

# Beurteilung der Sandvorspülung 1972 und Empfehlungen für die künftige Stranderhaltung am Weststrand der Insel Sylt

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

## Zusammenfassung

Im Jahre 1972 sind zum Schutz der 2,9 km langen befestigten Uferstrecke vor Westerland/Sylt rund 1 000 000 m<sup>3</sup> Sand aus dem Untergrund des Rantum-Wattes vorgespült worden. Das Sanddepot in Form einer Sandbuhne vor dem stark gefährdeten Nordteil der Uferschutzmauer erreichte seewärts eine Länge von etwa 350 m. Schon während der Spülarbeiten formte sich die Sandbuhne in ein Sandhöft um, wodurch große Sandmengen in die nördlich und südlich anschließenden Strandstrecken verlagert wurden. Die gefährdeten Inselfschutzwerte waren nach kurzer Zeit durch eine Sandvorlage gesichert. Die Sandvorspülung hat sich während der ungewöhnlich schweren Sturmfluten des Winters 1973/74 sehr gut bewährt.

Vor, während und nach der Vorspülung wurden umfangreiche hydrologische, topographische, morphologische und sedimentologische Untersuchungen durchgeführt. Sie bestätigten die Erwartungen über die Verteilung des vorgespülten Sandes im Strand- und Vorstrandbereich und ergaben zusätzliche Erkenntnisse für künftige Vorspülungen. Wesentliche Sandverluste über das Riff seewärts sind nicht entstanden. Nachteilige Lee-Erosion konnte an der Sandbuhne nicht beobachtet werden. Dagegen gelang es, während des Winters 1972/73 zusätzlich Sand aus der natürlichen Sandbewegung aufzufangen.

Der aus dem Vorspülbereich abtransportierte Sand wird nach Verminderung auf die Hälfte des ursprünglich vorgespülten Sandes zur Erhaltung der schützenden Wirkung durch Nachspülungen ersetzt werden müssen. Die verschiedenen Möglichkeiten für Nachspülungen werden untersucht und auf ihre Wirtschaftlichkeit geprüft. Als Ergebnis wird empfohlen, den künftigen Inselfschutz vor Westerland auf eine Stranderhaltung durch Nachspülung von Sand abzustellen, der aus dem Gebiet des Rantum-Wattes entnommen wird. Als Form der Vorspülung ist, wie 1972, ein Sandlager in Form einer Sandbuhne anzustreben.

## Summary

*In 1972 about 1 million m<sup>3</sup> sand have been pumped from Rantum Watt as replenishment material to protect a 2,9-km-segment of armoured shore off Westerland/Sylt. The sand reservoir had the shape of a spit normal to the longshore current and could be described as broad, flat sand groyne. It extended 350 m from the shore and was placed in front of the severely threatened northern part of the seawall. Replenishing had not yet been completed when the sand groyne shape was already transformed into a sand peninsula, with large sand volumes moving alongshore to the adjoining beaches. After a short while the threatened shore armoring was safe behind the sand from the reservoir. The sand replenishment has proven its worth in the exceptionally serious storm surge attacks in winter 1973/74.*

*Before, during and after the replenishment comprehensive hydrologic, topographic, morphologic and sedimentologic surveys were made. They confirmed the predicted distribution of the replenished sand in the beach and foreshore areas, and supplied additional insight useful for future feeder beach projects.*

*Sand volumes lost by seaward movement across the bar were not substantial. Harmful lee erosion at the sand groyne was not observed. During winter 1972/73 it was even possible to intercept additional sand from the natural littoral transport.*

*In order to maintain the protective effect the sand lost from the reservoir area will have to be replaced as soon as only half of the original volume is left. Various methods of repeat replenishments have been investigated and checked regarding their economy. The result is a recommendation to protect the island coast at Westerland henceforth by beach conservation using repeated replenishment with sand borrowed from the Rantum Watt area. The feeder beach should be, as in 1972, in the form of a sand reservoir acting as a groyne.*

## I n h a l t

1.	Einleitung und Aufgabenstellung . . . . .	25
2.	Ablauf der Vorspülung . . . . .	28
2.1	Betriebseinrichtung . . . . .	28
2.2	Spülvorgang . . . . .	30
3.	Untersuchungen und Beobachtungen zur Sandvorspülung . . . . .	32
3.1	Art der Untersuchungen und Beobachtungen . . . . .	32
3.1.1	Hydrologische Untersuchungen . . . . .	32
3.1.2	Topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen . . . . .	34
3.1.3	Sedimentologische Untersuchungen . . . . .	35
3.2	Untersuchungsergebnisse . . . . .	36
3.2.1	Wasserstände . . . . .	36
3.2.2	Wellenklima im Winter 1973/74 . . . . .	37
3.2.3	Veränderungen in der Strandmorphologie . . . . .	39
3.2.4	Sedimentologie . . . . .	39
3.2.4.1	Allgemeines . . . . .	39
3.2.4.2	Eigenschaften der Sedimente . . . . .	42
3.2.4.3	Bestandsaufnahme vor der Vorspülung . . . . .	42
3.2.4.4	Veränderungen der Sedimentverteilung bis 1973 außerhalb des Einflußbereiches der Sandvorspülung . . . . .	45
3.2.4.5	Vibrocorerkerne . . . . .	45
3.2.4.6	Einspülung des Kaolinsandes . . . . .	46
3.2.4.7	Verteilung des eingespülten Kaolinsandes bis zum Sommer 1973 . . . . .	46
3.3	Quantitative Änderungen des Sandvorrates . . . . .	49
3.4	Halbwertszeit der Strandvorspülung . . . . .	56
4.	Grundlage für künftige Sandnachspülungen . . . . .	57
4.1	Häufigkeit der Nachspülungen . . . . .	57
4.2	Nachzuspülende Sandmengen . . . . .	58
5.	Grundlagen der künftigen Sandzufuhr . . . . .	62
5.1	Sandentnahmegebiete . . . . .	62
5.1.1	Allgemeines . . . . .	62
5.1.2	Sandentnahme aus dem Gebiet des Salzsandes am Lister Tief . . . . .	62
5.1.3	Sandentnahme aus dem Flachwassergebiet westlich des Vortrapptiefs . . . . .	65
5.1.4	Sandentnahme im Seegebiet westlich der Inselmitte von Sylt . . . . .	66
5.1.5	Sandentnahme aus dem Untergrund des Watts zwischen Sylt und Föhr . . . . .	69
5.1.6	Sandentnahme aus der Insel . . . . .	70
5.1.7	Vergleich der möglichen Entnahmegebiete . . . . .	70
5.2	Sandgewinnung, Sandtransport, Sandeinbau . . . . .	72
5.2.1	Nutzung seeseitiger Entnahmegebiete . . . . .	72
5.2.1.1	Sandzufuhr aus dem Gebiet des Salzsandes . . . . .	72
5.2.1.2	Sandzufuhr aus dem Flachwassergebiet westlich des Vortrapptiefs . . . . .	72
5.2.1.3	Sandzufuhr aus dem Seegebiet westlich der Inselmitte von Sylt . . . . .	73
5.2.2	Nutzung des Sandentnahmegebietes im Watt zwischen Sylt und Föhr . . . . .	77
5.2.3	Nutzung einer Sandentnahme auf der Insel . . . . .	78
5.2.3.1	Sandentnahme aus einem Baggersee . . . . .	78
5.2.3.2	Sandentnahme aus dem Rantumbecken . . . . .	80
5.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	81
5.3.1	Allgemeines . . . . .	81
5.3.2	Kostenermittlungen . . . . .	82

5.3.3	Ergebnis . . . . .	84
6.	Schutz der Insel Sylt durch massive Bauwerke . . . . .	84
6.1	Allgemeines . . . . .	84
6.2	Buhnen . . . . .	85
6.3	Deckwerke . . . . .	85
6.4	Wellenbrecher . . . . .	87
6.4.1	Überlegungen zur Planung . . . . .	87
6.4.2	Bauweisen von Wellenbrechern . . . . .	88
6.4.3	Wellenbrecher vor Westerland . . . . .	89
7.	Schlußbetrachtung und Empfehlungen für den künftigen Inselchutz vor Westerland . . . . .	90
8.	Schriftenverzeichnis . . . . .	94

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

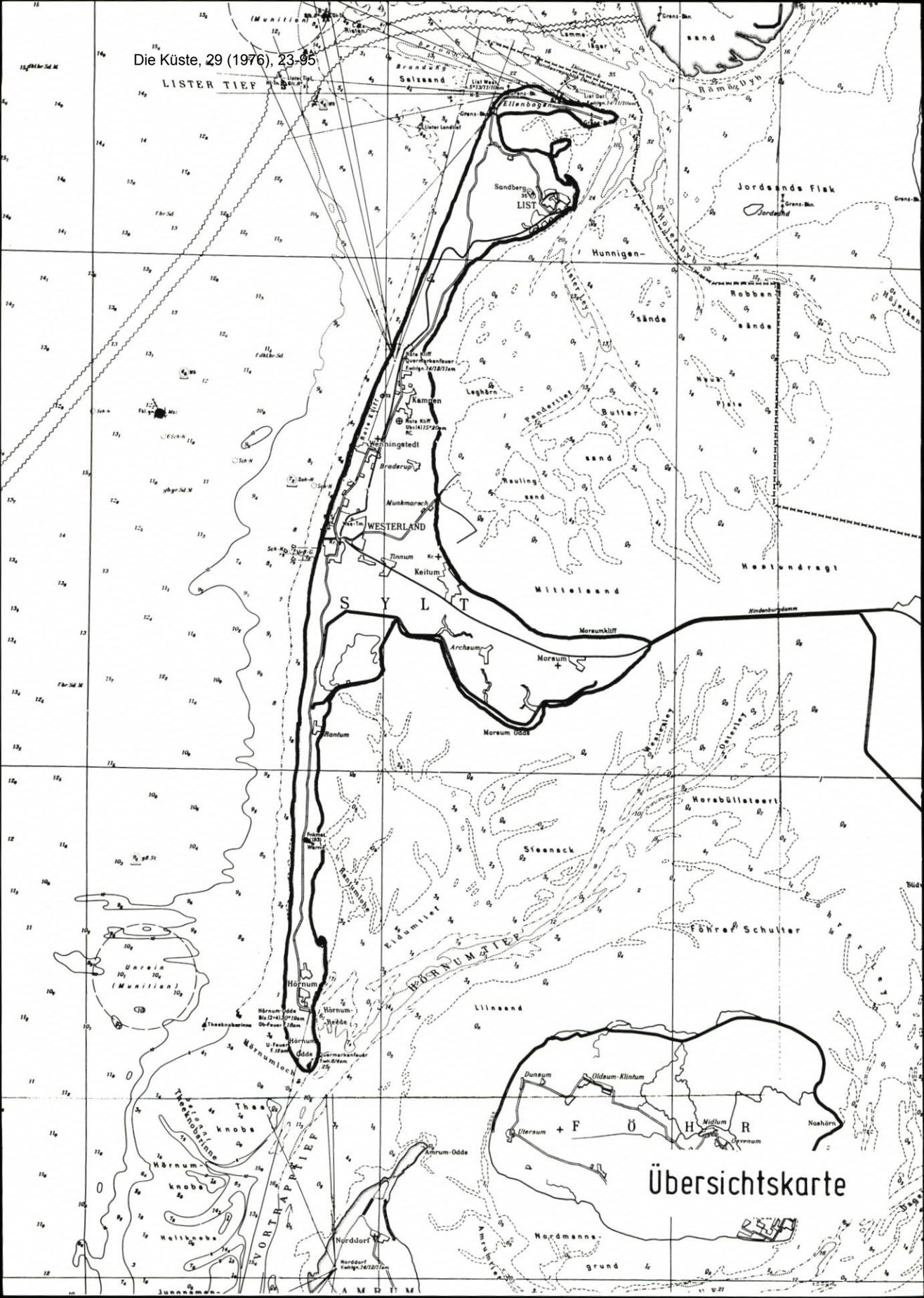
Der ständige Uferabbruch vor *Westerland/Sylt* (Abb. 1) erforderte schon zu Beginn des Jahrhunderts, daß zusätzlich zu den vorhandenen Buhnensystemen eine Ufermauer als Längswerk zum Schutze des Dünenfußes erbaut wurde. Die weitere Erosion des Strandes konnte jedoch damit nicht aufgehalten werden, ebenso vermochten weitere Buhnen den Strandrückgang höchstens zu verzögern, aber nicht zu verhindern. Die Wellenbelastung auf das Längswerk nahm daher, besonders bei Sturmfluten, ständig zu, wobei zeitweise schwere Beschädigungen hingenommen werden mußten. Lee-Erosionen nördlich und südlich der Strandmauer zwangen zur Verlängerung des Längswerkes nach Norden (Deckwerke, Tetrapodenwall) und Süden (Tetrapodenwall).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind rd. 2,9 km Uferlänge vor *Westerland* durch Längswerke geschützt, die nun selbst wieder in ihrem Bestand durch drohende Unterspülung und Wellenbelastung gefährdet werden. Diese Gefahr wächst in dem Maße, wie durch die stete Arbeit der Brandung der Strand vor den Längswerken immer mehr ausgeräumt wird. Der Ausräumungsprozeß wird zusätzlich dadurch verstärkt, daß an den scharliegenden Längswerken erhebliche Reflexionen auftreten. Kostspielige Verstärkungen und Fußvorlagen wurden erforderlich, wie die bauliche Entwicklung des Längswerkes im Bereich der 1912 angelegten Ufermauer zeigt (Abb. 2).

Vor einigen Jahren wurde deshalb begonnen, nach neuen Wegen für den Uferschutz durch Strandauffüllung zu suchen. Das Ergebnis war die 1972 ausgeführte Strandauffüllung vor *Sylt*, zu der von der Gutachtergruppe bisher drei Teilgutachten erstellt wurden. Nach einer Einführung, *Veranlassung und Aufgabenstellung*, in der die Vorgeschichte bis zur Beauftragung der Gutachtergruppe *Sylt* behandelt wurde, konnte das Teilgutachten A, *Untersuchungs- und Meßtechnik*, am 28. 11. 1970 abgeschlossen werden, dem das Teilgutachten B, *Vorschläge zur Einspültechnik*, am 3. 2. 1971 folgte. Das Teilgutachten C, *Steuerung der Einspültechnik*, wurde in vier Stellungnahmen am 1. 7. 1971, 10. 6. 1972, 1. 7. 1972 und 25. 9. 1972 abgegeben, die sich sowohl auf die Firmenangebote für die Sandvorspülung vor *Westerland* wie auf die Beratung in der technischen Durchführung und deren Verbesserung sowie Ergänzung auf Grund verschiedener örtlicher Besprechungen während des Jahres 1972 bezogen.

Nach Abschluß der Vorspularbeiten sind rd. zwei Jahre vergangen. Insbesondere war die Vorspülung während der Monate November/Dezember 1973 extremen Wetterbedingungen ausgesetzt. Eine vorläufige Beurteilung des Ergebnisses der Vorspülung, wie sie von vornherein mit dem Teilgutachten D, *Beurteilung der Sandvorspülung*

LISTER TIEF



Übersichtskarte

nach ihrer Fertigstellung, geplant war, ist deshalb möglich. Dies um so mehr, als ein Erfolg der Sandvorspülung allein dadurch gegeben ist, daß an den Uferschutzwerken (Deckwerken und Bühnen) während der sehr schweren Sturmfluten des Winters 1973/74 keinerlei Schäden entstanden.

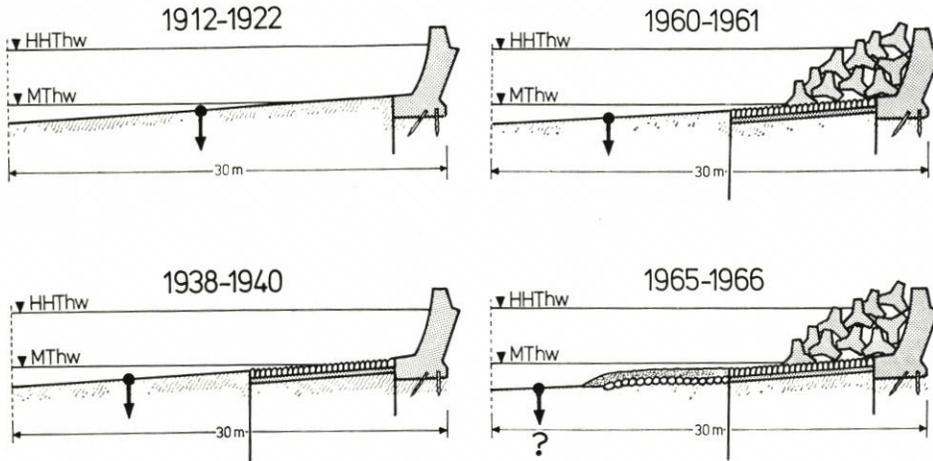


Abb. 2. Ufersicherung vor Westerland/Sylt

Eine erste vorläufige Beurteilung der Sandvorspülung wurde bereits am 15. 1. 1974 in dem Vorbericht zum Ergebnis der Sandvorspülung vor Westerland 1972 gegeben, in dem auch die Fragestellungen angegeben sind, auf die im Teilgutachten D besonders eingegangen wird.

Das Teilgutachten D bringt Wiederholungen aus den Teilgutachten A und B, soweit diese notwendig sind, die Vorgänge zu erläutern, ohne daß ständig auf die anderen Teilgutachten zurückgegriffen werden muß. Angestrebt wird, das Gesamtproblem der Sandvorspülung geschlossen darzustellen.

Bemerkt werden muß bereits an dieser Stelle, daß auf Grund der allgemeinen öffentlichen Anerkennung der Vorspülung Vorschläge gemacht worden sind, andere Uferstrecken der Insel Sylt durch Sandvorspülung zu sanieren, ohne daß aber die im Zentralabschnitt der Insel vor Westerland gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen auf andere Uferstrecken übertragen werden können. Eine unkritische Übernahme der vor Westerland gewonnenen Erfahrungen ist mit erheblichen Risiken verbunden.

Als Aufgabenstellung für das Teilgutachten D ergibt sich:

- kritische Stellungnahme zum Ablauf der Sandvorspülung,
- Beurteilung des Erfolges der Sandvorspülung,
- Bewertung der Untersuchungen und Beobachtungen vor, während und nach der Sandvorspülung,
- Ermittlung der Häufigkeit der Sandnachspülungen zur Stranderhaltung und der jeweils erforderlichen Sandmengen,
- Untersuchung der Möglichkeiten der Sandgewinnung und des Sandtransportes sowie des Einbringens am Strand,
- Überlegungen zur technisch günstigsten und damit wirtschaftlichsten Lösung der Sandvorspülung zur Stranderhaltung,
- Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen dem Uferschutz durch Sandvorspülung oder durch massive Schutzwerke und deren Unterhaltung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen und Überlegungen des Teilgutachtens D sind in Empfehlungen für die weitere Stranderhaltung vor *Westerland/Sylt* zusammengefaßt.

## 2. Ablauf der Vorspülung

### 2.1 Betriebseinrichtung

Auf Grund einer öffentlichen Ausschreibung des Marschenbauamtes Husum (MBA, jetzt Amt für Land- und Wasserwirtschaft, ALW) erhielt die Firma Dr.-Ing. RATHJENS, Hamburg, nach Abstimmung mit den Gutachtern den Auftrag für die Sandvorspülung vor *Westerland*.

Die insulare Lage der Baustelle stellte besondere Anforderungen an die Einrichtung, den Betrieb und den Abbau der Baustelleneinrichtung (Abb. 1).

Der Gerätepark hatte rd. 1 Mio. m<sup>3</sup> Kaolinsand aus einer Entnahme im *Rantum-Watt* zur Einbaustelle am Strand vor *Westerland* hydraulisch zu fördern. Vorher war jedoch eine für die Vorspülung ungeeignete Deckschicht auf dem Watt seitlich der Entnahme abzulagern. Die Saugbagger „Harald“ und „Peter“ baggerten, von See kommend, zunächst eine Rinne bis zur Sandentnahmestelle im Watt rd. 1200 m südlich des *Nössedeiches*. Von dort stellte ein dritter Saugbagger „Torsten“ eine etwa 600 m lange Rinne von der Entnahmestelle bis zum Liegeplatz des Saugbaggers „Peter“, etwa 500 m vor dem *Nössedeich*, her, der dort als Zwischenpumpstation diente (Abb. 3).

Die Spülrohre transportierte die Bundesbahn über den *Hindenburgdamm* bis zum *Bahnhof Westerland*; von dort brachten Lastkraftwagen über das Straßennetz der Insel die Rohre zum Einbau in die Rohrtrasse. Die Rohre für die 1 km lange Spülleitung vom *Nössedeich* bis zur Zwischenpumpstation Z 1 (Bagger „Peter“) und weiter bis zum nördlichen Rand der Entnahme mußten über Deichrampen ins Deichvorland gefahren werden.

Die Länge der Spülleitung betrug von der Entnahmestelle bis zum Spülfeld rd. 7 km; dabei mußte die Dünenkette mit einer Höhe von rd. NN + 20,0 m überquert werden. Wegen dieser großen Entfernung und wegen der zu überwindenden Dünenkette waren drei Zwischenpumpstationen erforderlich (Abb. 3).

Der in der Entnahme eingesetzte Saugbagger „Torsten“ förderte das Baggergut, den Kaolinsand, mit einer Leistung von 1500 PS über eine rd. 1200 bis 1600 m lange Spülleitung zur 1. Zwischenpumpstation, dem Saugbagger „Peter“. Dieser drückte es mit einer Leistung von 2200 PS über eine Entfernung von rd. 1900 m weiter zur 2. Zwischenpumpstation Z 1. Mit einer Leistung von ebenfalls 2200 PS förderte diese das Spülgut über eine 2000 m lange Leitung zur 3. Zwischenpumpstation Z 2. Deren Leistung von 3000 PS reichte voll aus für die Förderung des Kaolinsandes durch eine rd. 1700 m bis 1950 m lange Leitung über den Dünenrücken auf das Spülfeld vor *Westerland*. Mit Ausnahme der dieselbetriebenen 1. Zwischenpumpstation, Saugbagger „Peter“, waren andere mit elektrisch angetriebenen Pumpen ausgerüstet.

Der Treibstoff für den dieselbetriebenen Saugbagger wurde über See mit einem Bunkerboot aus *Emden* angeliefert. Für die Versorgung der elektrischen Zwischenpumpwerke (Betriebsspannung 6000 V) mußte eine 20 000-V-Freileitung von *Keitum* zum *Nössedeich* gezogen werden. Auch die Trafostation in *Keitum*, in der die Spannung von 60 000 auf 20 000 V transformiert werden mußte, war neu zu installieren.

Eine wichtige Voraussetzung für ein optimales Zusammenwirken des Saugbaggers in

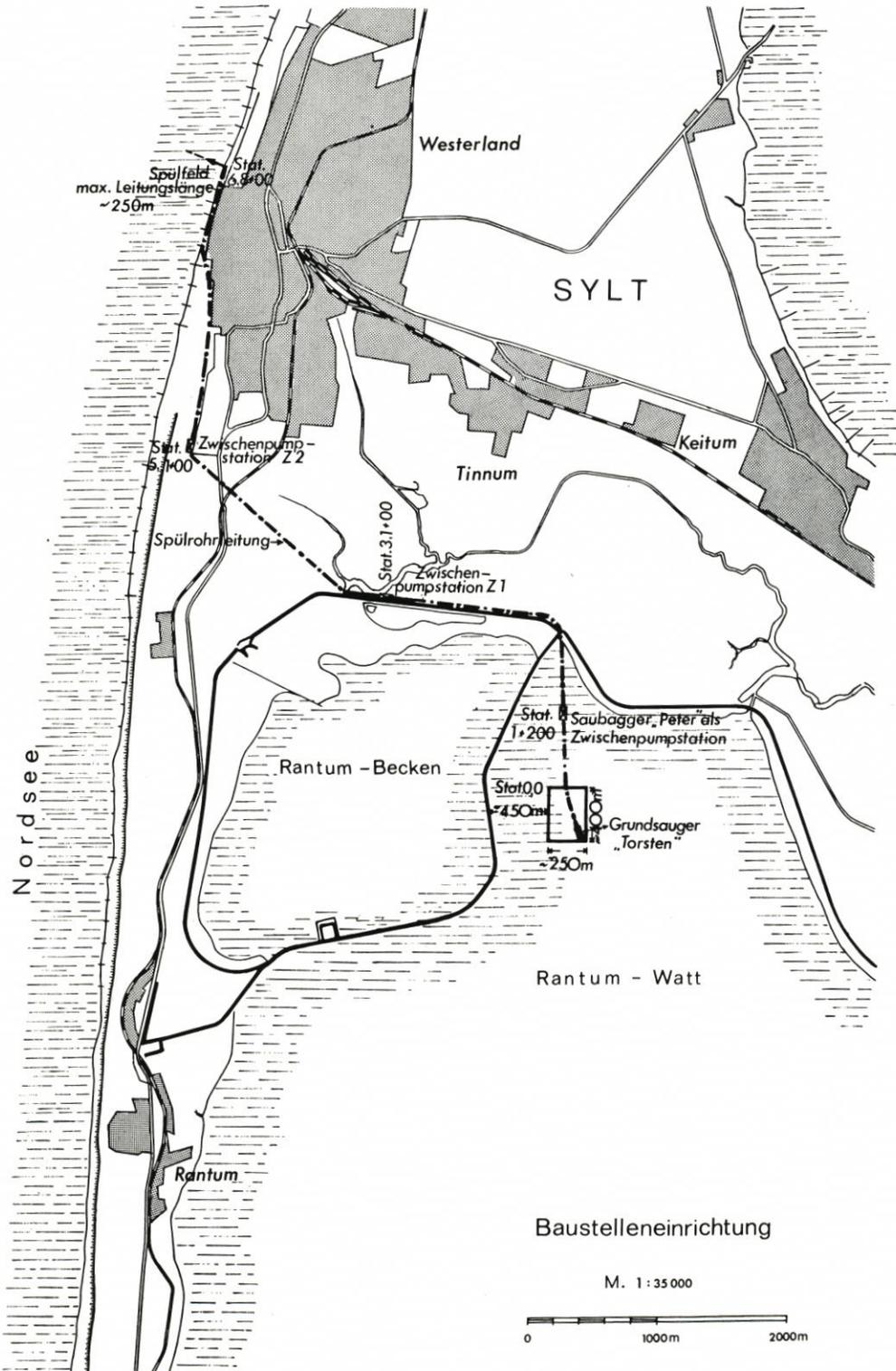


Abb. 3

der Entnahmestelle und den Zwischenpumpstationen waren gute Nachrichtenverbindungen. Deshalb war der Saugbagger „Torsten“ in der Entnahme über getrennte Sprechleitungen mit den einzelnen Zwischenpumpstationen verbunden. Außerdem war das Spülfeld und der Saugbagger „Peter“ an das öffentliche Telefonnetz angeschlossen.

Der als Zwischenpumpstation eingesetzte Saugbagger „Peter“ steuerte die anderen Zwischenpumpstationen und den Saugbagger „Torsten“ in der Entnahme zentral, indem die Werte der Schalt- und Anzeigetafeln per Fernseher über Kabel übertragen wurden. Die Daten des Entnahmegerätes und der einzelnen Zwischenpumpstationen konnten ständig von einer Stelle überwacht und der Saug- und Förderbetrieb gesteuert werden.

## 2.2 Spülvorgang

Die Vorspülung verlief entsprechend der Planung ohne Umstellungen in der Baustelleneinrichtung. Der Spülbetrieb lief entgegen den ursprünglichen Erwartungen ohne große Schwierigkeiten an, wie auch das Zusammenspiel von Saugbagger und Zwischenpumpstationen gut erreicht werden konnte.

Das Vorstrecken der Spülrohrleitung auf dem Spülfeld war durch die Form der vorgespülten Sandbühne besonders einfach und wenig arbeitsintensiv. Normalerweise waren dafür nur eine Planierraupe und zusätzlich ein Mann eingesetzt. Der Spülrohrauslauf wurde beim Vorstrecken auf der Sandbühne jeweils so gerichtet, daß brandungsbedingte Sandverluste ausgeglichen werden konnten. Bei starkem Seegang mußte die Leitung gelegentlich wieder verkürzt werden.

Die Leistung der Spüleinrichtung wurde durch einen Konzentrationsmesser der Firma IHC überwacht. Nach anfänglich fehlerhafter Anzeige wurde das Gerät von der IHC justiert und arbeitete dann, wie durch Aufmaß ermittelt, mit einer Genauigkeit von  $\pm 5\%$ . Neben der Konzentration wurden gleichzeitig die sekundliche Durchflußmenge und mit einem Zählwerk der Durchsatz angezeigt. Die Durchflußgeschwindigkeit betrug im Mittel rd. 3,8 – 4,2 m/sek.

Nach Abschluß der Vorspülung konnten die schwimmenden Geräte nur bei Springtiden zurücktransportiert werden, weil die bei der Anfahrt gebaggerten Rinnen zu den Liegeplätzen stark verschlickt waren. Nach Abbau der Spülrohrleitung mußten die durch den Transport beschädigten Straßen und insbesondere der *Nössedeich* im Bereich der Rampen wieder instandgesetzt werden.

Die Verwendung eines Saugbaggers als Zwischenpumpstation hat sich als sehr aufwendig erwiesen; wirtschaftlicher wäre der Einsatz eines landfesten Zwischenpumpwerkes gewesen. Auch die Lage der Zwischenpumpstationen Z 1 und Z 2 in der Förderleitung ließe sich verbessern. Insbesondere konnte die 3. Zwischenpumpstation Z 2 mit 3000 PS installierter Leistung nie voll ausgefahren werden, weil der abschließende Spülstrang zu kurz war.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Vorspülung planmäßig, ohne bemerkenswerte Vorkommnisse verlief. Mit der angewandten Spültechnik und der eingesetzten Baustelleneinrichtung konnte der Vorspülvorgang jederzeit sicher beherrscht werden. Das Verfahren hat sich bewährt und läßt sich in Einzelheiten noch verbessern.

