fast dasselbe Bild, nur der „Kleine Blauort Sand“ ist hier erst „trocken bei $\frac{2}{3}$ Fluth“ und unmittelbar westlich Büsum ist der längliche „Büsum Hinnerk“ wieder „t. b. h. W.“ (trocken bei Hochwasser). Damit ist der Zustand zu der Zeit glaubhaft belegt.

Im Jahre 1867 wird von dem Hamburger F. A. MEYER auf der Karte „Elbemündung“ genauso wie 8 Jahre später der „Blauorter Sand“ als Wattkomplex mit nur noch einem kleinen, nierenförmigen, bei mittlerem Hochwasser nicht überflutenden Sandrücken dargestellt (Abb. 13).

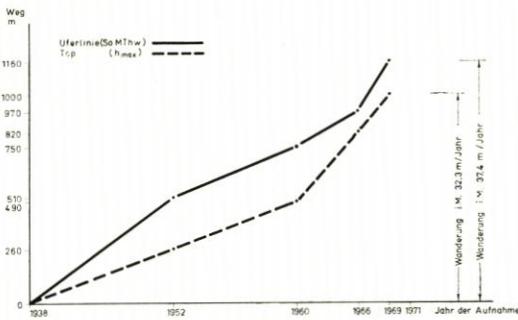


Abb. 9.
Zeit-Wegdiagramm. Ostwanderung von Uferlinie (SoMThw) und Top (hmax) auf der Meßachse (s. Abb. 6 und 14)

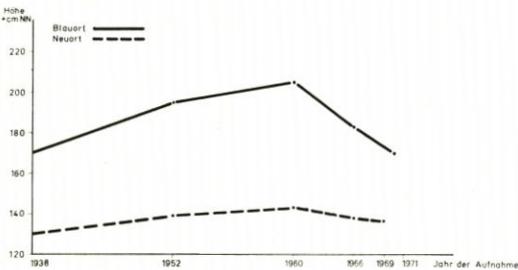


Abb. 10.
Zeit-Höhendiagramm. Höhenveränderung des Top (V) von „Blauort“ und „Neuort“ zwischen 1938 und 1969/70

Etwa seit dem Ende des 19. Jahrhunderts sind alle in diesem Wattgebiet zuvor vorhandenen Inseln und hohen Sände nicht mehr erschienen. Es scheint, daß in dem Raum um „Blauortsand“ bis zur Küste hin etwa in der Zeit von Mitte des 18. bis Mitte des 19. Jahrhunderts eine erhebliche Aufsandung stattfand, der eine Zeit des Ausgleichens und Abtragens der höheren Sandrücken folgte.

4.2 Profil

Im Zusammenhang mit dem geplanten Bauvorhaben interessiert die Frage, ob „Blauort“ den bis zu einem höchsten Punkt gleichmäßig geneigten und relativ stabilen Rücken des gesamten Wattkomplexes „Blauortsand“ bildet, oder aber einen inselartig aufgeschütteten, labilen

Außensand darstellt. Aus den Watt-Höhenkarten des Zustandes von 1938, 1952, 1960 und 1966 sind in der aus Abbildung 6 ersichtlichen Ost-West-Schnittachse die entsprechenden Profile entnommen worden und in Abbildung 14 dargestellt. Daraus wird der jeweils etwa 75 cm unterhalb der häufigsten Tidehochwasserstände mit steilerer Böschung ansetzende Außensand „Blauort“ erkennbar. Deutlich zeichnet sich der Prozeß seiner Umlagerung ab. Bezogen auf die gewählte Schnittfläche wurde er von 1938 bis 1960 sowohl ständig ostwärts verlagert als auch insgesamt aufgehöhht. Von 1960 an, als der Top von + 1,70 m NN gleichmäßig auf + 2,05 m NN angehoben war, wanderte der gesamte Sand mit zunehmender Geschwindigkeit weiter (Abb. 9), erreichte aber in der Maximalhöhe im Jahre 1970 wieder das um 35 cm niedriger liegende Ausgangsmaß von 1938 (Abb. 10). Die hier betrachtete Profilfläche hat sich während dieses Prozesses im Umfang nicht wesentlich geändert, so daß auf eine Aufstauchung des aufgeschütteten Materials geschlossen werden kann.

Parallel zu „Blauort“ ist in diesem Zeit-Schnitt (Abb. 14) die Entwicklung des Wattrückens „Neuort“ am Westufer des „Neumannsloch“ zu einem flachen Außensand zu erkennen. Wie dort gewinnt hier der Top von 1938 an stetig, wenn auch viel langsamer, an Höhe. Im Jahre 1960 ragt er nach allmählicher Aufschüttung des Sandes 3 cm über den Spiegel des SoMThw heraus. Im Herbst 1969 war „Neuort“ wieder flacher. Der Top lag auf + 1,38 m NN, also 5 cm niedriger als 1966. Die Entwicklung gleicht im allgemeinen der von „Blauort“. Das rechte Prielufer (VIII) des „Neumannsloch“ wurde dabei stark aufgesteilt, ohne daß sich die Lage des Prieles wesentlich veränderte.

Da das Profil des Außensandes „Blauort“ trotz Aufhöhung im Flächeninhalt keine auffallenden Veränderungen zeigt, in der selben Zeit der Watt Rücken im Bereich „Neuort“ aber aufgehöhht wurde, ist nicht auszuschließen, daß der Wattkomplex in seiner obersten Region (Rücken) eine Sandaufschüttung erfährt. Dieses Material kann aber dem unteren Bereich der eigenen Region mit der Basishöhe + 0,7 m NN entstammen. Die bei „Blauort“ um etwa 500 m weitere Verlagerung des Basispunktes + 0,7 m NN auf der Achse ostwärts als bei „Neuort“ läßt das wahrscheinlich erscheinen. Ebenso kann zumindest ein Teil des Materials auch aus dem tieferen Wattsockelbereich kommen.

Eindeutig ist die West-Ost-Verfrachtung des Sandmaterials. Das Profil zeigt den typischen, schwach geneigten Luvhang und den steiler abfallenden Leehang, wie BAHR (1) es allgemein für den Wattstrand an den Prielmündungen im Zusammenhang mit der dort beobachteten Nord-Süd-Verfrachtung beschreibt, und wie es auch bei der Sandbank vor St. Peter-Ording festgestellt wurde (8).

4.3 Volumen

Um die in der Fläche sowie im Profil gefundenen Veränderungen von „Blauort“ wenigstens für einen bestimmten Betrachtungszeitraum durch die dritte Dimension zu ergänzen, wurden in einem planimetrischen Verfahren die Wattmassen bilanziert. Und zwar betrifft das jeweils den Raumteil Watt bezogen auf die Basisflächen + 0,7 m NN (Watt Rücken) und + 1,4 m NN (Außensand). Außerdem wird einmal der eine sog. „Physiografische Einheit“ (IX) bildende Teil des Wattkomplexes „Blauortsand“ zwischen „Norderpiep“, „Wesselburener Loch“, „Neumannsloch“ und „Blauorterpriel“ betrachtet, also der am weitesten seewärts gelegene engere Wattkomplex, dem „Blauort“ aufliegt, und zum anderen das gesamte Wattgebiet „Blauortsand“ zusammen mit dem „Büsumer Watt“. Die Bilanzierung beschränkt sich auf den Zeitabschnitt von 1952 bis 1966 einschließlich.

Tabelle 3
Bilanzierung
Teilgebiet: Blauortsand zwischen Neumannsloch, Piep und Blauort-Priel
Raumteil: Watt

Jahr	Höhe cm NN	Fläche		Volumen		Höhe i. M. cm NN	Bemerkungen
		ha	%	m ³	%		
1938	+ 140	17,0	36,7				
1952	+ 140	46,4	100	133 925	100	+ 169	
1960	+ 140	51,9	112	167.865	125,4	+ 172	
1966	+ 140	44,0	95	103 370	77,2	+ 163	
1969	+ 140	55,5	120				
1952	+ 70	344,2	100	1 268 545	100	+ 107	
1960	+ 70	366,4	106	1 340 515	105,7	+ 107	
1966	+ 70	372,7	108	1 359 700	107,2	+ 107	
1952	— 50	854,0	100	8 732 390	100	+ 52	
1960	— 50	928,5	109	9 005 565	103,1	+ 47	
1966	— 50	1 046,3	122	8 144 665	93,3	+ 28	
1952	— 50	163,9		2 017 905		+ 73	Einzugsgebiet
1960	— 50	169,2		2 299 925		+ 86	Nebenpriel
1966	— 50	168,9		2 285 755		+ 86	östlich Blauort
1952	— 50	0,0		0,0			Einzugsgebiet
1960	— 50	204,0		1 202 455		+ 9	Nebenpriel
1966	— 50	281,3		1 954 505		+ 20	westlich Blauort

Über die Ordinate + 1,4 m NN erhebt sich im betrachteten Gebiet während der gesamten Zeit ausschließlich der Außensand „Blauort“. Die Sandmasse oberhalb dieser Basis pendelt stark. Zunächst nahm sie von 1952, wo sie mit 133 925 m³ ermittelt wurde, bis 1960 auf 167 865 m³ um 25,4 % zu (Abb. 17 u. Tab. 3). Danach folgte jedoch von 1960 bis 1966 ein fast doppelt so steiler Abfall um insgesamt 48,2 % auf 103 370 m³. Über den gesamten Zeitraum verteilt ergibt sich mit nur 1,2 % Zunahme ein nahezu ausgeglichener Massenhaushalt. Ob an der sehr auffälligen Schrumpfung des über SoMThw herausragenden Sandes zwischen 1960 und 1966 die schwere Sturmflut von 1962 Anteil hat, kann nicht gesagt werden.

Die räumliche Entwicklung des gesamten Außensandes oberhalb der Basis von + 0,7 m NN verläuft gleichmäßig. Das Volumen nimmt während der gesamten Zeit von 1952 bis 1966 zuerst um 5,7 % und im letzten Sechsjahresabschnitt um weitere 1,5 % zu (Abb. 17). Im einzelnen sind für 1952 = 1 268 545 m³, für 1960 = 1 340 515 m³ und für das Jahr 1966 = 1 359 700 m³ an Masse ermittelt worden. Die Mengenbilanz im Gebiet zwischen „Norderpiep“, „Neumannsloch“ und „Blauorterpriel“ ist also gering positiv. Bei Einbeziehung des östlich „Neumannsloch“ anschließenden Wattkomplexes einschl. „Büsumer Watt“ ist das Bild etwas anders (Abb. 17). Das Volumen des über SoMThw herausragenden Sandes ändert sich natürlich nicht. Der gesamte Wattrücken schrumpft von 1952 bis 1960 um 2,8 %, vergrößert sich jedoch bis 1966 wieder um insgesamt 4 % und steht damit in der Endbilanz um 1,2 % höher. Das sind gegenüber dem mit 100 % gesetzten Ausgangsvolumen von 1 649 250 m³ bei einem Endvolumen von 1 669 585 m³ (Tab. 5) rund 20 300 m³ Gewinn.

Die jüngste Entwicklung von 1966 bis heute konnte in diesem Rahmen nicht weiter verfolgt werden. Es ist zu vermuten, daß das für den davorliegenden Zeitabschnitt gefundene Bild des angenäherten Massengleichgewichts kaum wesentlich anders sein wird.

4.4 Zusammenfassung

Die Analyse zweier Luftbildaufnahmen sowie der sog. Höhenkarten aus mehreren, zeitlich gestaffelten terrestrischen Wattvermessungen (Abb. 2) zeigt für den oberen, stärker modellierten Rücken des Wattes mit dem Außensand auf der Basis von +0,7 m NN eine relativ starke Umlagerung. Schon beim Betrachten der Luftbilder fallen die stark ausgeprägten strukturellen Formen auf, die speziell im Bereich um „Blauort“ nach den Beobachtungen von NEWTON und WERNER (7) im Elbmündungsgebiet auf eine hohe Sedimentaktivität hinweisen. Hervorstechend dabei ist die für „Blauort“ mit durchschnittlich 37,4 m pro Jahr gefundene, unvermutet rasche Ost-West-Verlagerung (Abb. 9). Verursachende Kräfte sind primär Brandungsströmungen. Die

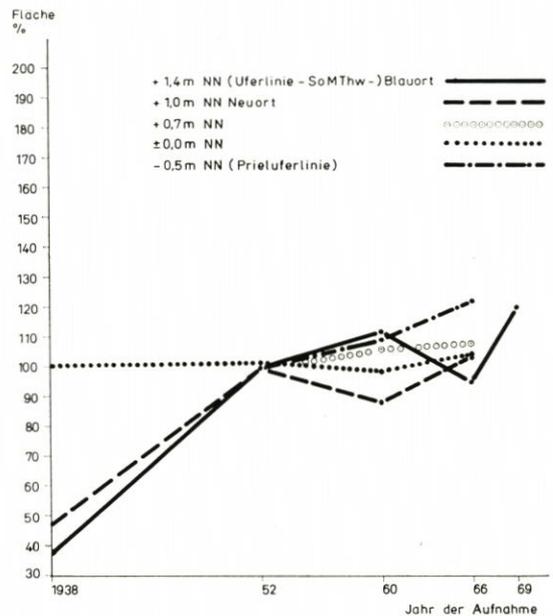


Abb. 11.
Zeit-Flächendiagramm. Prozentuale Veränderung der Wattfläche innerhalb verschiedener Höhenstufen im Gebiet zwischen „Piep“, „Neumannsloch“ und „Blauorter Priel“ (s. Abb. 4 und 6) von 1938/52 bis 1966/69

Form des Außensandes in der mittleren Hochwasserbegrenzung könnte auch auf zusätzlich wirksam gewordene äolische Kräfte zurückzuführen sein. Die vorherrschenden westlichen Windrichtungen, bei denen zugleich die Stufen der größeren Windgeschwindigkeiten überwiegen, die größtenteils auch noch in die niederschlagsärmeren, wärmeren und dadurch sandflugbegünstigten Monate fallen (Abb. 12), sind aus der meerwärts gebeugten Nierenform des Sandes abzulesen.

Die Basisflächen sowohl des von der SoMThw-Linie begrenzten Außensandes als auch des Wattrückens nehmen im Teilgebiet „Blauort“/„Neuort“ an Umfang zu. Das Gesamtgebiet einschließlich „Büsumer Watt“ verändert sich in der +0,7-m-NN-Basisfläche kaum. Der Top von „Blauort“ und „Neuort“ zeigt zunächst steigende, dann wieder abfallende Tendenz, in der Resultierenden des Betrachtungszeitraumes 1938 bis 1970 theoretisch noch geringfügig positiv. Mit einer weiteren Abnahme ist jedoch zu rechnen. Denn beim Betrachten des Entwicklungsprozesses an Hand der in Abbildung 14 dargestellten Profile ist deutlich eine Phase des Aufbaues und ab 1960 eine Phase des Abbaues zu erkennen. Ein Rückblick in die historische Entwicklung der inselartigen Aufhöhungen läßt offenbar werden, daß sich wellenartig ähnliche Phasen wiederholen, wie zum Beispiel schon einmal zwischen der Mitte des 18. und dem Ende des 19. Jahrhunderts etwa im selben Gebiet.

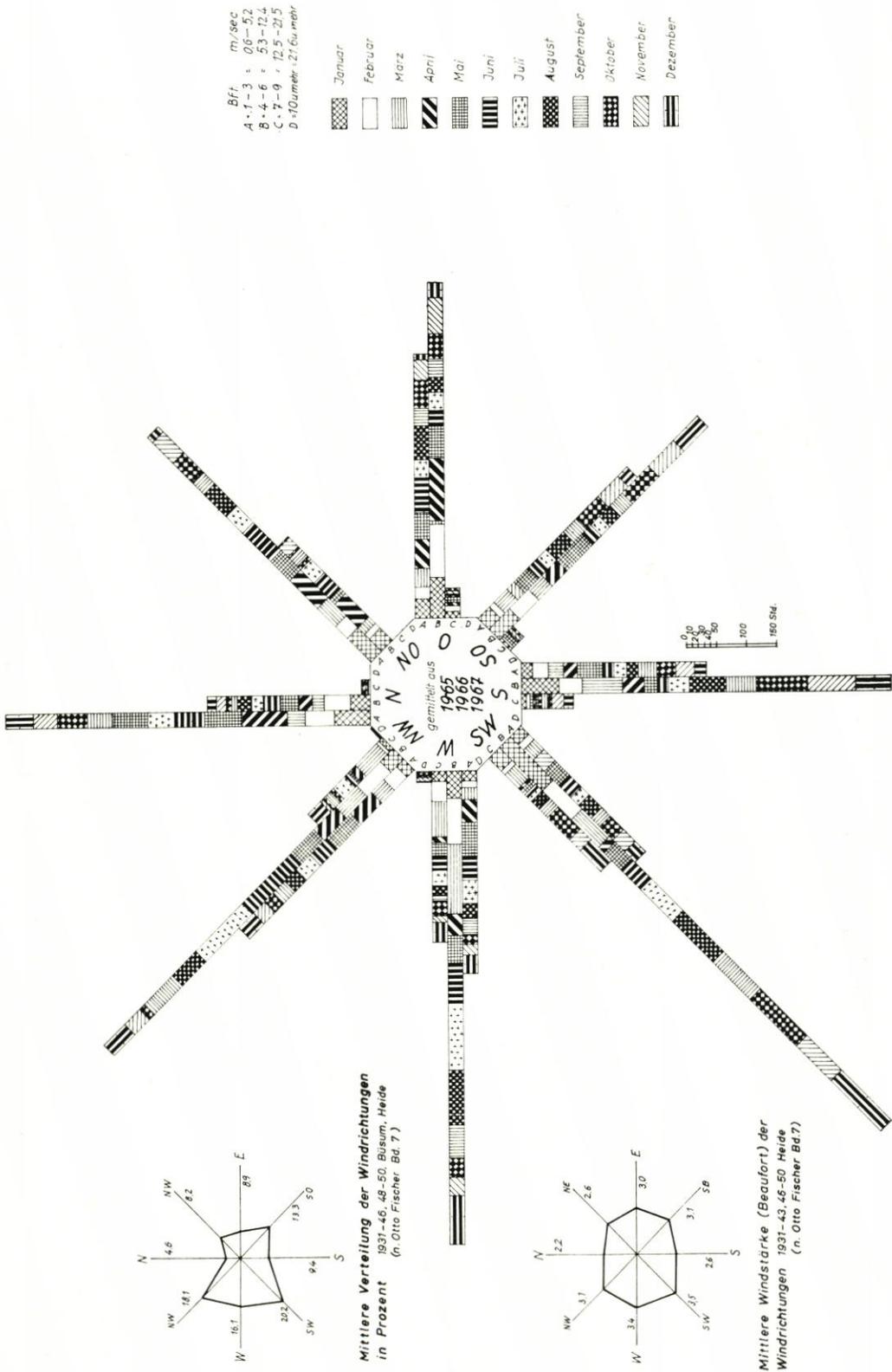


Abb. 12. Mittlere Windverhältnisse in Richtung und Stärke, gegliedert in je 4 Stufen und monatlich verteilt, gemessen an der Station Büsum in der Jahresreihe 1965-1967

Um die Entwicklungstendenz deutlicher werden zu lassen, wurden für den Zeitabschnitt von 1952 bis 1966 die jeweils auf verschieden hohe Basen bezogenen Wattvolumina ermittelt und bilanziert (Abb. 17, Tab. 3 u. 5). Das Ergebnis zeigt eine angenäherte Parallelität zu den in der Fläche und im Profil gefundenen Veränderungen. Nach einer Zunahme in der ersten Phase ist der Massenhaushalt nahezu wieder ausgeglichen worden.

