

# 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 Inselfschutzes 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.

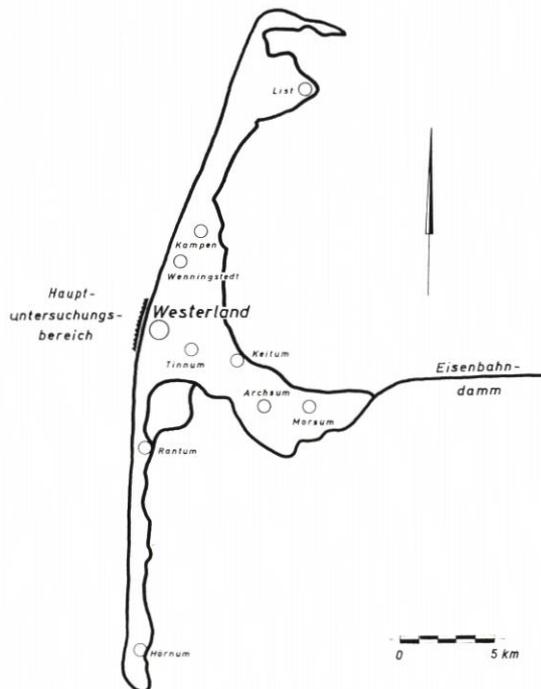


Abb. 1. Insel Sylt mit Hauptuntersuchungsgebiet

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 vermarken. 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 ghandhabt

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 Profilnullpunkt 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 Trokenflächen 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 Funkprechgerät, 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 Umfang 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  $20 \times 20$  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 Schiffsämtern 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 Vibrocoring 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 Rifffes 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 unzweckmäßig. 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 Wasserstandsaufzeichnung verwendet werden kann (Abb. 5).

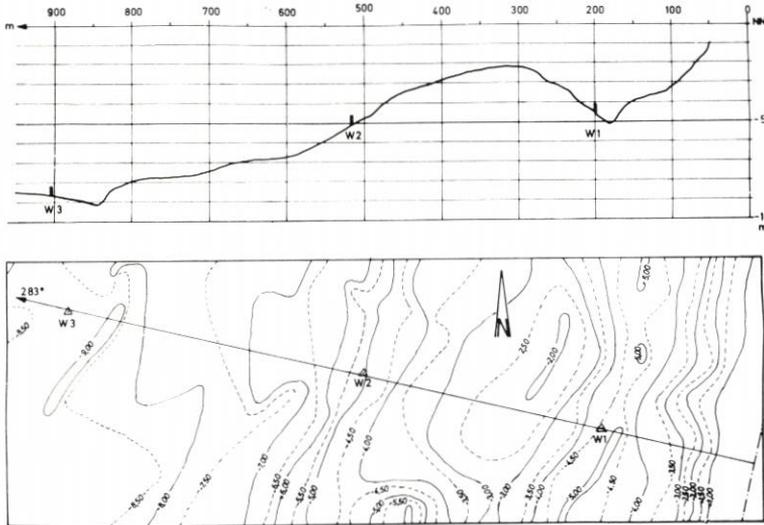


Abb. 3. Lage der 3 Fathenholz-Wellenschreiber vor Westerland (vgl. Abb. 9)

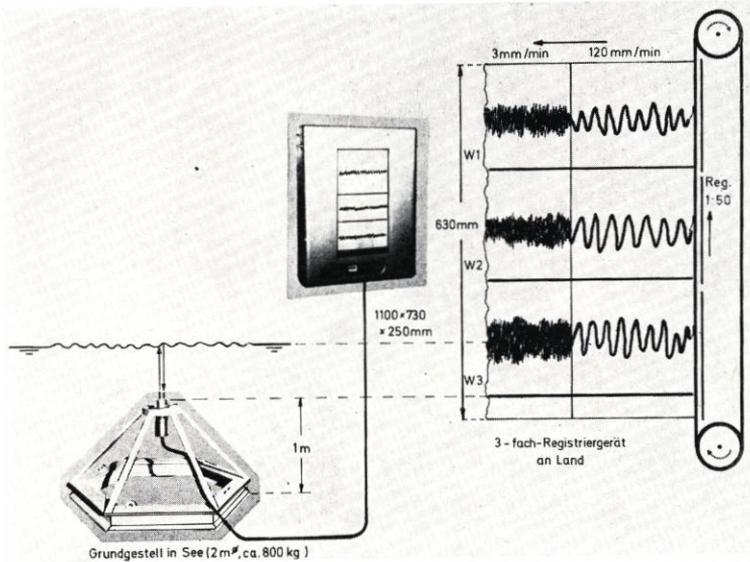


Abb. 4. Fathenholz-Wellenschreiber mit 3 Meßstellen W1, W2, W3. Hochfrequente Ultraschallimpulse werden von einem auf einem Grundgestell montierten Kristallschwinger scharf gerichtet zur Wasseroberfläche 15mal in der Sekunde abgestrahlt und als Echos auf einem Echographen registriert. Schreibende Pegel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