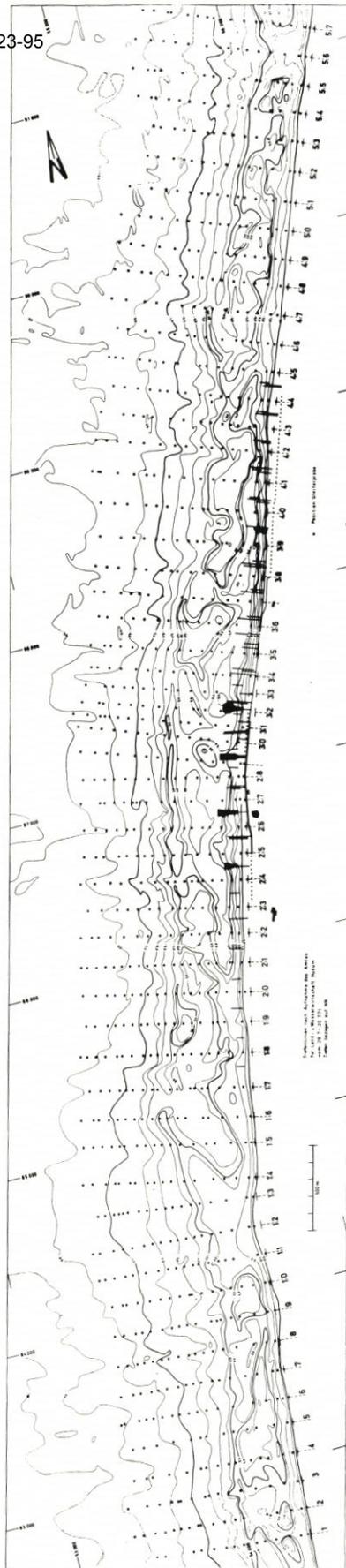


Abb. 4. Profil- und Probenkarte

### 3. Untersuchungen und Beobachtungen zur Sandvorspülung

#### 3.1 Art der Untersuchungen und Beobachtungen

Im Jahre 1971 wurde vom MBA Husum, jetzt ALW Husum, ein umfangreiches Meßprogramm begonnen, wofür das Teilgutachten A, Untersuchungs- und Meßtechnik, die Grundlage bot. Als sogenannte Bestandsaufnahme wurde mit den verschiedensten Meß- und Untersuchungsverfahren bereits vor Beginn der Vorspülung begonnen. Danach begleiteten weitere Untersuchungen die Vorspülung und wurden zeitlich darüberhinaus bis zum Frühjahr des Jahres 1974 fortgesetzt, um jederzeit die Auswirkung der Baumaßnahme auf den unmittelbar betroffenen Bereich einwandfrei und vollständig meßtechnisch erfassen zu können.

Das Meßprogramm umfaßte:

- a) hydrologische Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen,
- b) topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen und
- c) sedimentologische Untersuchungen.

Ergänzt wurden diese Meßprogramme durch gleichzeitige Untersuchungen des Lehrstuhls für Hydromechanik und Küstenwasserbau der Technischen Universität Braunschweig mit seiner Außenstelle Sylt sowie des Geologisch-Paläontologischen Instituts und Museums der Universität Kiel. Außerdem konnten die meteorologischen Beobachtungen des Instituts für Bioklimatologie in Westerland der Universität Kiel zur Beurteilung der vorgenannten Untersuchungen herangezogen werden.

Im Jahre 1971 wurden zunächst die Standlinien, Haupt- und Meßprofile im einzelnen festgelegt, um später alle Messungen, Beobachtungen und sonstige Untersuchungen auf die Profillinien ausrichten zu können.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über 9 km, und zwar jeweils 4,5 km südwärts und nordwärts von *Westerland*. Baken am Strand und auf der Düne markierten in dem vorgenannten Gebiet eine Standlinie, senkrecht dazu 57 Profile (Abb. 4). Die Schiffbarkeit zwischen den Bühnen oder ihren Resten bestimmte den Abstand der Profile – im Mittel 158 m – voneinander.

#### 3.1.1 Hydrologische Untersuchungen

Von der Gutachtergruppe wurden im Teilgutachten A die nachfolgend aufgeführten Beobachtungen und Untersuchungen empfohlen:

1. Wellenmessungen
2. Brandungsbeobachtungen
3. Wellenbefliegungen
4. Brandungsströmungsbeobachtungen
5. Schwimmermessungen
6. Dauerstrommessungen
7. Wasserstandsmessungen
8. Wasserstandsbeobachtungen
9. Strandversatzbeobachtungen

Die vorgenannten Beobachtungen und Messungen waren zum großen Teil regelmäßig möglich. Die Lage der Meß- und Beobachtungspunkte ist in den Abbildungen zu den Teilgutachten A und B angegeben.

### Zu 1. Wellenmessungen

Als Grundlage für die Durchführung der täglichen Wellenmessungen und Strandbeobachtungen wurden vom Lehrstuhl für Hydromechanik und Küstenwasserbau der TU Braunschweig im Oktober 1971 zunächst ein Meßprogramm aufgestellt und Richtlinien für die laufende Auswertung ausgearbeitet.

Für die Seegangsmessungen war ein Meßprofil bis zu einer Entfernung von 1280 m vor der Küste, etwa 1 km südlich der geplanten Sandbühne, ausgewählt worden. An den einzelnen Meßstellen wurden verschiedene elektronische Meßgeräte ausgelegt, wie Ultraschall-Wellenschreiber, elektromagnetische Strömungsmeßgeräte, Druckwandler und Pegel nach dem Echolotprinzip (Einzelheiten s. DETTE, 1974a).

Mit diesem Wellenmeßprogramm wurde am 1. 11. 1971 begonnen. Im ersten Winter konnten bis zum 31. 1. 1972, Beginn einer ruhigen Wetterlage, insgesamt 80 Wellenmessungen bei Thw und Tnw ausgeführt und ausgewertet werden.

Vor Beginn des Winters 1972/73 wurde auf Grund der Erfahrungen des Vorwinters ein überarbeitetes Wellenmeßprogramm vorgeschlagen, um bei verschiedenen Wetterlagen ein Optimum an Meßdaten sammeln zu können. In diesem Winter waren dann rund 180 Wellenmessungen bei signifikanten Wellenhöhen  $H_s > 0,3$  m möglich.

### Zu 2. Brandungsbeobachtungen

Für die Brandungsuntersuchungen und -beobachtungen wurden in dem vorgenannten Meßprofil in Abständen von je 20 m Stahlrohre mit der Oberkante auf NN + 5 m zwischen der Station 0 m (Dünenfuß) und 100 m im Jahre 1971 eingespült, an denen visuelle Beobachtungen angestellt wurden. Hierzu war ein ausführliches Untersuchungsprogramm zur Erfassung von etwa 10 Parametern erstellt worden. Die vorwiegend im Winter 1971/72 möglichen visuellen Beobachtungen – als noch alle Pfähle vorhanden waren – haben erkennen lassen, daß wertvolle Daten für die Beurteilung anderer Untersuchungen gewonnen werden konnten.

An Brandungs- und Strandbeobachtungen wurden ausgeführt:

1971/72	144 Beobachtungen
1972/73	155 Beobachtungen
1973/74	153 Beobachtungen

### Zu 3. Wellenbefliegungen

Im Jahre 1972 waren bei verschiedenen Sturmweatherlagen Wellenbefliegungen möglich. Für die Auswertung wurden die Wellenregistrierungen mit dem 3fach-Schreiber (Ultraschallprinzip) herangezogen.

### Zu 4. Brandungsströmungsbeobachtungen

Im Sommer 1972 hat die Hubschrauber-Seenotstaffel der Bundeswehr im Rahmen einer Seenotübung Farbmarkierungen im Brandungsbereich abgeworfen, die nach Zeit und Weg verfolgt wurden. Eine Vielzahl von Brandungsstrommessungen im ufernahen Bereich wurde mit Hilfe eines Induktionsströmungs-Meßgerätes auch im Rahmen eines Forschungsvorhabens „Energieumwandlung in Brandungszonen“ durchgeführt und mit zur Auswertung herangezogen.

### Zu 5. Schwimmermessungen

Die Tafelkreuzschwimmer in besonders schweren Ausführungen haben sich als sehr windanfällig erwiesen, obwohl der Schwimmkörper nur 30 cm über die Wasseroberfläche herausragte, so daß es schwierig war, exakte Strömungsbahnen zu messen. Wegen der großen Zielweite war es nicht möglich, kleinere Auftriebskörper für diese Schwimmer zu verwenden. Deshalb wurden kleinere Schwimmkörper (sich kreuzende quadratische Tafeln von 0,50 m × 0,50 m mit hölzernen Auftriebskörpern) gefertigt, die von einem Boot verfolgt werden können, wobei für die Ortsbestimmung das den Schwimmer begleitende Boot eingemessen wird.

### Zu 6. Dauerstrommessungen

Versuche mit Schaufelrad-Dauerstrommessern im Sommer 1971 im Meßbereich haben nur wenige Ergebnisse geliefert, da diese Geräte anfällig gegen Seegang und Sandtrieb sind. Auch hat sich ihre Wartung als aufwendig herausgestellt. Ebenso erwies sich der Einsatz von Wattdauerstrommessern als sehr schwierig.

Für Strömungsmessungen (Tideströmungen und Winddriftströmungen an der Oberfläche) wurden vom MBA Husum Ende 1972 zwei Flügelmeßgeräte beschafft, die von festverankerten Booten einsetzbar waren. Auf den Meßpunkten wurde bei verschiedenen Wetterlagen die Strömung (Richtung und Geschwindigkeit) über eine volle Tide in zeitlichen Abständen von rd. 30 Min. in 5 Stufen über die Tiefe gemessen, und zwar gleichzeitig in der Rinne bzw. am Riff vor der Sandbühne und im Wellenmeßprofil.

Zwei weitere stationäre elektromagnetische Strömungsmeßgeräte lagen an den Stationen 225 m (in der Rinne zwischen Riff und Strand) sowie bei Station 940 m (am seeseitigen Riffhang) aus, und zwar so, daß das eine etwa die küstennormale und das zweite etwa die küstenparallele Komponente der Orbitalströmung registrierte. Diese Geräte liefen simultan mit den Wellenmessern nach einem gemeinsamen Meßprogramm.

### Zu 7. Wasserstandsmessungen

Der im Jahre 1971 am Strand vor *Westerland* erstellte Schreibpegel (Schwimmerprinzip) erbrachte nur unbefriedigende Ergebnisse (Einfluß der Brandung). Seine Wartung war schwierig, und das Rohr wurde im Winter 1971/72 zerstört. Aus diesen Gründen wurde ein Pegel nach dem Ultraschall-Prinzip beschafft und am äußersten Ende des Wellenmeßprofils aufgebaut. Die Meßdaten werden noch heute über ein Kabel in den Meßraum auf dem Bauhof übertragen. Das Gerät kann sowohl als Wasserstandsschreiber als auch als Wellenschreiber arbeiten.

### Zu 8. Wasserstandsbeobachtungen

An der Westseite der Insel Sylt vor *Hörnum*, *Rantum*, *Kampen* und *List* standen im Sommer 1972 einfache Pegellatten, die bei ruhiger Wetterlage über eine ganze Tide synoptisch abgelesen wurden, um Aufschluß über die Spiegelhöhendifferenzen längs des Weststrandes zu verschiedenen Tidephasen zu erhalten.

### Zu 9. Strandversatzbeobachtungen

Um aus den Geschwindigkeiten des Wassers in der Wellenauflaufzone auf die Verdriftung des Sandes zu schließen, wurden mit Wasser gefüllte Tischtennisbälle bzw. Wasserflaschen benutzt.

#### 3.1.2 Topographische und morphologische Messungen und Beobachtungen

Als sog. Bestandsaufnahme wurden im Jahre 1971 der trockene und nasse Strand (oberhalb der MTnw-Linie) tachymetrisch und der Vorstrand (unterhalb der MTnw-Linie) mit Hilfe von Lotungen vermessen und das Ergebnis in einem Tiefenplan im Maßstab 1 : 2500 dargestellt. Zusätzlich zu den Querprofilen wurden ab Sommer 1972 auch viele Längsprofile vermessen, um die Morphologie des Meeresbodens genauer erfassen zu können.

Der Ausgangszustand für die Sandvorspülung wurde mit der Peilung vom 21. 4. 1972 erfaßt. Es folgten zwei weitere Peilungen im Sommer 1972. Nach Beendigung der Sandvorspülung im Oktober 1972 führte das MBA Husum am 11. 10. 1972 eine Schlußpeilung aus. Danach konnten trotz des stürmischen Winters noch zwei Winterpeilungen am 20. 12.

1972 und am 13. 3. 1973 angestellt werden. Am 17. und 18. 5. 1973 wurde dann die große Frühjahrspeilung unternommen, die den ersten Aufschluß gab, wie weit sich die Sandmengen nach Norden und Süden ausgebreitet haben. Zusätzlich waren 1973 noch zwei weitere Peilungen möglich. Die letzte für die Beurteilung benutzte Peilung fand am 28. 2./1. 3. 1974 statt, d. h., es wurde der Einfluß der Sturmflutkette von November/Dezember 1973 erfaßt.

Der Strandbereich der Sandbuhne wurde während der Vorspülung täglich einmal zur Niedrigwasserzeit vermessen und bei ruhigen Wetterlagen durch Peilungen des Unterwasserbereiches ergänzt. Um die Massen der in der Vorspülung jeweils enthaltenen Sandmengen vergleichen zu können, wurden ein Längsprofil in der Achse der Vorspülung und dazu Querprofile ständig eingemessen und in einem Lageplan im Maßstab 1 : 1000 dargestellt.

Ergänzt wurden diese Messungen durch Strandaufnahmen, z. T. vom Dach des mittleren Hochhauses in *Westerland*. Die Häufigkeit der Aufnahmen während der Vorspülung richtete sich nach dem Umfang der Veränderungen an der Sandbuhne.

### 3.1.3 Sedimentologische Untersuchungen

Die geologischen Untersuchungen von Mai 1971 bis Ende 1973 sollten Aussagen über die Wechselwirkung zwischen dem eingespülten Sandkörper und den wirksamen Kräften ermöglichen. Die im Teilgutachten A vorgeschlagenen Arbeiten wurden in vollem Umfange ausgeführt und dort, wo es sich aus dem Gang der Untersuchungen als ratsam erwies, ergänzt.

Die Untersuchungen gliederten sich in:

1. Oberflächenproben vom Strand und Vorstrand
2. Gefügeuntersuchungen
3. Leitstoffmessungen

#### Zu 1. Oberflächenproben vom Strand und Vorstrand

Zur Bestandsaufnahme vor Beginn der Vorspülung wurden im Jahre 1971 etwa 950 Oberflächenproben vom Strand und Vorstrand von Hand oder mit Backengreifern genommen und analysiert. Während der Vorspülung 1972 folgte eine Vergleichsserie ähnlichen Umfangs und 1973 eine Bestandsaufnahme nach der Vorspülung. Feldgeologische Beobachtungen begleiteten 1972 den Einspülvorgang, wobei die Sortierung des Spülgutes durch Probenentnahme in einem Rasternetz bestimmt wurde.

Am Strand wurden 1-3 Proben je Profil aus den oberen 5 cm des Sandes entnommen. Die Proben aus dem Seebereich barg ein Van-Veen-Greifer von Bord des Schlepp- und Vermessungsschiffes „Oland“ des MBA Husum. Die Entnahmepunkte konnten nicht an der Morphologie orientiert werden, da Tidenströmungen und Wind die Manövrierfähigkeit des Schiffes stark behinderten. Diesen Nachteil glich ein sehr enges Probenetz aus. Die Greiferproben lagen im Abstand von 50 m. Es wurde angestrebt, die Proben möglichst aus den Profilen zu entnehmen. Das Trockengewicht betrug etwa 2 kg/Probe.

Folgende Proben sind entnommen worden:

946 Greiferproben	vom 14. 6.-19. 9. 1971
944 Greiferproben	vom 18. 7.-4. 10. 1972
269 Bühnenstrandproben	16./17. 1. 1973
(im Strandbereich der Vorspülung	am 27. 2. 1973
zwischen den Profilen 26 und 35)	am 18. 4. 1973
855 Greiferproben	vom 22. 5.-29. 6. 1973

## Zu 2. Gefügeuntersuchungen

Um den Aufbau der Schichtenfolgen und die Gefüge zu bestimmen, konnten die ersten Kerne mit dem Vibrocoper 1971 vom Schlepp- und Vermessungsschiff „Oland“ gezogen werden. Das Vibrokammer-Kerngerät wurde 1972/73 wegen der besseren Eignung des Schiffes von Bord des Hilfstonnenlegers „Hildegard“ eingesetzt. Die hier verwendeten Kernkästen hatten einen Querschnitt von  $10 \times 10$  cm und eine Länge von 2 m oder 3 m.

Nach Abschluß der Vorspülarbeiten wurden noch folgende Kerne gezogen:

16 Vibrocoperkerne am 9. 10. 1972

31 Vibrocoperkerne am 26. und 27. 9. 1973

## Zu 3. Leitstoffmessungen

Die im Herbst 1970 ausgebrachten radioaktiven Leitstoffe wurden im Mai/Juni 1971 mit neu entwickelten Meßgeräten und nach einem neuen Verfahren weiter verfolgt. Infolge des Verfalls der Isotopen und der starken Ausbreitung und Vermischung des markierten Sandes wurden auf weitere Messungen der 1970 ausgebrachten Aktivität verzichtet.

Zur Beobachtung der Ausbreitung des Sandes wurden 1970 außerdem Luminophoren (lumineszent markierter Seesand) eingesetzt. Der Vorteil ist, daß für dieses Meßverfahren kein speziell geschultes Personal erforderlich ist und sich bei der Analyse außerdem ein zweifaches Meßergebnis ergibt, nämlich Siebanalysen und Luminophorenauszählung.

## 3.2 Untersuchungsergebnisse

### 3.2.1 Wasserstände

Weil Messungen der Wasserstände im Untersuchungsbereich vor Westerland nicht für den gesamten Untersuchungszeitraum vorliegen, wird für die folgenden Betrachtungen der Pegel Hörnum/Sylt herangezogen.

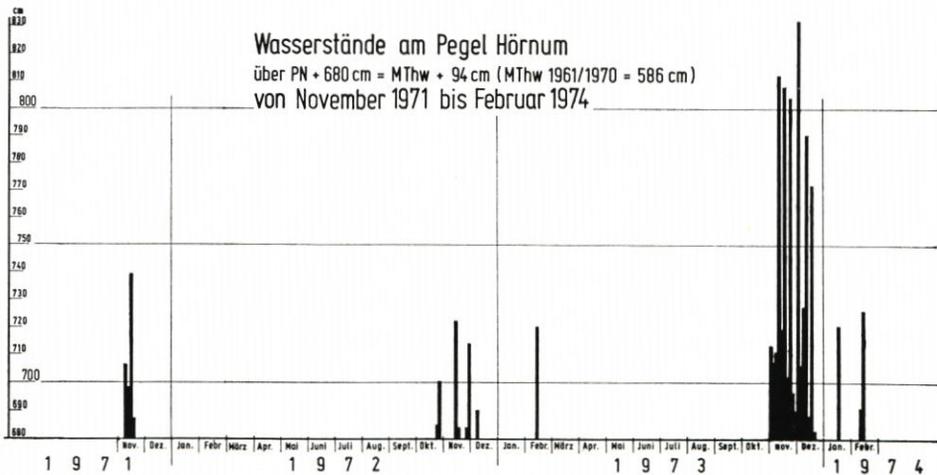


Abb. 5

Am Pegel Hörnum/Sylt ist für die 10-Jahres-Reihe 1961/70 für das mittlere Tidehochwasser (MThw) ein Wert von 586 cm PN (Winter 583 cm und Sommer 588 cm) ermittelt worden. Während im Jahre 1972 das MThw noch unter den vorgenannten

Mittelwerten war, lagen sie in den Jahren 1973 und 1974 bereits darüber. Aber auch der Winter 1972/73 kann als verhältnismäßig ruhig angesehen werden. Um die Halbjahre im Untersuchungszeitraum besser vergleichen zu können, wurden das mittlere höchste Tidehochwasser (MHTw) und das höchste Tidehochwasser (HTw) ausgewählt. In der Zeit von November 1971 bis April 1974 sind folgende Werte in cm PN eingetreten:

	1972			1973			1974		
	Jahr	Wi.	So.	Jahr	Wi.	So.	Jahr	Wi.	So.
MThw	577	573	582	587	591	583	—	592	—
MHTw	653	666	639	657	675	639	—	724	—
HThw	739	739	700	722	722	679	—	832	—

Aus der vorstehenden Tabelle ist zu entnehmen, daß die Wasserstände des Winters 1973/74 außergewöhnlich hoch waren, was auf die Sturmweatherlagen im November/Dezember 1973 zurückzuführen ist. In dieser Zeit trat eine Serie von Sturmfluten auf, bei der der Wasserstand am Pegel Hörnum/Sylt 17mal das mittlere Tidehochwasser um 1 m, davon 6mal um 1,5 m und 5mal um 2 m überstieg; Erhöhungen von 0,5 m und mehr traten 39mal auf. Das Übergewicht der hohen Wasserstände im November/Dezember 1973 verdeutlicht die Wasserstandsgraphik (Abb. 5).

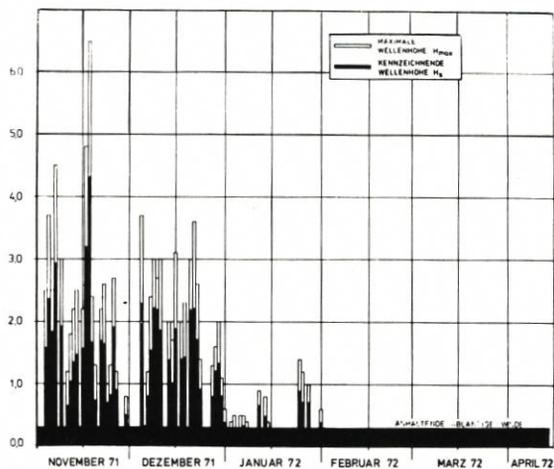
### 3.2.2 Wellenklima im Winter 1973/74

Entsprechend den erhöhten Wasserständen war auch der Seegang beachtlich. Die Abbildung 6 zeigt die signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  und die gemessenen maximalen Wellenhöhen  $H_{max}$  der Winter 1971/72, 1972/73 gegenüber denen des Sturmflutwinters 1973/74. Es handelt sich um den ankommenden Seegang auf dem seeseitigen Riffhang mit einer Sohlentiefe von NN — 8,5 m, der mit einem Echolotpegel registriert wurde. Die signifikante Wellenhöhe von 1 m wurde im Winter 1973/74 an 56 Tagen, die von 2 m an 31 Tagen und die von 4 m an 4 Tagen überschritten. An einem Tag (19. 11. 1973) erreichte die signifikante Wellenhöhe sogar 5 m; die höchste Welle wurde an diesem Tage mit 7,2 m gemessen. Dabei können noch höhere Wellen aufgetreten sein; durch die beschränkte Meßdauer (i. allg. 15 Min.) und auch durch zeitweiligen Geräteausfall konnten diese Wellen nur nicht erfaßt werden.

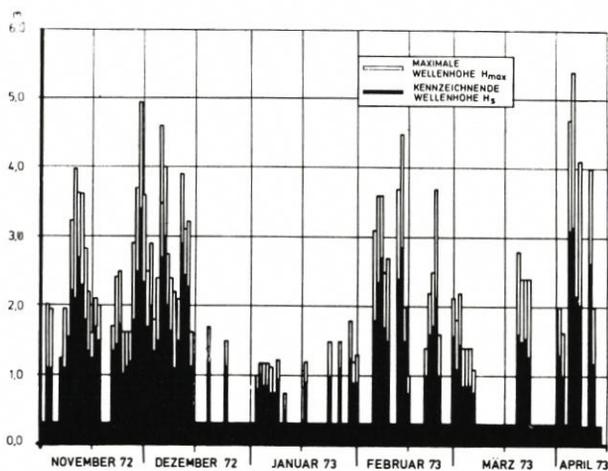
Über die Entwicklung dieser Sturmfluten sowie über Zusammenhänge zwischen der Brandungsströmung und der Energieumwandlung in der Brandungszone ist weiteres bei DETTE (1974b) beschrieben; die Orbitalströmungen werden gesondert von BÜSCHING (1974) behandelt.

Für die Beurteilung der hydrologischen Wirksamkeit eines Winterhalbjahres ist eine Wellenstatistik (Abb. 6) besser als eine Windstatistik geeignet, weil die Erfahrung gezeigt hat, daß zumindest die Korrelation zwischen der örtlichen Windgeschwindigkeit in *Westerland/Sylt* und dem anlaufenden Seegang nur bedingt vorhanden ist.

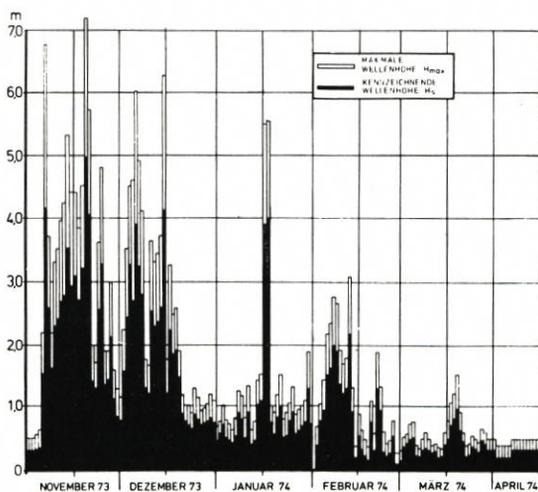
Wird aus den gemessenen Wellen, z. B. nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE, die Seegangleistung berechnet (FÜHRBÖTER, 1974a), die auf 1 m Uferlänge abgegeben wird, so ergibt die Integration dieser Leistungsbeträge über einen bestimmten Zeitraum die Energie, die vom Seegang in dieser Zeit auf 1 m Küstenlänge umgesetzt wurde. Wird diese Energie auf Kilowattstunden umgerechnet, so lassen sich mit den Wellenhöhen folgende Kennzahlen für die Winterhalbjahre von 1971 bis 1974 errechnen:



1971 / 72



1972 / 73



1973 / 74

Abb. 6. Wellenklima vor Westerland/Sylt in den Winterhalbjahren von 1971 bis 1974

Winterhalbjahr	Energieabgabe in kWh/m
1971/72	5 400
1972/73	8 800
1973/74	12 300

Die Energieabgabe betrug also im Winter 1973/74 mehr als das Doppelte des Winters 1971/72.

Da diese Energien fast ausschließlich innerhalb der – verhältnismäßig schmalen – Brandungszonen umgesetzt werden, kann die Energieabgabe als ein unmittelbares Maß für die Wellenbelastung der Strände und Uferschutzwerke angesehen werden (FÜHRBÖTER, 1974a). Besser als die Auftragung der Wellenhöhen (Abb. 6) geben diese Energiekennzahlen in kWh/m Uferlänge für einen bestimmten Zeitraum ein quantitatives Maß für die Stärke der Seegangbelastung, das überdies einen unmittelbaren Vergleich aller Küsten erlaubt.

### 3.2.3 Veränderungen in der Strandmorphologie

Die Entwicklung der Strandmorphologie vor *Westerland/Sylt* (Abb. 7) von 1953 bis 1974 wurde nach Tiefenplänen dargestellt. Sie umfassen eine rd. 1,7 km lange Uferstrecke vor dem Zentralbereich der Schutzwerke.

Der Vergleich der Zustände vom 19. 5. 1953 und vom 21. 4. 1972 zeigt den Strandrückgang in 19 Jahren. Die Vermessungen vom 11. 10. 1972, vom 20. 12. 1972 und vom 13. 3. 1973 legen dar, wie der vorgespülte buhnenartige Sandkörper in den ersten 2 Monaten in ein flaches Höft umgewandelt wird und diese Gestalt bis zum 13. 3. 1973 annähernd beibehält; auch der Zustand am 17. 5. 1973 unterscheidet sich kaum von den beiden vorigen (Abb. 7).

Dagegen zeigt der Zustand vom 28. 2. 1974 eine deutliche Vertiefung der Rinne, die im ganzen stärker ausgeprägt ist. Das gleiche gilt auch für das Riff, das schmaler aber höher geworden ist und seawärts verschoben wurde. Das Sandhöft ist zwar etwas zurückgegangen, hat aber im Unterwasserbereich seine Form im wesentlichen bewahrt. Der Vergleich mit dem Zustand vom 21. 4. 1972, vor der Aufspülung, zeigt einen flachen Unterwasserstrand unterhalb  $\text{NN} \pm 0$  m, wobei die Strandneigung in diesem Bereich sogar noch wesentlich flacher als am 19. 5. 1953 ist. Besonders anschaulich ist die Strandentwicklung in der Sandbuhnenachse sowie in den Profilen 0,5 km und 1,0 km südlich und nördlich davon, vom Ausgangszustand bis zur Aufmessung am 28. 2. 1974 (Abb. 8), zu erkennen.

Da der Schwerpunkt der Energieabgabe der Brandung sowohl bei normalem Dünungsseegang als auch bei Sturmfluten im Höhenbereich unter  $\text{NN} \pm 0$  m liegt, bedeutet auch das abgeflachte Sandhöft nach dem Aufmaß vom 28. 2. 1974 weiterhin einen wirksamen Schutz für die Längswerke.

### 3.2.4 Sedimentologie

#### 3.2.4.1 Allgemeines

Das 9 km lange (Abb. 4) und 1 km breite Untersuchungsgebiet zeigt eine charakteristische, natürliche Gliederung.

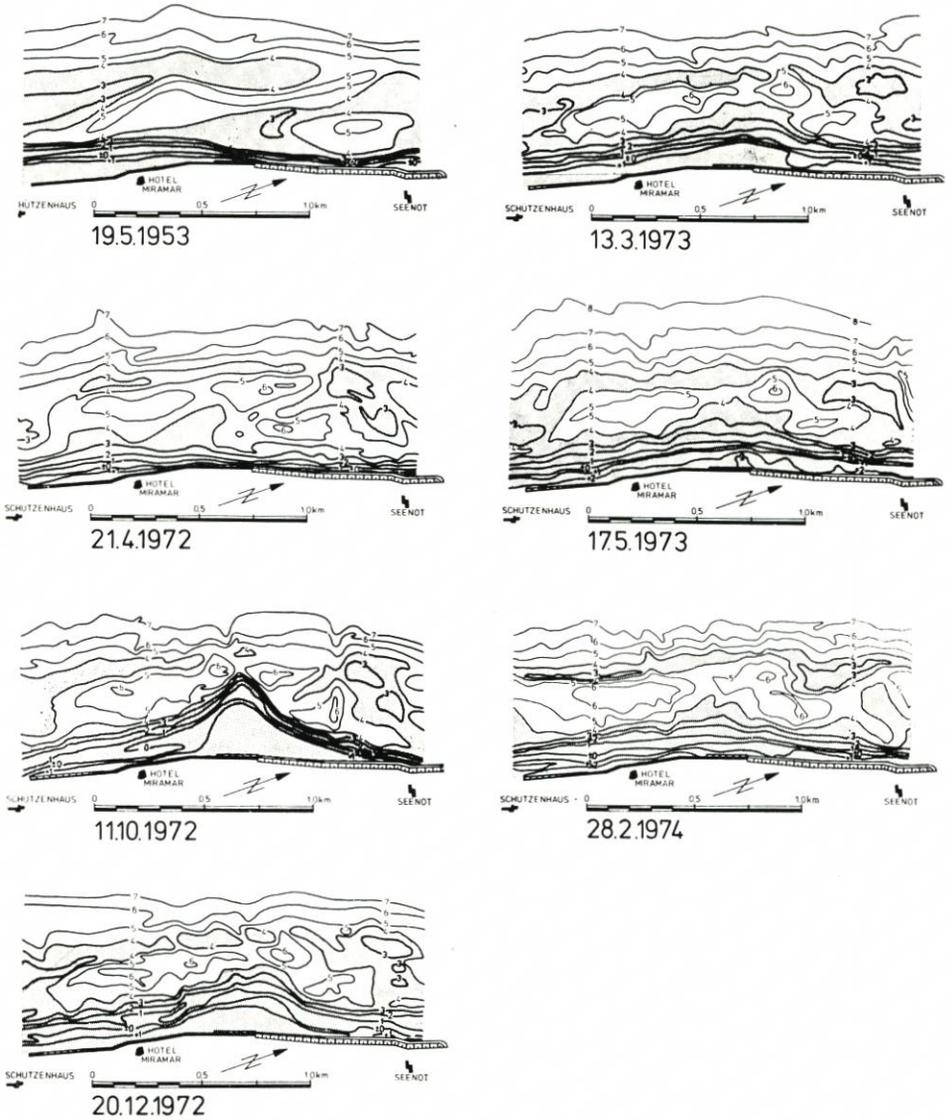


Abb. 7. Entwicklung der Strandmorphologie vor Westerland/Sylt

Küstenparallel unterschied NACHTIGALL (1968) vor Sylt drei Bereiche:

- a) den Strand vor Düne, Kliff oder Deckwerken bis zur  $NN \pm 0,0$  m-Linie,
- b) den Vorstrand mit Rinnenzone und Riff und
- c) den Seegrund.