5.0 Veränderungen des Wattsockels

Die Intensität der Umformungen im Watt nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Veränderungen vollziehen sich im tieferen Wattsockelbereich in längerzeitlichen Phasen primär in unmittelbarer Umgebung der in ihrer Lage pendelnden Priele. Zur Untermauerung der Aussage über die Entwicklung der oberen Wattregion soll auch der Wattsockel einer Analyse unterzogen werden, zumal das Material beispielsweise des Außensandes dieser Region entstammen kann und nicht von außen her in das Betrachtungsgebiet „Blauort-Sand“ hereingeführt sein muß.

5.1 Fläche

5.11 Jüngere Zeit

Vergleicht man die beiden jeweils zur Niedrigwasserzeit aufgenommenen Luftbilder, so erkennt man zwischen den beiden Zuständen von 1936 und 1958 wesentliche Veränderungen der Wattsockelfläche. Ins Auge fallen die 1958 erkennbaren ausgedehnteren Hellflächen. Zur Zeit der Erstaufnahme durchtrennt etwa 1000 m westlich des Vergleichspunktes noch ein Nord-Süd gerichteter Priel den nur schwach ausgeprägten und überwiegend dunkler getönten Steert. Die „Norderpiep“ überrascht mit ihrer konstanten Stabilität im Nordufer. Lediglich unmittelbar westlich des Außensandes ist eine stärkere nördliche Einbuchtung entstanden. Der vom „Wesselburener Loch“ südwärts und mit einem stark ausgebildeten Arm ostwärts in den „Blauortsand“ hineinreichende Priel wurde umgebildet in ein NW-SO gerichtetes Prielpaar. „Ossengot“ und „Neumannsloch“ blieben, mit Ausnahme einer parallelen seewärtigen Ausbuchtung im Mittellauf, unverändert. Der Komplex „Blauortsand“ scheint hiernach zugenommen zu haben.

Eine Analyse der terrestrischen Wattaufnahmen des Teilgebietes „Blauortsand“ bis zum „Neumannsloch“ unterstreicht diese Beobachtung. Der durch die Prieluferlinie (VIII) begrenzte Wattflächeninhalt vergrößerte sich von 1952 mit 854,0 ha auf 1046,3 ha im Jahre 1966 fast linear um 22% (Abb. 11 u. Tab. 3). Für dasselbe Gebiet wurde zusätzlich die Wattfläche innerhalb der NN-Isohypse ermittelt.

Auch hieraus ergibt sich eine zunehmende Tendenz im durchschnittlichen Umfang von + 1,75 % für den Zeitabschnitt 1952-1966, der im Jahre 1960 eine vorübergehende Schrump-

Tabelle 4

Jahr der Vermessung	Flächeninhalt	
	ha	%
1938	660,5	100
1952	666,4	101
1960	647,5	98
1966	686,9	104

fung um 2 % aufweist, und für den gesamten Betrachtungszeitraum von 1938 bis 1966 von + 1,62 %. Auch wenn man in diese Betrachtung den restlichen Teil des Wattkomplexes „Blauortsand“ und das „Büsumer Watt“ einbezieht, ändert sich das Ergebnis kaum. Die durch das Prielufer, also die — 0,5 m NN-Isohypse begrenzte Wattfläche verringerte sich zwar von 4030,3 ha im Jahre 1952 auf 3963,9 ha im Jahre 1966, da aber 1960 der Flächenumfang mit 4195,9 ha bedeutend größer war (Tab. 5), verbleibt eine Gesamtzunahme von 1,15 %.

Ist die gefundene Fläsenzunahme auf erhöhte Sandzuführung von außen her zurückzuführen, so müssen sich die Randpriele entweder entsprechend verlagert haben, also seitlich ausgewichen sein, und die Fläche der den Wattkomplex gliedernden Priele abgenommen haben, oder die Zufuhr erfolgte auf unveränderter Basisfläche durch Aufhöhung in der Vertikalen.

Tabelle 5
Bilanzierung
Teilgebiet: Blauortsand und Büsumer Watt — Raumteil: Watt

Jahr	Höhe cm NN	Fläche		Volumen		Bemerkungen
		ha	%	m ³	%	
1938	+ 140	17,0	36,7			
1952	+ 140	46,4	100	133 925	100	
1960	+ 140	51,9	112	167 865	125,4	
1966	+ 140	44,7	95	103 650	77,2	
1952	+ 70	615,2	100	1 649 250	100	
1960	+ 70	558,7	91	1 603 190	97,2	
1966	+ 70	615,9	100	1 669 585	101,2	
1952	— 50	4 030,3	100	30 032 090	100	
1960	— 50	4 195,9	104	31 200 035	103,9	
1966	— 50	3 963,9	98,3	29 491 645	98,2	

Tabelle 6
Bilanzierung
Teilgebiet: Neumannsloch, Piep und Blauort-Priel — Raumteil: Priel

Jahr	Höhe cm NN	Fläche ha	mittl. max. Tiefe cm NN	Priel	Bemerkungen
1960	— 50	140,7	~ — 250	Neumannsloch	
1966	— 50	76,5	~ — 200	Neumannsloch	
1952	— 50	8,1	~ — 150	Piep/IV	Nebenpriel östlich Blauort
1960	— 50	1,1	~ — 80	Piep/VI	
1966	— 50	1,3	~ — 70	Piep/VIII	
1952	— 50	143,6	~ — 260	Piep/VI	Nebenpriel westlich Blauort
1960	— 50	93,0	~ — 160	Piep/VIII	
1966	— 50	79,6	~ — 200	Piep/X	
1952	— 50	192,6	~ — 200	Blauort-Priel	
1960	— 50	52,5	~ — 200	Blauort-Priel	
1966	— 50	94,7	~ — 250	Blauort-Priel	

Im Bereich des „Blauort-Steert“ ist der westlich des Außensandes zwischen „Wesselburener Loch“ und „Norderpiep“ verlaufende, im Jahre 1938 noch stark ausgeprägte Randpriel ausgewichen (Abb. 3 und 4). Ein etwas weiter östlich entstandener, schwach ausgebildeter neuer Priel nahm in seiner Fläche innerhalb der Prieluferlinie im Zeitabschnitt 1952–1966 von 143,6 ha um 64 ha auf 79,6 ha ab (Abb. 18, Tab. 6). Die Schrumpfung betrug von 1952 bis 1960 = 35,2% und von 1960 bis 1966 = 9,3%. Die parallel zur Aufschüttung von „Blauort“ hart östlich davon entstandene Strömungsrinne verkümmerte in ihrer Uferfläche mit fortschreitender Abflachung des Außensandes von 1952 bis 1966 um insgesamt reichlich 85%. Weniger stark, aber mit ebenfalls negativer Tendenz, änderten sich die entsprechenden Flächen des „Neumannsloch“ und des „Blauorter Priel“.

5.12 Ältere Zeit

Der Name „Blauortsand“ für das Wattgebiet nördlich der „Piep“ erscheint nachweisbar erstmals 1592 bei dem Holländer WAGHENAER in seiner Segelanweisung „Thresoor der Zeevaert“, worin es heißt, Blauort erstreckte sich „vom Steert des Hont bis fast halbwegs nach Helgoland“ (1). C. M. WOHLERS zeichnete in seine „Accurate Chartre eines theil von der Noord See“ 1779 „die Hend“, wohl das frühere „Hont“, als kleine Insel fast nördlich Büsum. Sie ist vermutlich ein Teil des heute eingedeichten „Heringsand“. Auf der „Paskaart van de Weser, Elve en Eyder“ zeigt der Amsterdamer BLAEU 1623 „Blauoort“ mit dem „Steert of vlacte van Blau oort“ als schmales, sehr langgestrecktes Watt zwischen „Eider“ und „Piep“, von dem an das Festland anschließenden Wattgebiet „De Hont“ durch ein nahe dem Festland zwischen den beiden Wattströmen Nord-Süd verlaufendes, ausgebacktes Fahrwasser getrennt (Abb. 13). Dieses Fahrwasser ist in der Peilung Tating–Ehst, hart am Ostrand des „Blauen Orth“ in die „Norderpiep“ mündend, nach STEENERSENS „Karte des Raumes Neuwerk–Pellworm“ im Jahre 1784 noch vorhanden, wenn auch im nördlichen Teil weiter seewärts gewandert. Auf etwa ein Drittel der Länge von der Eider her gerechnet zweigen von diesem die neu entstandenen „Dove Fief Faden“ ab. Auf einer von C. MÜLLER 1842 kopierten Karte eines unbekanntenen Verfassers von 1829 ist die „Fifefadendove“ bereits stark ausgeprägt (Abb. 13). Diese Entwicklung einer eigenen Tidestromrinne läßt auf eine Vergrößerung des Wattkomplexes „Blauortsand“ schließen. Um 1840 war vom Querfahrwasser nur noch ein Rest vorhanden. Dafür war im Westen von der Eider her das „Wesselburener Loch“ entstanden. Von diesem Fahrwasser bestand zum „Ostermanns Loch“ über eine schmale Rinne nach dem Segelhandbuch von LOWTOW bis 1857, wo es letztmalig erwähnt wird, noch eine Verbindung.

Das zunächst südwärts wandernde Eiderfahrwasser verlagerte sich wieder zunehmend nordwärts. Die Ausgangsposition im Norden war nach der „Spezialkarte der Eider“ 1867/68 wieder erreicht. Die Norderpiep hatte sich in der gleichen Zeit weiter südwärts verlagert, schaffte sich aber wiederholt ein Ebbegat unmittelbar westlich „Blauort“, das immer wieder versandete. Bis 1900 veränderte sich die immer wieder nordwärts drängende „Norderpiep“ nicht mehr. Im weiteren Verlauf wuchs der zwischen „Norderpiep“ und „Süderpiep“ entstandene „Tertius-Sand“. Bis etwa 1936 wurde die innere Barre der Süderpiep abgebaut. Die Norderpiep rückte im nördlichen Scheitel wieder nordwärts, und zwar von 1900 bis 1936 um rd. 400 m, von 1936 bis 1954 um weitere 750 m, die Mündungsstrecke verlagerte sich in der gleichen Zeit um insgesamt 1700 m südwärts (1).

Der gesamte Wattkomplex zwischen „Piep“ und „Eider“ hat danach also während der letzten zwei bis drei Jahrhunderte in der Fläche merklich zugenommen. Als Ursache ist eine Materialzufuhr in dieses Gebiet wahrscheinlich.

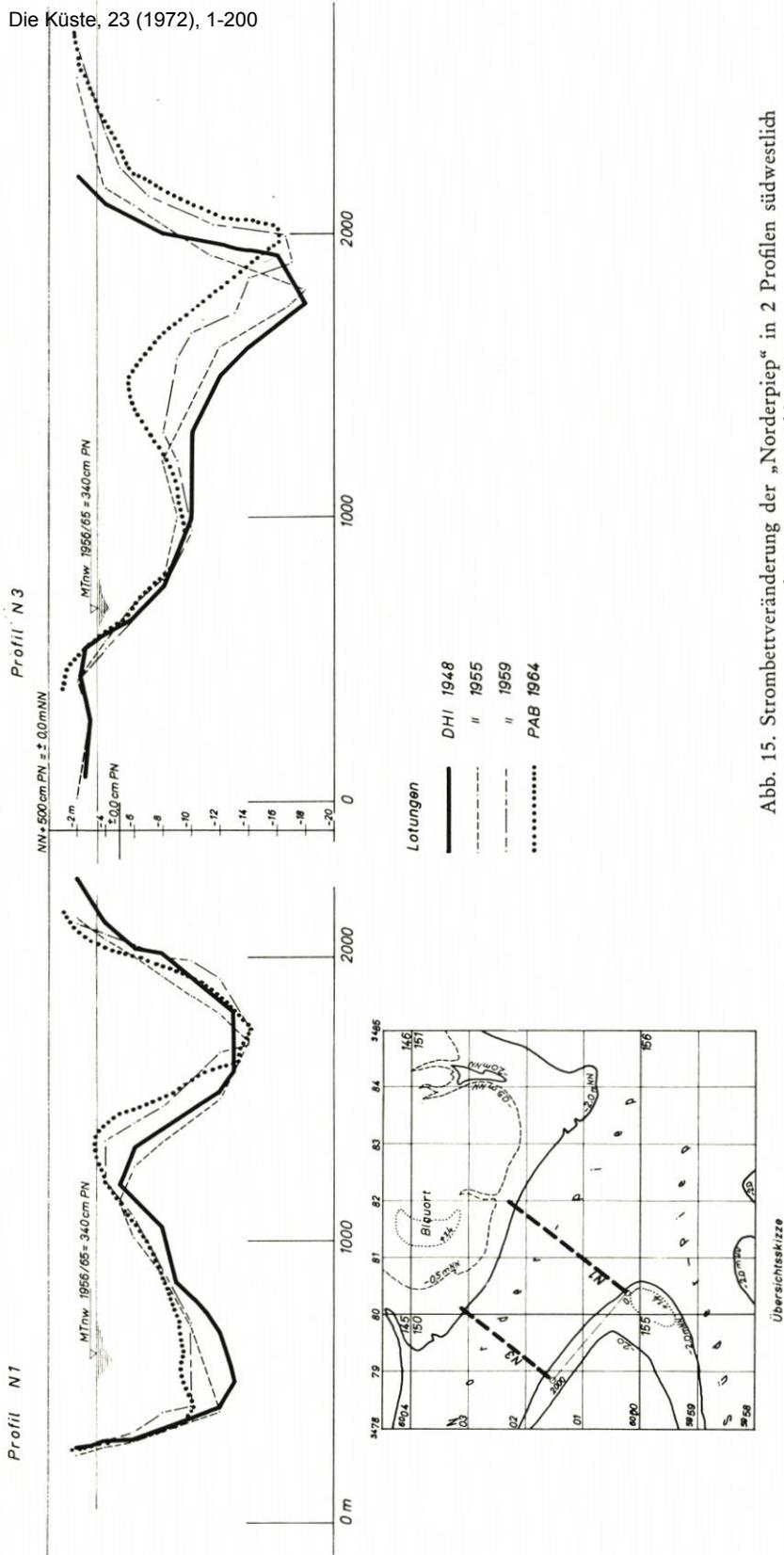


Abb. 15. Strombettveränderung der „Norderpiep“ in 2 Profilen südwestlich „Blauort“ von 1948 bis 1964

5.2 Profil

Das in der Fläche festgestellte Verhalten der größeren Priele in unmittelbarer Umgebung von Blauort soll an den wichtigsten Stellen durch vergleichende Betrachtung einiger Profile ergänzend analysiert werden. Hiernach zeigt der bereits für die Analyse des Watrückens benutzte Schnitt (Abb. 14) im Wattsockelbereich zwischen Prielufer und der $-2,0$ m NN-Linie von 1938 bis 1966 eine Nordostverlagerung der „Norderpiep“ um insgesamt 640 m im Mittel dieser Höhenstufe. Dabei wurden rund 75 % der Strecke in der Zeit von 1938 bis 1952 zurückgelegt. Danach hatte sich eine bis etwa zur Watrückebasis reichende, fast gleichmäßig geneigte Böschung eingestellt, die in diesem Bereich zunehmend flacher wurde, ein Zeichen dafür, daß das Nordufer in den letzten Jahren annähernd stabil blieb.

Das Ergebnis der Auswertung einiger Seekarten und eigener Lotungen in den Profilen N1 und N3 (Abb. 15) seitab von „Tertius“ unterstreicht diese Beobachtung. Im Profil N1, das ungefähr südlich „Blauort“ auf das Watt trifft, hat sich die nördliche Ebberinne der „Norderpiep“ in ihrer Lage von 1948 bis 1964 nicht verändert. Die zuvor fast flächengleiche südliche Flutrinne hat sich aufgehöhht, aber auch durch Aufschüttung einer Sandbank zwischen beiden deutlicher abgetrennt. Die Ebbeströmung scheint stärker geworden zu sein. Im Profil N3, das südwestlich „Blauort“ etwa mit der Schnittachse des Rückens zusammentrifft, und das bereits im Scheitelbereich der „Norderpiep“ liegt, findet sich die in historischer Zeit gefundene Tendenz der Nordverlagerung bis etwa 1964 bestätigt. Jährliche Lotungen der in Abbildung 15 gekennzeichneten Überwachungsprofile seit 1964 brachten bis heute keine weiteren Veränderungen.

Das „Neumannsloch“ hat sich in der Lage kaum verändert (Abb. 14). Die westliche Uferböschung ist wesentlich aufgesteilt und die Sohle aufgehöhht worden, wobei beide Vorgänge offensichtlich im Zusammenhang mit der Entwicklung des Watrückens „Neuort“ stehen. Von 1952 bis 1966 hat sich die mittlere maximale Tiefe des „Neumannsloch“ von -400 cm NN auf -200 cm NN verringert. Ähnlich sind die Verhältnisse bei den schwächer ausgebildeten Prieeln unmittelbar westlich und östlich „Blauort“ (Abb. 19 u. Tab. 6). Eine Ausnahme macht der „Blauorterpriel“, der von 1952 bis 1960 gleichbleibend maximal -200 cm NN tief war, im Jahre 1966 jedoch eine um 50 cm größere Maximaltiefe aufweist. Diese im Profil gefundenen Teilwerte untermauern die aus den Flächen ermittelte Schrumpfungstendenz der hier beleuchteten kleineren Priele.