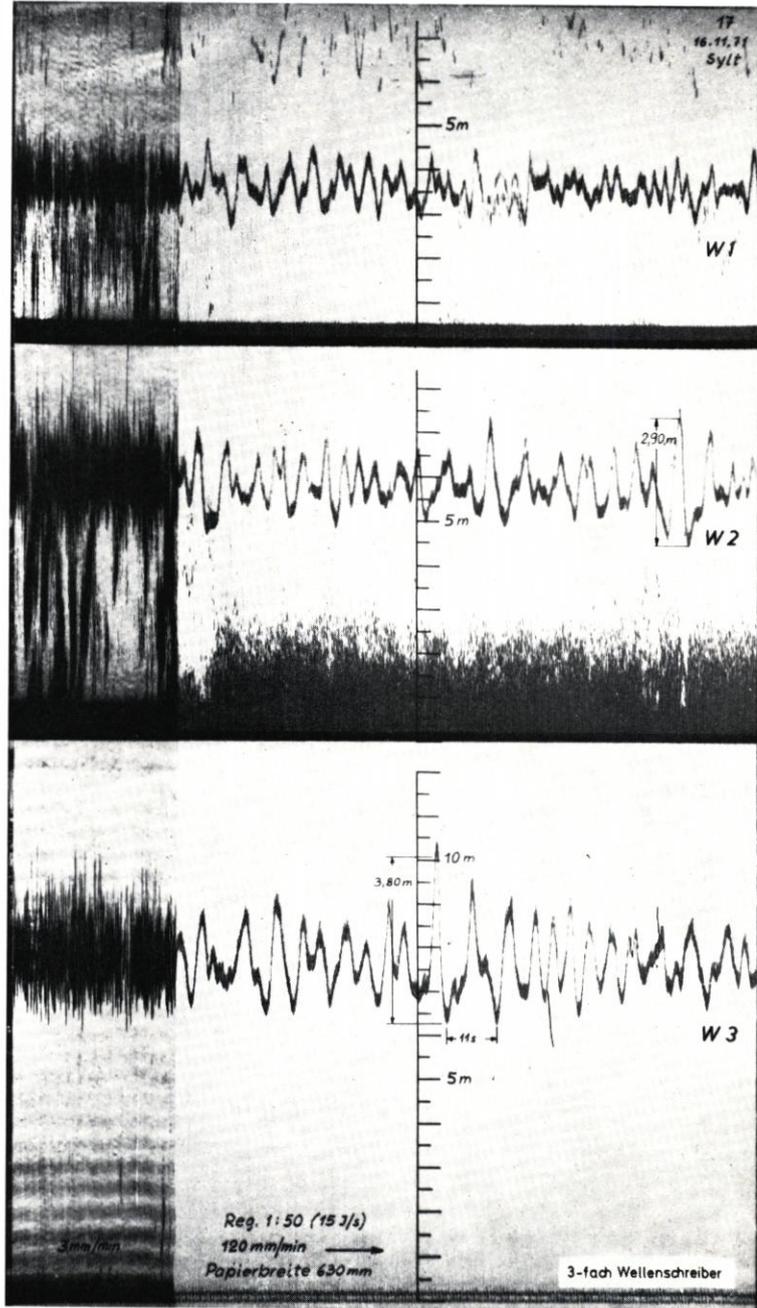


Abb. 5. Wellen-Echogramme der Fahrenholz-Wellenschreiber

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 SKN<sup>1)</sup> 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<sub>w</sub>. 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 Luftbildaufnahmen	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.