Senkrecht zur Insel (Nord-Süd-Richtung) ist ebenfalls eine Dreiteilung vorhanden:

- a) die Riffzone im Übergangsbereich zur Südhalbinsel (Profil 1-13),
- b) die exponierte Zone vor Westerland mit der Umbiegung der Küstenlinie (Profil 14-37) und
- c) die Riffzone im Übergangsbereich zur Nordhalbinsel (Profil 38-57).



In diesem Untersuchungsgebiet wurden vor, während und nach der Vorspülung Proben entnommen. Die Darstellung der Ergebnisse beruht auf dem Bericht „Untersuchung zur Sandvorspülung vor Westerland/Sylt – Geologie“ von H. KIRCHNER und wird durch Ergebnisse aus Arbeiten im Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft ergänzt.

### 3.2.4.2 Eigenschaften der Sedimente

Der holozäne Meeressand vor *Sylt* leitet sich durch Umlagerung und Transport von zwei deutlich verschiedenen Ausgangsmaterialien ab, die eine Unterscheidung nach der Herkunft ermöglichen. Diese Ausgangsmaterialien sind Kaolinsand und Geschiebemergel. Beide sind im *Roten Kliff* aufgeschlossen und kommen in erheblicher Verbreitung am Seegrund an der Basis des holozänen Meeressandes vor.

Der Kaolinsand ist ein fluviatiles Sediment aus dem jüngsten Tertiär (Pliozän). Die Mächtigkeit beträgt bis etwa 80 m. Die Korngrößen des gut geschichteten Materials reichen von Ton bis zu Steinen. Ein charakteristischer Bestandteil der Grobfraktionen sind Milchquarze. Die feinen Körner sind verhältnismäßig schlecht gerundet. Der Schwermineralgehalt beträgt 1–6 ‰.

Der Geschiebemergel ist demgegenüber eine eiszeitliche Gletscherablagerung mit allen Korngrößen von Ton bis zu metergroßen Blöcken in unregelmäßiger Verteilung. Für die Grobfraktionen ist Feuerstein charakteristisch. Die Quarzkörner haben durch Eisenoxydbelag einen bräunlichen Schimmer. Der Schwermineralgehalt beträgt 0,1 bis 1 ‰.

Der holozäne Meeressand ist ein Gemisch aus beiden Ausgangsmaterialien und aus diesen durch Abtragung, Umlagerung, Sortierung, Transport und Wiederablagerung im Meer und am Strand entstanden. Er besteht aus Komponenten von Kaolinsand und Geschiebemergel in wechselnden Mischungsverhältnissen. Milchquarz und Feuerstein kommen nebeneinander vor. Die feineren Fraktionen enthalten neben Quarz und anderen Leichtmineralien im Mittel 0,8 ‰ Schwerminerale. Örtlich können jedoch durch Anreicherung in Auswaschungszonen viel höhere Schwermineralkonzentrationen auftreten.

### 3.2.4.3 Bestandsaufnahme vor der Vorspülung

In der Zeit vom 14. 6. bis 19. 9. 1971 wurden 946 Oberflächenproben entnommen (Abb. 4). Die Bestimmung der Korngrößen durch Siebanalysen erfolgte im Labor des ALW Husum in Westerland, alle weiteren Arbeiten wurden im Geologischen Institut der Universität Kiel durchgeführt. Die Ergebnisse sind in einem Kartensatz über die Sedimentverteilung (Medianwert, Feinsandgehalt, Mittelsandgehalt und Grobsandgehalt) im Bericht von KIRCHNER zusammengefaßt.

In der Sedimentverteilung zeichnen sich zwei deutlich zu unterscheidende Bereiche ab:

- a) der Seegrund mit etwa küstennormal angeordneten Sedimentzonen und
- b) der Vorstrand und Strand mit einer küstenparallelen Sedimentverteilung.

Eine Übersicht nach den Untersuchungen zur Sandvorspülung und den Arbeiten im Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ findet sich in Abbildung 9.

Die Sedimentzonen des Seegrundes sind auf Grund der Untersuchungen im Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ (Probenserie 1968/69) als ein Wechsel zwischen küstennormalen Anhäufungen von Wandersand und Auswaschungszonen als Folge eines

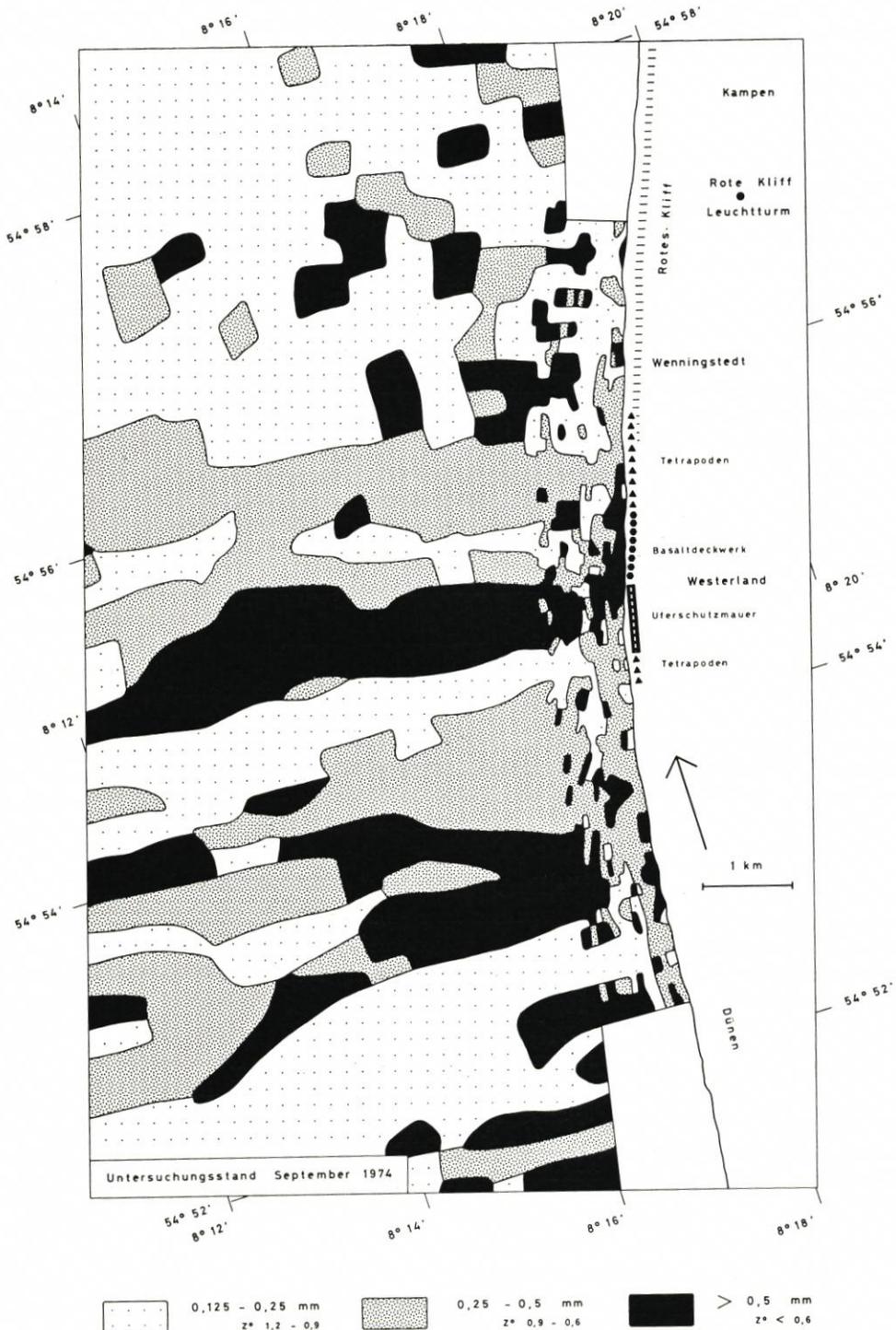


Abb. 9. Medianwerte vor der Mitte von Sylt nach Probenentnahmen 1968 bis 1971

in erster Linie von den Gezeitenströmungen bestimmten S-N bis SW-NO gerichteten Versatzes gedeutet worden (KÖSTER, 1974). Diese Zonen reichen mit landwärts abnehmender Deutlichkeit in das Probenfeld der Untersuchungen zur Sandvorspülung hinein.

Die küstenparallele Sedimentverteilung von Vorstrand und Strand ist dagegen sehr wechselhaft und engräumig. Trotzdem zeichnen sich einige allgemeine Tendenzen ab.

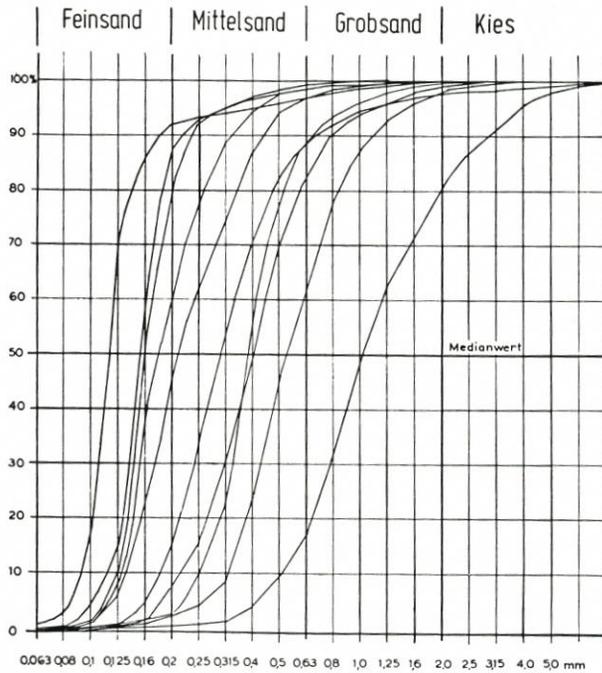


Abb. 10. Summenkurven aus dem Vorstrandbereich

Oberhalb NN — 5,5 m sind alle Korngrößen mit Ausnahme des feinsten Materials vertreten. Unterhalb NN — 5,5 m herrschen dagegen auf dem Seegrund Feinsande mit Medianwerten zwischen 0,125 mm und 0,2 mm und gröbere Sande mit Medianwerten zwischen 0,315 mm und 0,8 mm vor. Typische Summenkurven sind in der Abbildung 10 wiedergegeben.

Das feine Material stellt typische Wandersande dar, das grobe überwiegend Restsedimente. Im Bereich des Vorstrandes wird das Bild dagegen von Mischsedimenten bestimmt, die Fein-, Mittel- und Grobsande in stark wechselnden Mischungsverhältnissen enthalten. Im Bereich vor der exponierten Zone vor *Westerland* mit den Uferschutzanlagen und an einigen anderen Stellen überwiegen allgemein Restsedimente.

Dieses Bild wird durch den mit abnehmender Wassertiefe zunehmenden Einfluß der Wellenbewegung und schließlich der Brandung gedeutet, die über den Brandungslängsstrom zu einem starken küstenparallelen Sandversatz führt. Die Übergangzone von vorherrschender Wirkung der Gezeitenströme bis zu vorherrschender Wirkung der Brandung reicht von 5 bis 6 km Uferentfernung bei 12 bis 14 m Wassertiefe (KÖSTER, 1974) bis etwa NN — 6 m am seeseitigen Riffhang. Oberhalb dieser Grenze herrschen im Vorstrandbereich Brandungslängsströme mit mehreren Transportzonen, die in Richtung und Intensität von den Vorgängen am Seegrund weitgehend unabhängig sind.

Eine ausgeprägte Transportzone liegt im Bereich des Brandungslängsstromes vor dem Strand, eine zweite am seeseitigen Riffhang. Letztere wird wirksam, wenn Wellen über 4 m  $H_{\max}$  auf dem Riff branden (DETTE, 1974b). Dann dürfte die Sedimentumlagerung dort größer als vor dem Strand sein. Andererseits sind die entsprechenden Wetterlagen seltener, so daß die Transportzone vor dem Strand über längere Zeit größere Bedeutung hat. Der Transport zwischen den beiden Zonen ist schwächer.

#### 3.2.4.4 Veränderungen der Sedimentverteilung bis 1973 außerhalb des Einflußbereiches der Sandvorspülung

Die Probenserien aus den Jahren 1972 und 1973 zeigen die gleichen Grundzüge der Materialverteilung. Die Strukturen blieben unverändert, die Einzelheiten zeigten dagegen deutliche Verschiebungen.

Eine vergleichende Probenentnahme in einem größeren Gebiet vor der Mitte von *Sylt* im Rahmen des Schwerpunktes „Sandbewegung im Küstenraum“ aus dem Jahre 1972 (Juni und August) erbrachte für den Seegrund im allgemeinen eine deutliche Zunahme des Feinsandgehaltes in allen Zonen, so daß mit einer nach 1968/69 eingetretenen Überlagerung durch eine dünne Decke von Wandersand zu rechnen ist. Diese Feinsandmassen können mengenmäßig nicht von der gleichzeitigen Sandvorspülung hergeleitet werden.

Im Untersuchungsgebiet zur Sandvorspülung wurden vom 18. 7. bis 14. 10. 1972 944 und vom 22. 5. bis 29. 6. 1973 855 Oberflächenproben entnommen. Für die Bearbeitung gelten die Ausführungen unter 3.2.4.3. Im Bericht KIRCHNER sind die Vergleichsdaten für alle 57 Profile in Diagrammen dargestellt und beschrieben worden.

Daraus ergibt sich ein vielfacher Wechsel von Auswaschungen mit Bildung von Restsedimenten einerseits und Zunahme des Wandersandgehaltes durch Antransport und Ablagerung von Feinsand andererseits, ohne daß bei aller Intensität der Veränderungen und trotz deutlicher Verschiebung von Kennziffern die grundsätzlichen Züge umgestaltet worden wären.

#### 3.2.4.5 Vibrocorerkerne

Die Aussagen der Oberflächenproben werden durch bis zu 3 m lange Kerne ergänzt. Am 9. 10. 1972 konnten 16 und am 26./27. 9. 1973 31 Vibrocorerkerne entnommen werden, insgesamt 47 Kerne. Zu jedem Kern ist im Bericht von KIRCHNER ein Diagramm mit der Schichtfolge und den wichtigsten Sedimentkennziffern wiedergegeben.

Die Mächtigkeit des Holozäns ist sehr unterschiedlich. Die Holozänbasis konnte nur in verhältnismäßig wenigen Kernen erreicht werden und wird hier fast stets von Kaolinsand gebildet.

Profil 6,	Rinne (Kern 6/1/72): 185 cm Holozän über Torf unbekanntes Alters
Profil 12,	Übergangsrücken (Kern 12/3/72): 232 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 20,	seeseitiger Riffhang (Kern 20/2/73): 93 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 31,	seeseitiger Riffhang (Kern 31/1/72): 135 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 31,	Seegrund (Kern 31/3/72): 45 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 35,	Rinne (Kern 35/5/73): 93 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 40,	Übergangsrücken (Kern 40/1/72): 153 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 40,	Übergangsrücken (Kern 40/3/72): 83 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 41,	Seegrund (Kern 41/1/72): 31 cm Holozän über Kaolinsand
Profil 42,	Seegrund (Kern 42/2/73): 90 cm Holozän über Kaolinsand

In Verbindung mit den Vermessungsdaten ergibt sich, daß sich diese Mächtigkeitsangaben in kurzer Zeit erheblich ändern können. Das gesamte Untersuchungsgebiet wird von starken Umlagerungen beherrscht.

Die Schichtfolgen zeigen sehr wechselvolle Sedimentationsbedingungen, wobei die an den Oberflächenproben erkannte Gliederung in dem vielfältigen Materialwechsel der Kerne nicht wiedergefunden werden konnte. Allen Kernen ist jedoch gemeinsam, daß nach den Ergebnissen der Laborarbeit gut sortierte Feinsande nicht festgestellt werden konnten. Die wenigen Proben dieser Zusammensetzung stammen alle aus dem oberen Dezimeter der Profile, also aus dem mit dem Backengreifer erfaßbaren Bereich. Daraus ergibt sich, daß die in den Karten wiedergegebenen Feinsande hier nicht zur Ablagerung kommen, sondern durchwandern.

Ähnliche Schichtfolgen wurden auch bei den Arbeiten im Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ weiter seewärts angetroffen, und zwar stets in den stark erosiv beeinflussten Bereichen. Mächtigere Ansammlungen von Wandersand wurden dagegen in den ausgedehnten Feinsandfeldern und vor allem in den Wandersandrücken und vor den Barren vor dem *Vortrapptief* und dem *Lister Tief* unterhalb etwa NN — 7 m angetroffen.

#### 3.2.4.6 Einspülung des Kaolinsandes

Der Aufbau der Kornverteilung in dem Sandentnahmegebiet in der *Rantumer Bucht* ist im Gutachten des Geologischen Landesamtes Schleswig-Holstein, *Kornverteilung von Bohrproben für eine Sandvorspülung vor der Insel Sylt*, beschrieben worden. Die vorkommenden Korngrößen sind durch das diesem Gutachten entnommene Summenkurvenband der Bohrung VII gekennzeichnet (Abb. 11).

Am 16. 1., 17. 1., 27. 2. und 18. 4. 1973 sind im Strandbereich der Vorspülung zwischen den Profilen 26 und 35 insgesamt 269 Oberflächenproben entnommen worden. Den Proben ist gemeinsam, daß Korngrößen unter 0,2 mm und Medianwerte unter 0,25 mm kaum vorhanden sind (Abb. 12). Die Mehrzahl der Medianwerte liegt zwischen 0,315 und 0,425 mm, also in der gleichen Größenordnung wie bei Strandproben aus der Zeit vor der Vorspülung. Korngrößen unter 0,2 mm wurden ausgewaschen oder kamen von vornherein nicht zum Absetzen. Daraus ergeben sich auch die Mindestforderungen an die Kornverteilung von Sanden für künftige Vorspülungen:

Medianwert  $> 0,315$  mm und möglichst geringer Anteil von Feinsand  $< 0,2$  mm. Auch der Kiesanteil ( $> 2$  mm) war im Strandbereich der Vorspülung geringer, als es dem Material im Sandentnahmegebiet entsprach. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, daß Kieslagen wegen schlechter Spülfähigkeit bei der Materialentnahme möglichst vermieden wurden.

#### 3.2.4.7 Verteilung des eingespülten Kaolinsandes bis zum Sommer 1973

Während der Vorspülung der Sandbühne konnte beobachtet werden, daß sich die Spülsande bei ruhigem Wetter unter Wasser nahe am Fuß der Sandbühne absetzten. Bei Westwinden begann ein Abtransport durch den Brandungslängsstrom mit Auffüllung der Bühnenfelder im Norden und Süden. Der eingespülte Sand unterschied sich dabei durch die hellere Farbe des Kaolinsandes deutlich vom bräunlichen, holozänen Meeressand. Nach

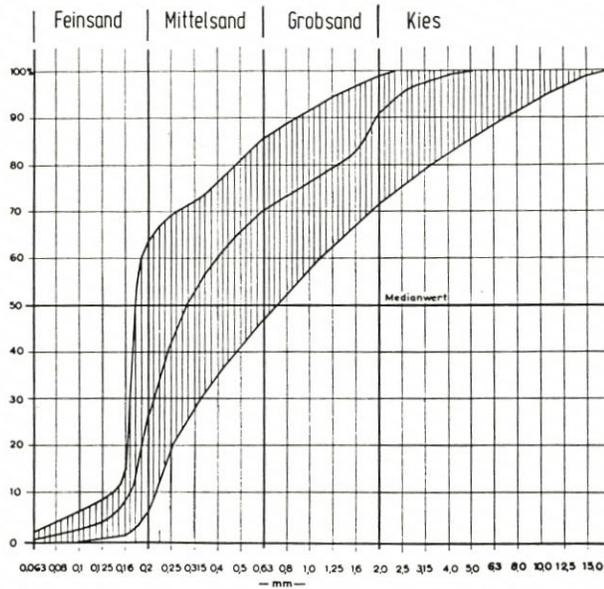


Abb. 11. Summenkurvenband des Sandentnahmegebietes der Sandvorspülung 1972

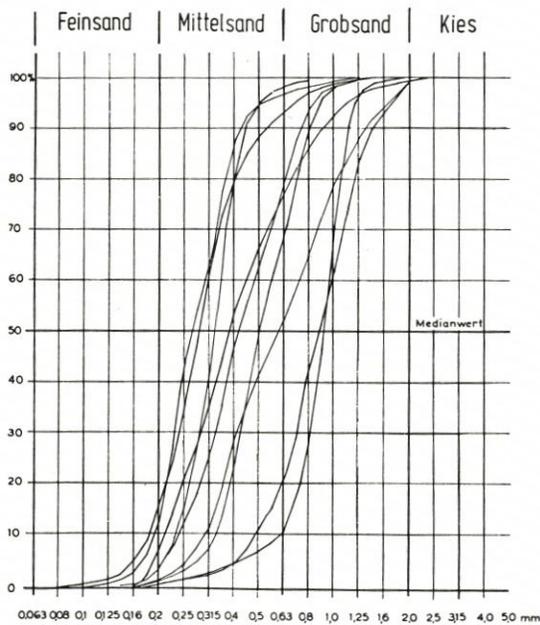


Abb. 12. Summenkurven der „Sandbühne“

den Feldbeobachtungen war die Verbreitung des eingespülten Kaolinsandes am Strand bis zum Sommer 1973 nach Süden bis zum Profil 22 und nach Norden bis zum Profil 38 zu beobachten.

Charakteristische Korngrößenunterschiede zwischen dem natürlichen Strand- und Meeressand sowie dem verteilten Spülsand bestehen nicht. Zur genaueren Bestimmung der Spülsandausbreitung, vor allem auch im Unterwasserbereich, wurden deshalb weitere Untersuchungen an den Sandfraktionen durchgeführt. Sie stützen sich auf zwei Eigenschaften des Kaolinsandes, die den Charakter von Naturtracern haben:

- a) hoher Anteil an Schwermineralien und
- b) schlecht gerundete Quarzkörner in den Feinfraktionen.

Da es sich bei dem natürlichen Material von Strand und Vorstrand um ein Mischsediment aus Geschiebemergel- und Kaolinsandkomponenten handelt, ist eine direkte Bestimmung des Einflusses des eingespülten Sandes nicht möglich. Vielmehr kann nur die Zunahme der Kaolinsandkomponenten der Probenserie 1973 gegenüber der Bestandsaufnahme vor der Vorspülung 1971 erfaßt werden.

Die Anwendbarkeit beider Methoden hat Grenzen. Der Schwermineralgehalt findet sich nahezu ausschließlich in den Korngrößen des Wandersandes und kann somit auch durch Schwankungen seines Anteiles und seiner Zusammensetzung beeinflusst werden. Weiter treten Änderungen des Schwermineralgehaltes durch Auswaschung von Leichtmineralien und damit relative Anreicherung der Schwerminerale auf. Ebenso finden sich schlecht gerundete Quarze aus dem Kaolinsand auch im Feinsandanteil des natürlichen Strandsandes. Eindeutig sind also nur Untersuchungsergebnisse, die eine klare Zunahme der Kaolinsandkomponenten aufzeigen. Mit zunehmender Verteilung des eingespülten Sandes verwischt sich seine Bestimmbarkeit.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen stellen Näherungswerte dar. Die kurze verfügbare Zeit hat die nähere Bearbeitung einiger damit verbundener methodischer Fragen nicht zugelassen. Durch deren Klärung hätten möglicherweise genauere Angaben erhalten werden können.

Zur Untersuchung der Schwerminerale wurde der Gehalt in Proben der Serien 1971 und 1973 im gesamten Arbeitsgebiet bestimmt. Der Anteil der Schwerminerale ist im Bericht von KIRCHNER angegeben.

Aus dem Schwermineralanteil 1971 ergibt sich für weite Teile des Vorstrandbereiches durchgehend ein geringerer Schwermineralgehalt als für den Seegrund. Die beiden verschiedenen Sedimentzonen zeichnen sich deutlich ab. Die Sandvorspülung mit dem höheren Gehalt des Kaolinsandes an Schwermineralien wirkt sich in der Probenserie 1973 nur im Vorstrandbereich der Profile 21 bis 35 aus. Hier ist der durchschnittliche Anteil so deutlich gestiegen, daß eine andere Erklärung entfallen muß.

Die zweite Methode mit der Bestimmung des zusätzlichen Kaolinsandanteiles über den Gehalt an schlecht gerundeten bzw. eckigen Quarzkörnern durch Vergleich der Probenserien 1971 und 1973 hat sich als das beste Hilfsmittel erwiesen, um die Verteilung des eingespülten Kaolinsandes zu verfolgen.

Die Vergleichsgrundlage ist durch die Probenserie 1971 vor der Sandvorspülung gegeben. Je Probe wurden 500 Körner bestimmt und daraus der Anteil eckiger Körner als Kaolinsandanzeiger berechnet. Damit wurde die Serie 1973 nach der Vorspülung verglichen. Die systematische Zählung konnte auf die Profile 20 bis 41 beschränkt werden, da weiter nördlich und südlich der Spülsandeinfluß so gering wurde, daß er sich bei den zur Zeit gegebenen methodischen Grundlagen von den Schwankungen im Zusammenhang mit den ständigen Umlagerungen nicht mehr eindeutig trennen läßt.

Die Verteilung des eingespülten Sandes (Abb. 13) verlief in erster Linie im Brandungslängsstrom des Strandes und des Riffs, also in den aus den Kornverteilungen abgeleiteten Transportbändern. Die Umlagerung in der Rinnenzone ist unterschiedlich stark und

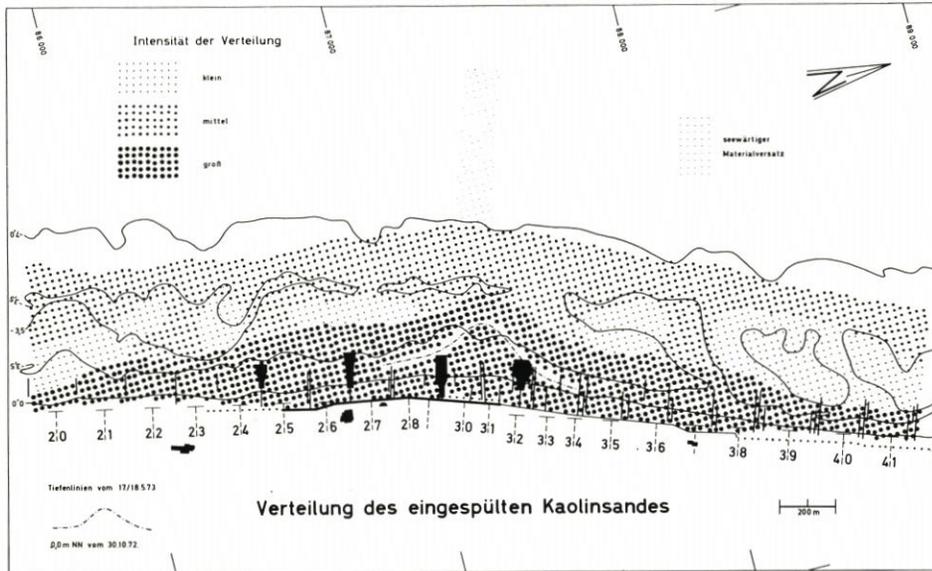


Abb. 13. Verteilung des eingespülten Kaolinsandes

im allgemeinen etwas geringer. Der Versatz ist nach Norden bis Profil 11 und nach Süden bis Profil 20 eindeutig nachweisbar. Eine weitere Ausbreitung ist wahrscheinlich. Die überwiegende Menge des eingespülten Kaolinsandes ist am Strand und im Vorstrandbereich verteilt worden.

An einigen Stellen reichen außerdem aus den Gebieten mit klarer Zunahme des Gehaltes an eckigen Körnern Zungen über den Vorstrand hinaus bis zum Seegrund. Mit einer Ausnahme könnten sie auch durch Schwankungen der natürlichen Zusammensetzung unabhängig von der Einspülung des Kaolinsandes erklärt werden. Im Profil 30 ist dies jedoch nicht mehr möglich. Hier ist die Zunahme deutlich größer als die der Methode anhaftenden Unsicherheiten. An dieser Stelle hat ein Materialtransport begrenzten Umfangs auch seewärts stattgefunden. Deshalb muß mit der Möglichkeit eines zeitweisen geringen Transportes durch seewärtige Bodenströmungen gerechnet werden. Relativ zur Transportleistung des Brandungslängsstromes sind diese Vorgänge jedoch von geringer Bedeutung.

Ähnliche Beobachtungen konnten bereits bei Untersuchungen mit radioaktiven Leitstoffen durch DOLEZAL, PETERSEN und REINHARD (1971) gemacht werden. Hier bestand jedoch die Möglichkeit einer Beeinflussung der Messungen durch Schwermineralanreicherungen mit geringer natürlicher Strahlung, deren Einfluß wegen zeitlich unterschiedlicher Bedeckung durch Wandersand mit Nullmessungen nicht voll zu kontrollieren war. Die neuen Beobachtungen machen jedoch auch hier eine Deutung im Sinne eines zeitweise vorhandenen seewärtigen Transportes wahrscheinlich.