5.3 Volumen

Der Wattsockel kann bei einer gleichbleibenden Oberfläche, hier auf durchschnittlich $+0,7$ m NN festgelegt, in der Vertikalen verändert worden sein. Daher wurde die Wattmasse, bezogen auf die Prielufer – bzw. Wattrandbasis ($-0,5$ m NN), zur Ergänzung des bisherigen Bildes bilanziert.

Nach der Tabelle 3 u. Abb. 17 erhöht sich im Teilgebiet des „Blauortsand“ zwischen 1952 und 1960 die Wattmasse zunächst von $8\,732\,390$ m³ um 3,1 % auf $9\,005\,565$ m³, verringert sich aber bis 1966 wieder um 6,7 % auf $8\,144\,665$ m³, so daß sich am Ende des betrachteten Zeitabschnittes eine negative Bilanz von 1,8 % ergibt.

Das Volumen des gesamten Wattkomplexes „Blauortsand“ und „Büsumer Watt“ verändert sich ähnlich dem des Teilgebietes. Von 1952 bis 1960 ist ein Materialzuwachs um 3,9 % von $30\,032\,090$ m³ auf $31\,200\,035$ m³ erfolgt. Die nachfolgende Abnahme erreichte 1966 insgesamt 1,8 %. Dadurch errechnet sich über den gesamten Zeitraum mit 1,05 % eine gering positive Volumenänderung (Abb. 17, Tab. 3 u. 5). Schneidert man die Wattkörper bis auf die $-0,5$ m

NN-Basis heraus, die in der Oberfläche je das Einzugsgebiet der Priele unmittelbar östlich und westlich von „Blauort“ bilden, so ergibt sich für den ersteren wieder die gleiche Entwicklung. Der Raumteil des westlichen Priel-Einzugsgebietes hat sich nach Entwicklung des Prieles zwischen 1952 und 1960 insgesamt wesentlich vermehrt.



Abb. 16.
Die Bake „Blauort“. Sie wurde 1955 direkt auf dem hochwasserfreien Außensand neu errichtet. Heute ist dieser bereits rd. 500 m weiter ostwärts gewandert. Die Bake ist bei MThw trockenem Fußes nicht mehr erreichbar (Aufnahme: Thies 1970)

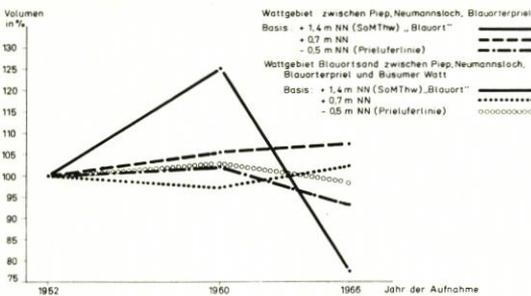


Abb. 17.
Zeit-Volumendiagramm. Prozentuale Veränderung des Wattvolumens innerhalb verschiedener Höhenstufen im Teil- und Gesamtgebiet von 1952 bis 1966

Im Endergebnis scheint in das östliche Wattgebiet eine größere Menge Material verfrachtet worden zu sein als in das Teilgebiet um Blauort. Das zu drei verschiedenen Zeiten ermittelte Wattvolumen pendelt, und es ist bekannt, wie die Entwicklung vor 1952 und nach 1966 verlief. Außerdem beschränkt sich die Bilanzierung nur auf die obere Region mit der $-0,5$ m NN-Basis. Zum Beispiel stellte BÄHR im Niveau KN $-7,7$ m für den Zeitraum von 1936 bis 1954 eine Abnahme des Volumens und der Fläche im Wattkomplex zwischen „Piep“ und „Wesselburener Loch“ fest, verursacht durch die nördliche Verlagerung der Norderpiep. Zu-

gleich aber auch beobachtete er eine starke seewärtige Verlagerung dieser Tiefenlinie von 1840 bis 1954 (1). Für die hier gestellte Aufgabe genügt aber der hier vollzogene teilweise Einblick, der zur Vermutung Anlaß gibt, daß trotz ständiger Umformungen der Gesamthaushalt bei geringfügigem Zuwachs im wesentlichen ausgeglichen ist.

Abb. 18.
Prielflächen-Veränderungen innerhalb der
Prieluferlinie (-0,5 m NN) von 1952
bis 1966 in Prozent

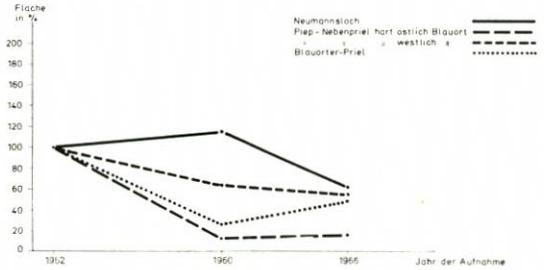
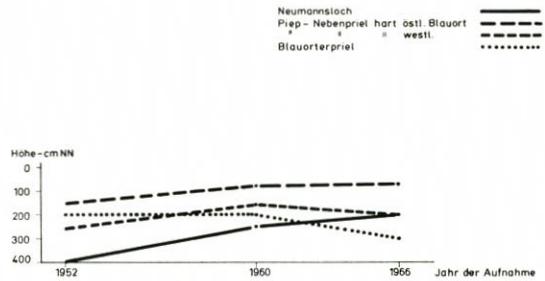


Abb. 19.
Prieliefen-Veränderungen bezogen auf
die mittlere maximale Tiefe (Talweg)
von 1952 bis 1966



5.4. Zusammenfassung

Ein Vergleich zweier Luftbildaufnahmen der Zustände von 1936 und 1958 macht einen Flächenzuwachs am „Blauort-Steert“ augenfällig. Die Analyse von vier terrestrischen Vermessungen von 1938 bis 1966 ergibt sowohl für die innerhalb der NN-Linie als auch für die durch Prielufer begrenzte Wattfläche insgesamt einen Gewinn. In der gleichen Zeit haben die Wasserflächen der bordvoll gefüllten kleineren Priele durchschnittlich merklich abgenommen, bei gleichzeitiger Verflachung.

Die historische Entwicklung zeigt eine erhebliche Breitenausdehnung des einstmals (1623) sehr schmalen, von „Piep“ und „Eider“ begrenzten Wattes „Blauortsand“, in dem sich später das „Wesselburener Loch“ als zusätzliches Ebbegat bildete.

Die Entwicklung des Wattvolumens zeigt eine überraschend genaue Parallelität zur Flächenentwicklung innerhalb der Prieluferlinie für den gesamten Wattkomplex „Blauortsand“ einschließlich „Büsumer Watt“. Einem Anwachs von 4 % (Fläche) und 3,9 % (Volumen) im Zeitabschnitt 1952–1960 folgt ein Verlust von 1,7 % (Fläche) und 1,8 % (Volumen) im Zeitabschnitt 1960–1966. Im Teilgebiet „Blauortsand“, mit „Neumannsloch“ als östlicher Begrenzung, haben Fläche wie Volumen von 1952 bis 1960 einen unterschiedlich starken Zuwachs von 9 % und 3,1 %, von 1960 bis 1966 nimmt die Fläche um weitere 13 % zu, das Wattvolumen aber schrumpft in der gleichen Zeit um 9,8 %. Offensichtlich ist das küstennahe Watt in sich ausgeglichener als das in der Dynamik des Meeres sich eingreifender umformende äußere Watt,

das trotz flächenhafter Materialanlagerungen einen in dem betrachteten, sehr kurzen Zeitraum etwa ausgeglichenen Massenhaushalt behält, in der oberen Region aber ständig stark bewegt wird.

6.0 Zusammenfassung und Folgerung

Ausgelöst durch den Plan, Bauten für den Fremdenverkehr auf dem Außensand Blauort zu errichten, waren mit der vorliegenden Untersuchung die geomorphologischen Gestaltungsvorgänge aufzufinden, um die Verwirklichung dieses Vorhabens beurteilen und darüber entscheiden zu können.

Die natürlichen Veränderungen und Tendenzen sind getrennt nach Fläche, Profil und Volumen für den Wattsockel und den ihm auflagernden Sand beleuchtet worden. Die Synthese ergibt ein dynamisches Bild:

Der Top des Außensandes liegt heute mit + 1,7 m NN nur 30 cm über dem mittleren Tidehochwasserstand der Jahresreihe 1956/65 des Sommerhalbjahres und wird in dieser Zeit, bezogen auf die Jahresreihe 1966/69, von insgesamt 59 Tiden erreicht (Abb. 12). Die bei So MThw hochwasserfreie Fläche ist rund 55 ha groß. Sie wurde im Zeitraum von 1938 bis 1969 um 37,4 m pro Jahr ostwärts verlagert.

Die Entwicklung im Wattgebiet westlich des „Neumannsloch“ war, bezogen auf die Basis — 0,5 m NN, bis 1960 zunächst positiv, wobei auch der Außensand höher (bis + 2,05 m NN) und in der Fläche größer wurde. Danach nimmt das Volumen insgesamt in etwa gleichem Umfang wieder ab. Nur im Wattrückenbereich zwischen + 0,7 und + 1,4 m NN bleibt eine Zunahme. Im Gesamtgebiet „Blauort-Sand“ mit „Büsumer Watt“ zeigt sich eine gegenläufige Entwicklung von Rücken und Sockel. Während von 1952 bis 1960 die Wattmasse oberhalb + 0,7 m NN abnimmt und anschließend bis 1966 um etwa die Ausgangsmenge wieder aufgefüllt wird, nimmt sie oberhalb — 0,5 m NN in der ersten Phase bis 1960 zu und danach um etwa das gleiche Maß wieder ab. Daraus kann geschlossen werden, daß die Bilanz im Gesamtgebiet im Betrachtungszeitraum nahezu ausgeglichen ist, daß dagegen im westlichen Teilgebiet um „Blauort“ erhebliche Umformungen stattfinden, bei einer Materialabgabe aus dem Wattsockelbereich in die Region des Wattrückens mit einer gering negativ resultierenden Massenbilanz, wobei jedoch die starke Zunahme der unteren Basisfläche (— 0,5 m NN) auf eine wahrscheinliche Materialzufuhr von außen her deutet. Das würde zum Teil BAHR (1) bestätigen. Ein Teil dieses Materials scheint durch das Flutgat „Süderpiep“ in die „Piep“ wieder über das Ebbegat „Norderpiep“ zurück ins Meer transportiert und teilweise auf das Watt im Bereich „Blauort“ geworfen zu werden.

Die von GRIPP aufgestellte Hypothese der kontinuierlichen Materialauffüllung des inneren Winkels der Deutschen Bucht bis zu einer ausgeglichenen Bogenküste kann durch vorliegende, in der Fläche sehr begrenzte Untersuchung nicht bestätigt werden. Vielmehr ist ein dynamischer Gleichgewichtszustand erkennbar, als Stufe eines sehr lang andauernden Entwicklungsprozesses, mit einem noch unreifen Watt und ohne Voraussetzung für die Bildung reifer und damit relativ stabiler Inseln.

Der Außensand „Blauort“ wird also auch zukünftig mit Material genährt, verlagert, verformt und wieder zu einem flachen Rücken eingeebnet werden. Schließlich wird auf den Wattsockel geschüttetes neues Material in einem nachfolgenden, ähnlichen Vorgang über das Watt bewegt werden. Diese Dynamik muß bei der Überlegung, ob „Blauort“ als Standort für ein bauliches Feriencentrum geeignet ist, unbedingt beachtet werden. Der um die geplanten Gebäude gewünschte natürliche Sandstrand in Form des heutigen Außensandes wird nach deren Errichtung infolge der aufgezeigten Beobachtungen rasch weiterwandern. Diese Entwicklung wird darüber hinaus durch die künstlichen Eingriffe in das natürliche Kräftespiel stark negativ beeinflusst werden. Die Bauwerke stellen sich den Wellen-, Strömungs- und Brandungskräften entgegen, lenken sie um und verstärken sie dadurch erheblich.

Das nur in Verbindung mit dem Element Land (Boden) im Sinne der Erholung und Freizeitbetätigung wirksame technische Gebilde, dessen bewohnbarer Teil wegen der zu erwartenden Sturmflutwasserstände mindestens erst 5 m über dem Niveau des Wattrückens (+ 1,0 m NN) beginnen kann, wird seiner Basis schnell entblößt und kann die ihm zugeordnete Aufgabe nicht erfüllen. Die Baukörper selber würden in ihrer Standsicherheit zunehmend gefährdet und wiederum

mit hohem, volkswirtschaftlich nicht vertretbarem finanziellen Aufwand vor der Zerstörung geschützt werden müssen, ohne einen Nutzen zu erreichen. Ein solches technisches Gebilde wäre in jeder Hinsicht absolut umweltfeindlich.

Es muß daher abgeraten werden, auf dem Rücken des Wattkomplexes „Blauortsand“ einschließlich des Außensandes ein Ferienzentrums der geplanten Art zu errichten.

7.0 Begriffe

Einige der gewählten Begriffe sind im Zusammenhang mit der Entwicklung eines auf der Grundlage bekannter Methoden aufbauenden Watt-Bilanzierungsverfahrens, das an anderer Stelle noch vorgestellt werden wird, mit bestimmter Bedeutung verwendet worden. Andere sind bekannt, aber zum Teil unterschiedlich definiert, oder es sind für eine Sache verschiedene Begriffe im Sprachgebrauch. Daher scheint hier eine Definition notwendig.

- | | |
|------------------------------|--|
| I. Außensand: | Der zur Zeit des mittleren Hochwasserstandes sichtbare Teil einer im Bereich des seeseitigen Wattrandes aufgeworfenen, im Top (höchster Punkt) mehrere Dezimeter bis etwa 2,2 m über NN reichenden und in der Regel unbewachsenen Sandbank. |
| II. Wattrücken: | Der durch Aufschüttung oder Aufstauung bis etwa in den MThw-Bereich rückenartig herausragende obere, periphere Teil des Wattkörpers. |
| III. Wattsockel: | Wattkörper zwischen der durch die jeweilige Prielsohle gebildeten unteren Basis und der Wattrückenbasis. |
| IV. Wattrand: | Linie zwischen Watt und Meer bei einem Tidewasserstand von $-0,5$ m NN, gleichbedeutend dem Wattrand an Prielen, dort identisch mit dem Prielufer. |
| V. Top: | Gipfel bzw. höchster Punkt eines Außensandes (Sandbank) oder eines Wattrückens. |
| VI. Seepegel: | Tideschreibpegel mit gleichbleibendem Standort im Wattenmeer, der zu Beginn der eisfreien Monate ausgebracht wird, während der Zeit möglicher Gefährdung durch Eisschub, gewöhnlich von Mitte Dezember bis Ende März, geborgen bleibt. Gebräuchlich ist auch der Begriff „Sommerpegel“. |
| VII. Isohypse: | Verbindungsline der Orte gleicher Höhenlagen (Höhenlinie). |
| VIII. Prielufer: | Linie zwischen Watt und Priel bei bordvoller Wasserfüllung eines Prieles bis zur Ordinate $-0,5$ m NN, bei der die Überflutung des flachen Wattes beginnt (Prieluferlinie). |
| IX. Physiografische Einheit: | Zusammenhängender, einheitlich geformter Wattkomplex mit nahezu gleichmäßig verteilten Kräftebedingungen, begrenzt in Küstennähe von der Küstenlinie (Deichfuß, Abbruchkante, Vorlandkante o. ä.), einem Schutzwerk und einem oder mehreren Prielen, im freien Watt entweder durch mindestens zwei Priele, durch ein Inselufer und mind. einem Priel, oder gebildet durch das einem Niederschlagsgebiet auf dem Festland gleichendes Einzugsgebiet jedes beliebigen Prieles. |
| X. Prielfläche: | Wasserfläche bei bordvollem Priel ($-0,5$ m NN). |
| XI. Wasserraum: | Volumen der Priele bei bordvoller Wasserfüllung, also unterhalb der Bezugsbasis $-0,5$ m NN. |

8.0 Literaturnachweis

- BAHR, MARTIN: „Die Entwicklung des Küstenvorfeldes zwischen Hever und Elbe seit dem 16. Jahrhundert.“ Unveröffentlicht. Helgoland 1963.
- FISCHER, OTTO: „Landgewinnung und Landerhaltung in Schleswig-Holstein“ Teil. III: Das Festland; Verlag von Dietrich Reimer, Berlin 1955. a) Band 5: Dithmarschen, b) Band 7: Hydrographie des Küstengebietes.

3. GRIPP, KARL: „Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht.“ Archiv der Deutschen Seewarte, Bd. 63, Hamburg 1944.
4. LINKE, GERHARD: „Bearbeitungsstand, Probleme sowie neue Arbeitsmöglichkeiten im Faziesbereich des sandigen Küstenholozäns.“ Hamburger Küstenforschung, Heft 11/Hamburg 1969.
5. LINKE, GERHARD: „Die Entstehung der Insel Scharhörn und ihre Bedeutung für die Überlegungen zur Sandbewegung in der Deutschen Bucht.“ Hamburger Küstenforschung, Heft 11/Hamburg 1969.
6. LÜDERS, KARL: „Kleines Küstenlexikon.“ Veröffentl. d. Niedersächs. Inst. f. Landeskunde und Landesentwicklung an der Universität Göttingen. Verlag August Lax, Hildesheim 1967.
7. NEWTON, ROBERT S., WERNER, FRIEDRICH: „Luftbildanalyse und Sedimentgefüge als Hilfsmittel für das Sandtransportproblem im Wattgebiet vor Cuxhaven.“ Hamburger Küstenforschung Heft 8/Hamburg 1969.
8. WIELAND, PETER: „Morphologische Entwicklungstendenz von Sandbank und Priel vor St. Peter-Ording als Grundlage für die Beurteilung des Standortes der geplanten Meerwassergewinnungsanlage.“ Marschenbauamt Heide – Pegelaußenstelle Büsum 1968; unveröffentlichter Arbeitsbericht.
9. WOHLBERG, ERICH: „Entstehung und Untergang der Insel Trischen.“ Mitt. Geogr. Ges. Hamburg. Bd. XIIX 1950.

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	} S
0,063-0,002		
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⁾.