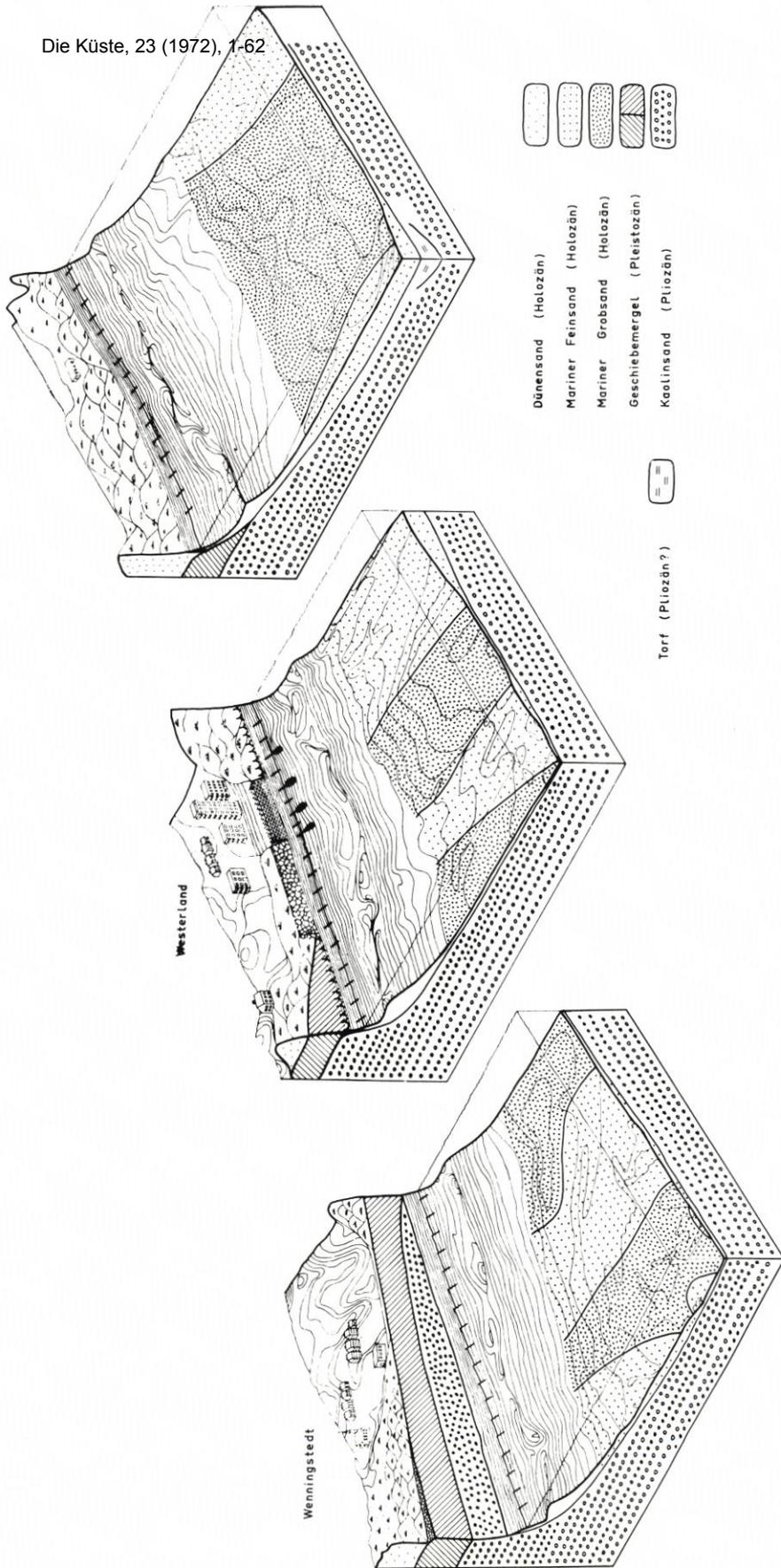


Abb. 6. Blockbilder des Seegrundes westlich von Westerland/Sylt (aus R. KÖSTER 1971)