### 3.3 Quantitative Änderungen des Sandvorrates

Die qualitativen Aussagen über die Entwicklung der Strandmorphologie und die Verteilung des eingespülten Materials vor den Schutzwerken vor *Westerland/Sylt* bedarf

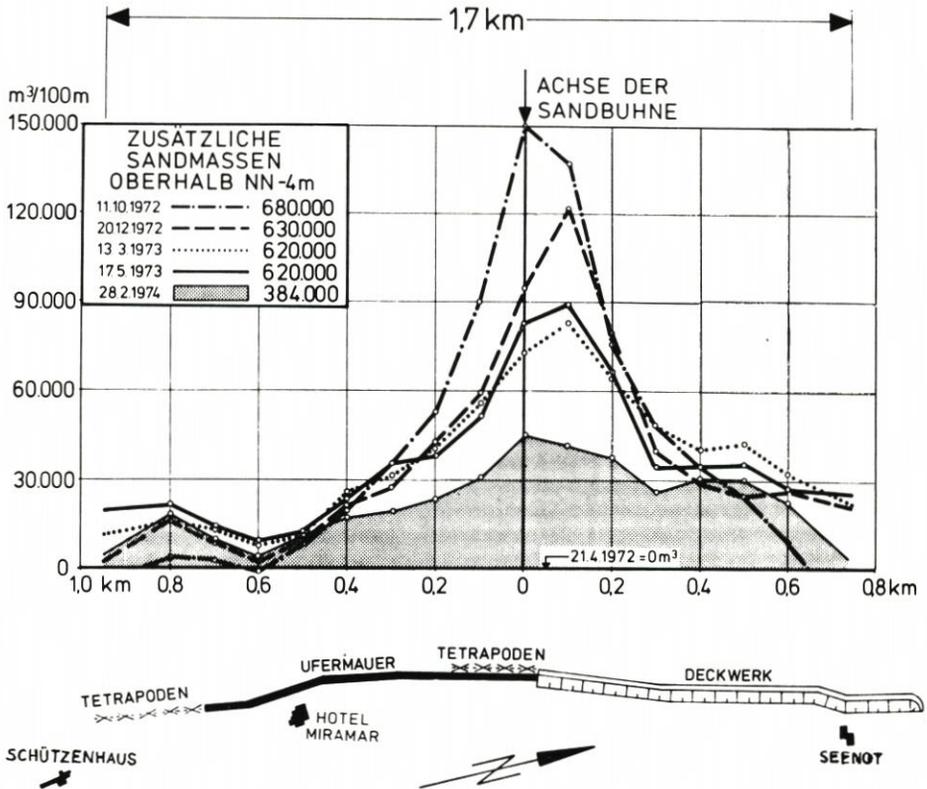


Abb. 14. Zusätzlicher Sandvorrat auf 1,7 km Uferlänge von 1972 bis 1974

für eine objektive Beurteilung einer quantitativen Ergänzung. Hierzu wurden die vom ALW Husum erarbeiteten Unterlagen im Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig mit einem Rechenprogramm ausgewertet. In diesen Auswertungen wurden die zusätzlichen Sandmengen bestimmt, die sich bei den Vermessungen nach der Fertigstellung der Sandbuhne in den einzelnen Uferabschnitten gegenüber den Nullzuständen befanden. Für den 1,7 km langen Uferbereich (Abb. 7) wurde dabei als Nullzustand die Morphologie vom 21. 4. 1972, für einen erweiterten Bereich von 8 km (je 4 km nördlich und südlich der Achse der Sandbuhne) die Morphologie vom 29. 7. 1971 gewählt. Beide Nullzustände entsprechen den letzten Gesamtaufmaßen dieser Gebiete vor dem Bau der Sandbuhne.

Das Rechenprogramm wurde so ausgelegt, daß zunächst die Verteilung der Zusatzsandmengen oberhalb der Tiefenlinie NN — 4 m in m³ je 100 m Uferlänge über den Uferstrecken von 1,7 km und 8,0 km ermittelt wurden. Durch Integration über die entsprechende Uferlänge wurde dann die gesamte Zusatzsandmasse bestimmt, die sich gegenüber den erwähnten Nullzuständen vor dem Bau der Sandbuhne vor der jeweiligen Uferstrecke befindet. Die Tiefenlinie NN — 4 m wurde deshalb gewählt, weil ungefähr bis zu dieser Tiefe das Brandungsgeschehen der Strandbrandung reicht und auch die Spitze der Sandbuhne nur wenig Massen unter dieser Linie ergibt. Die Ermittlung der Gesamtmasse nach dem Aufspülen der Sandbuhne ergab 680 000 m³ für den 11. 10. 1972 oberhalb der Tiefenlinie NN — 4 m gegenüber 698 000 m³ des Aufmaßes, das auch die Massen unterhalb NN — 4 m berücksichtigt.

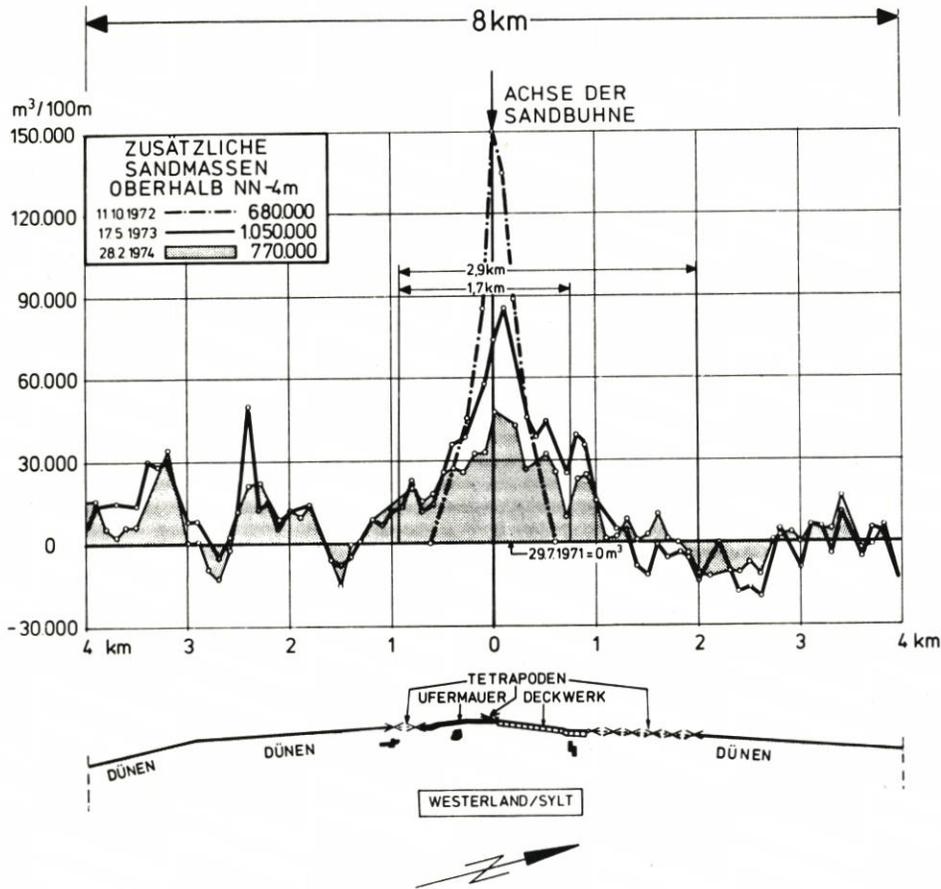


Abb. 15. Zusätzlicher Sandvorrat auf 8 km Uferlänge von 1972 bis 1974

Die Abbildung 14 zeigt für die einzelnen Zeitpunkte die Verteilung der Zusatzsandmengen auf der Uferstrecke von 1,7 km, Abbildung 15 die Verteilung auf der 8 km langen Uferstrecke mit der Sandbuhne (Station 0) in der Mitte.

Die erwähnte schnelle Umbildung der Sandbuhne in ein flaches Sandhöft (Abb. 7) geht auch aus den Abbildungen 14 und 15 hervor. Mit dem Abbau der Spitze der Sandbuhne (Erosion) gehen Anlandungen in den seitlichen Bereichen der Sandbuhne einher (Sedimentation). Die Abbildung 14 zeigt, daß diese Wirkung über die Grenzen des 1,7 km langen Uferabschnittes reicht.

Auffällig ist die geringe Neigung zur Anlandung bei Station - 0,6 km. Refraktionspläne zeigen, daß hier durch die Riffmorphologie eine Konzentration der Wellenenergie gegenüber den Nachbarstrecken stattfindet.

Nach dem Sturmflutwinter 1973/74 ist der ursprünglich auf einen Uferabschnitt von nur etwa 1 km beschränkte Sandvorrat der Sandbuhne auf mehr als 3 km verteilt worden (Abb. 15). An den Grenzen dieses Abschnittes traten durch Lee-Erosionen an den Enden der Längswerke negative Bilanzen auf, aber an den weiteren Uferstrecken überwiegen wieder positive Entwicklungen.

Die zeitliche Entwicklung geht aus Abbildung 15 nicht so deutlich wie aus Abbildung

14 hervor, weil für den größeren Bereich von 8 km nicht so viele Peilungen durchgeführt werden konnten wie für den engeren Bereich von 1,7 km Länge.

Als gesamte zusätzliche Sandmassen ergeben sich für die beiden Uferabschnitte:

Aufmaß vom	Zusätzliche Sandmassen oberhalb NN - 4 m in m <sup>3</sup>	
	1,7 km	8 km
29. 7. 1971	}	0
21. 4. 1972		
11. 10. 1972	680 000	680 000
20. 12. 1972	630 000	
13. 3. 1973	620 000	
17. 5. 1973	620 000	1 050 000
28. 2. 1974	384 000	770 000

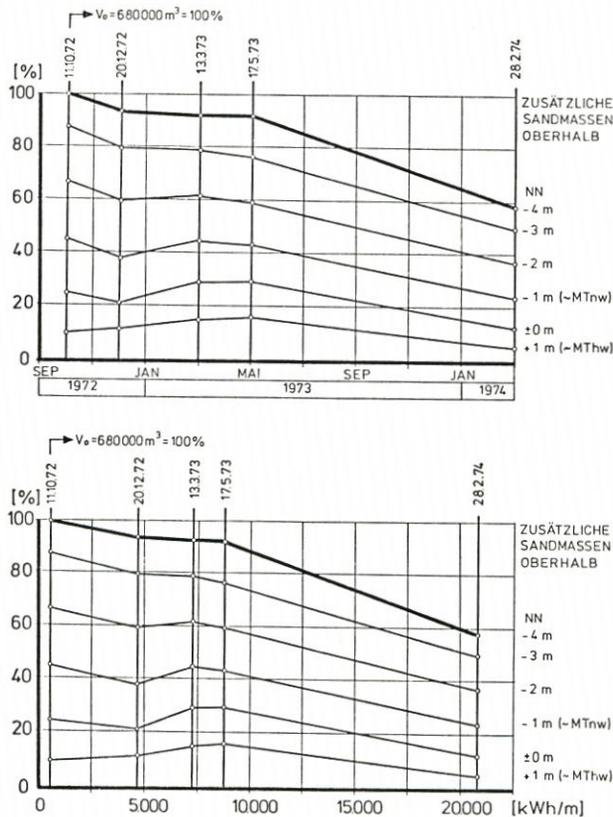


Abb. 16. Zusätzlicher Sandvorrat auf 1,7 km Uferlänge von 1972 bis 1974

Wird das für beide Uferabschnitte gültige ursprüngliche Ausgangsvolumen  $V_0 = 680\,000\text{ m}^3 = 100\%$  gesetzt und wird weiterhin das Rechenprogramm in der Art abgefragt, daß nicht nur die Zusatzsandmengen oberhalb der Tiefenlinie NN - 4 m, son-

dern auch die oberhalb NN — 3 m, NN — 2 m usw. bis NN + 1 m angegeben werden, so ergeben sich die zeitlichen Entwicklungen für die beiden Uferstrecken (Abb. 16 und 17). Auf diesen Abbildungen wurde neben dem linearen Zeitmaßstab für die Abszisse außerdem ein Maßstab verwendet, der dem Integral der Wellenleistung entspricht, also der gesamten Wellenenergie, die auf die Vorspülung gewirkt hat. Dieser verzerrte Maßstab entspricht wegen der starken Unterschiede in der zeitlichen Verteilung der Seegangsstärke besser dem morphologischen Geschehen als die lineare Auftragung der Zeit.

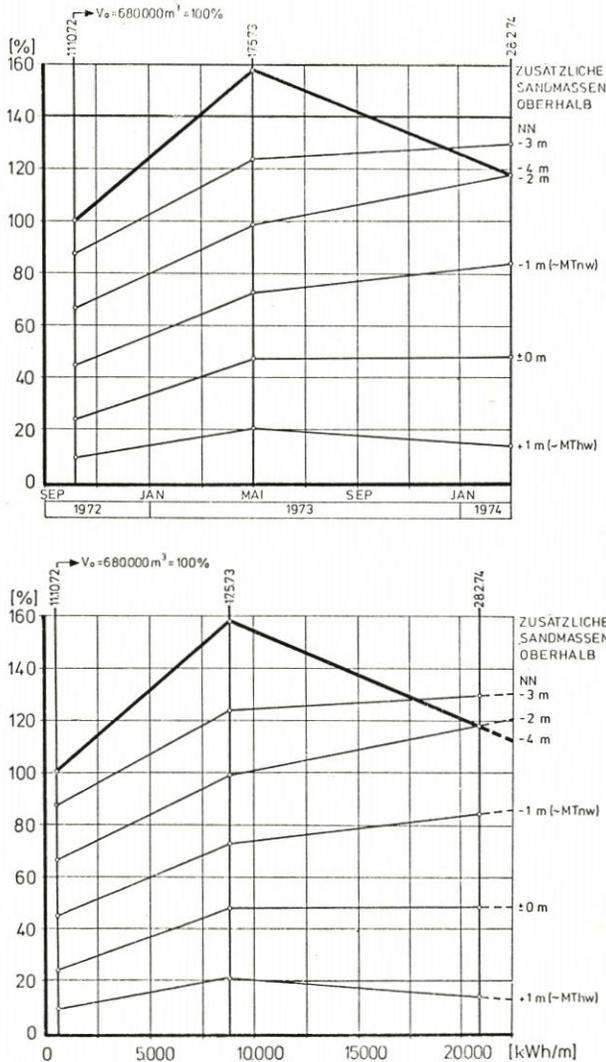


Abb. 17. Zusätzlicher Sandvorrat auf 8 km Uferlänge von 1972 bis 1974

Die Abbildung 16 verdeutlicht die aus Abbildung 14 hervorgehende Abnahme des Sandvorrates auf der 1,7 km langen Uferstrecke von 680 000 m<sup>3</sup> (11. 10. 1972) auf 384 000 m<sup>3</sup> (28. 2. 1974), wobei die stärkste Abnahme von 620 000 m<sup>3</sup> (17. 5. 1973) auf

384 000 m<sup>3</sup> (28. 2. 1974) in dem Zeitabschnitt mit der Sturmflutkette vom Herbst 1973 eintrat. Insgesamt sind oberhalb der Tiefenlinie NN — 4 m noch etwa 60 % der ursprünglichen Menge vorhanden (Abb. 16).

Für die Sandmassen oberhalb der höhergelegenen Horizonte (NN — 3 m usw.) ist während der Sturmperiode ebenfalls eine Abnahme der Zusatzsandmengen festzustellen. Bei den höhergelegenen Sandmassen fand aber zwischen Dezember 1972 und Mai 1973 zeitweilig eine Zunahme des Bestandes statt (Abb. 16), die mit der Bildung eines Sommerstrandes in Zusammenhang stehen dürfte.

Wie bereits erwähnt, ist der Uferabschnitt von 1,7 km Länge nicht repräsentativ für den Gesamtbereich der von der Vorspülung beeinflussten Uferabschnitte; dieses wird durch den wesentlich anderen Verlauf der zeitlichen Entwicklung des Sandvorrates auf der 8 km langen Uferstrecke bestätigt (Abb. 17).

Die Durchschneidung der Auftragung der Sandmassen oberhalb NN — 4,0 m mit denen oberhalb NN — 3,0 m und NN — 2,0 m auf Abbildung 17 ist darauf zurückzuführen, daß durch die starke Erweiterung der Rinne am Fuße des Vorstrandes starke Erosionen während der Sturmflutkette im Herbst 1973 auftraten, von denen die höhergelegenen Sandmassen nicht betroffen wurden.

Für die 8 km lange Uferstrecke ergibt sich für die Zeit vom 11. 10. 1972 bis zum 17. 5. 1973, also während des ersten Winters des Bestehens der Sandbühne, für die Sandvorräte über allen Horizonten eine Zunahme. Oberhalb der Tiefenlinie NN — 4,0 m trat dabei ein Anstieg auf nahezu 160 % ein (= 1 050 000 m<sup>3</sup>; 100 % = 680 000 m<sup>3</sup>); die Sandmasse oberhalb NN ± 0 m hat sich in diesem Zeitraum sogar verdoppelt (Abb. 17). Am auffälligsten aber ist, daß sich dieser Prozeß, wenn auch in geringerem Maße und mit Ausnahme der Massen oberhalb NN + 1,0 m und oberhalb NN — 4,0 m, auch in dem Zeitraum mit der Sturmflutkette (zwischen dem 17. 5. 1973 und dem 28. 2. 1974) fortsetzt. Trotz der Erosion durch die Rinne sind am 28. 2. 1974 oberhalb NN — 4,0 m mit 770 000 m<sup>3</sup> annähernd 120 % der Vorspülungen von 100 % (= 680 000 m<sup>3</sup>) vorhanden. Die Sandmenge oberhalb NN — 2,0 m, die am 11. 10. 1972 rd. 63 % der Aufspülmenge von 100 % oberhalb NN — 4,0 m betrug, hat sich bis zum 28. 2. 1974 ebenfalls auf fast 120 % der Aufspülmenge erhöht.

Die Abnahme der Massen oberhalb NN + 1,0 m ist mit Sicherheit außer durch Lee-Erosionen durch Dünenabbrüche verursacht, die im Zeitraum der Sturmflutkette auch einen Teil der Sandzunahmen über den übrigen Horizonten bewirkt haben mögen.

Im ganzen kann aber die Zunahme der Sandmassen über die Vorspülmenge hinaus, vor allem in zwei Wintern, die mit Wellenenergien von 8800 kWh/m und 12 300 kWh/m die des Vorwinters mit 5400 kWh/m weitaus überschritten, nicht als Zufall angesehen werden, zudem die 8 km lange Uferstrecke normalerweise im Abbruch liegt und durch die Sturmfluten eher eine verstärkte Erosion über das normale Maß hinaus als eine Sedimentation erwartet werden konnte.

Da im Zeitraum zwischen dem 11. 10. 1972 und dem 17. 5. 1973 keine Dünenabbrüche auftraten und die Zunahme der Sandbestände auch so stark ist, daß Meß- und Auswertefehler (Beschickung o. ä.) ausscheiden, ist es als sicher anzusehen, daß seitlich der Bühne außer dem Abbruchmaterial vom Kopf der Bühne zusätzlich zum Vorspülstrand sand aus dem natürlichen Küstenlängstransport durch die Veränderungen der Brandungsströmungen abgelagert wurde. Das bestätigten auch Beobachtungen, die seitlich des eigentlichen Bühnenkörpers aus weißem Kaolinsand Wechsellagerungen von braunem Strandsand und weißem Kaolinsand erkennen ließen.

Mit Abb. 17 wird also die Erwartung bestätigt, daß der Uferabschnitt vor *Sylt* durch

die Vorspülung Zusatzsandmengen erhält, die nicht allein aus der Vorspülung selbst bestehen, sondern außerdem durch Ablagerung natürlichen Strandmaterials gebildet werden.

Wenn auch diese positive Wirkung auf das großräumige Geschehen (Uferabschnitt von 8 km Länge) durchaus zu begrüßen ist, so muß doch berücksichtigt werden, daß für die Beurteilung der Wirkung der Vorspülung nur der Uferabschnitt von Interesse ist, wo durch die Sandvorlage der Fuß der Längswerke gesichert und diese selbst vor dem konzentrierten Angriff der Brandung geschützt werden sollen. Dieser Abschnitt ist etwa 2,9 km lang (vgl. Abb. 15); die Aufmaße ergaben hier folgende Werte:

Aufmaß vom	Zusätzliche Sandmassen vor dem Uferschutzwerk (Länge 2,9 km) oberhalb NN - 4 m in m <sup>3</sup>
29. 7. 1971	0
11. 10. 1972	680 000
17. 5. 1973	760 000
28. 2. 1974	540 000

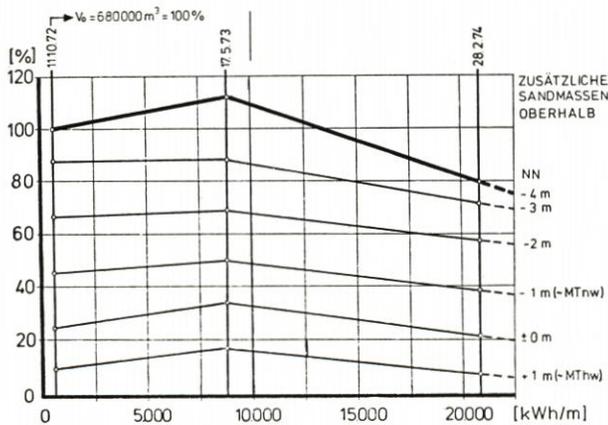
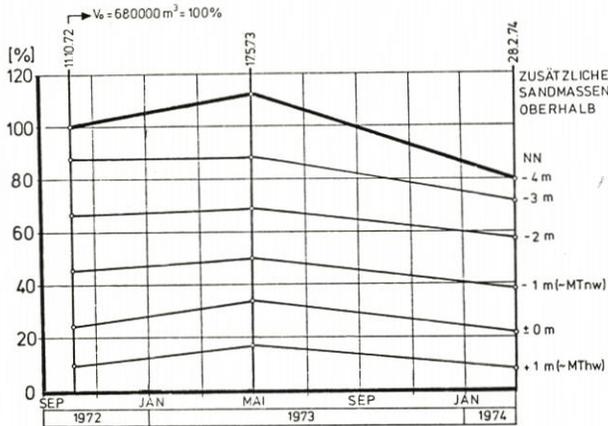


Abb. 18. Zusätzlicher Sandvorrat vor der befestigten Uferstrecke vor Westerland/Sylt (2,9 km) von 1972 bis 1974

Die zeitliche Entwicklung ist wie für die 1,7 km und 8 km langen Uferstrecken auf Abbildung 18 dargestellt. Die Entwicklung während des Winters 1972/73 stimmt mit der der 8 km langen Strecke (Abb. 17) überein; es findet über allen Horizonten eine Zunahme der Sandmassen statt mit Ausnahme der über NN — 3,0 m, wo die Sandmenge nahezu gleich bleibt. Im zweiten Winter 1973/74 nehmen aber die Sandvorräte über allen Horizonten ab, jedoch nicht in dem Maße wie auf der 1,7 km langen Uferstrecke (Abb. 16). Der Sandvorrat oberhalb NN — 4 m, der sich im Mai 1973 auf rd. 110 % der Ausgangsmenge erhöht hat, fällt auf 80 % nach dem Winter 1973/74 ab. Zu bemerken ist aber, daß die Abnahme der Sandvorräte über den anderen Horizonten meist schwächer ist als die über dem Horizont NN — 4,0 m (Abb. 18).

### 3.4 Halbwertszeit der Strandvorspülung

Die Entwicklung der Sandvorspülung vor *Westerland/Sylt* weicht wesentlich von der anderer Strandvorspülungen ab, bei denen das Material auf der zu erhöhenden Strandstrecke unmittelbar beim Einbau durch eine entsprechende Spültechnik verteilt wird.

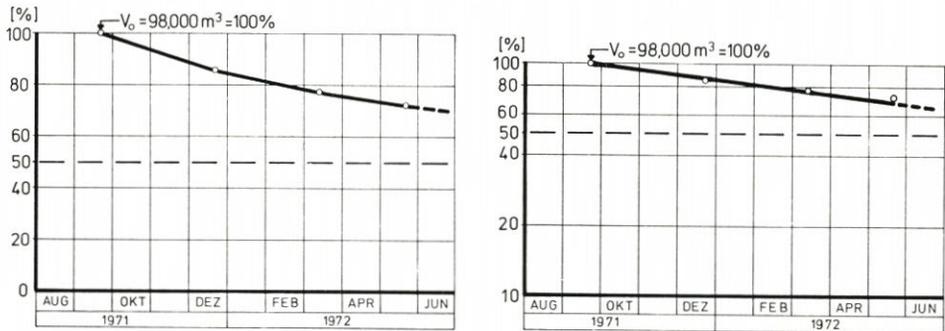


Abb. 19. Verhalten einer „linearen“ Strandaufspülung in Abhängigkeit von der Zeit

Die Abbildung 19 zeigt das kennzeichnende Verhalten einer solchen „linearen“ Vorspülung während des ersten Winters. Der Sandverlust ist in den ersten Zeitabschnitten nach der Aufspülung größer als in der Zeit danach. Es handelt sich hier um eine Vorspülung von  $V_0 = 98\ 000\ m^3$  bei *Sierkesdorf/Ostsee*. Aber auch bei den Strandaufspülungen auf *Norderney* (KRAMER, 1952 und 1958; LUCK, 1968) war es stets so, daß auch bei normalen Sturmwindern die Verluste am Anfang am größten waren und dann abklingen, ohne jedoch ganz aufzuhören.

Das Verhalten solcher Vorspülungen kann mit dem Gesetz des radioaktiven Kernzerfalles beschrieben werden. Die einmalig vorgespülte Sandmenge  $V_0$  nimmt nach dem Exponentialgesetz ab (FÜHRBÖTER, 1974b):

$$V(t) = V_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{II}}}$$

$V(t)$  = Restvolumen  $V$  zur Zeit  $t$

$V_0$  = vorgespülte Sandmenge zur Zeit  $t = 0$

$t$  = Zeit

$t_{II}$  = Halbwertszeit = der Zeitraum, nach dem noch die Hälfte der vorgespülten Sandmenge  $V_0$  vorhanden ist

Die einfachlogarithmische Auftragung auf Abbildung 19 zeigt, daß sich die Meßpunkte verhältnismäßig gut auf einer Geraden ordnen. Je stärker das Gefälle dieser Geraden ist, um so kleiner wird die Halbwertszeit, die unmittelbar auf der Abszisse zwischen  $t = 0$  und der Abszissenordinate des Schnittpunktes der Geraden mit der 50-%-Ordinate erhalten wird.

Die Halbwertszeit einer Vorspülung ist ein unmittelbares Maß dafür, in welchen Zeitabschnitten sie wiederholt werden muß. Im Gegensatz zur ersten Aufspülung mit dem Volumen  $V_0$  braucht dann aber nur die Hälfte dieses Volumens in den Abständen der Halbwertszeiten durch die Wiederholungsspülungen aufgebracht zu werden, damit die Anfangsmenge  $V_0$  wieder hergestellt wird.

Anstelle eines linearen Zeitmaßstabes wie auf Abbildung 10 wird bei stark wechselnden Seegangsbedingungen eine auf die Summe der Wellenenergie bezogene, verzerrte Zeitskala auf den Abbildungen 16, 17 und 18 zweckmäßig sein. An die Stelle der Halbwertszeit tritt dann die Halbwertsenergie als der Energiebetrag aus der Wellenbelastung, der die Sandvorspülung gerade zur Hälfte abbaut. Bei genügend vielen Jahreskennzahlen der Wellenenergie kann auch ein Normaljahr aus dem Mittelwert der jährlichen oder jahreszeitlichen Wellenenergie definiert werden.

Diese exponentielle Abnahme der Sandmassen ähnlich dem radioaktiven Zerfall ist eine Erfahrung, die bei zahlreichen Sandvorspülungen an verschiedenen Küsten gemacht wurde.

Von diesem Erfahrungsverhalten weicht die Sandbühnenvorspülung vor *Westerland/Sylt* völlig ab, besonders, wenn das großräumige Geschehen auf der 8 km langen Uferstrecke beobachtet wird (Abb. 17). Dies erschwert eine Voraussage für das künftige Verhalten. Es hat nach Abbildung 17 den Anschein, als ob durch die Sandfangwirkung des Sandhöftes aus dem Ausgangsvolumen  $V_0$  erst ein (größeres) Gleichgewichtsvolumen  $V_0'$  aufgebaut wird, das anschließend wie das einer linearen Strandaufspülung langsam abbricht. Die geringere Zunahme der Sandmassen oberhalb der einzelnen Horizonte im zweiten Sturmflutwinter 1972/73 deutet zumindest darauf hin. Für den 2,9 km langen Abschnitt vor der befestigten Uferstrecke (Abb. 18) tritt zwar schon eine Abnahme des Sandvorrates – unter der Wirkung der Sturmflutkette im Herbst 1973 – ein, aber auch hier ist noch keine Extrapolation möglich. Die Abnahme der Sandvorräte auf der 1,7 km langen Uferstrecke kann dagegen nicht als echter Verlust angesehen werden; dieser Abbruch war zur Verteilung des Sandes vor den anderen schutzbedürftigen Uferstrecken seitlich dieser Zone ohnehin eingeleitet.

#### 4. Grundlage für künftige Sandnachspülungen

##### 4.1 Häufigkeit der Nachspülungen

Maßgebend für die Beurteilung des Strandzustandes ist der besonders gefährdete 2,9 km lange, durch Längswerke und Bühnen geschützte Uferabschnitt vor *Westerland*. Nach den in den vorhergehenden Abschnitten wiedergegebenen Überlegungen wird eine Sandnachspülung für erforderlich gehalten, wenn

1. in diesem Abschnitt die Gesamtmenge des vorgespülten Sandes sich auf die Hälfte vermindert hat (s. 3.4) oder
2. an einzelnen Stellen der Sandvorrat für einen Schutz der Längswerke und Bühnen nicht mehr ausreicht.

Es bleibt jedoch zu prüfen, wie weit in Fällen örtlichen Sandmangels durch gezielte Baumaßnahmen herkömmlicher Art ein Ausgleich geschaffen werden kann, um auf unwirtschaftliche Nachspülungen kleiner Sandmengen verzichten zu können. In diesem Falle wird die Verminderung des Sandvorrates auf die Hälfte zum entscheidenden Kriterium für den Zeitpunkt einer Sandnachspülung.

Aus den bisherigen Beobachtungen geht hervor, daß nach der Peilung vom 28. 2. 1974 noch 80 % der vorgespülten Sandmenge auf dem 2,9 km langen Uferabschnitt vor *Westerland* lagen. Die Schutzfunktion des Sandvorrates ist für diesen Bereich also voll erhalten geblieben. Mit genügender Sicherheit kann geschlossen werden, daß dieser Schutz auch dann noch gegeben ist, wenn nur noch 50 % der ursprünglichen Sandmenge vorhanden ist. Jedoch ist diese Gewähr bei einer Unterschreitung von 50 % nicht mehr mit Sicherheit gegeben.

Nach diesen Überlegungen ist die Halbwertszeit zugleich die Zeit, nach deren Ablauf eine Nachspülung erforderlich wird, die dann nur die Hälfte der 1972 vorgespülten Sandmenge zu umfassen braucht, um den Ausgangszustand nach Abschluß der Vorspülung im Herbst 1972 wieder zu erreichen.