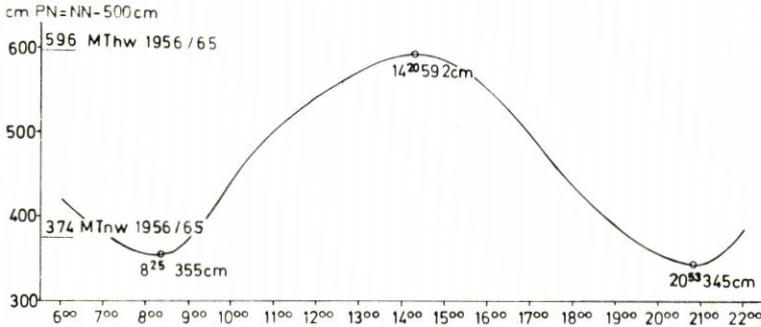


Abb. 2. Tidekurve am Pegel Borkum-Südstrand vom 10. 5. 1966

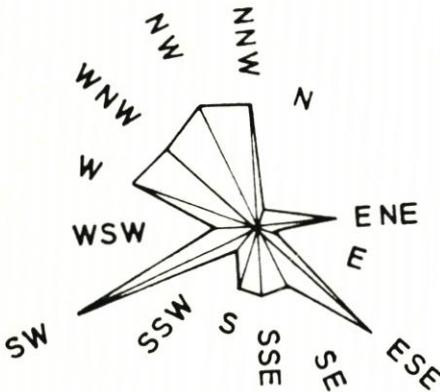


Abb. 3. Häufigkeiten der Windrichtungen für die Zeit vom 8. 9.-8. 10. 1969 an der Signalstelle Borkum (BAW)

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.

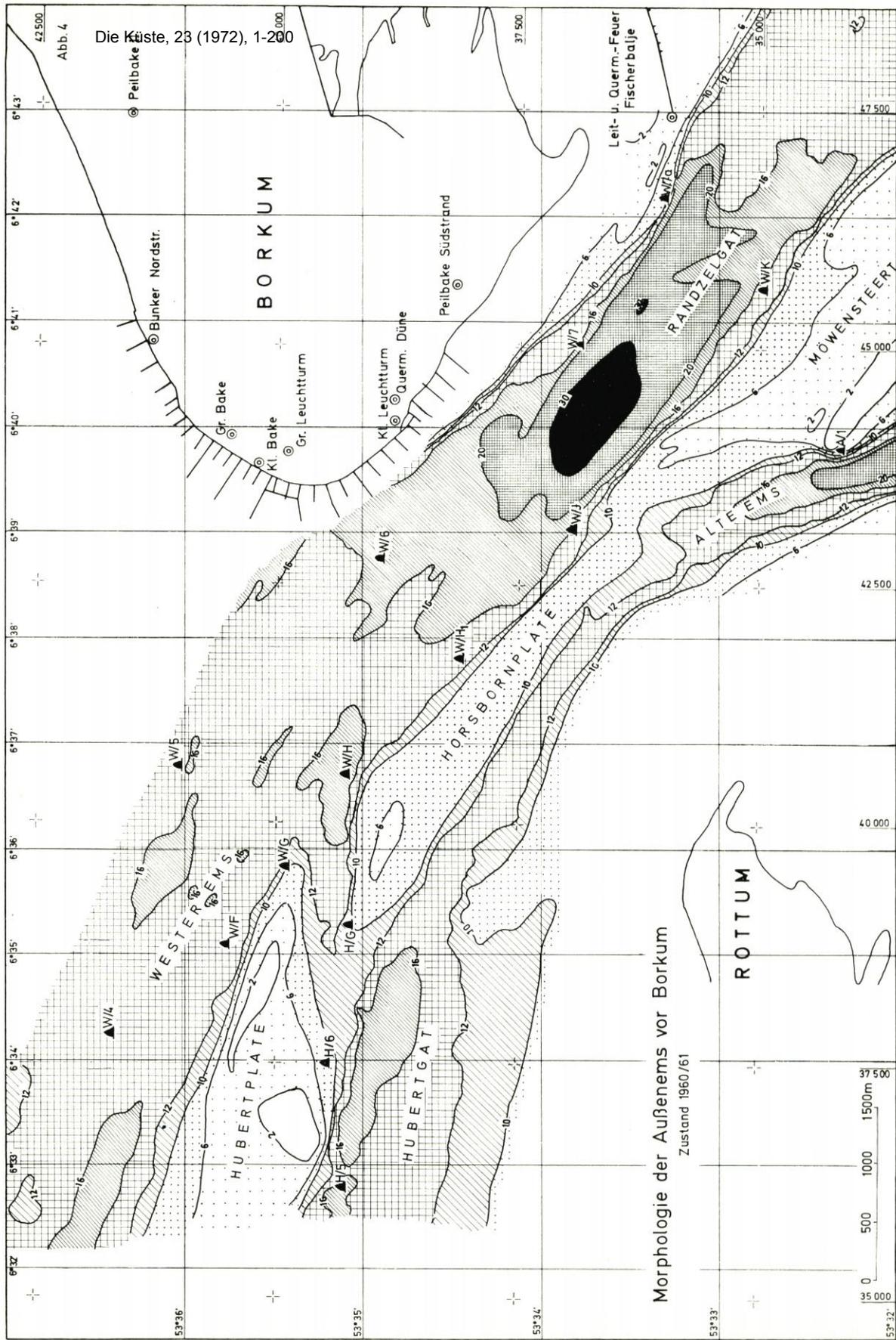
Der südöstliche Teil der Horsborn-Plate wurde ständig abgebaut, die einstige Rückenfläche, die bis zum Möwensteert reichte, verschwand allmählich. An ihrer Stelle entstand eine bis etwa 13 m unter SKN reichende breite Rinne, die Hubertfahrt, die jetzt das Hubertgat und die Wester-Ems verbindet (Abb.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

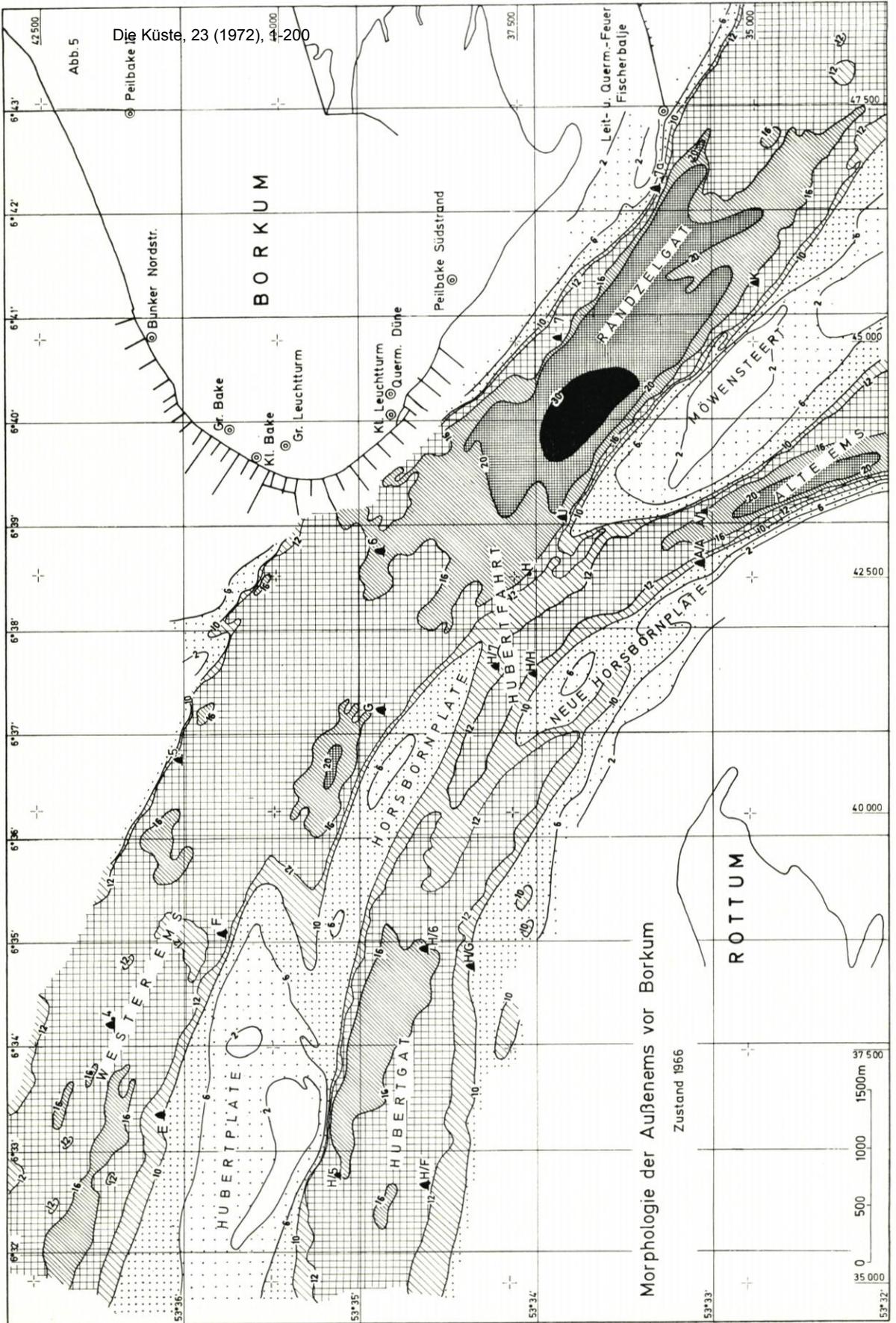
An der Nordostseite der Plate wird die Wester-Ems bis auf mehr als 20 m SKN ausgekolkt (Abb. 6, 7, 8). Als Folge der Verlagerung der Horsborn-Plate wird der bis dahin in der Verbindungsrinne abfließende Ebbstrom abgelenkt und prallt auf dem Ostteil der Hubert-Plate, woraus der Abbau dieses Teiles der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

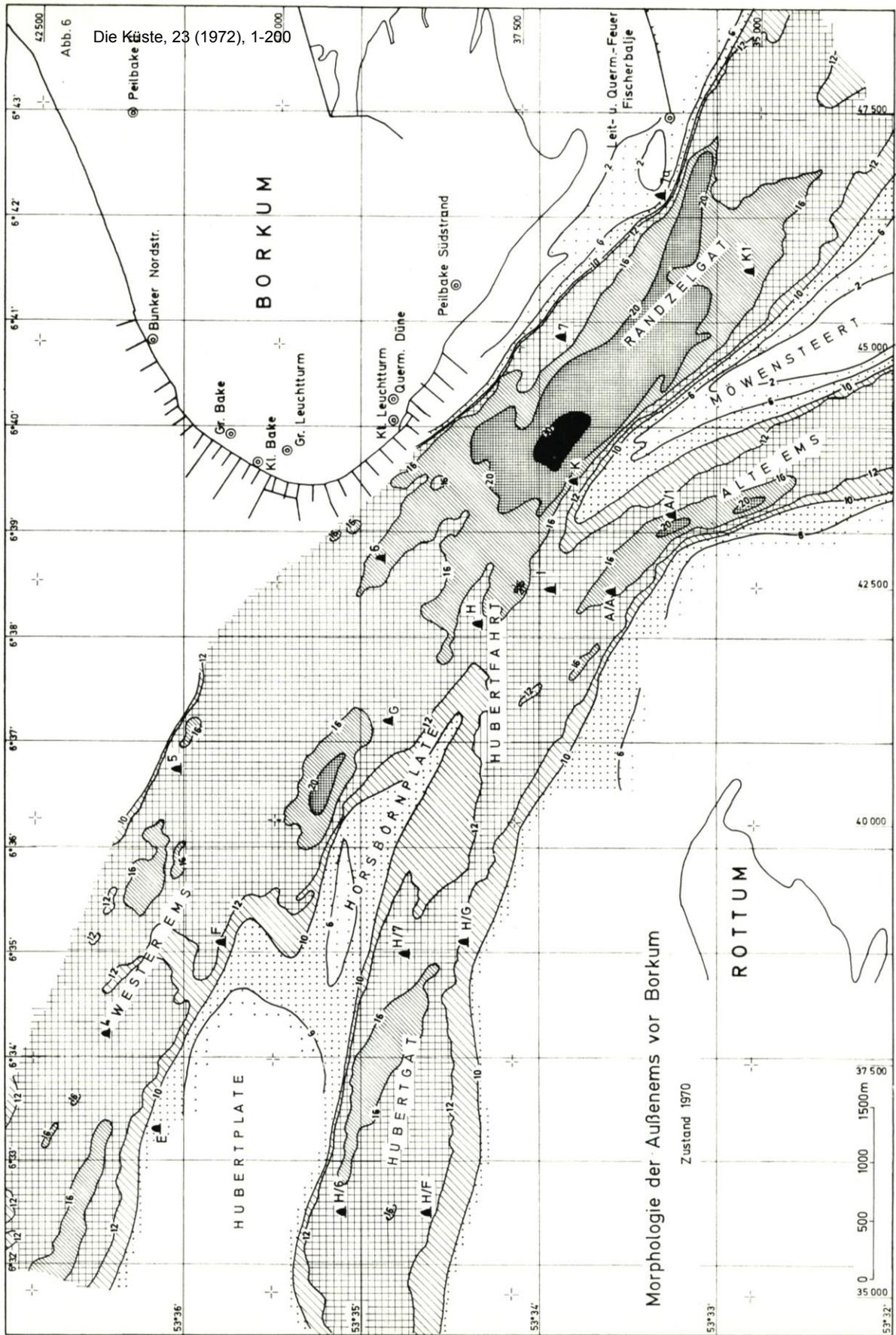
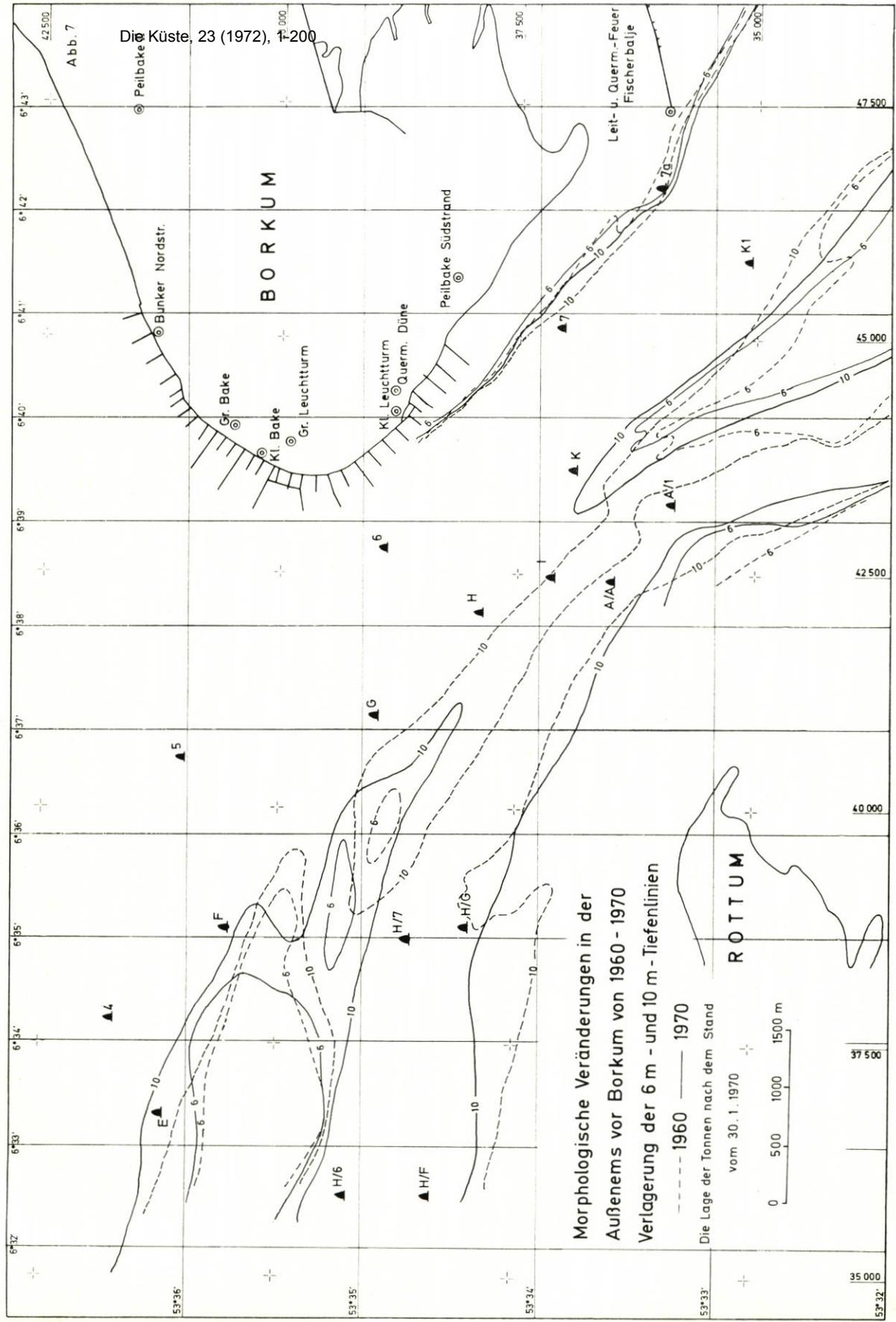