## 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.

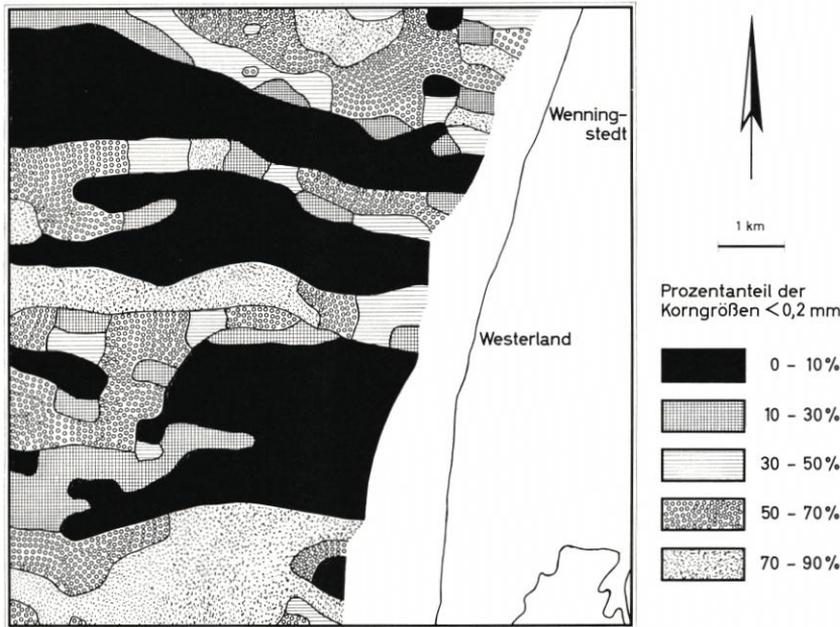


Abb. 7. Sedimentbedeckung des Seegerundes westlich der Mitte von Sylt am Beispiel der Korngrößen < 0,2 mm