Die Halbwertszeit hängt auch davon ab, welche Wellenenergie die künftigen Winter liefern. Eine Extrapolation aus den bisherigen Messungen ist äußerst schwierig. Doch läßt sich schon heute abschätzen, daß eine Halbwertszeit von im Mittel 5 Jahren zu erwarten ist, wenn keine außergewöhnlichen hydrologischen Verhältnisse auftreten. Zu deren unmittelbarer Erfassung müssen die Wellenmessungen fortgeführt werden, wie zur Bestimmung ihrer mittelbaren Auswirkung weitere großräumige Strand- und Vorstrandmessungen – mindestens einmal jährlich – unternommen werden müssen.

#### 4.2 Nachzuspülende Sandmengen

Wird der Strandzustand von Anfang 1974 mit dem von 1972 vor der Aufspülung verglichen, so sollte der vollständige Abbau der Sandvorspülung oberhalb der vorgenannten Zeitgrenzen liegen.

Jedoch wird zu überlegen sein, ob eine Abnahme des Strandes bis zu dem Zustand vor der Aufspülung 1972 wieder zugelassen werden kann, ohne daß sich ungünstige Einwirkungen auf die Schutzwerke ergeben. Ihre Sandeindeckung über die Ausgangshöhe 1972 hinaus sollte erhalten bleiben, um minimale Unterhaltungskosten der Bauwerke zu erreichen.

Einer am Strand erforderlichen Sandmenge von 350 000 m<sup>3</sup>, d. h. 50 % der 1972 aufgespülten Sandmenge, entspricht eine Fördermenge von 500 000 m<sup>3</sup>, weil mit Spülverlusten von rd. 30 % gerechnet werden muß. Vergleichsweise betrug die Fördermenge 1972 rd. 1 Mio. m<sup>3</sup>, von denen rd. 700 000 m<sup>3</sup> Sand am Strand im Ausgangszustand abgelagert waren.

Die Nachspülmengen werden auch von der Kornzusammensetzung des Sandes abhängig sein, die sich in den Entnahmestellen findet, aus denen künftighin Sand entnommen werden wird, worauf sich die weiteren Untersuchungen erstrecken.

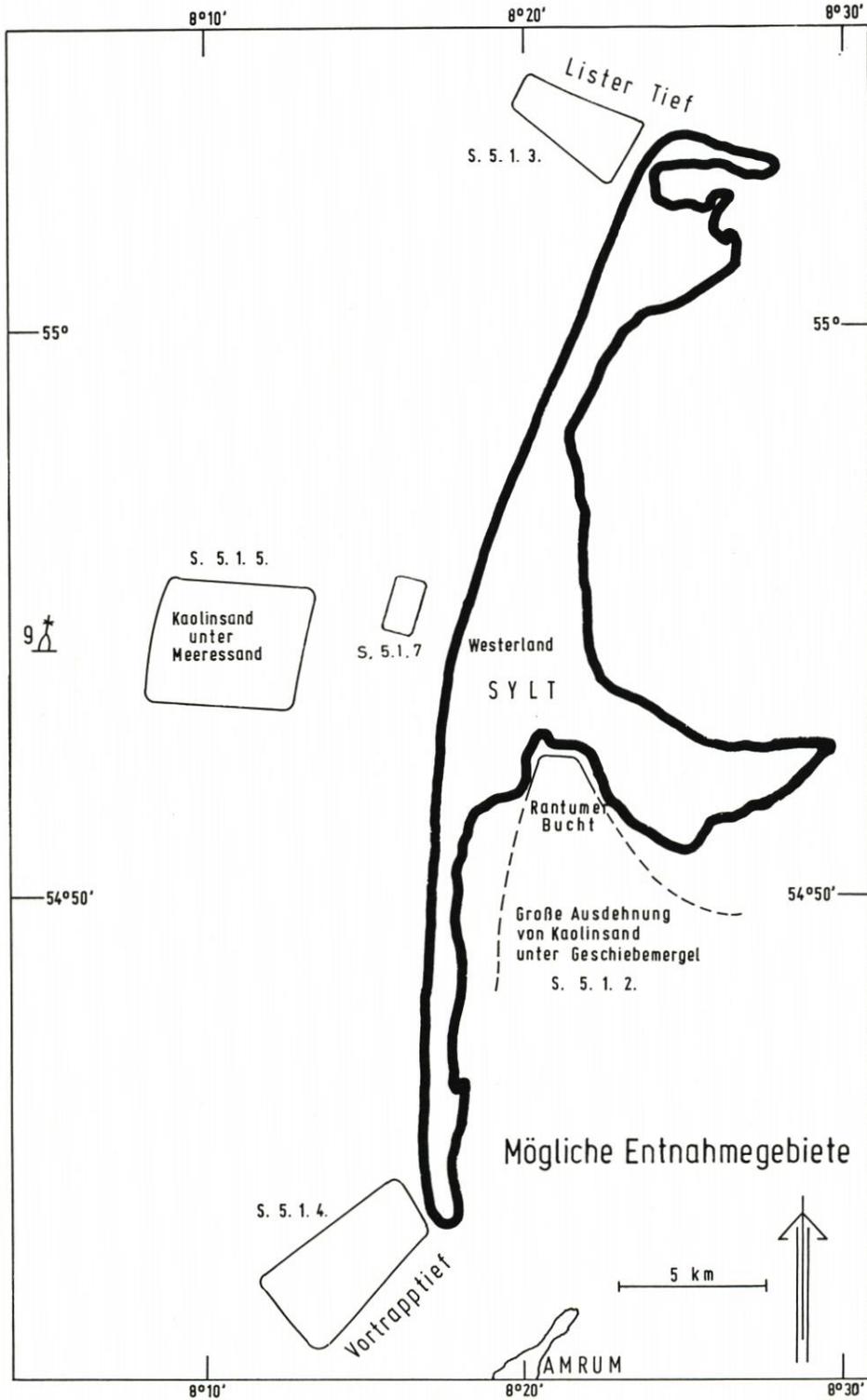
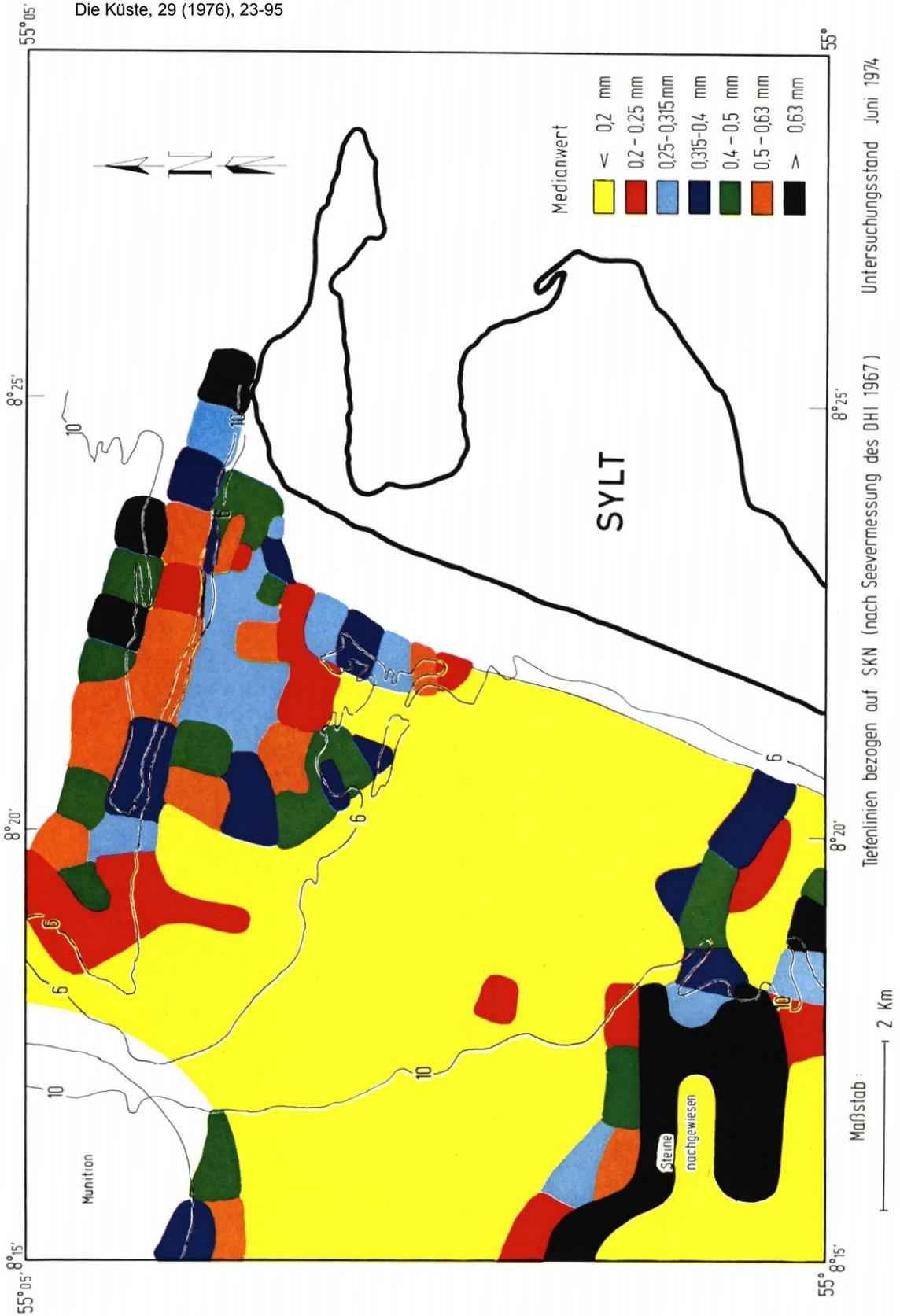


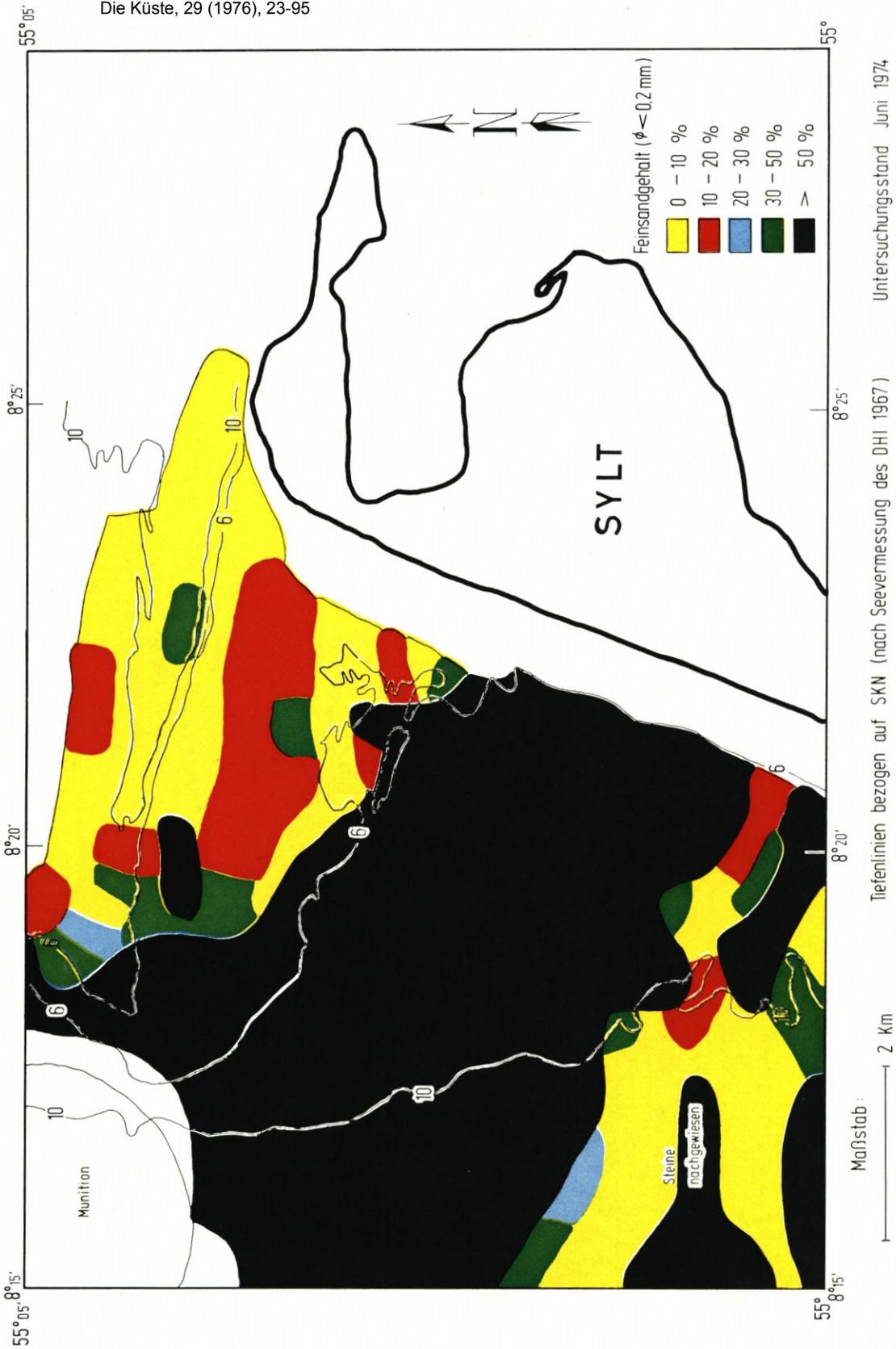
Abb. 20



Untersuchungsstand Juni 1974

Tiefenlinien bezogen auf SKN (nach Seevermessung des DHI 1967)

Abb. 21. Medianwert



Tiefenlinien bezogen auf SKN (nach Seevermessung des DHI 1967)

Abb. 22. Feinsandgehalt

## 5. Grundlagen der künftigen Sandzufuhr

## 5.1 Sandentnahmegebiete

## 5.1.1 Allgemeines

Für künftige Sandvorspülungen können je nach dem vorgesehenen technischen Verfahren verschiedene Sandentnahmegebiete in Betracht gezogen werden (Abb. 20), deren geologische Vor- und Nachteile hier kurz skizziert werden sollen. Die Angaben beruhen für das Gebiet westlich von *Sylt* auf den Untersuchungen im Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und für den Untergrund des Watts auf der geologischen Karte 1 : 25 000 (DIETZ und HECK, 1952), dem Gutachten des Geologischen Landesamtes Schleswig-Holstein, Kornverteilung von Bohrproben für eine Sandvorspülung vor der Insel *Sylt*, sowie den mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführten Untersuchungen von D. HOFFMANN. Diese sind mit Ausnahme der Beschreibung eines Teilgebietes (HOFFMANN, 1974) noch nicht abgeschlossen und unveröffentlicht.

5.1.2 Sandentnahme aus dem Gebiet des Salzsandes am *Lister Tief*

Im Norden von *Sylt* werden im Flachwassergebiet am *Lister Tief* wie auch im Süden am *Vortrapptief* große Sandmengen abgelagert. Am *Lister Tief* bilden sie in den deutschen Hoheitsgewässern den *Salzsand*. Er stellt eine nahe am *Lister Tief* sehr flache – zum

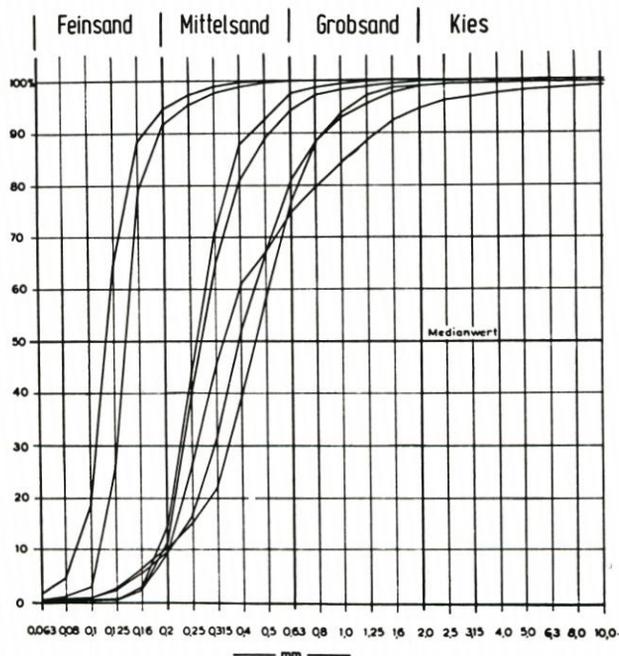
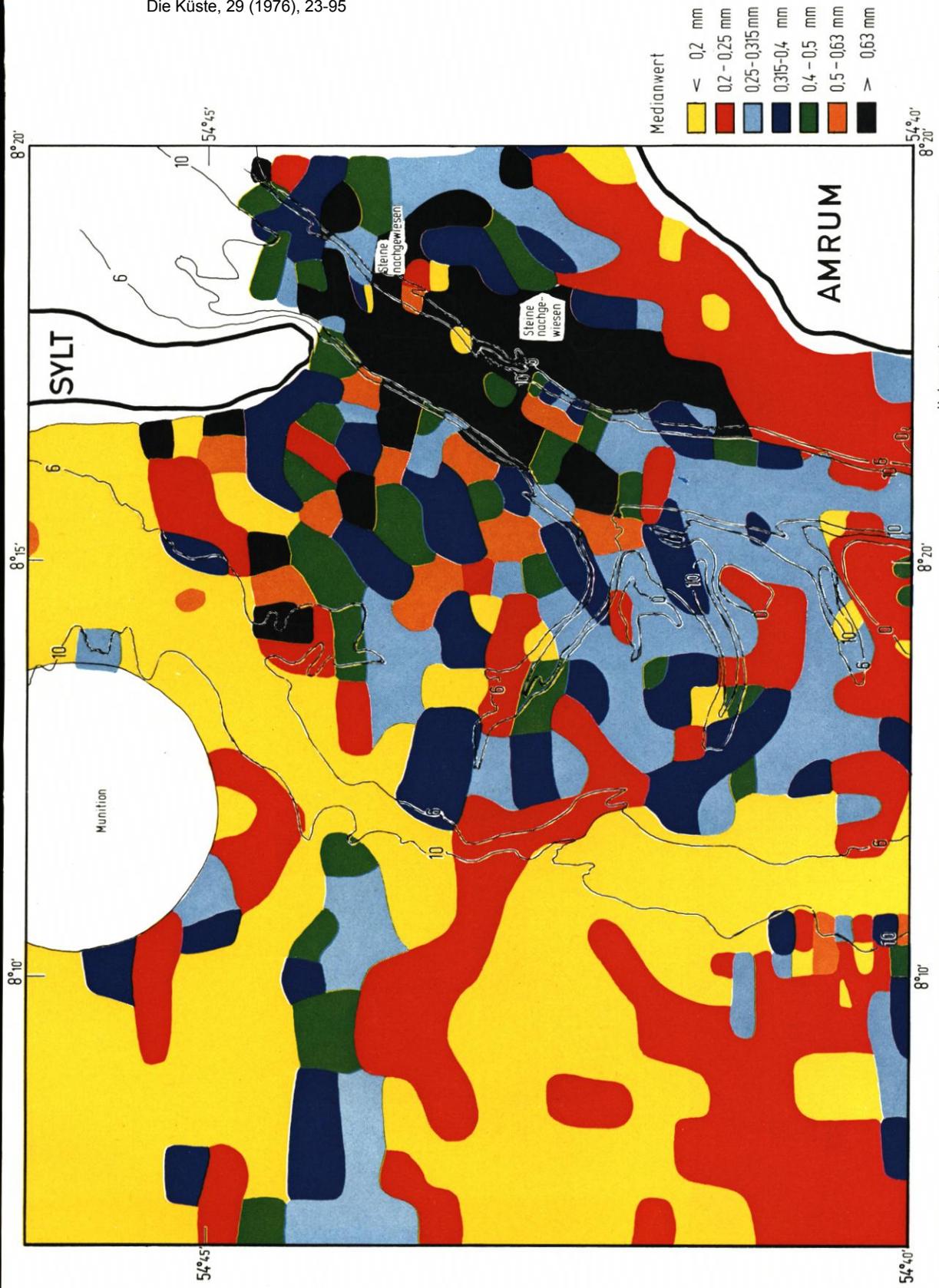


Abb. 23. Summenkurven aus dem Gebiet des Salzsandes



Tiefenlinien bezogen auf SKN (nach Seevermessung des DHI 1968

---Seewärtige Grenze der nachgewiesenen Verbreitung des

Keilseeendes watas dem belagerten Moorstrand

Untersuchungsstand Juni 1974

Maßstab :

Abb. 24. Medianwert

54°40'

8°10'

8°15'

54°40'

8°20'

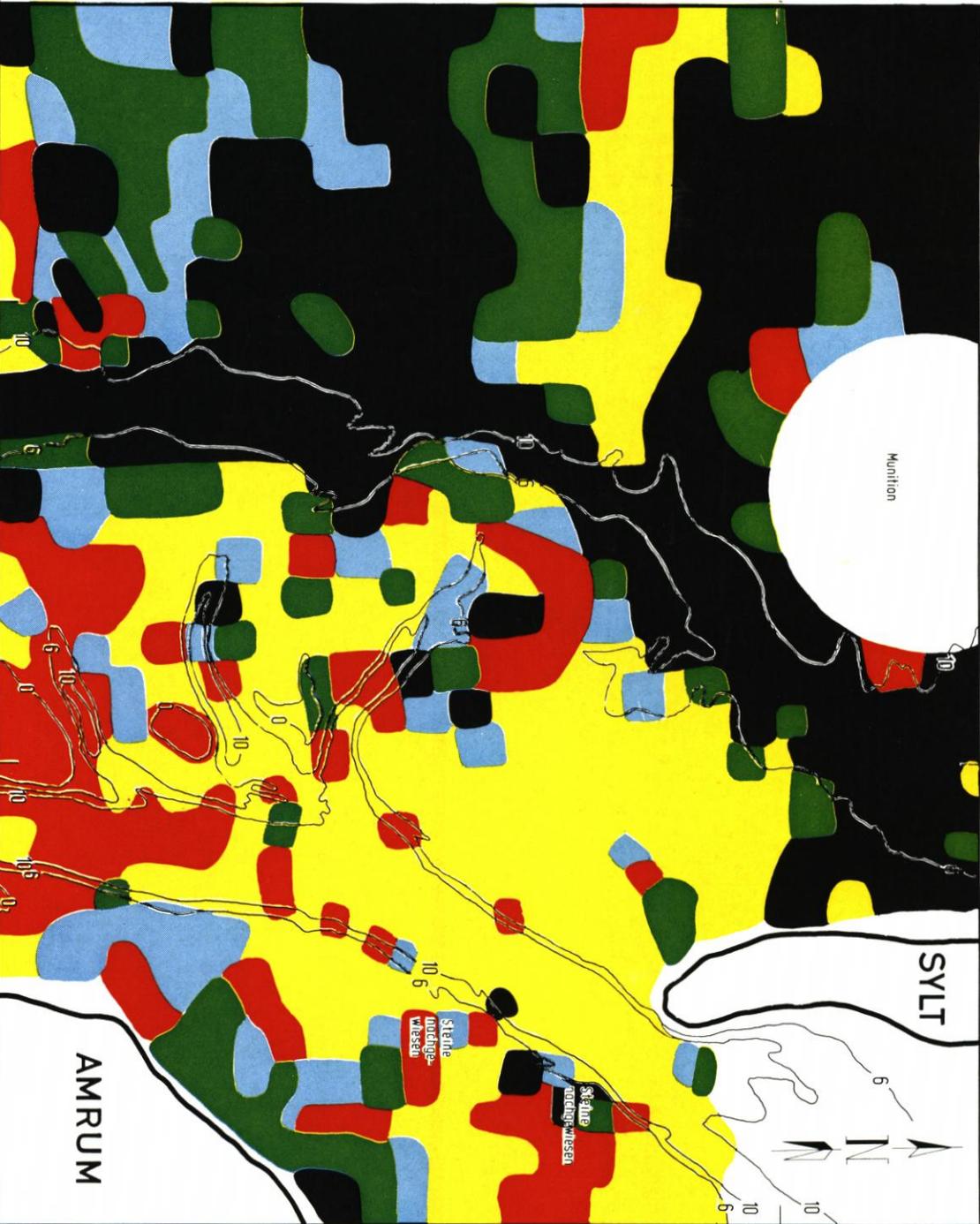
54°45'

54°45'

8°10'

8°15'

8°20'



- Feinsandgehalt ( $\phi \leq 0,2 \text{ mm}$ )
- 0 - 10 %
  - 10 - 20 %
  - 20 - 30 %
  - 30 - 50 %
  - > 50 %

Tiefenlinien bezogen auf SKN (nach Seevermessung des DHI 1968)

Maßstab: 1:2 km

Abb. 25. Feinsandgehalt

Untersuchungsstand Juni 1974

*Lister Tief* steil, nach Süden dagegen sanft abfallende – Sandbank dar, in deren Bereich starke Gezeitenströme und meist schwere Brandung herrschen.

Die Kornverteilung im *Salzsand* zeigt nach Oberflächenproben (Abb. 21 und 22) und Kernen, im Gegensatz zum Vorstrand vor der Mitte von *Sylt*, eine deutliche Tiefenabhängigkeit der Korngrößen. Größere, für eine Sandvorspülung geeignete Materialien liegen nur oberhalb 6 m SKN (etwa NN – 7 m) im Gebiet der sehr starken Brandung. Der Feinsandgehalt bleibt hier unter 10 %, und Steine sind nicht zu erwarten.

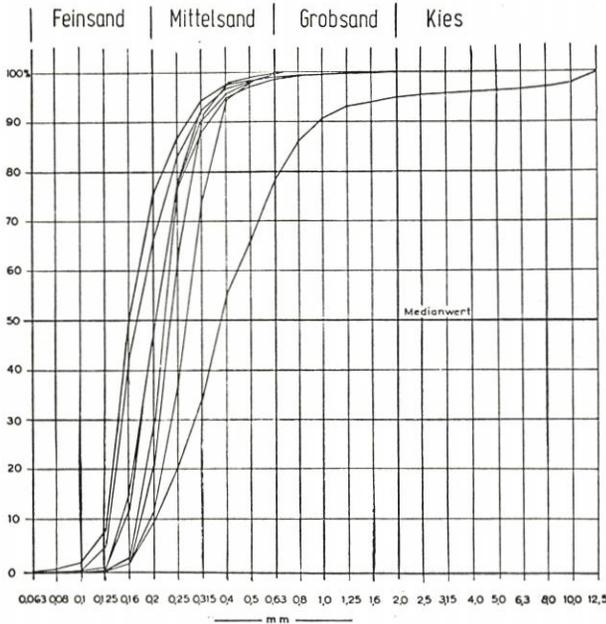


Abb. 26. Summenkurven aus dem nordwestlichen Vorfeld des Vortrapptiefs

Unterhalb 6 m SKN liegt dagegen eine mächtige Anhäufung von Feinsand mit meist über 90 % Feinsandgehalt ( $< 0,2$  mm  $\varnothing$ ). Dieses Material ist für Sandvorspülungen vor *Sylt* ungeeignet. Einzelheiten können den Karten zur Sedimentverteilung (Abb. 21 und 22) und den typischen Summenkurven (Abb. 23) entnommen werden.

Abbauwürdig ist nur das Material in den ungünstigsten Tiefenbereichen, wobei besonders zu prüfen wäre, wie weit durch eine Materialentnahme die Strömungsrinnen beeinflusst und damit der Schifffahrtsweg und die Küste geschädigt werden.

### 5.1.3 Sandentnahme aus dem Flachwassergebiet westlich des Vortrapptiefs

Südwestlich von *Hörnum*, westlich des *Vortrapptiefs*, liegt ein weiteres Flachwassergebiet, das allerdings wesentlich ausgedehnter als der *Salzsand* ist. Es zeigt eine ähnliche Kornverteilung in Abhängigkeit von der Wassertiefe (Abb. 24 und 25, typische Summenkurven in Abb. 26), wie schon für den *Salzsand* angegeben wurde. Unterhalb 6 m SKN (NN – 7 m) liegt wieder Feinsand, der für eine Sandvorspülung von der Inselmitte von

*Sylt* nicht geeignet ist. Oberhalb finden sich in einem ausgedehnten Gebiet größere Sande sehr wechselvoller Ausbildung, die aber insgesamt ein geeignetes Material darstellen würden. Der Feinsandgehalt in den Proben überschreitet selten 10 %.

Die Vorräte an größerem Sand oberhalb 6 m SKN sind erheblich größer als im *Salzsand*. Nach alten Seekarten kam allerdings ZAUSIG (1939) zum Ergebnis, daß unter diesem Flachwassergebiet ein Moränenkern aus Geschiebemergel oder ähnlichem Material zu erwarten wäre. Entsprechend wären auch große Steine wahrscheinlich. Die geologischen Untersuchungen der letzten Jahre haben keinerlei Anzeichen für die Richtigkeit der Interpretation der alten Karten durch ZAUSIG (1939) ergeben. Trotzdem sollte die Frage vor einer eventuellen Entscheidung für eine Sandentnahme in diesem Gebiet überprüft werden.