Abb. 6

Abb. 7



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

--- 1960 — 1970
 Die Lage der Tonnen nach dem Stand
 vom 30.1.1970

0 500 1000 1500 m

Abb. 7

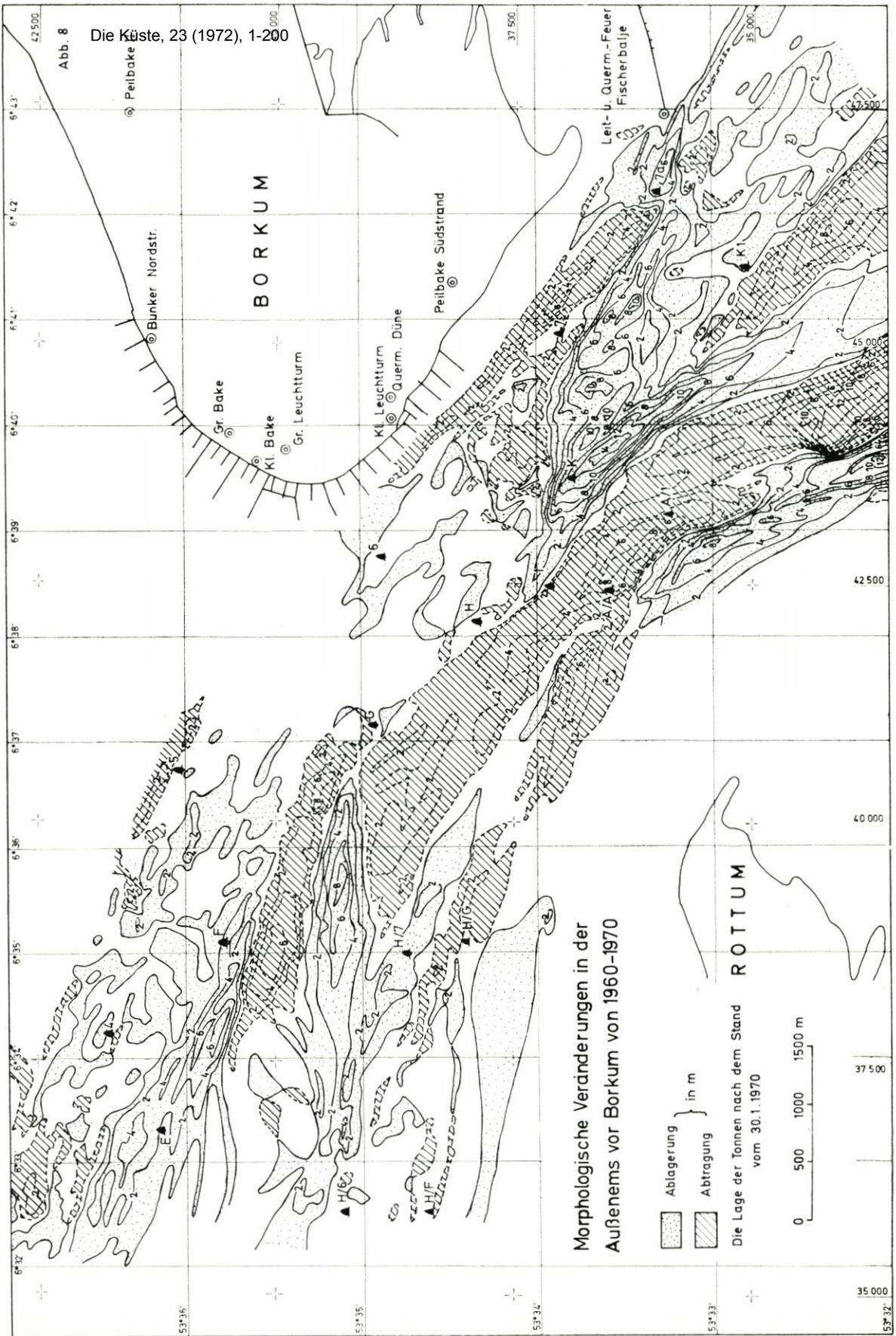


Abb. 8

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

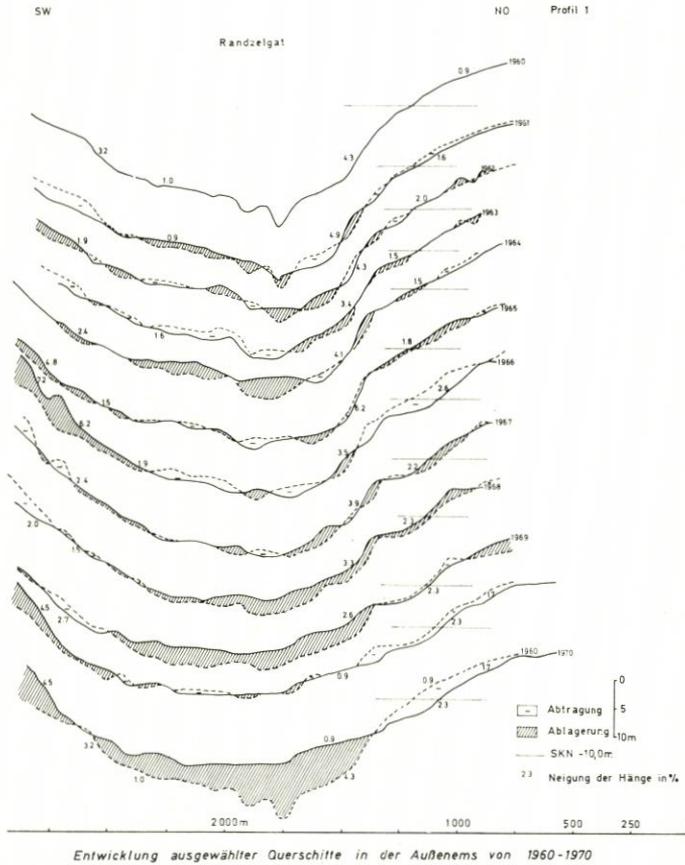


Abb. 9

Möwensteerts. Ihre Westteile haben ebenfalls in größerem Maße Auffüllungen erfahren (Abb. 7, 6). Die die westliche Begrenzung bildenden Wattgebiete wachsen 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-

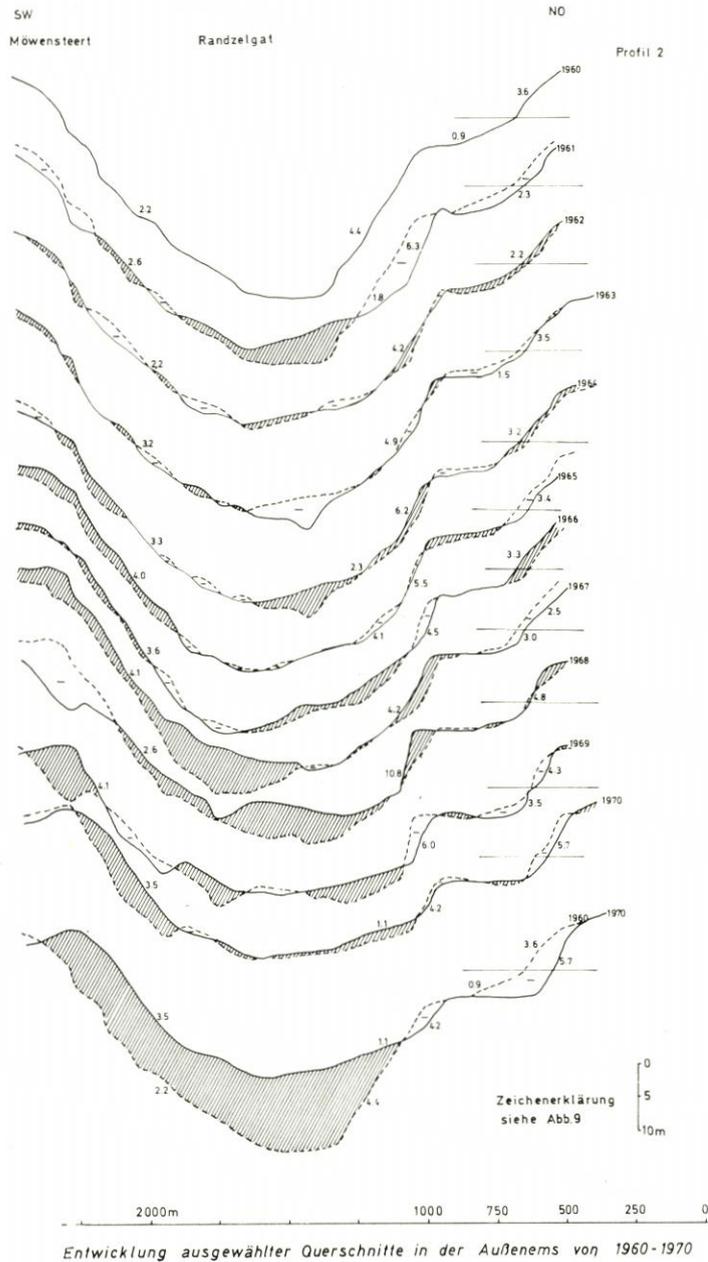


Abb. 10

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-

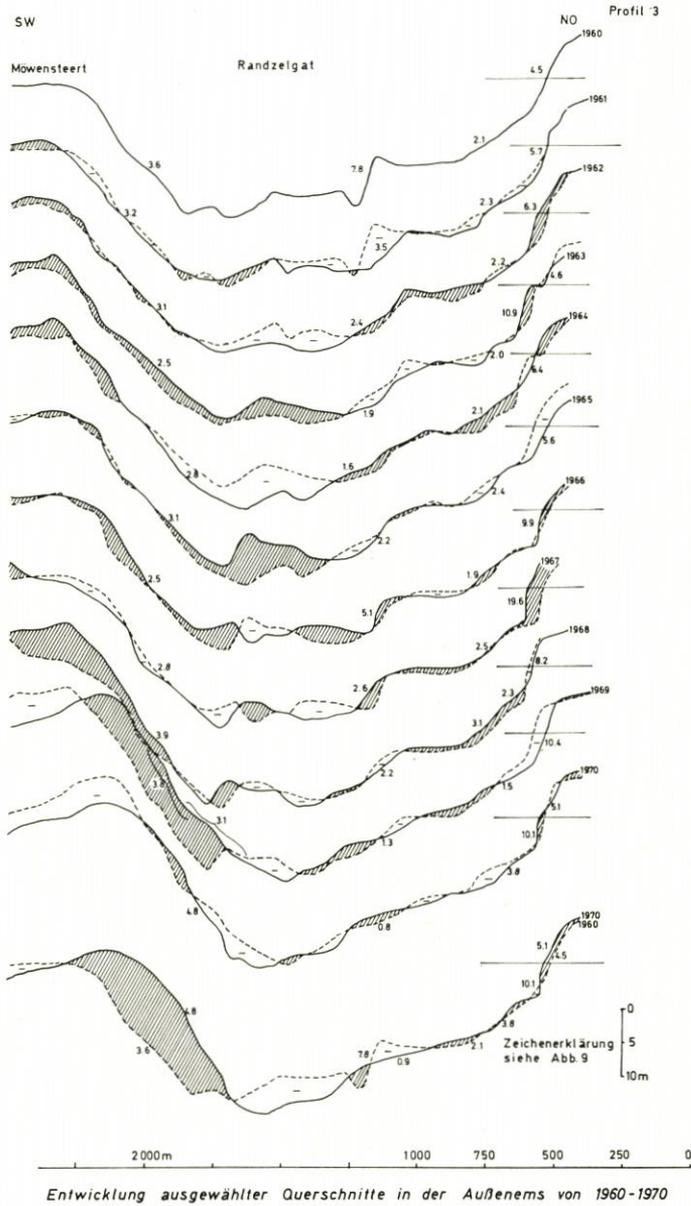


Abb. 11

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

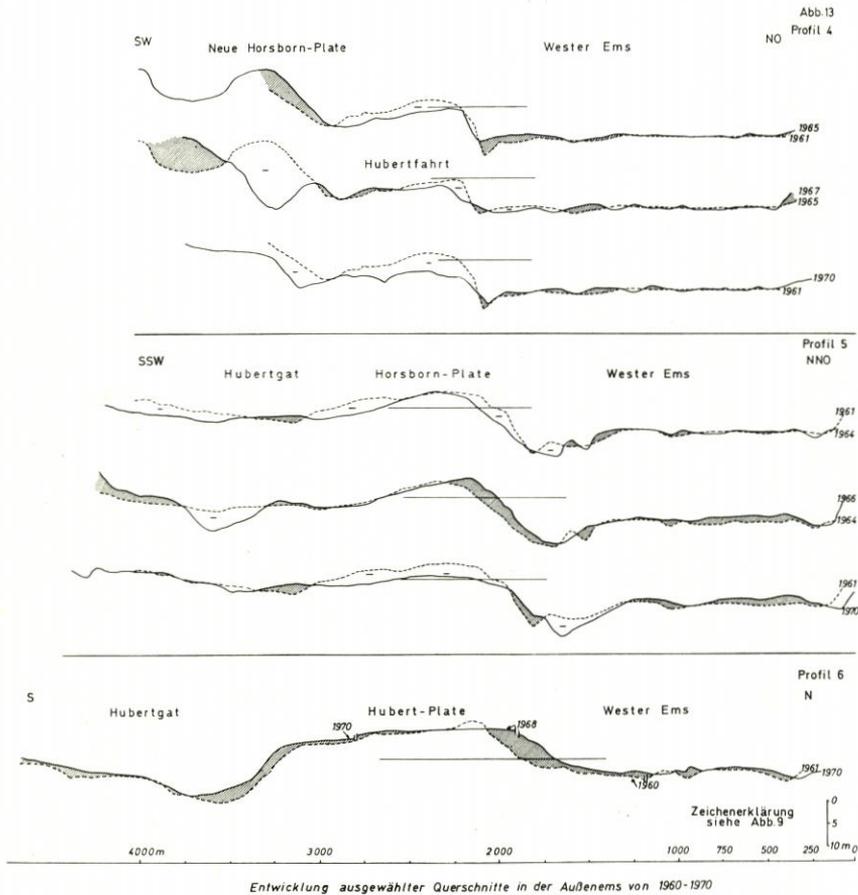


Abb. 13

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.

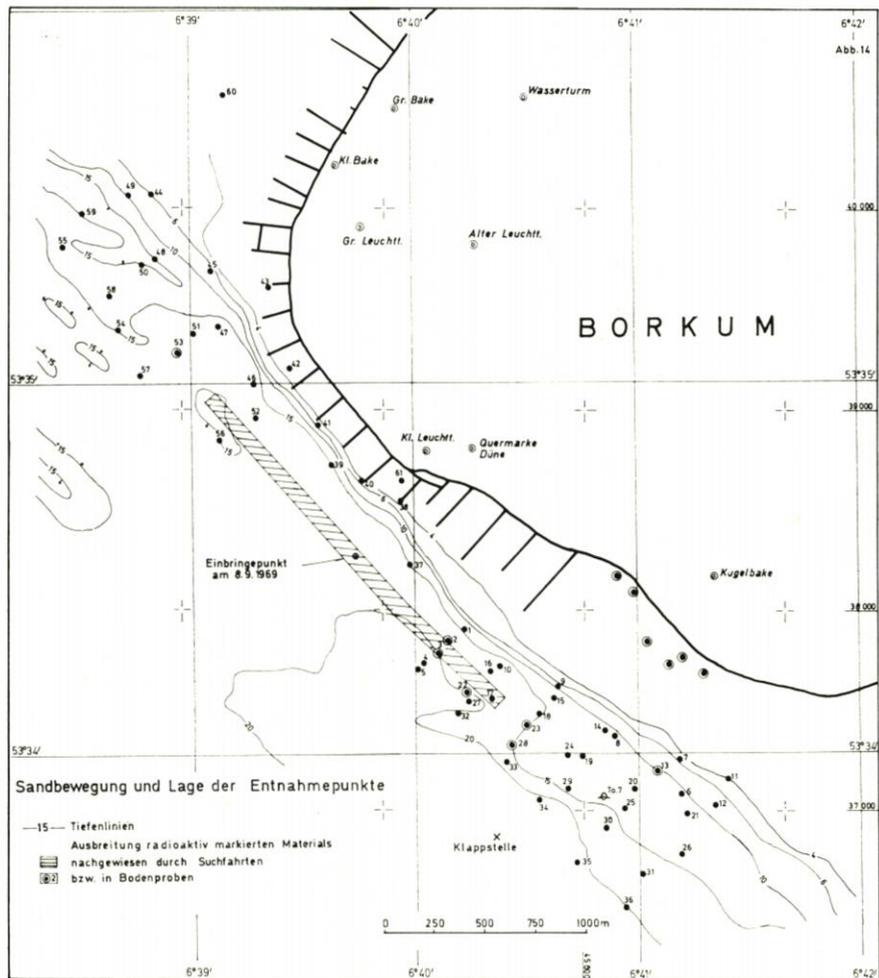


Abb. 14

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).

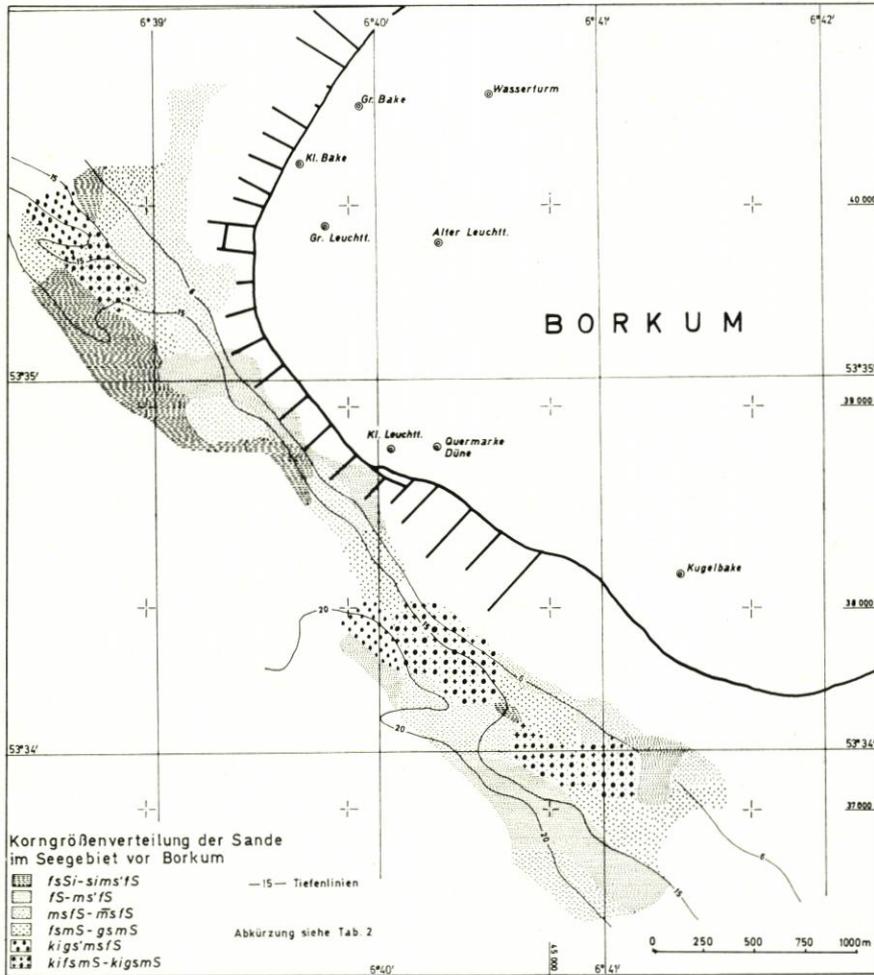


Abb. 15

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.