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

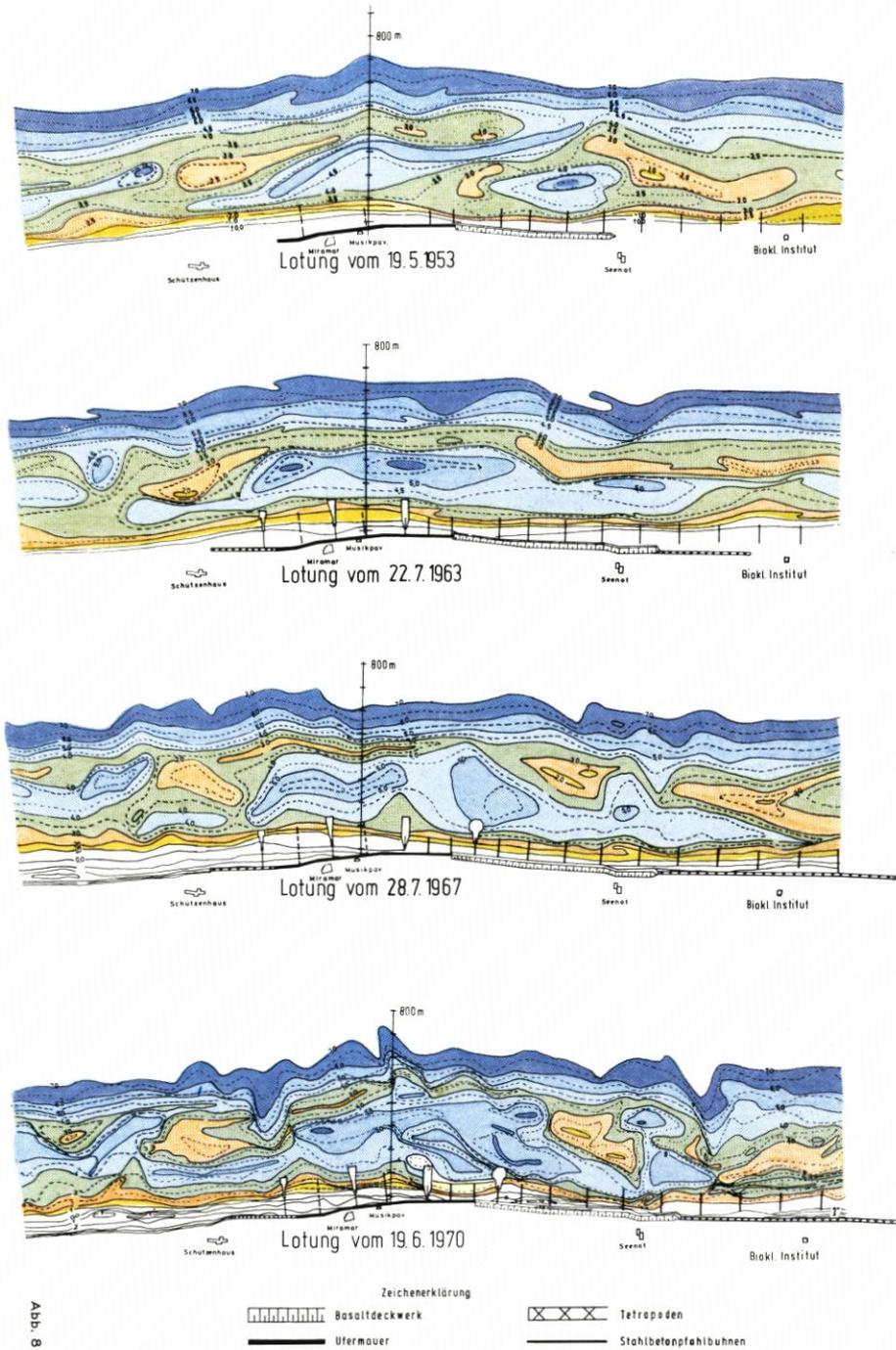


Abb. 8

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 verteilen 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 <sup>3</sup>
2.	1963	rd. 330 000 m <sup>3</sup>
3.	1967	rd. 400 000 m <sup>3</sup>
4.	1970	rd. 390 000 m <sup>3</sup>

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 m<sup>3</sup>/Jahr, während den Anwachszonen im Norden und Süden der Insel im Durchschnitt 242 000 m<sup>3</sup>/Jahr bzw. rd. 34 % der Abbruchmenge zugeführt werden:

*„Der Unterschied zwischen Anwachs- und Abbruchmenge, also das Gesamtdefizit, beträgt demnach rd. 473 000 m<sup>3</sup>/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 angenommen<sup>1)</sup>.

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-

<sup>1)</sup> 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 m<sup>3</sup> bzw. 31 000 m<sup>3</sup> Sand transportiert worden, so daß die Sandbilanz recht ausgeglichen war. Als Beispiel der wichtigsten Ergebnisse seien hier die Mengen der schwebend verfrachteten Sandmenge in m<sup>3</sup>/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. m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> Sand verloren.

Zur Wiederherstellung eines ausreichenden Küstenschutzes und Badestrandes wurden im Sommer 1953 rd. 1 Mio. m<sup>3</sup> 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. m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>.

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 m<sup>3</sup> 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. m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> (Beach Erosion Control, Doc. 277, 1952) jährlich beträgt. Auf den im Abbruch liegenden Strand wurden auf rd. 10 km Länge rd. 10 Mio. m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/Jahr; sie waren auf 160 000 m<sup>3</sup>/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. m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>; vorausgeschätzt worden waren 36 000 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 aufhöht.

## 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 Rauhdeckwerk, 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>. 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> dieser Bodenart aufgespült worden. Sie wurde abschließend mit rd. 28 000 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> bis 180 000 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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. m<sup>3</sup>, 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>; 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 Buhnen, um die Erosion aufzuhalten. Die Küstenströmung führte jedoch so wenig Sand, daß die Buhnen 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 m<sup>3</sup> und später 60 000 m<sup>3</sup> 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 Kieffreiheit 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.