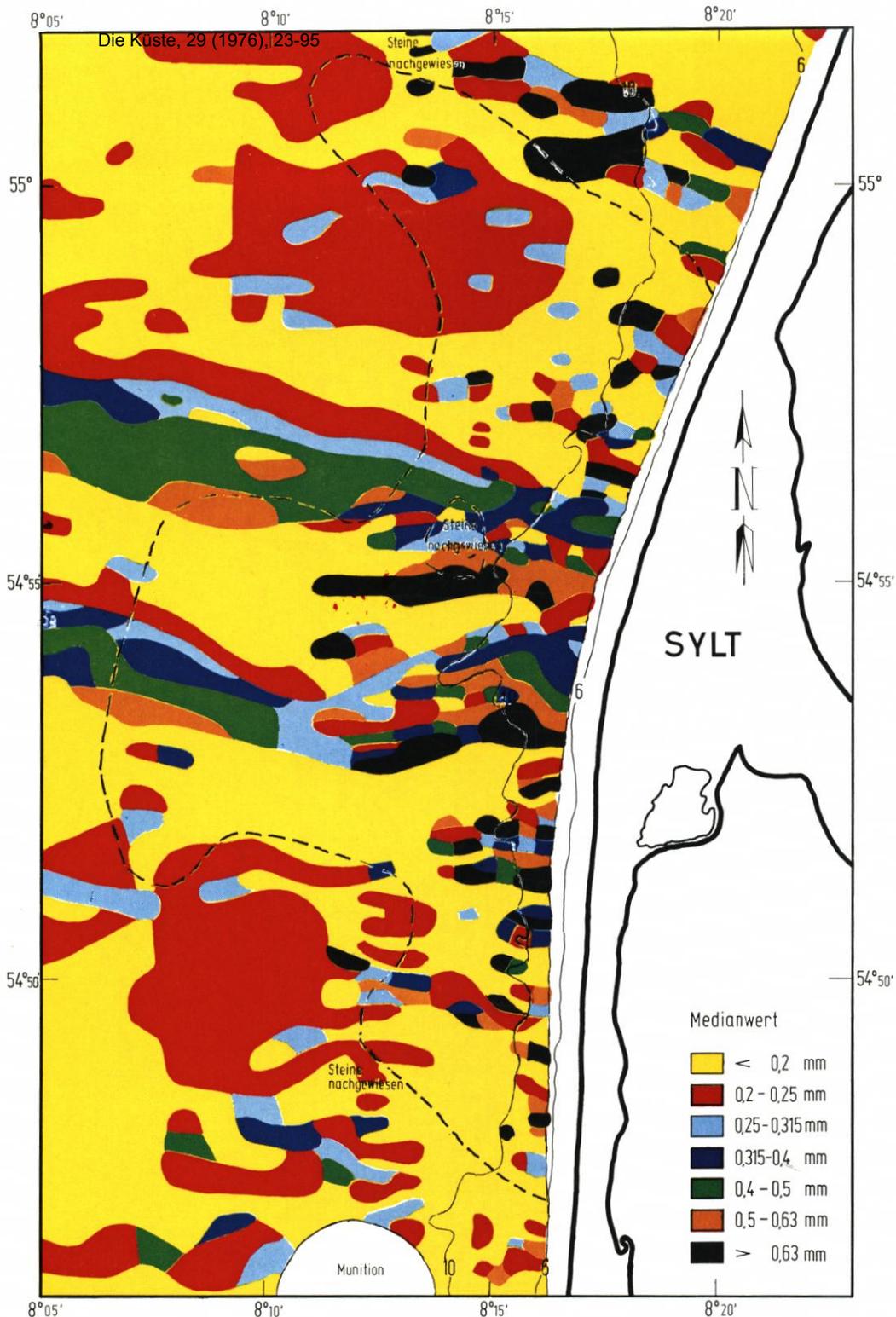
Das Material geeigneter Kornverteilung liegt auch hier wieder in einem Bereich starker Strömungen und starker Brandung. Die möglichen Auswirkungen auf Schifffahrtsweg und Küste bedürfen, ähnlich wie am *Salzsand*, größter Aufmerksamkeit, besonders in Anbetracht der ohnehin schwierigen Bedingungen an der Küste vor *Hörnum*.

#### 5.1.4 Sandentnahme im Seegebiet westlich der Inselmitte von Sylt

Als weiteres mögliches Sandentnahmegebiet bietet sich das Vorfeld der *Sylter Westküste* an. Hier beträgt die Mächtigkeit des holozänen Meeressandes bis in die Nähe des *Elbe-Esbjerg-Weges* meist unter 1,5 m. Die Kornverteilung ist sehr wechselhaft und schwankt zwischen feinen Wandersanden und groben Restsedimenten mit weniger als 10 % Feinsandgehalt. Die Verteilung der Sedimente am Meeresboden ist in den Abbildungen 27 und 28 wiedergegeben, typische Summenkurven finden sich in Abbildung 29. Der Aufbau der Profile ist nach Vibrocorerkernen uneinheitlich, aber es gibt ausreichend große Gebiete für den Abbau sehr erheblicher, für Sandvorspülungen geeigneter Sandmassen.

In einem weiten Bereich westlich des Mittelabschnittes von *Sylt* wird die Basis des holozänen Meeressandes von Kaolinsand in der gleichen Zusammensetzung wie im Sandentnahmegebiet in der *Rantum Bucht* gebildet (Abb. 27 und 28). Ursprünglich auch hier über dem Kaolinsand vorhandener Geschiebemergel ist teilweise bis in reichlich 10 km Landentfernung abgetragen. Als Rest sind Steine möglich und an einzelnen Stellen auch am Meeresboden nachgewiesen. Mit einer größeren Verbreitung von Steinen an der Oberfläche des Kaolinsandes und unter einer Decke von holozänem Meeressand muß gerechnet werden. An anderen Stellen liegt der holozäne Meeressand auf Geschiebemergel.

Ein besonderes Problem stellt hier der erforderliche Schutzabstand von der Küste zur Vermeidung negativer Rückwirkungen dar. Nach Aufbau und Verteilung der Sedimente (KÖSTER, 1974) beginnt der Angriff der See auf den Inselsockel bei 12 bis 14 m Wassertiefe, im allgemeinen 5 bis 6 km Uferentfernung entsprechend. Seewärts dieser Grenze überwiegt der Einfluß der Strömungen mit Transport von Wandersanden. Zum Land hin wird die Wirkung der Wellen relativ zu den Strömungen immer stärker, um schließlich in der Brandungszone zu überwiegen. Hier treten zu den Transportvorgängen starke Umlagerungen und Abtragungen. Deshalb sollte im Bereich landwärts der genannten Grenze kein Sand entnommen werden.



8°05' 8°10' 8°15' 8°20' 8°05' 8°10' 8°15' 8°20'

Tiefenlinien bezogen auf SKN (nach Seevermessung des DHI 1967 u. 1968) Untersuchungsstand Juni 1974

--- Seewärtige Grenze der nachgewiesenen Verbreitung des Kaolinsandes unter dem holozänen Meeressand

Maßstab: 4 Km

Abb. 27. Medianwert

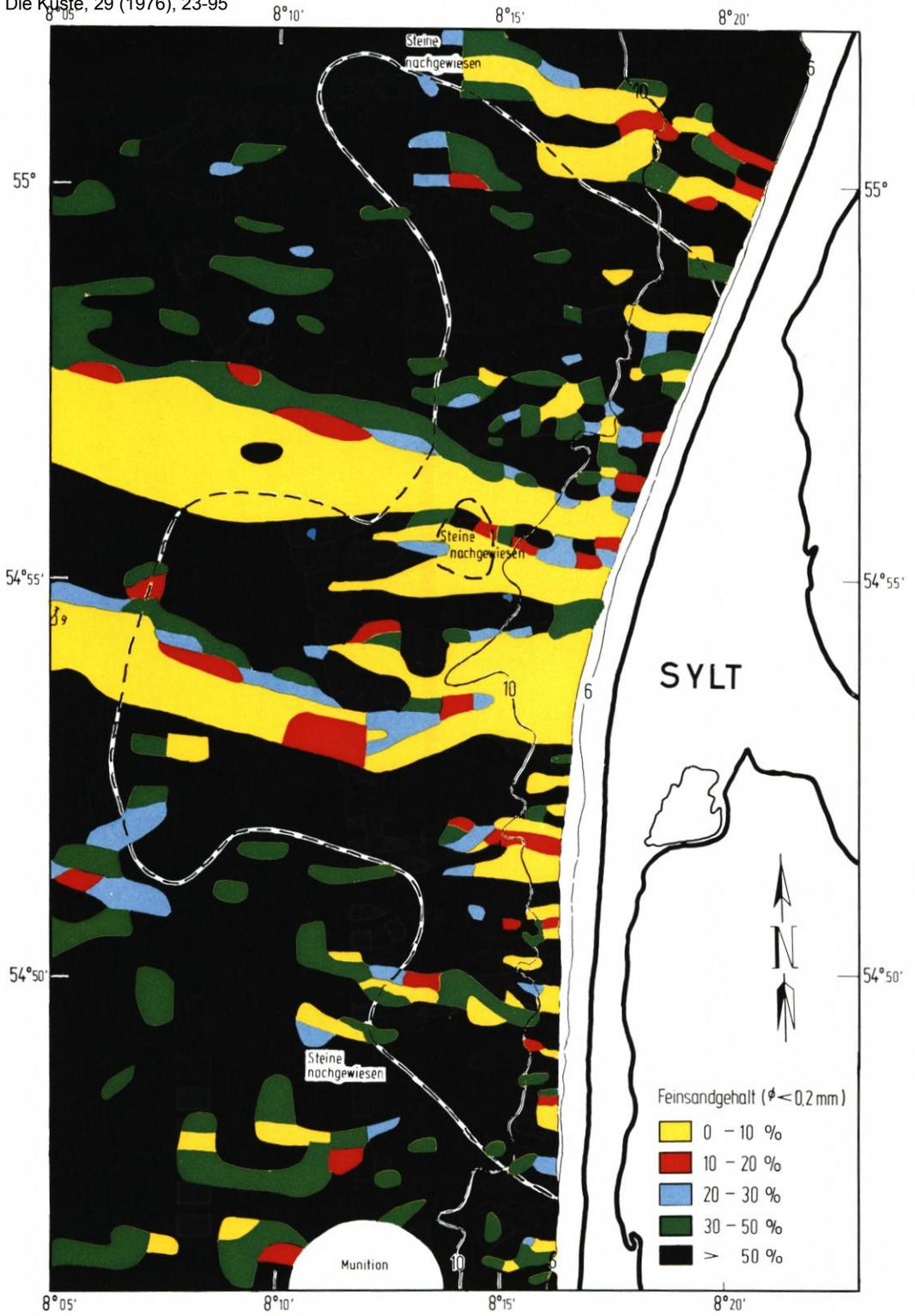


Abb. 28. Feinsandgehalt

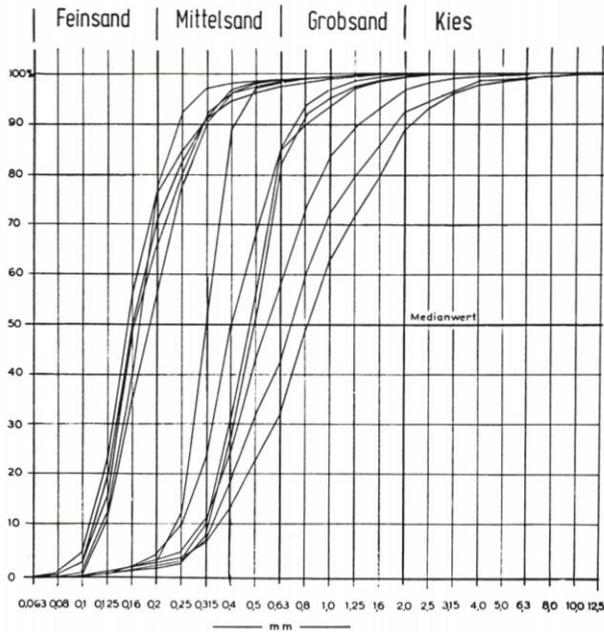


Abb. 29. Summenkurven aus dem Seegebiet westlich von Sylt

### 5.1.5 Sandentnahme aus dem Untergrund des Watts zwischen Sylt und Föhr

Für die Sandvorspülung 1972 ist Kaolinsand aus dem Untergrund der *Rantumener Bucht* verwendet worden. Deshalb ist dieses Gebiet auch für künftige Entnahmen von Interesse. Für den Kaolinsand kann hier mit einer Mächtigkeit von bis zu 80 m gerechnet werden. Er ist im Untergrund des gesamten Wattbereiches zwischen *Sylt* und *Föhr* zu erwarten, so daß der Gesamtvorrat außerordentlich groß ist.

An vielen Stellen wäre ein Abbau aber nur unter erschwerten Bedingungen möglich als Folge einer teilweisen Überlagerung mit Geschiebemergel, dessen Grenzen nur ungenau bekannt sind. Der Geschiebemergel hat wahrscheinlich ursprünglich das gesamte Gebiet überdeckt, ist in Teilbereichen aber später abgetragen worden, wobei als Rest möglicherweise Steine verblieben sind.

Über den genauen Umfang und die Mächtigkeit des Geschiebemergels wie über die Häufigkeit und Größe der Steine liegen gegenwärtig nur unvollständige Kenntnisse vor. Deshalb ist es dringend erforderlich, vor weiteren Materialentnahmen diese Frage durch geeignete geologische Untersuchungen zu klären. Es darf jedoch angenommen werden, daß nach ausreichender Klärung der geologischen Voraussetzungen aus dem Untergrund des Watts zwischen *Sylt* und *Föhr* noch große Kaolinsandmengen ohne Schädigung der angrenzenden Küsten entnommen werden können.

## 5.1.6 Sandentnahme aus der Insel

Eine weitere Möglichkeit ist die Sandentnahme aus der Insel südlich *Westerland*.

Über den Aufbau dieses Gebietes liegen nur unzureichende Daten vor. Aus der geologischen Karte 1 : 25 000 und dem Erläuterungsheft (DIETZ und HECK, 1952) sind folgende Bohrungen zu entnehmen:

Bohrung 28 (r 54 885, h 83 775):

- 0— 3,10 Dünensand (Holozän)
- 7,40 Klei, Torf und Moorerde (Holozän)
- (— 8,60) hellbrauner Feinsand (Pleistozän)

Bohrung 22 (r 55 385, h 84 650):

- 0— 0,90 Flugsand (Holozän)
- 2,40 Klei und Torf (Holozän)
- (— 6,00) dunkelbrauner Feinsand (Pleistozän)

Bohrung 61 (r 56 035, h 84 535):

- 0— 2,50 Klei, teilweise humoser Klei oder dunkelbrauner heller Sand (Holozän)
- 4,10 Torf und Moorerde (Holozän)
- 10,20 Geschiebelehm (Pleistozän)
- (— 11,20) Mittel- und Grobsand (pleistozäner Schmelzwassersand?)

Bohrung 57 (r 57 600, h 84 375):

- 0— 2,00 Klei (Holozän)
- 2,60 Torf mit Holzresten (Holozän)
- 4,60 Mittelsand, Steine, Geröll (Pleistozän)
- 7,80 Ton und Ton-Gyttja mit Pflanzenresten (Pleistozän, Interglazial)
- (— 11,20) Mittel- und Grobsand (pleistozäner Schmelzwassersand?)

Bohrung 109 (r 57 460, h 83 910):

- 0— 4,00 Klei und Torf (Holozän)
- 5,30 steiniger Sand (Pleistozän)
- (— 9,30) graugrüner Ton (Pleistozän, Interglazial)

Allgemein ergibt sich, daß der für Sandvorspülungen in erster Linie geeignete Kaolinsand in keiner der Bohrungen mit Sicherheit erreicht worden ist. Er wird von mehr als 10 m Sediment überlagert, darunter 5 m oder mehr Geschiebelehm und wenigstens in Teilgebieten von einigen Metern Ton. Mit erheblichen lokalen Unterschieden in der Schichtfolge muß gerechnet werden.

Einige Ergänzungen sind HOFFMANN (1969) zu entnehmen. Die Mächtigkeit der Marsch über dem Pleistozän liegt im allgemeinen zwischen 0 und 3 m und wird nur in Rinnen etwas höher.

## 5.1.7 Vergleich der möglichen Entnahmegebiete

Nach Abwägung aller Gesichtspunkte erscheint aus geologischen Gründen eine Sandentnahme beiderseits der Verbindungslinie *Westerland-Tonne 9* im *Elbe-Esbjerg-Weg* (Abb. 20) in mindestens 5 und höchstens 10 km Uferentfernung am empfehlenswertesten. Dort kann eine Schichtfolge aus holozänem Meeressand und pliozänem Kaolinsand ohne schädliche Rückwirkungen auf die Küste gewonnen werden. Auf mögliche kleine Restvorkommen von Geschiebemergel und auf Steine ist dabei zu achten.

Sandgewinnung und Sandtransport nach diesen Angaben stoßen jedoch auf schwierige technische Probleme (s. 5.2). Sollte eine Lösung gefunden werden, indem zunächst Sand in 1,5 km bis 2 km Entfernung vom Ufer – also innerhalb des kritischen Gebietes –

entnommen wird und später das Baggerloch mit in der angegebenen äußeren Zone gewonnenem Material wieder aufgefüllt wird, so erlaubt der Bodenaufbau ein solches Verfahren. Die Schichtfolge im Bereich um 1,5 km bis 2 km Uferentfernung entspricht der im empfohlenen Sandentnahmegebiet in 5 bis 10 km Uferentfernung. Hier liegt der gleiche Kaolinsand unter nur wenigen Dezimetern Meeressand. Steine sind ebenfalls wahrscheinlich. Es muß jedoch damit gerechnet werden, daß der nachträglich in die Baggerlöcher verbrachte Sand lockerer gelagert und damit leichter erodierbar ist als der Kaolinsand in seiner ursprünglichen Lagerung.

Dieses Problem verdient besondere Beachtung, da das in Frage kommende Feld nach den geologischen Untersuchungen im Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ ein ausgeprägtes Abtragungsgebiet darstellt (ANWAR, 1974 und KÖSTER, 1974). Die wenigen Dezimeter holozänen Meeressandes auf dem Kaolinsand sind ausgeprägte Restsedimente und stellen umgelagerten und ausgewaschenen Kaolinsand ohne größere Materialzufuhr aus der Umgebung dar. Jede Schwächung dieser Zone könnte negative Auswirkungen auf den Inselsockel und damit auf die Küste haben.

Es muß deshalb empfohlen werden, eine Sandentnahme in 5 km bis 10 km Entfernung mit Zwischenlagerung in einem Baggerloch (Abb. 20) in 1,5 km bis 2,5 km Entfernung vom Ufer nur nach sorgfältigen Vorarbeiten vorzusehen. Hierzu sind dann folgende Untersuchungen angebracht:

1. Regelmäßige jährliche Vermessung eines für die Zwischenlagerung geeigneten 2 km<sup>2</sup> großen Gebietes, das durch die nachstehenden Gaus-Krüger-Koordinaten festgelegt werden kann:

NW-Ecke:	r 53 100	h 89 050
NE-Ecke:	r 54 100	h 88 750
SW-Ecke:	r 52 500	h 87 150
SE-Ecke:	r 53 500	h 86 850

Das Auflösungsvermögen der Vermessung muß so groß sein, daß schon geringe Veränderungen erfaßbar sind.

2. Regelmäßige jährliche Probenentnahme an festgesetzten Punkten zur sedimentologischen Bearbeitung, um die natürliche Veränderung vor einer Baggerung wie auch die Einstellung eines neuen Gleichgewichtes in dem umgrenzten Gebiet nach einer Verfüllung zu erfassen. Der Probenabstand sollte 200 m nicht überschreiten. Eine bodenmechanische Untersuchung über das voraussichtliche Verhalten des Sandes, mit dem das Baggerloch der Zwischenlagerung wieder verfüllt wird, gegenüber der Erosion ist zu erstellen.

Die Untersuchungen können durch Unterlagen ergänzt werden, die aus dem Schwerpunkt „Sandbewegung im Küstenraum“ über Probenentnahmen in den Jahren 1968/69 und 1972 verfügbar sind. Jedoch erlauben sie für sich allein noch keine Aussage über die Größe des Risikos.

Bei der Beurteilung einer Sandentnahme aus der Insel ist zu berücksichtigen, daß eine starke Deckschicht abzuräumen ist. Der Kaolinsand kann erst in einer Tiefe von rd. 10 m erreicht werden. Das genaue Ausmaß der Deckschicht und der daraus folgende Aufwand für deren Entfernung kann jedoch aus den bisher vorhandenen geologischen Daten nicht abgeleitet werden. Dazu wären weitere Aufschlußbohrungen erforderlich, die sich vor allem über den wichtigen westlichen Teil des Gebietes nördlich des *Rantum-Beckens* erstrecken müßten. Ein besonderes Problem stellt außerdem eine mögliche Versalzung des Grundwassers dar, wenn entnommener Kaolinsand durch Meeressand ersetzt werden soll.

## 5.2 Sandgewinnung, Sandtransport, Sandeinbau

### 5.2.1 Nutzung seeseitiger Entnahmegebiete

#### 5.2.1.1 Sandzufuhr aus dem Gebiet des Salzsandes

Es liegt der Gedanke nahe, die aus dem Abbruch des seewärtigen *Sylter Strandes* nach Norden verdrifteten Sande im Bereich des *Salzsandes* wieder zu gewinnen und im Kreislauf dem Strand durch Aufspülen wieder zuzuführen. Geologische Untersuchungen (s. 5.1.3) haben ergeben, daß der *Salzsand* in den Oberflächensedimenten geeignete Sandkörnungen für eine Vorspülung ( $> 0,2$  mm) nur oberhalb SKN — 6 m aufweist. Da die Wassertiefen auf dem *Salzsand* überwiegend SKN — 4 m bis — 5 m betragen und die Kerne bis höchstens 2 m tief reichen, ist das Vorhandensein geeigneter Sande nur mit 1 bis 2 m Mächtigkeit nachgewiesen. Wird eine mittlere Schichtstärke von 1,5 m angenommen, so würde die erforderliche Sandmenge von 500 000 m<sup>3</sup> auf einer Fläche von rd.  $\frac{1}{3}$  km<sup>2</sup> gewonnen werden können. Bei der großen Ausdehnung des *Salzsandes* von rd. 8 km<sup>2</sup> und unter Berücksichtigung der größeren Schichtstärken im nördlichen Bereich wäre eine solche Entnahme vertretbar, zumal mit einer Wiederaufsandung gerechnet werden kann. Es müßte allerdings beobachtet werden, ob die Bodenentnahme auf natürliche Weise wieder aufgefüllt wird, um entscheiden zu können, ob im Zeitabstand von etwa 5 Jahren auf längere Sicht Spülboden gewonnen werden kann, ohne daß der Bestand des *Salzsandes* gefährdet und das morphologische Gleichgewicht im Mündungsbereich des *Lister Tiefs* nachteilig verändert werden.

Die Gewinnung des Sandes bereitet allerdings Schwierigkeiten. Für den Abbau sind wegen der geringen Schichtstärke nur Schleppkopf-Saugbagger geeignet. Für ihren Einsatz sind die vorhandenen Wassertiefen auf dem *Salzsand* jedoch nicht ausreichend, weil wirtschaftlich einsetzbare Geräte mit einer Ladefähigkeit von mindestens 3000 m<sup>3</sup> im allgemeinen Tiefgänge von rd. 7 m und mehr und nur in Einzelfällen bei Sonderbauweisen etwa 5 bis 6 m haben. Es gibt zwar kleine Geräte dieser Art, ihre Seegängigkeit ist aber so begrenzt, daß ein Einsatz in diesem stark seegangs- und brandungsgefährdeten Gebiet nicht erwogen werden kann.

Somit scheidet der *Salzsand* als mögliches Sandentnahmegebiet aus.

#### 5.2.1.2 Sandzufuhr aus dem Flachwassergebiet westlich des Vortrapptiefs

Der aus dem seeseitigen Strandabtrag der *Insel Sylt* nach Süden verdriftete Sand baute die Sandbank südwestlich von *Hörnum Odde* bzw. westlich des *Vortrapptiefs* auf. Auch hier könnte daran gedacht werden, den am Strand verlorenen Sand wieder aufzunehmen und in den Erosionsbereich des Strandes zurückzubringen. Geologische Untersuchungen der Sandbank (s. 5.1.4) haben ergeben, daß für die Aufspülung geeignete Sandkörnungen ( $> 0,2$  mm) ebenso wie auf dem *Salzsand* nur oberhalb SKN — 6 m anstehen. Die Oberfläche der Bank liegt überwiegend auf SKN — 4 m bis SKN — 5 m, so daß geeignete Spülsande aus den gleichen Gründen wie beim *Salzsand* nur mit einer Mächtigkeit von 1,5 m nachgewiesen sind. Für die Gewinnung von 500 000 m<sup>3</sup> Spülsand müßte also auch hier eine Fläche von rd.  $\frac{1}{3}$  km<sup>2</sup> abgetragen werden. Die Entnahme wäre im Hinblick auf die Ausdehnung dieses Flachwassergebietes von rd. 15 km<sup>2</sup> vertretbar,

zumal auch hier mit einer Wiederauflandung gerechnet werden kann (LAMPRECHT, 1955), was aber noch genauer zu untersuchen wäre.

Da die Schichtstärke der für eine Aufspülung geeigneten Sande etwa ebenso gering ist wie auf dem *Salzsand* (s. 5.2.1.1), müßten für die Gewinnung und den Abtransport wiederum Schleppkopf-Saugbagger eingesetzt werden. Wegen des großen Tiefgangs wirtschaftlich einsetzbarer Geräte dieses Baggertyps und wegen der starken Seegangs- und Brandungsgefährdung in diesem Flachwasserbereich kann eine Sandentnahme aus dem Flachwassergebiet westlich des *Vortrapptiefs* ebensowenig in Betracht gezogen werden wie aus dem Bereich des *Salzsandes*.

### 5.2.1.3 Sandzufuhr aus dem Seegebiet westlich der Inselmitte von Sylt

Geologische Untersuchungen (s. 5.1.5) haben ergeben, daß auch im Seegebiet westlich von *Sylt* geeignete Sande für eine Aufspülung gewonnen werden können. Bei den Überlegungen über eine Sandentnahme aus diesem Gebiet ist zu berücksichtigen, daß nicht nur der Strand und Vorstrand der *Insel Sylt*, sondern auch der Inselsockel abbruchgefährdet sind. Da die erodierende Wirkung der Seegangskräfte bis in Wassertiefen von 12 bis 14 m festgestellt wurde, sollte eine Sandentnahme landwärts dieser Tiefenlinien vermieden werden. Das bedeutet, daß das Entnahmegebiet mindestens 5 km westlich des Inselstrandes liegen würde. Andererseits kann das Entnahmegebiet nicht weiter als 10 km nach Westen ausgedehnt werden, weil dort der stark befahrene *Elbe-Esbjerg-Weg* nahezu küstenparallel vorbeiführt. Eine Entnahme wäre also in einem Bereich zwischen etwa 5 und 10 km Entfernung westlich der *Insel Sylt* möglich. Für die Gewinnung aus dem Seegebiet westlich *Sylt*, den Transport und den Sandeinbau sind im wesentlichen folgende vier technische Lösungen denkbar (Abb. 30):

- a) Der Boden wird im Entnahmegebiet – 5 km vor dem Strand – von einem Saugbagger gewonnen und über eine Rohrleitung direkt auf das Spülfeld gefördert.
- b) Der Boden wird seewärts vom Riff – rd. 2 km vor dem Strand – von einem Saugbagger gewonnen und über eine schwimmende Rohrleitung direkt auf das Spülfeld gefördert. Der entstandene Entnahmekolk wird von einem Hoppersaugbagger mit Material aus dem in der Lösung a) angegebenen Entnahmegebiet wieder aufgefüllt.
- c) Ein Hoppersaugbagger gewinnt den Boden im Entnahmegebiet und verklappt ihn außerhalb des Riffgebietes auf etwa 10 m Wassertiefe, von wo ein Cutterbagger den Boden wieder aufnimmt und ihn auf den Strand spült.
- d) Ein Hoppersaugbagger gewinnt den Boden im Entnahmegebiet, transportiert ihn zu einem Spülgerüst oder zu einer Übergabeboje – etwa 2 km vor dem Strand – und spült ihn von dort über eine Rohrleitung auf das Spülfeld.

Die Lösung a) ist zunächst die naheliegendste (Abb. 30). Die wichtigste Voraussetzung dafür ist jedoch, daß es auf dem Markt seegängige Saugbagger gibt, die für einen Einsatz in dem unruhigen Seegebiet vor *Sylt* geeignet sind. Tatsächlich ist auf dem Markt der Trend zum seegängigen Saugbagger festzustellen. Soweit bekannt, sind zwei sehr leistungsfähige Saugbagger „Slidrecht 27“ und „Gravelines“ mit nachfolgenden Hauptdaten bereits im Einsatz, und ein weiteres Gerät „Slorp“ befindet sich in der Planung.

Der Einsatz seegängiger Geräte ist also denkbar. Ihre hohe Förderleistung setzt für einen wirtschaftlichen Einsatz aber eine Mächtigkeit der zu fördernden Bodenschicht von mindestens 20 m voraus. Da zu erwarten ist, daß im Entnahmegebiet bis mindestens 60 m Tiefe Kaolinsande anstehen, ist diese Bedingung erfüllt.

Name:	Sliedrecht 27	Gravelines	Slorp (Projekt)
Typ:	Ponton	Katamaran	Schiffsrumpf
Daten:			
Länge	79,10 m	75,70 m	139 m
Breite	12,90 m	26,50 m	25 m
Tiefgang	4,60 m	6,00 m	3,5 m
Antriebsleistung (insgesamt)	9 735 PS	6 900 PS	17 500 PS
Saugtiefe	60 m	50 m	65 m
Wochenleistung (m <sup>3</sup> Sand)	rd. 300 000	rd. 500 000	rd. 400 000
Spülrohrdurchmesser	90 cm	85 cm	90-100 cm

Während die Spülweite vom Entnahmegebiet zum Strand von reichlich 5 km für die genannten Großgeräte überwindbar ist, bereitet die Sicherung der schwimmenden Spülrohrleitung gegen Strömung, Wellengang und Brandung Schwierigkeiten. Der Aufwand ist nicht nur wegen der erforderlichen großen Zahl von Verankerungen, des großen Überwachungsaufwandes und der hohen Störanfälligkeit einer seegangs- und strömungsbeanspruchten Schwimmrohrleitung sehr groß und damit kostspielig. Dazu kommt, daß die Eigner der genannten Großgeräte noch nicht über derartig lange, seegangsbeständige schwimmende Spülrohrleitungen verfügen und deshalb speziell für diesen Auftrag zusätzliche Investitionen tätigen müßten. Das seegangsbedingte Risiko für schwimmende Spülrohrleitungen ließe sich mit einer am Meeresboden verlegten Spülrohrleitung vermindern, allerdings würde diese Lösung hohe Kosten erfordern. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit müssen auch die beträchtlichen täglichen Gerätekosten sowie die hohen Kosten für den An- und Abtransport in Relation zu der im Vergleich zur Leistung der Geräte geringen Aufspülmenge von nur 500 000 m<sup>3</sup> gesehen werden. Die Aufspülmenge könnte theoretisch in 7 bis 10 Arbeitstagen gefördert werden.

Es ist durchaus möglich, daß die wenigen Firmen, die über seegängige Saugbagger verfügen, wegen starker, weltweiter Auslastung einerseits und der geringen Aufspülmenge, der hohen erforderlichen Investitions- und Unterhaltungskosten für eine ausreichend lange Schwimmrohrleitung oder Bodenleitung, aber auch wegen des risikoreichen Einsatzes vor *Sylt* nicht anbieten werden.

Die Lösung b) sieht vor, daß der Spülsand zunächst aus dem Inselsockel – etwa 2 km vor dem Strand – entnommen und der entstandene Kolk gleichzeitig oder anschließend mit Material aus dem zulässigen Entnahmegebiet in mindestens 5 km Entfernung wieder verfüllt wird (Abb. 30). Diese Lösung würde gegenüber der Lösung a) den Vorteil haben, daß die schwimmende oder am Meeresboden verlegte Spülrohrleitung des Saugbaggers um 60 % kürzer wäre und damit geringere Investitions- und Unterhaltungskosten und auch ein geringeres Betriebsrisiko bedeuten würde. Bei der geringeren Spülentfernung könnten auch Geräte mit mittleren Förderleistungen, allerdings unter Inkaufnahme eines stark erhöhten Wetterrisikos, eingesetzt werden. Ein größerer Kreis von Firmen würde in der Lage sein anzubieten. Verteuernd kommt der Einsatz eines Schleppkopf-Saugbaggers hinzu, der erforderlich ist, um den Entnahmekolk mit Boden aus dem Entnahmegebiet 5 km vor der Insel wieder aufzufüllen.