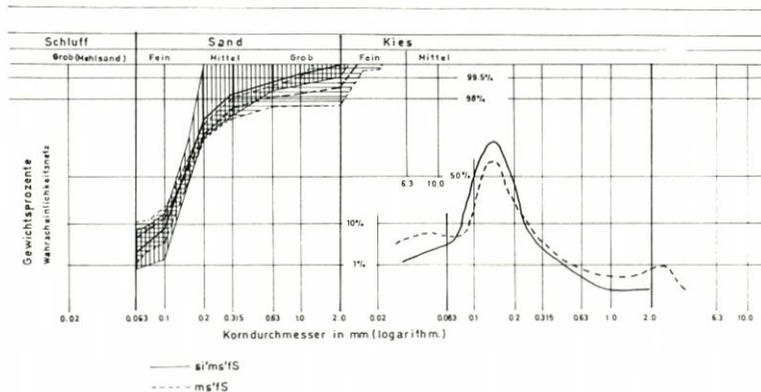


Abb. 16. Sammeldiagramm von Kornsummenkurven mit abgeleiteten Häufigkeitskurven

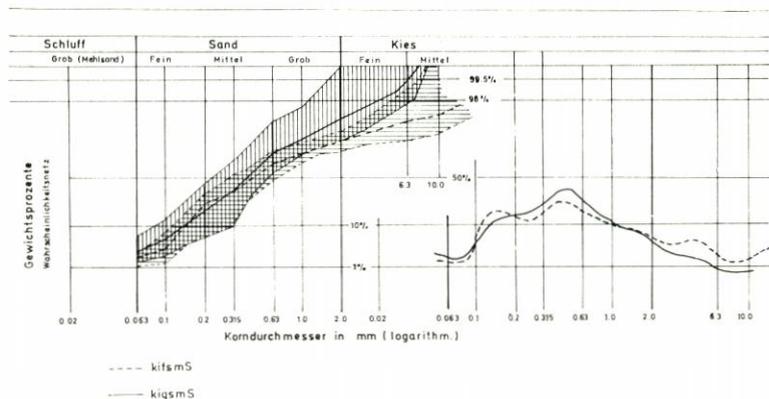


Abb. 17. Sammeldiagramm von Kornsummenkurven mit abgeleiteten Häufigkeitskurven

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.

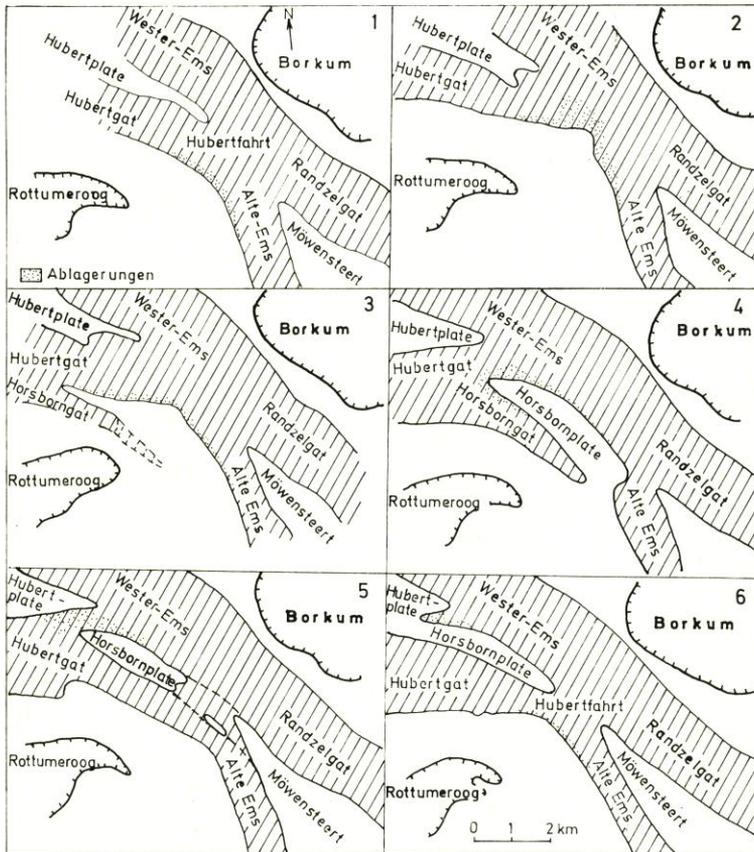


Abb. 18. Schematische Darstellung der Entwicklung einer Plate in der Außenems zwischen Borkum und Rottum

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 Emders 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.

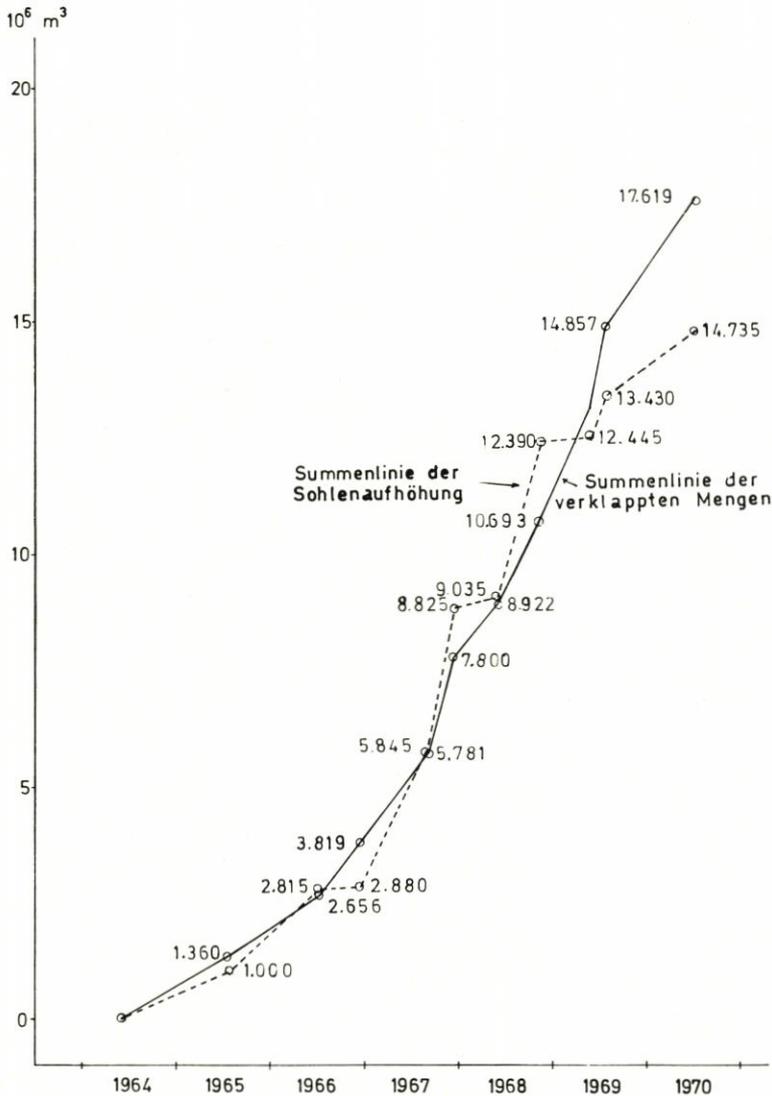


Abb. 19. Menge des verklappten Baggergutes und der Volumenänderung der Sohle unterhalb 15 m Tiefe bei Tonne 7

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

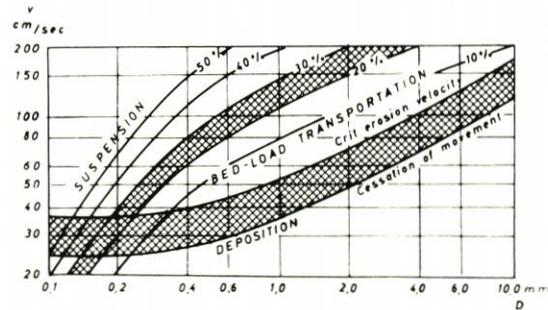


Abb. 20.
Grenzgeschwindigkeit des Geschiebe-
transportes in 1 m Höhe über dem Boden
und das Verhältnis Suspension zu Geschiebe
bzw. Ablagerung in Prozenten ausgedrückt
(n. SUNDBORG 46)

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

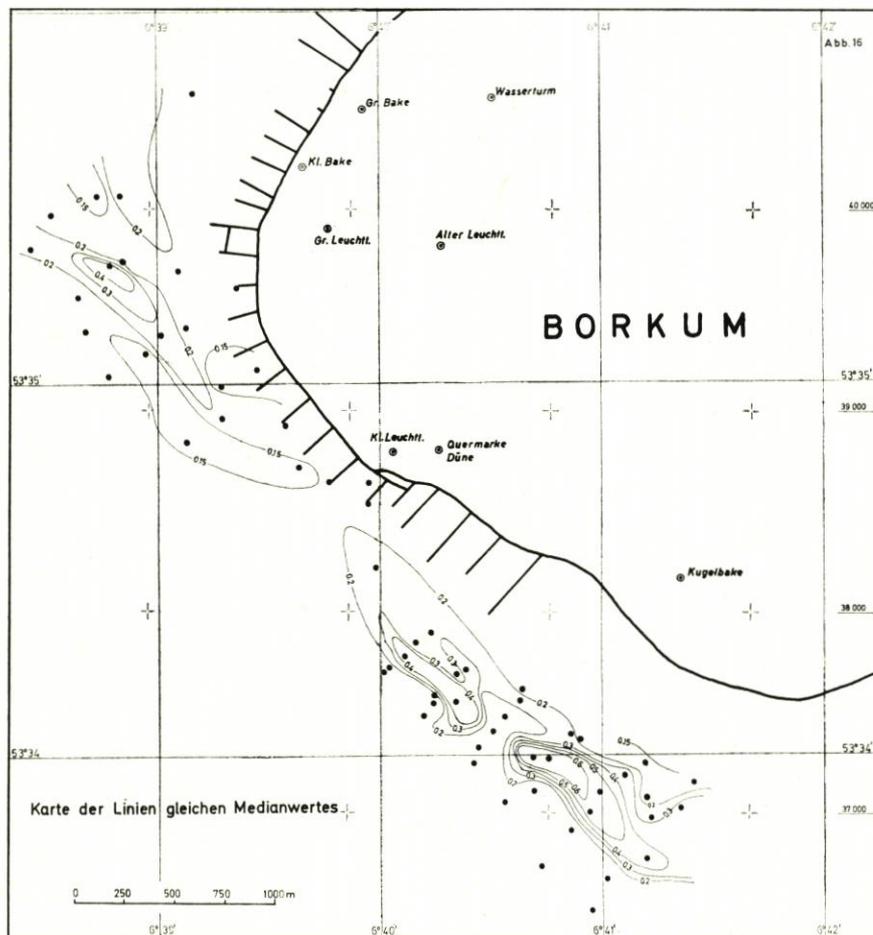


Abb. 21

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 Brandungströmungen 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

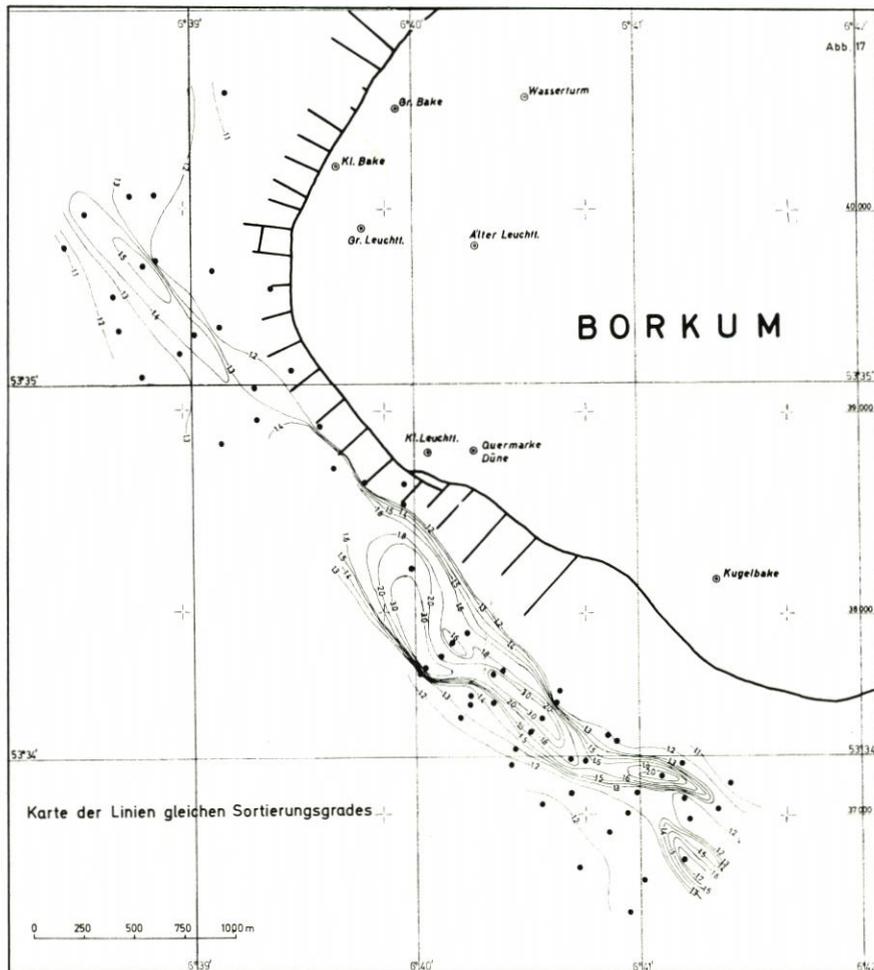


Abb. 22

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 Buhnen 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.

Die Sichelbuhne

Theorie und bisherige Erfahrung einer neuen Bühnenform

Von Claus Magens

Summary

The author developed a special groyne in the shape of a sickle, which is suitable to prevent harbour mouths enclosed by jetties to be silted up.

The sickle-shaped groyne is composed of one part vertical and another part parallel to the coastline connected together by a flat arc. The former vertical one works like a groyne, the other parallel one like a breakwater.

The functional planning using diffraction- and refraction diagrams is shortly explained.

A modeltest carried out in a wide lagoon at the shore of the isle of Fehmarn is shown.

The experiences with a practical example at the naval base Olpenitz on the Baltic are described.

Another more recent application is represented and it is pointed to the fact that the sickle-shaped groyne at the end of a physiographic unit also is suitable to cause an enlargement of the beach.

Einleitung

Wo vom Ufer in die See bis in Wassertiefen, die auch bei Niedrigwasserständen noch für die Schifffahrt ausreichende Fahrwassertiefen sicherstellen sollen, hinausgeführte Hafentiefen, die Brandungs- und Riffzone in ganzer Breite unterbrechen, ist regelmäßig an der Seite, aus der der größte Sandtransport mit der Brandung erfolgt, mit einer starken Ansandung zu rechnen. Diese wird sich immer weiter nach See zu verlagern und schließlich dazu führen, daß die Hafeneinfahrt versandet.

Um diesem Umstand abzuweichen, wurde in jüngerer Zeit eine besondere Bühnenform vom Verfasser entwickelt, die wegen ihrer Form als Sichelbuhne bezeichnet wird. Die theoretischen Überlegungen, Modellversuche sowie praktische Erfahrungen werden im folgenden beschrieben.

Die Theorie der Sichelbuhne

Die Sichelbuhne stellt ein Bauwerk dar, das in Ufernähe wie eine Buhne senkrecht zur Küste gerichtet ist, in einer gewissen Entfernung jedoch in leichtem Bogen in eine nahezu küstenparallele Lage herumgeführt wird. Sie wirkt damit sowohl als Buhne als auch als Wellenbrecher.

Hinter einem freistehenden Wellenbrecher wird von einer bestimmten Strandstrecke, die abhängig von der Länge und Uferentfernung des Wellenbrechers ist, die Brandung in ihrer ursprünglichen Stärke ferngehalten. Im Schutze desselben lagert sich infolgedessen Sand ab. Mit der Wahl der Länge und Entfernung des Wellenbrechers kann die Ablagerungsmenge in seinem Schutze bis zu einem gewissen Grade vorweg bestimmt werden, d. h. es können sowohl Strandverbreiterungen als auch Sandablagerungen bis zum Wellenbrecher hin über MW (=Mittelwasser) künstlich angestrebt werden.

Im ersteren Falle und im letzteren anfänglich bleibt indessen dem von der Brandung hervorgerufenen strandnahen Wasserstau die Möglichkeit, in Sandtransportrichtung abzufließen.

Der Abschluß des Wellenbrecherschutzraumes auf der Leeseite durch eine Buhne vom Strand zum Wellenbrecher nimmt diese Möglichkeit, und so wird der Wasserstau unmittelbar hinter dem Wellenbrecherschenkel der Sichelbuhne in Form einer strandparallel erzwungenen Rippströmung der Brandungsströmung entgegengesetzt abfließen und verhindern, daß auch der äußerste Kopf der Sichelbuhne sich mit Sand füllt und der Sandtransport schließlich über die Sichelbuhne hinaus weiter fortgesetzt wird.