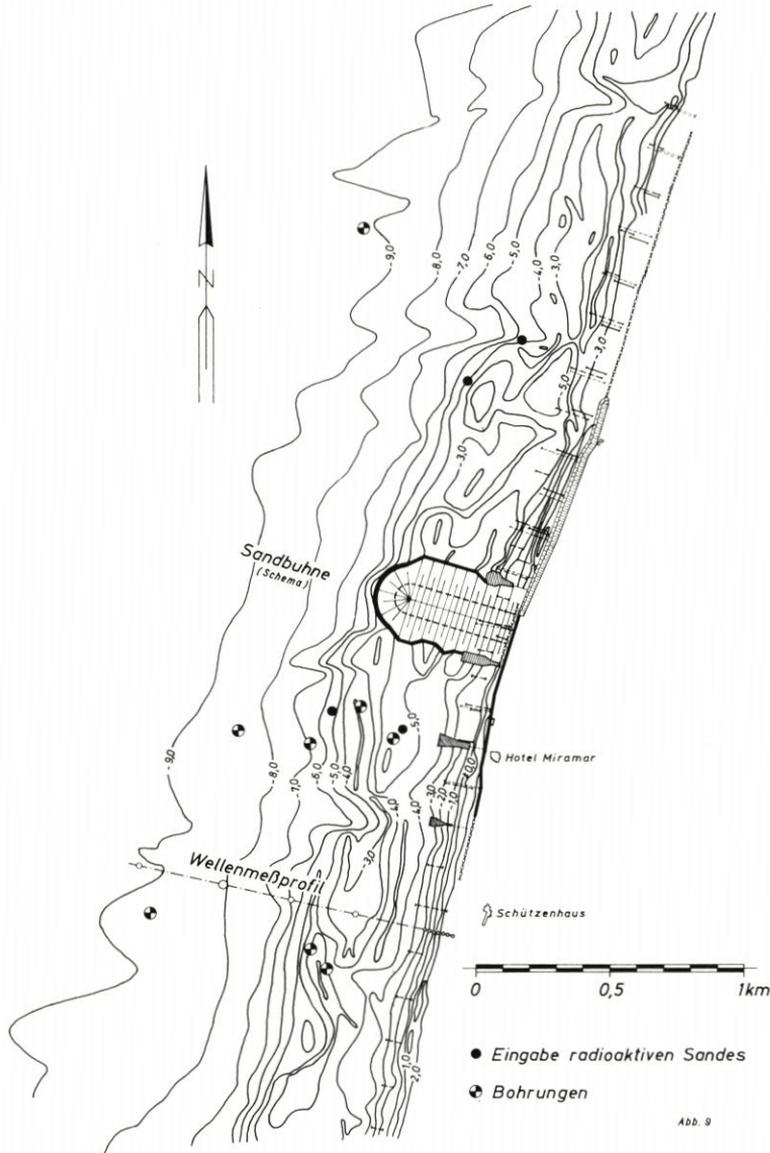


Abb. 9. Hauptuntersuchungsgebiet mit Schema der Sandbühne

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).

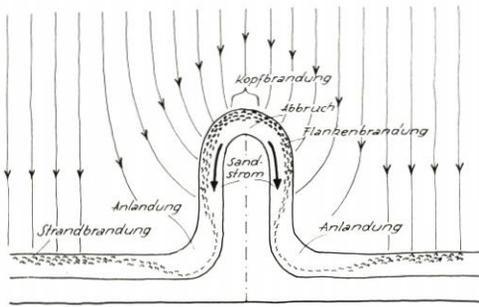


Abb. 10. Brandung und Sandumlagerung im Bauzustand (schematisch). Wellenangriff normal zum Strand

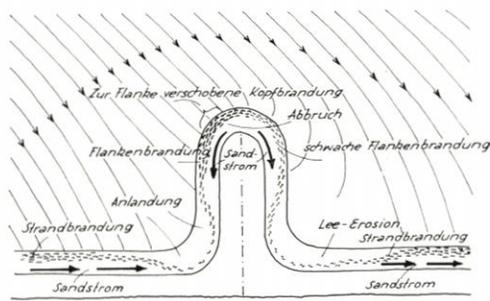


Abb. 11. Brandung und Sandumlagerung im Bauzustand (schematisch). Wellenangriff schräg zum Strand

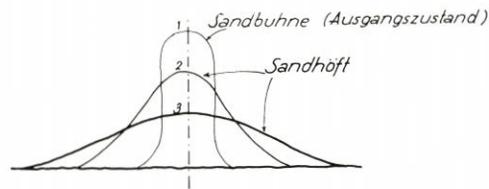


Abb. 12. Umwandlung der Sandbühne in ein Sandhöft durch Wellenkräfte (schematisch)

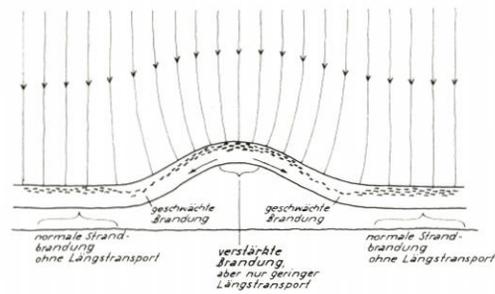


Abb. 13. Brandung und Längstransport an einem Sandhöft bei Wellenangriff normal zum Strand (schematisch)

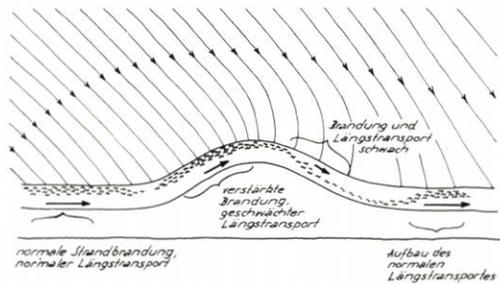


Abb. 14. Brandung und Längstransport an einem Sandhöft bei schrägem Wellenangriff (schematisch)