Entscheidend für die Beurteilung der Lösung b) ist die Beantwortung der Frage, ob der in den Entnahmekolk abgelagerte Sand gegenüber den in diesem Gebiet wirksamen Seegangs- und Strömungskräften die gleiche Lagebeständigkeit hat wie der zuvor anstehende Boden. Nach den inzwischen vorliegenden Erfahrungen bei dem Bau von Unterwassertunneln und -pipelines muß davon ausgegangen werden, daß bei gleichem Kornaufbau ein unter Wasser eingebrachter Boden sich weniger dicht abgelagert als der um-

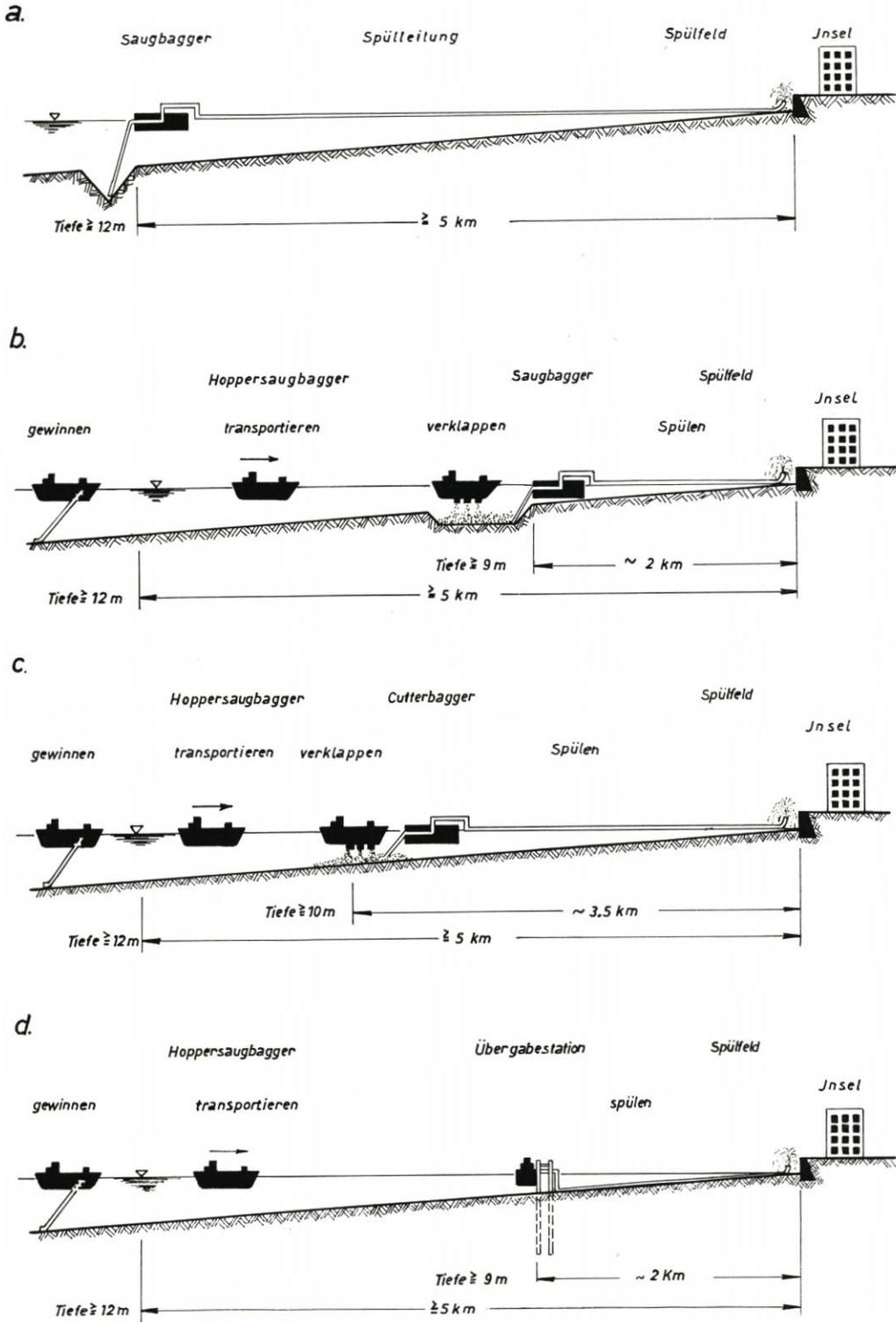


Abb. 30. Lösungsmöglichkeiten für eine Strandaufpflung mit Materialgewinnung seawärts der Insel

gebende Meeresboden. Aus diesem Grunde muß von einer Entnahme im Abstand von weniger als 5 km von der Insel abgeraten werden.

Die Lösung c) ähnelt im Prinzip der vorstehenden Lösung (Abb. 30). Eine Verbesserung bedeutet jedoch der Wegfall des Entnahmekolkes in der 5-km-Sicherheitszone der Insel. Statt dessen wird der durch einen Schleppkopf-Saugbagger im Entnahmegebiet gewonnene Sand auf dem Meeresboden zwischengelagert und von dort mit einem Cutterbagger über eine schwimmende Spülrohrleitung zum Strand gefördert. Ein Nachteil der Zwischenlagerung des Materials auf dem Meeresboden ist allerdings die Tatsache, daß der Bagger für das Verklappen eine Mindestwassertiefe von 10 m benötigt, denn diese liegt in größerer Entfernung von der Insel als der Entnahmekolk, der auf etwa 9 m Tiefe, aber aus Sicherheitsgründen nicht näher als 2000 m von der Strandmauer entfernt liegen würde. Dadurch bedingt, vergrößert sich die Spülentfernung gegenüber der Lösung b) von rd. 2 km auf rd. 3,5 km. Damit wachsen wiederum die Aufwendungen für die kostspielige schwimmende oder am Boden verlegte Spülrohrleitung einschließlich ihrer Verankerung und Unterhaltung. Die Förderkosten für den Bagger steigen ebenfalls, weil dieser den Spülsand nicht mehr beliebig aus dem Meeresboden ansaugen kann, sondern nur das zuvor aufgeschüttete Sandlager abräumen darf, ohne den ursprünglichen Meeresboden anzuschneiden. Diese Randbedingung führt dazu, daß nicht wie bei den Lösungen a) und b) ein leistungsfähiger Saugbagger eingesetzt werden kann, sondern statt dessen ein Cutterbagger gewählt werden muß. Die auf dem Markt befindlichen Cuttergeräte reichen bei weitem nicht an die Größe und damit Seegängigkeit der vorgenannten Großsauger heran. Aber nicht nur ihre geringere Größe, sondern auch ihre Arbeitsweise erschweren ihren Einsatz, verringern die Leistung und führten zu erhöhten Kosten. Außerdem ist wie bei der Lösung b) neben dem Spüler der Einsatz eines Hoppersaugbagger erforderlich.

Die Lösung d) sieht die Gewinnung, den Transport und die Aufspülung wieder mit nur einem Gerät vor – wie bei Lösung a) (Abb. 30). In diesem Falle würde ein Hoppersaugbagger den Boden im Entnahmegebiet 5 bis 10 km vor der Insel gewinnen, dann zu einem auf etwa 9 m Wassertiefe zu errichtenden Spülgerüst fahren und von dort über eine rd. 2 km lange Spülrohrleitung auf den Strand spülen. Der Bau des Spülgerüsts würde beträchtliche Kosten verursachen, weil es das Anlegen eines etwa 5000 bis 10 000 tdw großen Baggers gestatten müßte. Statt des Spülgerüsts könnte auch eine Übergabeboje ausgelegt werden, wie sie beim Ölumschlag vielfach verwendet wird. Die Kosten für eine solche Boje sind aber auch hoch.

Ungünstig für dieses Spülverfahren ist, daß nur wenige Schleppkopf-Saugbagger das Baggergut aus dem Laderaum verspülen können. Die zum Verspülen eingerichteten Bagger erreichen – soweit bekannt – nur in wenigen Ausnahmefällen eine Spülweite von 2 km. Außerdem wird die Leistung des Gerätes, gegenüber der Verklappmethode bei der Lösung b) und c), durch den Zeitaufwand für das Spülen sowie das An- und Ablegen und das Anschließen und Lösen des Spülrohres um mindestens 50 % vermindert. Dazu kommt das Risiko der Anlegemanöver, Spülleitungsübernahme, Leitungskopplung und -lösung und schließlich der Ausfalltage durch Seegang, an denen das Anlegen am Spülgerüst bzw. an der Boje nicht möglich ist. Ein Spülgerüst einschließlich Anlegedalben für eine einzige Aufspülung wird wegen der rauen Seegangsbedingungen zu teuer. Soll es aber auf Dauer für die etwa alle fünf Jahre erforderlichen Aufspülungen dienen, muß es konstruktiv so bemessen sein, daß es Winterstürmen und Eisgang widerstehen kann. Die Kosten würden dadurch steigen, sich aber entsprechend der Lebensdauer auf mehrere Aufspülungen verteilen. Dazu kommt die notwendige Unterhaltung der nur etwa alle fünf Jahre für kurze Zeit betriebenen Anlage. Bei den Kosten für die Spülrohrleitung wird davon ausgegangen,

daß die feste Verlegung vom Spülgerüst zum Strand zwar einen risikolosereren Spülbetrieb ermöglicht, aber auf Dauer teurer ist als eine jeweils vom Unternehmer vorzuhaltende schwimmende Spülleitung.

### 5.2.2 Nutzung des Sandentnahmegebietes im Watt zwischen Sylt und Föhr

Die Lösung e) entspricht der 1972 angewandten Aufspülmethode. Die im Untergrund der *Rantum-er Bucht* anstehenden Kaolinsande haben eine Mächtigkeit von etwa 80 m (s. 5.1.2). Da anzunehmen ist, daß deren Vorkommen sich über den gesamten Wattbereich zwischen *Sylt* und *Föhr* erstreckt, ist auf lange Sicht die Möglichkeit gegeben, hier geeignete Sande für Strandaufspülungen zu gewinnen. Das Abräumen von mehr oder weniger starken Mergelschichten mit Steineinschlüssen muß dabei in Kauf genommen werden.

Das Entnahmegebiet im *Rantum-Watt* (Abb. 3) liegt seegangsgeschützt. Die Gewinnung von Spülsand ist hier daher weitgehend unabhängig von Wetter und Jahreszeit. Der Einsatz von Großgeräten ist wegen der geringen Wassertiefen in Ufernähe kaum wirtschaftlich möglich, zumal pro Aufspülung jeweils nur die relativ geringe Sandmenge von 500 000 m<sup>3</sup> zu gewinnen und zu fördern ist. Spülgeräte mittlerer Leistung finden hier jedoch gute Arbeitsbedingungen und damit wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten vor (s. 2). Für den Spülguttransport zum Strand sind allerdings Zwischenpumpwerke unentbehrlich.

Die Versuchsvorspülung 1972 hat dieses Aufspülverfahren als nahezu wetterunabhängig, wenig stör anfällig und leistungsfähig erwiesen. Zu überprüfen bleibt, ob sich das Verfahren im Hinblick auf regelmäßig wiederkehrende Aufspülungen wirtschaftlicher gestalten läßt.

Die Baustelleneinrichtungs- und Abbaukosten würden sich beispielsweise vermindern lassen, wenn das ALW Husum die vom *Nössedeich* bis zur Strandmauer vor *Westerland* führende Spülrohrleitung vorhalten würde. Für eine solche Leitung müßte ein gängiger Rohrdurchmesser von 60–65 cm gewählt werden, der auf die Mehrzahl der auf dem Markt befindlichen Spülgeräte abgestimmt wäre. Gegen eine verwaltungsseitige Vorhaltung der Zwischenpumpstationen spricht, daß die Pumpen mindestens eine Leistung von 2000 PS haben müßten und deshalb für den nur etwa alle 5 Jahre wiederkehrenden kurzfristigen Einsatz zu kostspielig in der Anschaffung und Unterhaltung sind.

Es bleibt abzuwägen, ob das verwaltungsseitige Vorhalten der Spülrohrleitungen zu Einsparungen führt. Die Länge der festen Spülrohrleitung zwischen dem Binnenfuß des *Nössedeiches* und dem Spülfeld vor der Strandschutzmauer vor *Westerland* würde rd. 5 km betragen. Die Leitungslängen vom Binnenfuß des *Nössedeiches* bis zur Entnahmestelle und die Leitungen auf dem Spülfeld müßten ohnehin von dem jeweiligen Auftragnehmer installiert, vorgehalten und betrieben werden. Das bedeutet, daß der Auftraggeber von der gesamten Leitungslänge von etwa 7 km je nach Lage der Entnahmestelle bis zu 70 % in eigene Regie nehmen könnte.

Für die Lebensdauer der Spülrohrleitung ist entscheidend, daß sie nur etwa alle 5 Jahre benutzt wird und daher geringem Verschleiß, aber ungehemmter Korrosion unterliegt. Die Lebensdauer ist deshalb relativ gering und belastet die einzelnen Aufspülungen kostenmäßig erheblich. Ferner muß eine bleibende Leitung sorgfältiger und dauerhafter verlegt werden als eine vorübergehende, was vor allem bei Kreuzungen mit Verkehrs-

wegen sowie in bebauten Erholungsgebieten zusätzliche Kosten verursacht. Schließlich fallen erhebliche Unterhaltungskosten an. Schon die Vorstellung, daß während des mehrjährigen Stilliegens der Leitung nahezu sämtliche Dichtungen schadhft werden und ausgetauscht werden müssen, führt zu der Erkenntnis, daß das Vorhalten einer Spülrohrleitung von seiten der Verwaltung unwirtschaftlich ist.

Wenn somit von verwaltungseigenen Zwischenpumpstationen und Spülrohrleitungen abzusehen ist, so muß doch zumindest eine Leitungstrasse von der Bebauung freigehalten werden. Die Trasse sollte entlang einer Straße verlaufen. Soweit das nicht möglich ist, muß sie ausreichend befahrbar und mindestens 5 m breit sein. Der Auf- und Abbau sowie die Unterhaltung der Leitung würden sehr begünstigt, wenn entlang dieser Trasse eine Straße geführt würde, über welche der Transport der Spülrohre und die Rohrverlegung möglich wären. Von der Bebauung freigehalten werden müssen auch zwei Plätze an der Trasse für die Aufstellung von Zwischenpumpstationen. Sie sollten eine Ausdehnung von 15 m × 30 m parallel zur Rohrleitungstrasse haben und etwa dort liegen, wo bei der Versuchsaufspülung die Zwischenpumpstationen Z 1 und Z 2 standen (Abb. 3).

Die Lösung f) soll eine Verbilligung schaffen, indem in Verbindung mit der nächsten Aufspülung ein Sandvorrat möglichst nahe an der Einbaustelle geschaffen wird. Damit würden für eine oder mehrere nachfolgende Aufspülungen geringere Förderkosten entstehen, als wenn jedesmal aus dem Watt über die gesamte Entfernung bis zur Einbaustelle gespült werden müßte. Der Sandvorrat könnte in einem umdämmten Spülfeld untergebracht werden. Wird eine Spülhöhe von 10 m vorgesehen, so würde für das Zwischenlager mit 1 : 4 geneigten Böschungen eine Geländefläche von rd. 7,5 ha benötigt. Der Sand für 2 Vorspülungen würde eine Ablagerungsfläche von rd. 15 ha erfordern. Auf der gleichen Fläche könnte der Sandvorrat für 3 Aufspülungen untergebracht werden, wenn die Spülhöhe auf 15 m gesteigert würde. Zur Vermeidung von Sandflug könnten die Böschungen und Oberflächen chemisch verfestigt oder künstlich begrünt werden.

Wenn wegen eines Wassergewinnungsgebietes das Versickern von Salzwasser aus dem Spülfeld vermieden werden muß, wären aufwendige Maßnahmen zu treffen, die noch dazu im rauen Baustellenbetrieb sehr gefährdet sind. Die Ablagerungsfläche wäre mit Folie abzudecken und das Spülfeld zu drainieren. Das Wasser aus der Drainage wäre in einem Vorfluter aufzufangen, der kein Salzwasser versickern läßt und ggf. wasserdicht ausgekleidet werden muß, und dann einem Pumpwerk zuzuleiten, das es in den See zurückpumpt. Für den Transport des Materials aus dem Sandlager zur Einbaustelle am Strand bietet sich auf den ersten Blick ein Trockentransport an, dessen Wirtschaftlichkeit an anderer Stelle (s. 5.3.2, Lösung f) noch untersucht wird.

### 5.2.3 Nutzung einer Sandentnahme auf der Insel

#### 5.2.3.1 Sandentnahme aus einem Baggersee

Die Lösung g) sieht die Bodenentnahme aus dem Untergrund der Insel vor, denn auch dort steht geeigneter Kaolinsand an. Er wird jedoch von einer rd. 10 m mächtigen Deckschicht – im wesentlichen aus Geschiebelehm und Ton bestehend – überlagert. Dem Nachteil der starken Deckschicht aus unbrauchbaren Bodenarten steht der Vorteil der kurzen Spülentfernung und des witterungsunabhängigen Betriebes gegenüber. Deshalb soll diese Lösung nicht näher untersucht werden.

Die Entnahmestelle müßte so nahe wie möglich am südlichen Stadtrand von Wester-

land und so dicht wie möglich hinter den Randdünen liegen (Abb. 3), damit die Transportentfernung zwischen der Entnahme- und der Einbaustelle so kurz ist, daß eine Zwischenpumpstation vermieden werden kann und die Transportkosten gering bleiben. Damit möglichst wenig Bodenfläche der Insel in Anspruch genommen wird, muß die Sandgewinnung in einer solchen Entnahme begrenzt werden, indem der durch die Gewinnung entstehende Baggersee nach einer Anzahl von Sandentnahmen durch Nachspülen aus dem *Rantum-Watt*, und zwar zweckmäßigerweise in Verbindung mit einer direkten Strandaufspülung in der unter 5.2.2 beschriebenen Art, wieder aufgefüllt wird.

Eine vieler denkbaren Lösungen für die Anlage eines Baggersees und vor allem für eine umweltfreundliche Ablagerung der für die Aufspülung unbrauchbaren Deckschichten ist auf Abb. 31 skizziert. Die insgesamt in Anspruch genommene Bodenfläche ist bei 1 : 3 geneigten Böschungen rd. 32 ha groß. Sie wird zur Hälfte aber nur für die Umlagerung und Unterbringung der nicht verwertbaren Deckschichten benötigt, so daß nach der vierten Entnahme die endgültige Form des Baggersees mit nur etwa 16 ha Ausdehnung verbleibt. Da sich dieser Baggersee für Erholungszwecke (Baden und Bootfahren) anbietet, könnten die Ufer in den dafür vorgesehenen Bereichen abgeflacht werden, und zwar von der Geländeoberfläche bis zu einer Wassertiefe von 2 m 1 : 10, darunter 1 : 3 geneigt. Damit würde sich jedoch die zu beanspruchende Bodenfläche entsprechend vergrößern.

Auf diese Weise wären 6 Aufspülungen mit kurzen Spülweiten aus der Entnahme auf der Insel möglich. Die 7. Aufspülung würde aus dem *Rantum-Watt* vorgenommen und mit der Wiederauffüllung des Baggersees – sofern er auch Erholungszwecken dient – bis etwa 2 m unter dem normalen Wasserspiegel verbunden. Die Bodenentnahme aus dem *Rantum-Watt* würde hierbei rd. 3,5 Mio. m<sup>3</sup> betragen und damit kostengünstiger sein als sieben Einzelentnahmen von 0,5 Mio. m<sup>3</sup>.

Die Aufspülung aus den Sandvorräten der Insel ist nicht unbedenklich. Vor allem müssen nachteilige Auswirkungen auf den Grundwasserstand – insbesondere auf Wassergewinnungsgebiete – verhindert werden. Während die Umlagerung der für Aufspülungszwecke nicht verwendbaren Deckschichten keine Anreicherung oder Auszehrung des Grundwasserspeichers bewirkt, wird für das Verspülen des Kaolinsandes zur Einbaustelle Grundwasser verbraucht. Das Mischungsverhältnis von Sand zu Wasser kann beim Spülvorgang zwischen 1 : 3 und 1 : 5 schwanken. Zum Verspülen von 0,5 Mio. m<sup>3</sup> Kaolinsand werden also rd. 1,5 bis 2,5 Mio. m<sup>3</sup> Wasser aus dem Grundwasserspeicher entnommen. Die Entnahme würde sich über einen Zeitraum von 3 bis 4 Monaten erstrecken und an den Wochenenden im allgemeinen unterbrochen werden, so daß sie relativ langsam verläuft und das Grundwasser sich von Zeit zu Zeit durch ihre Unterbrechung, durch übergebiethlichen Ausgleich und durch zwischenzeitliche Regenfälle wieder auffüllen kann.

Eine Absenkung des Wasserspiegels im Baggersee und die sich daraus ergebende Grundwasserabsenkung können wesentlich vermindert werden, wenn die Vorfluter möglichst weitere Gebiete zwischen *Morsum* und der Randdünenkette mit dem Baggersee verbinden. So müßte es möglich sein, die durch den Spülbetrieb verursachten Wasserverluste durch Oberflächenwasser weitgehend zu ersetzen. Ein Verbund des Entwässerungssystems der *Waadens-Sill*, *Kreuz-Wehle*, *Archs-Wehle* und *Tjüls-Wehle* mit dem Baggersee ist also eine Voraussetzung für die beschriebene Lösung. Damit könnte die Belastung des Grundwassers wesentlich eingeschränkt werden.

Zunächst sollten aber die durch den Spülwasserverbrauch zu erwartenden Grundwasserabsenkungskurven ermittelt werden, damit möglichst genaue Aussagen über die Auswirkung einer Wasserentnahme auf den Grundwasserspeicher und eventuell benachbarte Wassergewinnungsgebiete gemacht werden können.

Besondere Schwierigkeiten treten bei der Wiederauffüllung des Baggersees nach voraussichtlich  $7 \times 5 = 35$  Jahren in Verbindung mit der siebten Aufspülung – die Versuchsspülung 1972 nicht mitgerechnet – auf, weil dabei Salzwasser in den Baggersee gelangt. Wenn das Grundwasser nicht versalzen soll, muß das Salzwasser zurückgepumpt werden. Die Tatsache, daß sich Salz- und Süßwasser nur allmählich mischen und daß Salzwasser schwerer als Süßwasser ist, eröffnet die Möglichkeit, das Salzwasser in den tiefsten Bereichen des Baggersees und in Ufernähe, wo die Gefahr des Einsinkens in den Grundwasserspeicher besteht, abzupumpen. Dabei muß die abgepumpte Wassermenge stets etwas größer als die zugeführte Spülwassermenge sein, damit immer ein leichter Grundwasserzufluß zum Baggersee besteht. Auch bei Unterbrechungen des Einspülbetriebes, insbesondere auch an den Wochenenden, sollte leicht abgepumpt werden, damit das Eindringen von Salzwasser in den Grundwasserträger vermieden wird. Bevor an eine Wiederauffüllung des Baggersees aus dem Watt gedacht wird, sind deshalb genaue Boden- und Grundwasseruntersuchungen anzustellen. Insbesondere sind Modellversuche über das Abpumpverfahren zu machen, um genaue Kenntnisse über die optimale Lage und Anordnung des Abpumpsystems und die erforderlichen Abpumpmengen zu gewinnen.

Das Wiederauffüllen des Baggersees ließe sich dadurch vereinfachen, daß er gegen den umgebenden Grundwasserspeicherraum abgedichtet wird. Die Abdichtung wäre möglicherweise wirtschaftlich erreichbar, wenn der in den abzuräumenden Deckschichten zu erwartende Ton in so ausreichender Menge anfällt, daß er für eine Auskleidung des Baggersees ausreicht. Das Abpumpen des salzhaltigen Spülwassers ist dann ohne ein ausgeklügeltes Absaugsystem möglich. Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß der Wasserspiegel im Baggersee nicht unter den des Grundwassers abgesenkt wird, weil dann ein Überdruck hinter der Tondichtung entsteht und Schäden eintreten können. Während Sandentnahmen aus dem Baggersee, wenn also Grundwasserzufluß benötigt wird, muß ein dauernder Wasserausgleich zwischen dem umgebenden Grundwasser und dem Baggersee ermöglicht werden. Der rauhe Baustellenbetrieb wäre einer Dichtung gefährlich.

Für den Fall, daß keine ausreichenden Tonmengen vorhanden sind, um den ganzen Baggersee abzudichten, ist eine Teillösung denkbar, indem wenigstens der Boden und der untere Böschungsbereich gedichtet werden, weil das Salzwasser sich wegen seines höheren spezifischen Gewichtes vornehmlich im unteren Bereich sammelt. Je höher die Dichtung geführt werden kann, desto einfacher wird das Absaugsystem. Der Einbau der Tondichtung in den großen Tiefen des Baggersees – bis zu 40 m – müßte sehr sorgfältig geplant und ausgeführt werden.

#### 5.2.3.2 Sandentnahme aus dem Rantumbecken

Die Lösung h) behandelt die Möglichkeit einer Sandgewinnung im *Rantumbecken*. Auch dort wäre durch Bodenuntersuchungen festzustellen, welche Mächtigkeit die Kaolinsande im Untergrund haben und wie stark die Deckschicht aus für Aufspülungen ungeeigneten Böden ist. Eine Entnahme im *Rantumbecken* hat den Vorteil gegenüber anderen aus der Insel, daß sie so sehr am Rande des Grundwasserspeichers der Insel und von Wassergewinnungsgebieten entfernt liegt, daß Wasserstandsschwankungen in der Entnahme sich kaum noch nachteilig auswirken können. Diese Annahme muß durch Bodenerkundungen jedoch bestätigt werden. Das *Rantumbecken* ist so groß, daß Entnahmen über sehr lange Zeiträume möglich sind. Es befindet sich im Eigentum der öffentlichen Hand, so daß ein Grunderwerb nicht nötig und Entschädigungsansprüche nicht zu erwar-

ten sind. Die Sandgewinnung wäre von Witterungseinflüssen – ausgenommen Frost – unabhängig, weil das *Rantumbecken* ein eingedeichtes ehemaliges Wattgebiet ist. Die Spülweite würde mit etwa 4 km zwischen der aus einem Baggersee (s. 5.2.3.1) und der aus dem *Rantum-Watt* (s. 3.2.2) liegen und je nach der Leistung des eingesetzten Baggergerätes ohne oder allenfalls mit einer Zwischenpumpstation zu überbrücken sein.

Da das *Rantumbecken* ein Naturschutzgebiet ist, muß auf die Belange des Naturschutzes unbedingt Rücksicht genommen werden. Deshalb ist Wert auf eine umweltfreundliche und naturschutzgerechte Unterbringung der für das Aufspülen ungeeigneten Deckschichten zu legen. Das ist im Bereich der vorhandenen Wasserflächen ohne weiteres unter dem Wasserspiegel möglich, so daß die Bodenentnahme und -ablagerung nicht stören.

Wegen der Witterungsunabhängigkeit der Sandgewinnung ist jahreszeitlich gesehen eine optimale Anpassung an die Bedürfnisse des Naturschutzes möglich. Es läßt sich sogar erreichen, das Naturschutzgebiet durch die Baggerarbeiten und die damit verbundenen Bodenentnahmen und -umlagerungen positiv zu beeinflussen. Deshalb sind in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für ergänzende Maßnahmen 0,2 Mio. DM angesetzt worden. Die damit zusammenhängenden Fragen und Möglichkeiten müssen mit den Dienststellen des Naturschutzes erörtert werden. Zu untersuchen ist auch, ob der Betrieb der am Nordwestrand des *Rantumbeckens* gelegenen Kläranlage nachteilige Auswirkungen auf eine Aufspülung aus diesem Gebiet haben könnte. Sofern das zu befürchten ist, muß die Kläranlage entsprechend verbessert werden. In der nachfolgenden Kostenbetrachtung (s. 5.3) ist dafür vorsorglich ein Betrag von 0,8 Mio. DM angesetzt worden, worin auch eine Beseitigung von Faulschlämmen aus dem *Rantumbecken* enthalten ist.

### 5.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

#### 5.3.1 Allgemeines

Für die Frage der Wirtschaftlichkeit sind Kostenermittlungen unentbehrlich. Die Kosten für Baumaßnahmen – denn darum handelt es sich bei den Sandaufspülungen – werden vielfältig beeinflußt, wobei sich die Einflußfaktoren ständig verändern. Maßgebende Einflüsse sind in diesem speziellen Fall die Beschäftigungslage der Baggerfirmen, Verfügbarkeit von Gerät und Personal, Leistung von Geräten, Möglichkeiten von Gerätekombinationen, Verfügbarkeit von Wetter- und Seegangsvoraussagen, Transport- und Versorgungsfragen, Einschätzung des Wetterrisikos im allgemeinen und des Seegangrisikos im besonderen, Erreichbarkeit von Schutz- und Versorgungshäfen und ihre Ausrüstung, Beurteilung der durch die Insellage bedingten Erschwernisse und erhöhten Kosten, anzusetzende Abschreibungskosten, Verzinsung, Wagnis, Gewinn usw. Diese und weitere Faktoren haben auf die Kalkulation der einzelnen Firmen sehr unterschiedliche Auswirkungen und führen bekanntermaßen zu Unterschieden in den Angebotspreisen, die beträchtlich sein können.

Die Vielfalt und die Unterschiede in der Beurteilung der Kalkulationseinflüsse erschwerten die im Rahmen der nachfolgenden Kostenbetrachtungen angestellten Ermittlungen sehr. Es wurde versucht, das angefallene Zahlenmaterial aus den zahlreichen Unterlagen und Informationen so zusammenzustellen und zu bewerten, daß die nachfolgenden überschläglichen Kostenangaben vergleichbar sind. Die Ergebnisse haben aber nur eine zeitlich begrenzte Gültigkeit, weil die Kalkulationsgrundlagen sich ständig und unterschiedlich ändern.

## 5.3.2 Kostenermittlungen

Zunächst werden die Kosten von Strandaufspülungen mit 500 000 m<sup>3</sup> seeseitiger Sandgewinnung erörtert.

Die Lösung a) (Abb. 30) wird unter der Annahme des Einsatzes eines der erwähnten Großgeräte und 50 % Ausfallzeiten 3,75 Mio. DM bzw. 7,50 DM/m<sup>3</sup> kosten.

Die Lösung b) (Abb. 30) bietet zwar eine kürzere Spülentfernung, erfordert aber zusätzlich den Einsatz eines Hoppersaugbaggers, wodurch die Kosten auf 4,50 Mio. DM bzw. 9,00 DM/m<sup>3</sup> steigen. Da dieses Verfahren außerdem den Nachteil hat, daß eine vorübergehende Sandentnahme innerhalb des 5-km-Sicherheitsbereiches der Insel vorgenommen würde und die Stabilität einer Wiederauffüllung gegenüber Seegangskräften ungewiß ist, sollte sie außer Betracht bleiben.