Die Länge und Form des uferparallelen Schenkels der Sichelbuhne wird in der Weise festgelegt, daß zunächst die Ausbreitung (Diffraktion) der anlaufenden Wellen hinter einem Wellenbrecher konstruiert wird. Diese Konstruktion der Wellenkämme und deren Orthogonalen

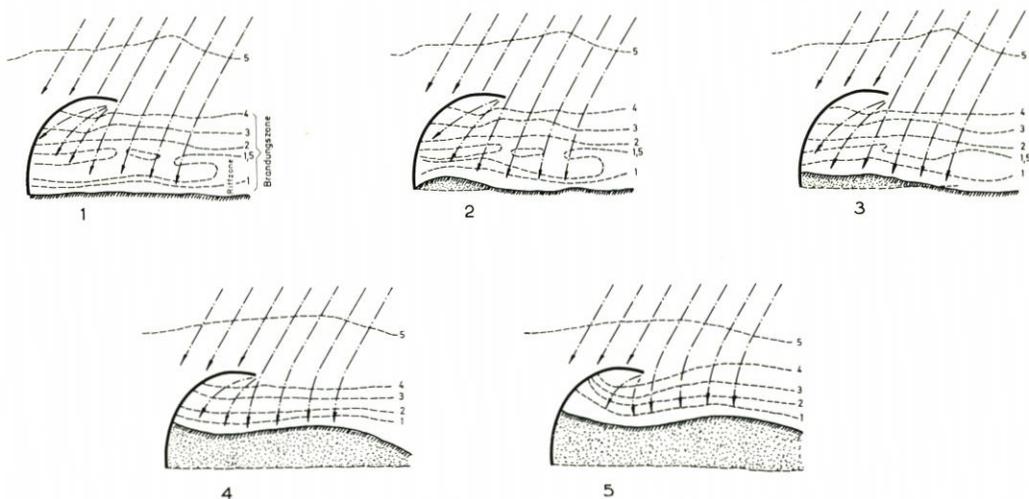


Abb. 1. Stadien der Entwicklung der Aufsandung im Bereich einer Sichelbuhne bei einseitiger Brandung nach der Theorie

wird ergänzt durch die weitere Konstruktion der Beugung (Refraktion) der Wellen über dem geneigten Unterwasserstrand. Aus der Größe der hinter dem Wellenbrecher stark reduzierten Wellenhöhen einerseits und der konstruierten Wellenfortschrittsrichtung andererseits kann nunmehr unter Ansatz der Unterwasserstrandneigung die Größe der im Schutz des Wellenbrechers verbleibenden Brandungsströmung nach PUTNAM, MUNK und TRAYLOR mit einiger Annäherung berechnet werden. Die Länge des als Wellenbrecher funktionierenden uferparallelen Schenkels der Sichelbuhne ergibt sich dann dadurch, daß das vorgenannte Diffraktions-Refraktions-Diagramm so lange verschoben wird, bis sich an der Wurzel des buhnenartigen, zur Küste quer verlaufenden Schenkels die Brandungsströmung zu einem Wert ergibt, unter dem nach den Kurven von HJULSTRÖM bei den vorhandenen Korngrößen des Sandes kein Transport und keine Erosion mehr erfolgt.

Dieser Untersuchung wird die kennzeichnende Welle des häufigsten starken Seegangs zugrunde gelegt.

(Da Wellenmessungen an Ort und Stelle nicht vorlagen, wurde als kennzeichnende Welle die sich aus der Formel von DARBYSHIRE ergebende Welle für eine Windstärke von 6 Bft und eine Windanlaufbahn [Fetch] von 50 km als kennzeichnende benutzt.)

Wellen kleinerer Dimensionen gestalten zwar die morphologische Entwicklung des Strandes unregelmäßig, jedoch nicht ungünstiger. Wellen größerer Dimension sind meist verbunden mit höheren Wasserständen und wirken somit ähnlich wie die kennzeichnenden, nur in einer höheren Ebene.

Wesentlich ist, daß der uferparallele Schenkel, der als Wellenbrecher dient, außerhalb der Brecherzone angelegt wird, damit nicht außerhalb des Bauwerks noch nennenswerte Brandungsströmungen und Sandtransport stattfinden.

Notwendig erscheint auch, daß dieser Schenkel nicht zu lang gebaut wird, damit nicht im innersten Teil hinter der Sichelbuhne eine Zone verbleibt, in die kein Sand mehr hineingelangt, denn dort würden sich nur schwimmende Teile wie Treibholz, Abfall, Seegrasreste u. ä. ansammeln und zu Geruchsbelästigungen führen.

Nach Einstellung der neuen Tiefenlinien hinter der Sichelbuhne in Richtung der dort gebeugten Käme der gedämpften Brandungswellen wird schließlich ein Beharrungszustand herbeigeführt, der infolge des Verlaufs der Tiefenlinien weiteren Sandtransport in den geschützten Raum hinein auf ein Mindestmaß herabsenkt. Die Ablagerungen werden dadurch schon vorher an der Küste erzwungen, die luvseitig liegt. Die verschiedenen Stadien der Entwicklung bei einseitiger Brandung sind nach der Theorie in Einzelskizzen auf Abbildung 1 dargestellt.

Der Modellversuch

Im Rahmen der Voruntersuchungen für eine Landverkehrsverbindung der Insel Fehmarn mit dem Festland, dem Bau eines Fährhafens im Norden dieser Insel („Vogelfluglinie“) einerseits und zur Beantwortung grundsätzlicher Küstenschutzfragen in diesem Raum andererseits wurde in einem Strandsee im Norden der Insel ein Modellversuch einer solchen Sichelbuhne durchgeführt. Da dort in der flachen Landschaft, in unmittelbarer Nähe der Ostsee der Wind freien Zutritt hatte, der Wasserstand in den Sommermonaten nahezu konstant blieb und die für die Versuche gewählte Uferstrecke aus Sand bestand, an dem ein natürlicher Transport wie am Meeresufer einerseits durch die natürliche Ausbildung eines Hakens, andererseits durch Anlage von Bühnen und Wellenbrechern vorher festgestellt werden konnte, waren die natürlichen Voraussetzungen für derartige Modellversuche gegeben.

Dieser Versuch mit einer Sichelbuhne ist im einzelnen in den unter 5 und 6 im Schriftumsverzeichnis angeführten Aufsätzen beschrieben worden.

Am Ende einer physiographischen Einheit am Ufer des Strandsees wurde den theoretischen Überlegungen entsprechend auch angepaßt an die Maßstabsverhältnisse des Sees, eine Sichelbuhne aus Strandgeröll, zugeschnitten auf den SW-Wind, der die größte Anlaufbahn über Wasser hatte, über die ganze Brandungszone hinaus angelegt. Die fotografischen Aufnahmen der Abbildung 2a bis f zeigen die zeitliche Entwicklung der Sandablagerungen und den Endzustand, der sich über etwa einen Monat – solange der Wasserstand noch einigermaßen konstant blieb – unverändert erhalten hat.

Praktische Erfahrungen vor Olpenitz

Erstmalig beim Bau des Marinehafens Olpenitz an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste konnte der Gedanke der Sichelbuhne in die Tat umgesetzt werden, um die Versandung der Hafeneinfahrt zu verhindern.



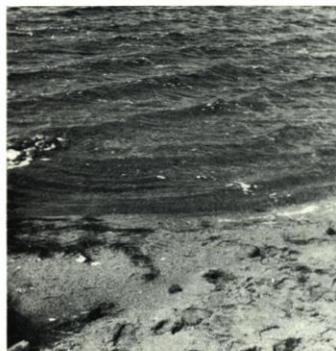
a. Nach Anlage am 10. 7. 1953.
(Aufn. MAGENS)



b. Nach Anlage am 10. 7. 1953.
(Aufn. MAGENS)



c. Erste Anlandung am 15. 7. 1953 (Aufn. MAGENS)



d. Wie c., die Steine rechts im Bild
deuten die ursprüngliche Strand-
linie an. (Aufn. MAGENS)

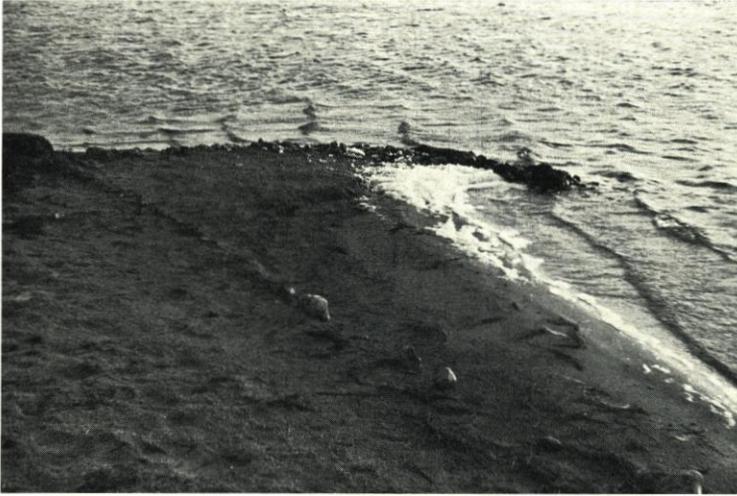


e. Beugung der Wellen am Bühnenkopf (16. 7. 1953).
(Aufn. MAGENS)



Abb. 2 (a-f). Modellversuch mit Sichelbuhne im Strandsee a. Fehmarn

Südlich der Schleimündung wurde in einem durch die Nehrung geschützten natürlichen flachen Becken dieser Hafen angelegt und durch einen Damm gegen die Schlei abgetrennt. Der Hafen erhielt mittels eines weiteren Durchstichs durch die Nehrung seine eigene Zu- bzw. Ausfahrt zur See. Während in der Mündung der Schlei die Ein- und Ausstrombewegungen des



f. Endzustand am 10. 9. 1953. (Aufn. Seifert)

Wassers von beträchtlicher Menge und Geschwindigkeit – hervorgerufen durch die wechselnden Wasserstände der Ostsee und die große Flächenausdehnung der Schlei – die Fahrrinne in ausreichender Tiefe offenhalten, war dies für die Zufahrt zum Hafenbecken nicht gewährleistet. Die Hafeneinfahrt wurde deshalb beiderseits von Molen eingefasst, die bis zu einer Wassertiefe in See hinausgeführt wurden, die der geplanten Wassertiefe im Hafen gleicht (vgl. Abb. 3).

Die Nehrung vor der Schlei ist im Laufe der Zeiten von Süden nach Norden vorgewachsen. Auch andere Untersuchungen der vor der Küste festgestellten, durch die Brandung hervorgerufenen Sandverfrachtung weisen darauf hin, daß auch gegenwärtig noch ein überwiegend von Süd nach Nord gerichteter Sandtransport stattfindet.

Um zu verhindern, daß sich der Sand mit der Zeit so weit an der Südmole des Hafens sammelt, bis eine Versandung der Hafeneinfahrt eintritt, wurde ausgehend von der Südmole ein küstenparalleler Steindamm entworfen, dessen Länge und Entfernung von der Strandlinie nach der vorher geschilderten Theorie bestimmt wurde. Die Verbindung der Südmole mit diesem Wellenbrecher stellt eine Sichelbuhne dar, der lediglich – aus wirtschaftlichen Gründen – der vorher erwähnte Bogen fehlt.

Dieser Bau der Sichelbuhne wurde seinerzeit von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, unter deren Regie er ausgeführt wurde, als ein Modellversuch im natürlichen Maßstab einer funktionell neuartigen Anlage betrachtet und ihre Funktion durch laufende Beobachtung nachgeprüft.

Mit dem Bau wurde im Herbst 1961 begonnen. In annähernd regelmäßigen, jährlichen Abständen wurden von Juli 1961 an Lotungen durchgeführt, um die Veränderungen der Morphologie des Strandes und der Brandungszone im Bereich der Sichelbuhne zu verfolgen. Diese trat etwa nach einem Jahr Bauzeit in volle Funktion, so daß sie bis heute insgesamt fast 10 Jahre gewirkt hat.

Gegen Ende September 1960 war der Landanschluß der Südmole so weit vollendet, daß sie den natürlichen Sandtransport nach Norden vollständig unterband. Es bildeten sich nunmehr Ablagerungen an der Südflanke der Mole (Abb. 4). Dieser Bau-Zustand dauerte etwa ein Jahr bis zum Beginn des Baues der Sichelbuhne und in gewissem Sinne auch weiter, bis dieser Bau vollendet war.

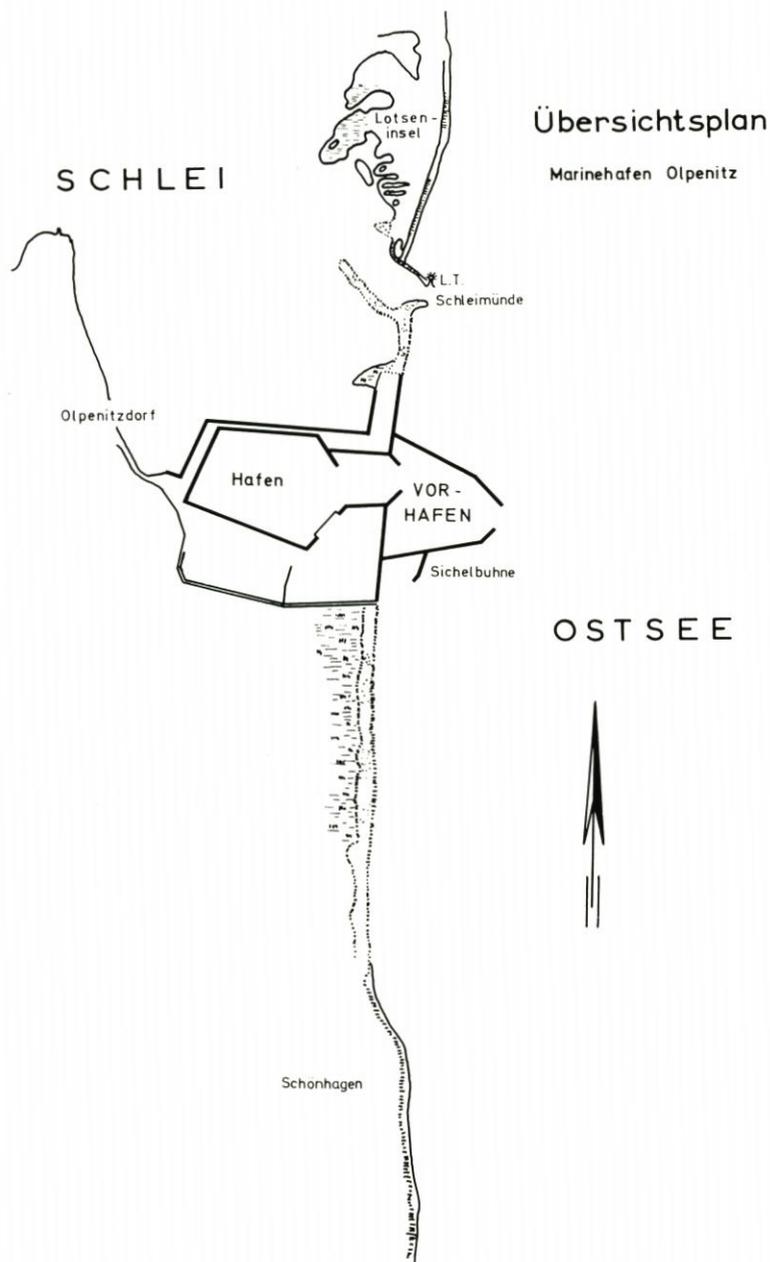


Abb. 3

In dieser Zeit wurde der Boden etwa bis zum Knick der Südmole, dort um 0,1 bis 0,5 m und weiter landwärts bis zu 2,8 m, aufgehöhht.

Nach Vollendung des küstenparallelen Schenkels jedoch kehrte sich die Entwicklung um. Hinter der Sichelbühne begann sich der Sand so umzulagern, daß aus der dreieckförmigen An-sandung im Molenwinkel eine breitere Strandform entstand, die der ursprünglichen Strandlinie

SICHELBUHNE OLPENITZ (Schlei)

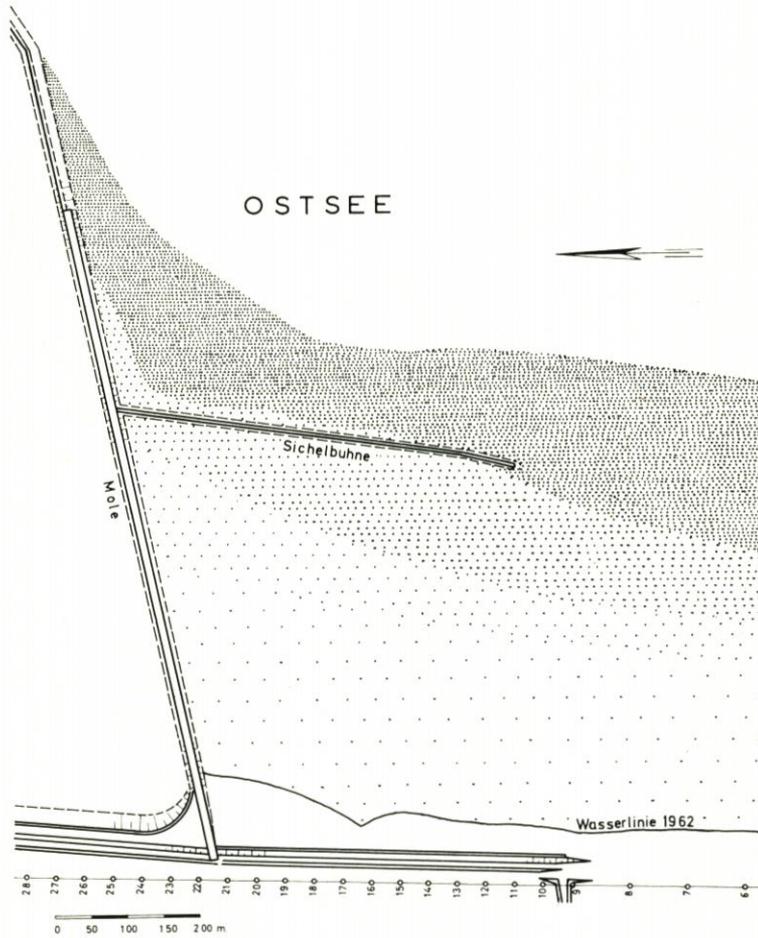


Abb. 4. Ansandung an der Südmole vor dem Bau bzw. Vollendung der Sichelbuhne

in einem flacheren Winkel nahezu folgte. Die außerhalb der Buhne vorher abgelagerten Sandmassen verschwanden im Laufe von acht Jahren vollständig.

Verzögert wurde die erwartete Strandentwicklung dadurch, daß die dem Entwurf zugrunde gelegte, als bisher überwiegend festgestellte Windrichtung aus SO (17 v. H. gegenüber 4 v. H. aus O und 10 v. H. aus NO) vom Zeitpunkt der Vollendung der Sichelbuhne an nicht mehr überwiegend war. Die Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der prozentualen Verteilung der Windrichtungen aus dem östlichen Sektor. Danach begann sich erst im Jahre 1965 das ursprüngliche Verhältnis zwischen NO- und SO-Wind wieder einzustellen, wenn auch zunächst nur mit sehr geringen Häufigkeiten aller Ostwinde überhaupt. Erst 1968 ist die anfängliche, dem Entwurf zugrunde gelegte und über mehrere Jahrzehnte festgestellte Häufigkeitsverteilung wieder annähernd erreicht.