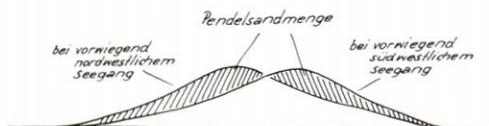


Abb. 15. Umbildung eines Sandhöftes mit der vorherrschenden Seegangsrichtung (schematisch)

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 Sandbuhne 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 Einspüleistung  $6600 \text{ m}^3/\text{Tag}$  (ohne Spülverluste) beträgt (s. 5.53), so kann die Buhne 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 m<sup>3</sup> Sand werden im Abtrag (entspricht ungefähr 600 000 m<sup>3</sup> + Spülverlust) als garantierte Mindestleistung ausgeschrieben.
- b) In einer Zusatzposition werden die Preise für weitere je 100 000 m<sup>3</sup> 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).

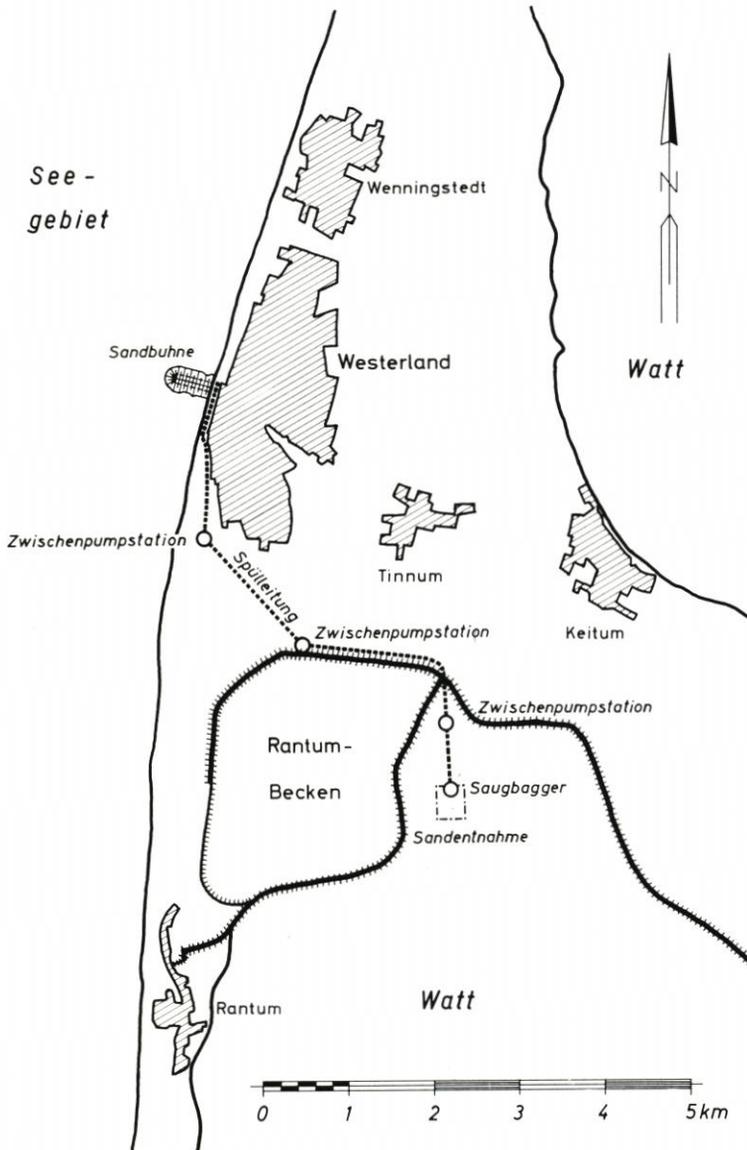


Abb. 16. Lageplan mit Spüleinrichtung

### 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> Sand in 3 Monaten gefördert werden sollen, so ergibt sich eine Tagesleistung im ununterbrochenen Betrieb von 10 000 m<sup>3</sup> Sand im Abtrag, was rd. 6600 m<sup>3</sup>/Tag im Auftrag nach Abzug des Spülverlustes ergibt. Für das Gerät bedeutet dies eine Stundenleistung von 500 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 Spülleitung 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 Inselfschutzwärke 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 Ufereinfassungen: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, 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:
- DIETZ: 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.