Die Folge davon war, daß der Sandtransport von S nach N anfänglich nicht in dem er-

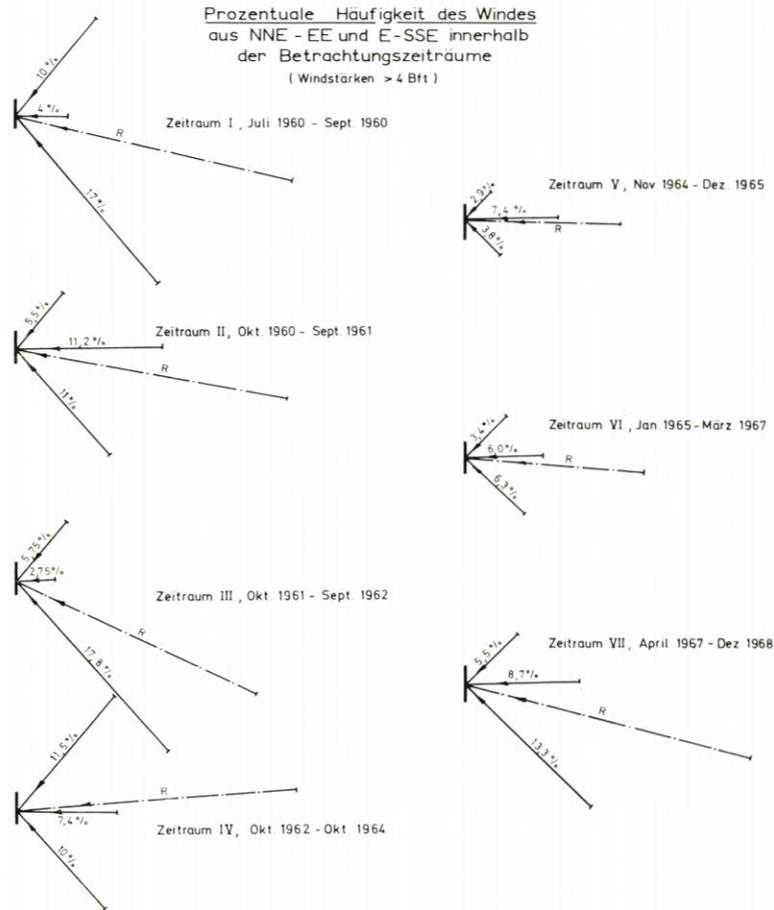


Abb. 5. Entwicklung der prozentualen Verteilung der Windrichtungen aus dem östlichen Sektor

warteten Ausmaß stattfand. Es wurde sogar bis zum Jahre 1966 südlich der Sichelbuhne eine geringe Lee-Erosion an der Küste festgestellt.

Die jährlichen Lotungen und Vermessungen sind regelmäßig in Tiefenkarten aufgetragen und diese mit Hilfe von Tiefenveränderungskarten miteinander verglichen worden. Aus verständlichen Gründen mußte auf die Veröffentlichung dieser Pläne verzichtet werden.

Als wesentliche Ergebnisse der Lotungen ist jedoch mit Bezug auf die Funktion der Sichelbuhne folgendes festzustellen:

Zunächst wurde zu einer Zeit, da die südliche Hafentmole an das Land angeschlossen, der Bau der Sichelbuhne (besser ihr küstenparalleler Schenkel) noch nicht begonnen war, bei vorherrschenden SO-Winden (Zeitraum II - vgl. Abb. 5) eine starke Sandanreicherung - wie oben bereits erwähnt - im Süden der Hafentmole festgestellt.

Die Lotung 1963 (innerhalb des Zeitraumes IV) zeigte, ebenso wie der vorangegangene von 1962 - kurz vor Vollendung der Sichelbuhne - sehr unruhige Tiefenlinien. Während sich indessen - nunmehr nach einjähriger Funktion der vollendeten Sichelbuhne - die Tiefenlinien innerhalb des Bühnenfeldes ebenso wie die Strandlinie seewärts verlagert haben, rücken sie außerhalb des Bühnenfeldes sowohl in Strandnähe als auch in Strandferne auf die Küste zu. Ver-

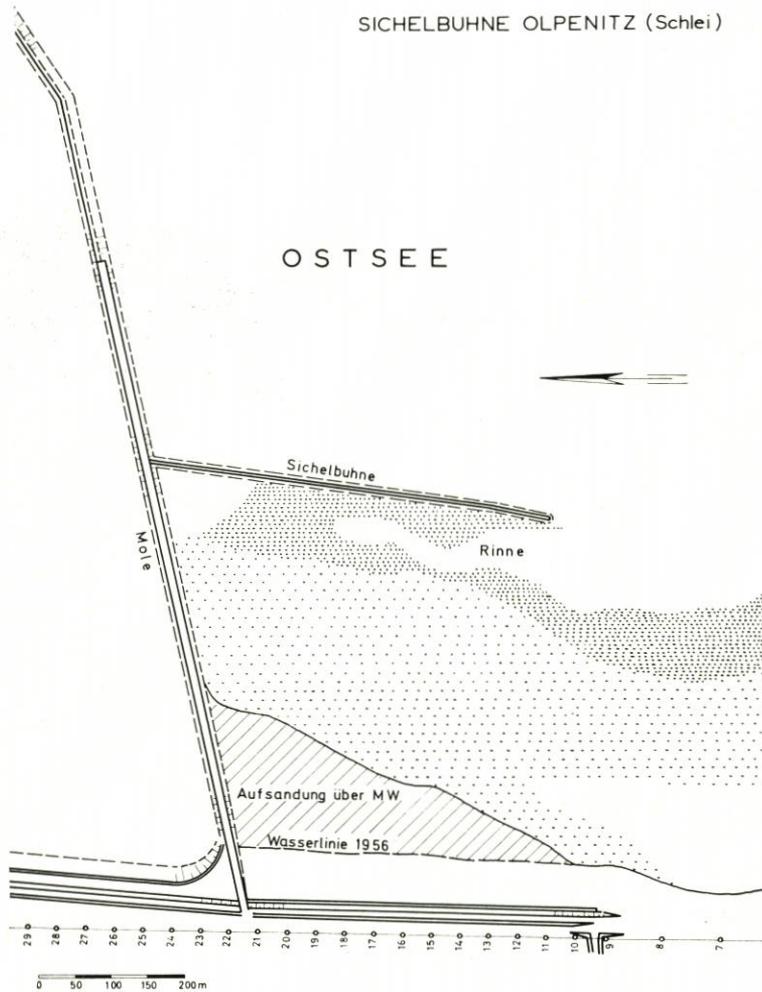


Abb. 6. Aufsandung 8 Jahre nach Vollendung der Sichelbuhne

gegenwärtigt man sich die Tatsache, daß während dieses Zeitraumes die Winde aus dem nord-östlichen Sektor überwiegen, so ergibt sich zwangslos die Erklärung für diese Erscheinung. Die Aufsandungen sind in diesem Zeitraum also im wesentlichen auf den Bereich des Buhnenfeldes beschränkt.

Im Lotungsergebnis von 1964 zeigte sich deutlich eine gewisse „Ordnung“ der Tiefenlinien innerhalb des Buhnenfeldes. Die Strandlinie ist nun erheblich nach See zu verlagert und der Unterwasserstrand unmittelbar davor stark und gleichmäßig ausgeflacht. Deutlich zeichnete sich jetzt auch eine Rinne ab, die dicht hinter dem strandparallelen Buhnenschenkel mit 3,5 bis 4,0 m Tiefe (der ursprünglichen) erhalten blieb.

Die Lotung von 1968 zeigte schließlich, daß außerhalb des Buhnenfeldes die Tiefenlinien wieder die Lage erreicht haben, wie sie vor dem Hafenumbau bestand. Die Lee-Erosion an der Küste im Süden ist wieder voll ausgeglichen, die Rinne von 4,0 m Tiefe hinter der Sichelbuhne hat sich gehalten, während im übrigen sowohl im Innern des Buhnenfeldes als auch süd-

lich in Strandnähe weitere flächenartige Aufsandungen erfolgten. Dabei hat sich die Aufsandung am Rande der obenerwähnten Rinne mit steilerer Böschung eingestellt (vgl. Skizze Abb. 6).

Die wesentlichste Erfahrung aus diesem Versuch in der Praxis ist die, daß sich der Sand, der von Süd nach Nord antransportiert wurde, bisher ausschließlich im Bereich der Sichelbuhne gesammelt und die Rinne hinter der Buhne – wie bei den theoretischen Überlegungen gefolgert

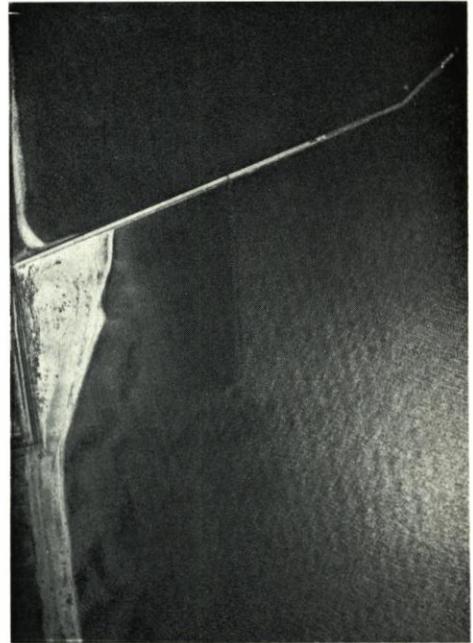


Abb. 7.
Luftaufnahme vom 24. 8. 1970. (Die Aufnahme wurde von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel im Einvernehmen mit der Mar. Div. Kiel zur Verfügung gestellt)

wurde – sich im Verlauf von nahezu 8 Jahren in ursprünglicher Wassertiefe gehalten hat. Letzteres dürfte der Beweis dafür sein, daß das mit den auf den Strand auflaufenden Wellen mitgeführte Wasser, das normalerweise als Unterströmung oder Rippströmung vom Strand wieder abfließt, hier hinter dem strandparallelen Schenkel der Sichelbuhne in einer Rinne abläuft, die der Brandungsströmung entgegengesetzt ist und die vollständige Aufsandung des Bühnenfeldes verhindert.

Ein anschauliches Bild von der Situation liefert eine photographische Luftaufnahme vom 24. 8. 1970 (Abb. 7), die annähernd 8 Jahre nach der Vollendung der Sichelbuhne gemacht wurde. Aus dieser ist die Ansandung hinter der Buhne und der aus SO anlaufende Seegang, der hinter der Buhne beruhigt ist, zu sehen. Auch die unruhige Sandkonfiguration in Strandnähe südlich des Bühnenfeldes wird deutlich. Der unregelmäßige Aufbau der Strandriffe deutet auf Verlandung hin. Der spitze Winkel zwischen der südlichen Hafentmole und dem küstenparallelen Schenkel der Buhne ist allerdings, wie vorauszusehen war, nicht mit Sand gefüllt und wird auch nicht gefüllt werden.

Eine weitere Anwendung

Auf Grund dieser als durchaus aussichtsreich zu bezeichnenden Entwicklung der Strandmorphologie hat Verfasser im Auftrage der Intergrund Bau- und Planungsgesellschaft m. b. H.

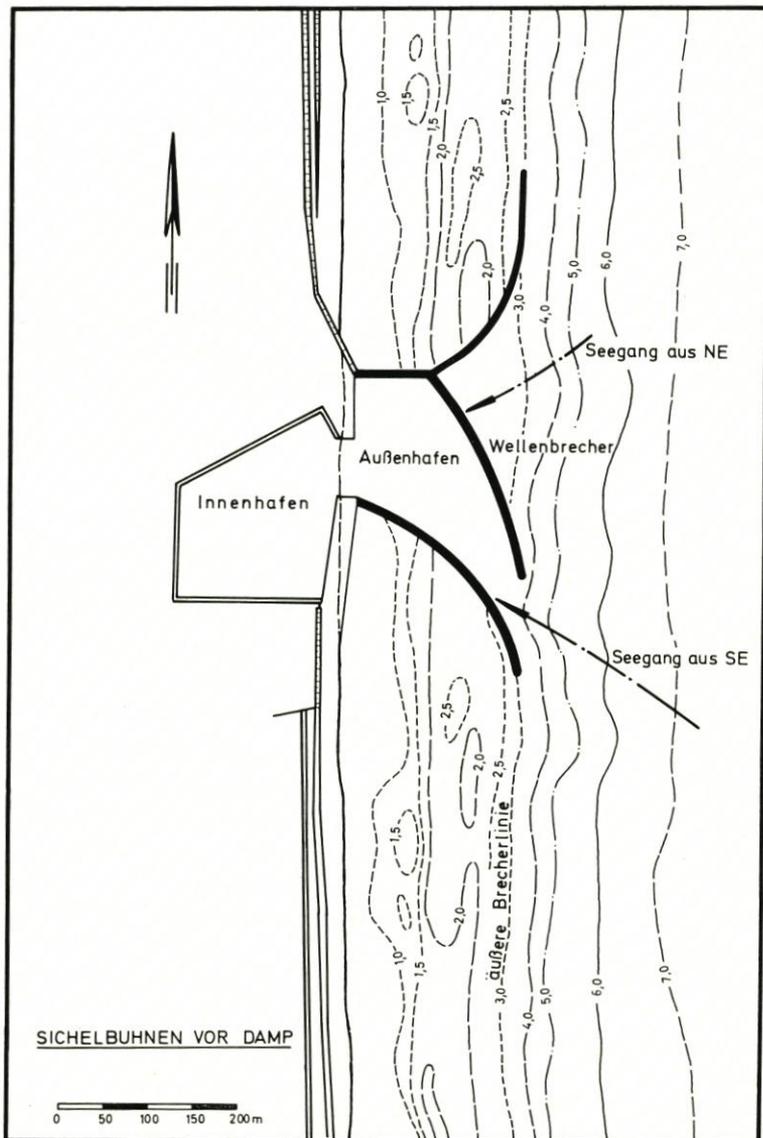


Abb. 8. Sichelbuhnen vor Damp/Ostsee

für einen Sportboothafen an der gleichen Küste nördlich der Eckernförder Bucht eine Einfahrt entworfen, die sowohl den Zweck hat, die Hafeneinfahrt vor Versandung zu schützen als auch nördlich und südlich derselben breitere Badestrände für das zu dem Hafen gehörende moderne Feriencentrum Damp zu schaffen. Die Gesamtanlage ist in Abbildung 8 dargestellt und zeigt sowohl nördlich als südlich der inneren Hafeneinfahrt Sichelbuhnen, die durch einen quer zu den anlaufenden Wellen verlaufenden Wellenbrecher verbunden sind, der den Hafen vor Seegang schützen soll. Die Anlage ist noch jung, landseitig noch im Bau, so daß sich über den Erfolg noch nichts sagen läßt. Immerhin zeigen sich aber auch hier bereits auf beiden Seiten inner-

halb der Sichelbuhnenfelder Ansandungen – zunächst nur unter dem mittleren Wasserspiegel – die eine ähnliche Entwicklung wie vor Olpenitz andeuten.

Schlußfolgerung

Die Sichelbuhne stellt nach dem Modellversuch und nach den Erfahrungen vor Olpenitz eine Maßnahme dar, die nicht nur der Versandung von Hafeneinfahrten oder von Einfahrten in Flußmündungen und Haffs entgegenzuwirken geeignet ist, sondern auch am Ende jeder physiographischen Einheit des küstenparallelen Sandtransports Strandverbreiterungen von dauernder Lagebeständigkeit zu gewährleisten verspricht.

Schrifttumsverzeichnis

1. Beach Erosion Board Washington: Special Issue Nr. 2, Shore Protection, Planning and Design, 1953.
2. BRUUN, P.: Materialvandring på Havkyster, Ingeniøren 60, H. 10, 1951.
3. GEIB, K. W.: Meeresbiologische Untersuchungen im Bereich der ostpommerschen Küste usw. Geol. d. Meere u. Binnengewässer Bd. 7, H. 1.
4. KIRSCHMER, O.: Die Theorie der Meereswellen als Grundlage von Modellversuchen für Seebauten, MAN-Forschungsheft 1952, 2. Halbjahr.
5. MAGENS, CL., WYRTKI, KL., und RODEN, G.: Die Brandungswirkungen an den Küsten Fehmarns und Wagriens, Teilber. 2, Abschn. III über die meereskundlichen Untersuchungen im Raum Fehmarn-Wagriens usw. 1954 unveröffentlicht (Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel).
6. MAGENS, CL.: Brandungsuntersuchungen an den Küsten von Fehmarn und Nordwagrien, „Die Küste“ Jg. 6, H. 1 (1957), S. 40–63.
7. MAGENS, CL.: Seegang und Brandung als Grundlage für Planung und Entwurf im Seebau und Küstenschutz. Mitt. d. Hann. Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut, H. 14, 1958.
8. MARTENS, P.: Morphologie der schleswig-holsteinischen Ostseeküste (Diss.). Ferd. Hirt, Breslau 1927.
9. MASON, M. A.: The Transformation of Waves in Shallow Water. Proc. of the first Conference on Coastal Engineering, 1950.
10. MINIKIN, R. R.: Coast Erosion. An enquiry into causes and remedies, Dock a. Harbour Auth. 30, 1950.
11. MORISON, J. R.: The Effect of Wave Steepness and Wave Velocity. Trans. Am. Geophys. Union 1951.
12. MUNK, W. H.: Rules for Constructing Wave Refraction Diagram. BEB, Techn. Rep. Nr. 2, 1942.
13. MUNK, W. H.: Refraction of Ocean Waves. Scripps Inst. of Oceanography, Contrib. 307, 1947.
14. MUNK, W. H.: The Solitary Wave Theorie and its Application to Surf Problems. Ann. New York Ac. Sci., Vol. 51, 1949.
15. PUTNAM, I. A., MUNK, W. H., und TRAYLER, M. A.: The Prediction of Longshore. Currents, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 30, 1949.
16. SHEPARD, F. P., und INMANN, D. L.: Nearshore Water Circulation related to Bottom Topography and Wave Refraction, Trans. Am. Geophys. Union, Bd. 31, 1950.
17. SVERDRUP, H. U., und MUNK, W. H.: Wind, Sea, and Swell, Theory of Relations. Scripps Inst. of Oceanography, Bull. 1947.
18. WEIDEMANN, H., DIETRICH, G., und HANSEN, W.: Teilberichte Nr. 9, 10 bzw. 11 über die Untersuchungen am Brodtener Ufer. Unveröffentlicht (Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel) 1951.
19. WIEGEL, R. L., und JOHNSON, I. W.: Elements of Wave Theorie, Proc. of the First Conf. on Coastal Engineering, 1950.