Die Lösung c) erfordert ebenso wie die Lösung b) den kostspieligen Einsatz von zwei Geräten. Darüber hinaus muß der Boden im Cutterverfahren aus dem Zwischenlager erneut aufgenommen und gespült werden, was sowohl vom Gerätetyp als auch von den Arbeitsbedingungen im Seegebiet vor Sylt her gesehen äußerst schwierig ist. Deshalb liegen die Kosten dieses Spülverfahrens mit 6,75 Mio. DM bzw. 13,50 DM/m<sup>3</sup> so hoch, daß es nicht erwogen werden kann.

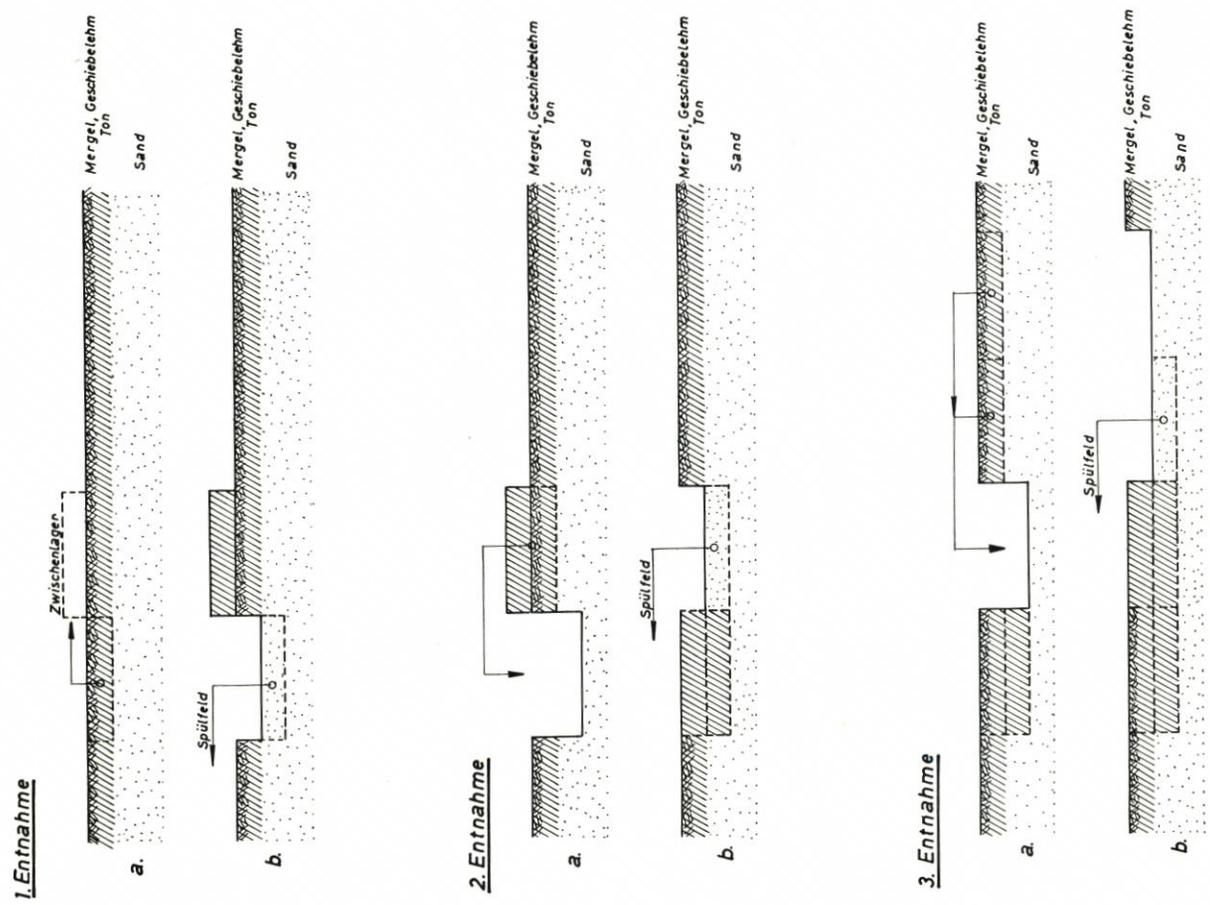
Die Lösung d) hat den Vorteil des Einsatzes von nur einem Gerät, aber den Nachteil, daß dieses Gerät das Baggergut nur mittels einer Übergabestation, die als Anlagestelle ausgebildet werden muß, auf den Strand spülen kann. Die Leistung des Hoppersaugbaggers fällt gegenüber dem Verklappen des Baggergutes bei den Lösungen b) und c) durch den Zeitaufwand für das Anlegen, Übernehmen und Koppeln der Spüleleitung, die Spülzeit, das Abkoppeln der Spüleleitung und das Ablegen um mehr als 50 %. Hinzu kommen Ausfalltage, an denen wegen ungünstiger Seegangsverhältnisse die Übergabestation nicht angelaufen werden kann. Daher steigen die Gerätekosten von 3,50 DM/m<sup>3</sup> Spülmenge [Lösung a) und b)] auf 8,00 DM/m<sup>3</sup>, womit allein der Geräteeinsatz 4 Mio. DM und damit mehr als die Lösung a) kostet. Die Kosten für die Übergabestation und die Spüleleitung zwischen ihr und dem Strand würden zusätzlich entstehen.

Die billigste Strandaufspülung von der Seeseite her bietet also die Lösung a) mit 3,75 Mio. DM.

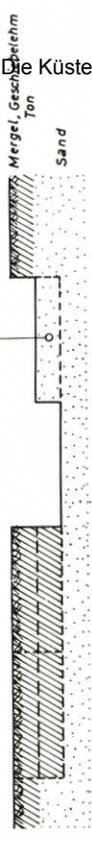
Die Lösung e) entspricht der Versuchsvorspülung 1972 mit einer Bodenentnahme aus dem *Rantum-Watt*. Die Kosten dafür sind insgesamt 3,60 Mio. DM bzw. 7,20 DM/m<sup>3</sup>. Der Preis je Kubikmeter liegt etwas höher als bei der Aufspülung 1972, als 900 000 m<sup>3</sup> gespült wurden.

Die Lösung f) verbindet mit der Aufspülung entsprechend Lösung e) ein Zwischenlager für drei weitere Strandauffüllungen im Trockentransport. Bei der Kostenermittlung ergibt sich jedoch, daß sich allein der Trockentransport, nicht zuletzt wegen der schwierigen Gelände- und Wegeverhältnisse zur Einbaustelle am Strand, auf rd. 7,00 DM/m<sup>3</sup> stellt. Dazu kommen Grunderwerb, Abdeckung des Spülfeldes mit Folie, Aufspülkosten für das Zwischenlager, Auffangen und Abpumpen des Spülwassers, Sicherung des Zwischenlagers gegen Regen- und Winderosion usw., so daß eine Strandauffüllung im Mittel 6,1 Mio. DM bzw. 12,20 DM/m<sup>3</sup> kosten würde. Diese Lösung wird wegen der hohen Kosten nicht in die weiteren Überlegungen einbezogen.

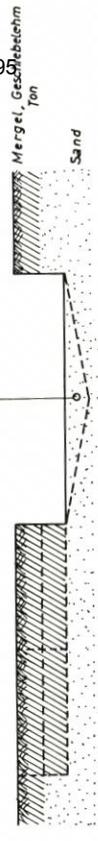
Die Lösung g) sieht die Bodenentnahme aus einem nahe des aufzuspülenden Strandes anzulegenden Baggersee vor. Die Spülweite würde nur rd. 2 km betragen und könnte ohne Zwischenpumpstation überwunden werden, so daß sich die reinen Spülkosten auf nur rd. 2,00 Mio. DM belaufen würden. Es entstehen jedoch zusätzliche Kosten, weil eine



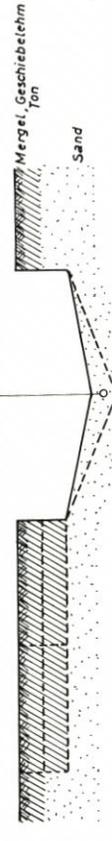
**4. Entnahme**



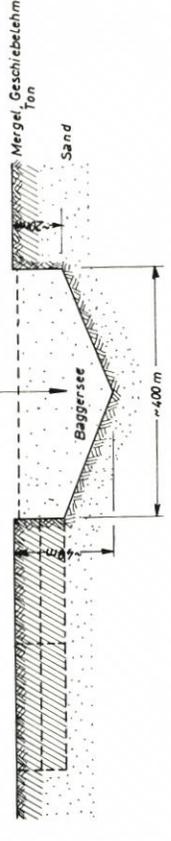
**5. Entnahme**



**6. Entnahme**



**7. Auffüllen des Baggerssees mit gleichzeitiger Strandaufspülung.**



**8. Jeweils 6 Entnahmen (Aufspülungen) erfolgen nunmehr aus dem Baggersee. Die Auffüllung des Baggerssees wird je weils mit der 7. Aufspülung verbunden.**

Abb. 31. Mögliche stufenweise Anlage eines Baggerssees (Prinzipskizze)

etwa 10 m starke Deckschicht abgeräumt und umweltfreundlich untergebracht werden muß. Wird der Baggersee in sechs Schritten (Abb. 31) angelegt, so kostet jede der sechs Aufspülungen einschließlich Grunderwerb, Entschädigung und Abdichtung des Baggersees im Mittel 4,00 Mio. DM bzw. 8,00 DM/m<sup>3</sup>. Weitere Aufspülungen kosten in Verbindung mit einer Wiederauffüllung des Baggersees aus dem *Rantum-Watt* im Mittel 3,60 Mio. DM bzw. 7,20 DM/m<sup>3</sup>. Damit entsprechen die Kosten dieser Lösung etwa denen der Lösung e).

Die Lösung h) nutzt das *Rantumbecken* zur Bodenentnahme. Nach einer Investition von 0,8 Mio. DM für notwendige Ergänzungen der Kläranlage und 0,2 Mio. DM für die Belange des Naturschutzes kosten Aufspülungen aus dem *Rantumbecken* mit Berücksichtigung des Umsetzens von Deckschichten rd. 3,0 Mio. DM bzw. 6,00 DM/m<sup>3</sup>.

### 5.3.3 Ergebnis

Aus dem vorstehenden Vergleich ergibt sich folgende Rangfolge der vier kostengünstigsten Aufspülverfahren für jeweils 500 000 m<sup>3</sup> Sand:

1. direkte Aufspülung aus dem <i>Rantumbecken</i> (+ einmaliger Betrag von 1 Mio. DM)	3,00 Mio. DM
2. direkte Aufspülung aus dem <i>Rantum-Watt</i>	3,60 Mio. DM
3. direkte Aufspülung mit einem Großgerät aus dem Seegebiet vor <i>Sylt</i>	3,75 Mio. DM
4. Aufspülung aus dem <i>Rantum-Watt</i> unter Zwischenschaltung eines Baggersees, 6 Aufspülungen im Mittel	4,00 Mio. DM
ab 7. Aufspülung im Mittel	3,60 Mio. DM

Zu diesem Ergebnis ist zu bemerken, daß die Kosten je Kubikmeter Spülsand mit zunehmender Menge abnehmen. Bei der Lösung 3 würde sich beispielsweise bei einer fünffachen Spülmenge von 2,5 Mio. m<sup>3</sup> eine Kostenminderung um rd. 20 % je m<sup>3</sup> ergeben. Künftig sollten daher die Sandverluste einer Aufspülung in Abhängigkeit von der Aufspülmenge untersucht werden. Soweit bekannt, nehmen die anfänglichen Sandverluste mit der Aufspülmenge zwar zu, über das Gesamtverhalten ist bisher aber zu wenig bekannt, um die Frage nach der Wirtschaftlichkeit eindeutig beantworten zu können.

## 6. Schutz der Insel Sylt durch massive Bauwerke

### 6.1 Allgemeines

Alternativ zur Strandaufspülung kommen massive Schutzwerke zur Verhinderung eines weiteren Abbruchs der *Insel Sylt* in Betracht. In erster Linie ist dabei an Bühnen, Deckwerke und Wellenbrecher oder an die Kombinationen dieser drei Bauweisen zu denken.

Derartige Bauwerke müssen so konstruiert werden, daß sie ihre Funktionen erfüllen und die Baukosten zusammen mit den kapitalisierten Unterhaltungskosten möglichst niedrig bleiben. Entscheidende Größe für ihre Bemessung sind die Höhen der Wasserstände (NNT<sub>nw</sub>, MT<sub>nw</sub>, MTh<sub>w</sub>, HHT<sub>w</sub>) sowie die Höhen, Längen und Perioden der Wellen. Für diese naturgegebenen Werte lassen sich in Abhängigkeit von der Böschungsneigung, ihrer Rauigkeit und Durchlässigkeit der Wellenauf- und -überlauf und damit die Bauwerkshöhen errechnen. Ferner lassen sich die Mindestgewichte der Bauelemente durch Modellversuche ermitteln.

## 6.2 B u h n e n

Die ersten Schutzbauten auf der *Insel Sylt* wurden 1872/73 in Form von Buhnen vor *Westerland* errichtet. Die in sie gesetzten Erwartungen erfüllten sich nicht. Sie waren nicht in der Lage, den weiteren Strandabbruch zu verhindern. In der Folgezeit angestellte Untersuchungen (LAMPRECHT, 1955) lassen jedoch den Schluß zu, daß Buhnen eine verzögernde Wirkung auf morphologische Veränderungen haben. Buhnen allein sind mithin nicht geeignet, die *Insel Sylt* zu sichern, so daß eine solche Lösung nicht weiter verfolgt zu werden braucht.

## 6.3 D e c k w e r k e

Im Jahre 1907 entstand das erste Deckwerk vor *Westerland* in Form einer Mauer. Nach der Fertigstellung brachen an den Enden des Deckwerks die Dünen verstärkt ab, so daß es im Laufe der Zeit nach Norden und Süden verlängert werden mußte. Die Gesamtlänge beträgt heute 2,9 km. In diesem Bereich ist die Substanz der Insel zwar gesichert, der Abbruch vor dem Deckwerksfuß geht jedoch weiter. Das Deckwerk und die davor liegenden Buhnen vermögen daher keineswegs die *Stadt Westerland* zu schützen. Das den Mittelteil des Deckwerks bildende Mauerprofil mußte wegen der fortschreitenden Strandabnahme bereits mit massiven Vorlagen gegen Unterspülung gesichert werden. Darüber hinaus war es nötig, die starken Wellenkräfte auf die Mauer durch Tetrapoden zu mindern.

Im Hinblick auf den ständig abnehmenden Strand und Vorstrand muß die Frage gestellt werden, ob es möglich ist, die Insel durch ein stärkeres Deckwerk endgültig und wirtschaftlich zu sichern. Bei der Planung eines entsprechenden Deckwerks muß davon ausgegangen werden, daß mit fortschreitender Erosion nicht nur der Strand und Vorstrand, sondern auch das Riff abgebaut werden. Damit geht die wellenbrechende Wirkung des jetzigen Riffes allmählich verloren. Das hat zur Folge, daß der Seegang ungebrochen den Strand erreicht, damit die Brandungszone bis unmittelbar an den Strand vorrückt und die Erosion verstärkt wird, wodurch der Vorstrand abnimmt. Bevor dieser Zustand eintritt, muß das Deckwerk so ausgebaut werden, daß es in der Lage ist, den verstärkten Brandungseinwirkungen standzuhalten. Da die Wassertiefen ständig näher an den Strand heranrücken, ist ein solches Bauwerk sehr schwer auszubilden und tief hinabzuführen.

Die Planung erfordert sorgfältige Voruntersuchungen, u. a. über die zu erwartenden Wellenhöhen und Wellenlängen bei fortschreitender Erosion, die zweckmäßige Deckwerksneigung und -höhe, über die bauliche Ausbildung und das zu verwendende Material usw. Wo die entsprechenden Daten für die nachfolgende Kostenermittlung nicht vorliegen, müssen Annahmen auf Grund vorhandener Erfahrungen getroffen werden.

So wird angenommen, daß die Wassertiefe vor dem Deckwerk maximal auf SKN — 8,00 m bzw. NN — 9,1 m zunimmt — falls größere Tiefen auftreten sollten, müssen Vorlagen angeordnet werden — und die Deckwerkshöhe bei einer Neigung von 1 : 3 und der gewählten Rauigkeit (Abb. 32) NN + 7,00 m betragen muß. Es wird eine offene Bauweise als zweckmäßig angenommen, wobei die Kornabstufung des verwendeten Steinmaterials wegen des zu erwartenden starken Brandungsangriffs in Anlehnung an die Bauweise von Wellenbrechern gewählt wurde. Auf der Deckwerkskrone wird eine 7 m breite Fahrbahn für die Bauausführung und spätere Unterhaltung vorgesehen. Um den filterartigen Aufbau nach rückwärts abzuschließen, wird am Ende der 1 : 3 geneigten Deckwerksböschung eine Spundwand angeordnet, so daß die Fahrbahn landseitig der Spund-

wand liegt. Der Anschluß des Deckwerks an das dahinter liegende Gelände bzw. anschließende Bauwerk kann durch eine Auffüllung des Geländes, durch eine Böschung oder eine Stützmauer geschehen.

Die Kosten pro lfd. m Deckwerk ergeben sich wie folgt: Der Querschnitt des einzubauenden Steinkörpers beträgt rd. 326 m<sup>3</sup>. Bei Annahme eines mittleren Schüttgewichtes von 1,7 t/m<sup>3</sup> werden pro lfd. m  $326 \cdot 1,7 = \text{rd. } 554 \text{ t}$  Steine einschl. der Betonblöcke benötigt. Der Einbau erfordert erhebliche Bodenbewegungen im brandungsgefährdeten Strandbereich. Der Boden kann zur seeseitigen Abschirmung der Baustelle verwendet

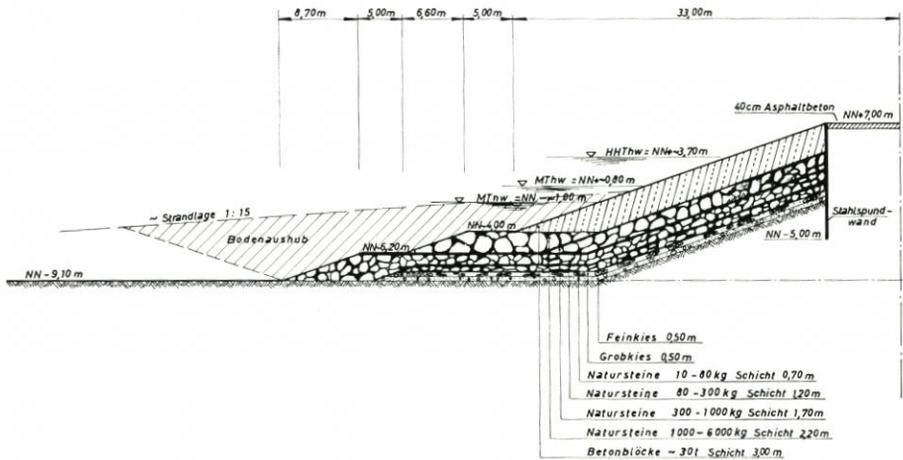


Abb. 32. Angenommenes Deckwerk vor Westerland

werden. Der Bau ist wegen der vorgelagerten Riffe nur von der Insel aus möglich, was den Antransport und Einbau des Steinmaterials erheblich verteuert und eine aufwendige Baustelleneinrichtung erfordert. Das Bauverfahren hängt sehr von dem Gerätepark der ausführenden Firma ab und kann daher im einzelnen nicht veranschlagt werden.

Die Kosten für Beschaffung, Transport sowie Einbau des Steinmaterials und der Betonblöcke werden auf 70,- DM/t geschätzt (s. 6.4.3), so daß die Kosten pro lfd. m  $554 \cdot 70 = \text{rd. } 38\ 800 \text{ DM}$  betragen. Dazu kommt das Umsetzen von rd. 420 m<sup>3</sup> Boden pro lfd. m, wofür wegen der schwierigen Verhältnisse am Strand 7,- DM/m<sup>3</sup> angesetzt werden, so daß pro lfd. m Deckwerk rd. 3000 DM aufgewendet werden müssen. Hinzu kommen etwa 3500 DM für die Spundwand aus schätzungsweise 12 m langen Bohlen, etwa 700 DM für die Asphaltbetonfahrbahn und etwa 1000 DM für den Anschluß des Deckwerks an das rückwärtige Gelände bzw. an die Bebauung. Wenn das Deckwerk die gleiche Länge von 2900 m erhalten soll wie das bestehende, würden die Baukosten sich auf  $47\ 000 \cdot 2900 = \text{rd. } 136 \text{ Mio. DM}$  belaufen.

Da die an das Deckwerk südlich und nördlich anschließenden Strandbereiche im Abbruch liegen, muß davon ausgegangen werden, daß es nach Norden und Süden verlängert werden muß, wodurch weitere Kosten entstehen werden.

Die laufende Unterhaltung des Deckwerks wird mit Rücksicht auf die schwere Bauweise auf 1 % geschätzt, so daß dafür jährlich rd. 1,4 Mio. DM anzusetzen sind.

## 6.4 Wellenbrecher

### 6.4.1 Überlegungen zur Planung

Da der Abbruch des Strandes und Vorstrandes im wesentlichen durch die Brandung und die durch sie verursachte Brandungsströmung hervorgerufen wird, ist auch der Bau von Wellenbrechern in Betracht zu ziehen. Es wäre die Möglichkeit zu untersuchen, durch die Anordnung von Wellenbrechern in einem bestimmten Abstand von der Insel die Brandung soweit abzubauen, daß sie keine erodierende Wirkung mehr auf den Strand hat. Damit würde der Badestrand erhalten bleiben und nicht, wie bei der Deckwerkslösung, einer Steinböschung zum Opfer fallen. Es muß ferner untersucht werden, ob die Funktion derartiger Parallelwerke zur Erhaltung des Strandes allein ausreicht oder ob in gewissen Abständen buhnen- oder molenartige Querdämme zwischen Wellenbrecher und Strand anzuordnen sind, um erodierende Längsströmungen zwischen dem Wellenbrecher und dem Strand durch Tide-, Windstau- oder Brandungsströmungen zu unterbinden.

Ein wesentlicher Kostenfaktor ist die Bauhöhe der Wellenbrecher. Sie hängt einerseits von der Wassertiefe über der Gründungssohle und andererseits von der für erforderlich gehaltenen Kronenhöhe ab. Aus Gründen der Standsicherheit des Bauwerkes muß die Gründungstiefe so groß sein, daß sie unterhalb des Bereiches der Wellen- und Strömungs-erosion liegt. Die entsprechende Wassertiefe beträgt vor Sylt 12 bis 14 m (s. 5.1.5). Das würde bedeuten, daß ein Wellenbrecher etwa 5 km vom Inselufer entfernt angeordnet werden müßte. Dieser große Abstand von der Insel würde die Wirksamkeit des Wellenbrechers aber erheblich mindern, weil auf der 5 km breiten Wasserfläche erneut Windwellen von beträchtlicher Höhe und Wirkung angefacht werden können. Bekanntlich ist die Höhe von in Flachwassergebieten erzeugten Wellen außer von der wirksamen Windgeschwindigkeit u. a. eine Funktion der Streichlänge des Windes, der wirksamen Wassertiefe und des Bodenprofils.

Je näher der Wellenbrecher an die Insel herangerückt wird, um so geringer werden auf der Leeseite des Wellenbrechers die Streichlänge des Windes und die wirksame Wassertiefe und infolgedessen um so kleiner und wirkungsloser die in diesem Bereich neu angefachten Wellen. Bei der Entscheidung über die Lage eines Wellenbrechers wird also ein Kompromiß gefunden werden müssen zwischen dem Wunsch nach größtmöglicher Ufernähe, um die leeseitigen Wellen klein zu halten, und dem Bestreben, in so großer Wassertiefe zu gründen, daß möglichst wenig Erosion zu erwarten ist. Als Entscheidungshilfen wären eingehende Untersuchungen über die Erosionsvorgänge und -ursachen im Vorstrandbereich zwischen der 14-m-Tiefenlinie und dem Riff sowie über die zulässigen Wellenhöhen und Strömungen am Strand, die gerade keine Erosion mehr hervorrufen, anzustellen.

Die Frage der zulässigen Wellenhöhen und Strömungen spielt auch eine wichtige Rolle bei der Entscheidung über die Höhenlage und Breite der Krone eines Wellenbrechers. Aus Kostengründen muß eine geringe Höhe angestrebt werden; die Funktionsfähigkeit dagegen bestimmt die Mindesthöhe. Überlaufende Wellen müssen unterbunden werden, weil sonst die Krone starken Brandungskräften ausgesetzt und keine ausreichende wellenbrechende Wirkung für den Strand erzielt wird; dagegen kann gelegentliches, örtlich begrenztes Überschwappen von Wellen in Kauf genommen werden. Die erforderliche Kronenhöhe und -breite ist durch Wellenmessungen und -untersuchungen sowie Wellenauflaufberechnungen und Modellversuche zu ermitteln.

Ein Wellenbrecher wird in regelmäßigen Abständen Durchlässe haben müssen, damit ein Ausgleich der Wasserstände vor und hinter dem Wellenbrecher ermöglicht wird. Sonst

verläuft der Wasseraustausch in Form von Längsströmungen hinter dem Wellenbrecher, die wegen der Erosionsgefahr jedoch vermieden werden müssen. Die Anordnung und konstruktive Ausbildung solcher Durchlässe müssen ebenfalls in Modellversuchen ermittelt werden. Trotz solcher Durchlässe können unzulässig hohe Längsströmungen hinter dem Wellenbrecher entstehen, die durch Querdämme zwischen dem Wellenbrecher und dem Strand unterbunden werden müssen.

Sorgfältiger Überlegungen bedarf auch die Frage, welcher Strandbereich durch einen Wellenbrecher vornehmlich geschützt werden und welche Länge der Wellenbrecher haben müßte. Da der Seegang selten senkrecht, sondern vorherrschend mit nördlicher und südlicher Abweichung anläuft sowie außerdem an den Enden des Wellenbrechers Diffraction auftritt, muß der Wellenbrecher sowohl nach Norden als auch nach Süden über den zu schützenden Strandbereich hinausragen. Auch diese zusätzlichen Wellenbrecherlängen sind durch Modellversuche zu ermitteln.

#### 6.4.2 Bauweisen von Wellenbrechern

Die Erörterung aller mit dem Bau eines Wellenbrechers zusammenhängenden Fragen darf auch nicht die vermissen lassen, ob und welche Auswirkungen ein Wellenbrecher auf die benachbarten, von ihm nicht geschützten Strandbereiche hat. Es muß befürchtet werden, daß dort nach dem Bau eines Wellenbrechers die Sandzufuhren aus dem nunmehr geschützten, früher in Abbruch befindlichen Strandbereich ausbleiben und ein Sandmangel eintritt, der auf längere Sicht die Verlängerung des Wellenbrechers nach Norden und Süden erforderlich macht.

Wellenbrecher werden in verschiedenen Bauweisen ausgeführt, die häufigsten sind:

- a) Dämme mit geschlossenen oder aufgelösten senkrechten Wänden
- b) Dämme mit seeseitiger Böschung und landseitiger senkrechter Wand
- c) beiderseits geböschte Dämme mit aufgesetzter schwerer Mauer
- d) beiderseits geböschte Dämme mit offener oder geschlossener Abdeckung

Ein Wellenbrecher mit geschlossenen oder aufgelösten senkrechten Wänden wäre vor *Sylt* wegen der großen Wassertiefe und fehlendem Landanschluß nur in Caissonbauweise möglich. Diese Bauweise setzt eine gleichmäßige horizontale Gründungssohle und für alle Caissons gleiche Setzungen voraus. Diese Vorbedingungen sind nicht erfüllbar, weil sich bei den Seegangsverhältnissen vor *Sylt* kaum eine horizontale Gründungssohle herstellen und bis zum Absetzen der Caissons halten läßt. Besonders schwierig aber wäre schon das Einfädeln und Absetzen der Caissons an der Einbaustelle, weil es hier kaum einen Tag ohne Seegang gibt. Schäden an einem solchen Wellenbrecher lassen sich wegen der exponierten Lage kaum beseitigen, so daß bei Schäden der Bestand des gesamten Wellenbrechers gefährdet wird. Eine derartige Bauweise ist für einen Wellenbrecher vor *Sylt* auszuschließen.

Das gleiche gilt für einen Wellenbrecher mit seeseitiger Böschung und landseitiger senkrechter Wand. Die landseitige Wand kann nur durch Verwendung von Caissons hergestellt werden, so daß beim Bauvorgang die gleichen Schwierigkeiten, wie oben beschrieben, auftreten. Nach Fertigstellung wäre ein solcher Wellenbrecher durch die seeseitige Böschung allerdings weniger empfindlich gegen Schäden als das oben beschriebene reine Caissonbauwerk.

Ein beiderseits geböschter Wellenbrecher mit aufgesetzter Mauer würde gegen ungleiche Setzungen der Gründungssohle unempfindlich sein. Allein die aufgesetzte Mauer

benötigt eine genaue horizontale Unterfütterung, weil sie aus vorgefertigten Quadrern oder Formteilen zusammengesetzt werden müßte. Der Einbau wäre wegen der Seegangsbedingungen am Einbauort sehr aufwendig und langwierig. Der Unterhaltungsaufwand würde sich für den geböschten Unterbau in Grenzen halten, weil sich das Nachschütten von Steinen relativ einfach und örtlich gezielt durchführen läßt. Die aufgesetzte Mauer müßte sehr schwer ausgeführt werden, um ihr die erforderliche Standsicherheit zu geben, was die Baudurchführung erschweren würde, ohne entsprechende Vorteile zu bieten. Preiswertes Steinmaterial für den Damm würde eingespart, dafür aber teures Material für die Mauer erforderlich. Die Mauer hätte den Vorteil, daß sie befahrbar und damit evtl. für die Baudurchführung und Unterhaltung benutzbar wäre, was sich aber nur befriedigend nutzen ließe, wenn eine Zufahrt von Land vorhanden wäre.

### 6.4.3 Wellenbrecher vor Westerland

Als Bauweise für einen Wellenbrecher vor *Westerland* würde sich als praktikabelste Lösung ein beidseitig geböschter Damm anbieten (Abb. 33). Diese Bauweise ist robust, stellt die geringste Anforderung an die Baudurchführung und wird deshalb bei exponierten Seebaustellen bevorzugt angewandt. Über zweckmäßige Querschnittsausbildungen liegen Untersuchungen und Erfahrungen vor (AGENA, 1972; VAN DIXHOORN, 1971; HAKKELING, 1970). Während für die grundsätzliche Gestaltung des Wellenbrechers auf Erfahrungen zurückgegriffen werden kann, muß jedoch die Länge der see- und landseitigen Fußvorlage nebst Steingewichten – insbesondere für die obere Abdeckung des Wellenbrechers – durch Messungen, Modellversuche und Berechnungen ermittelt werden.

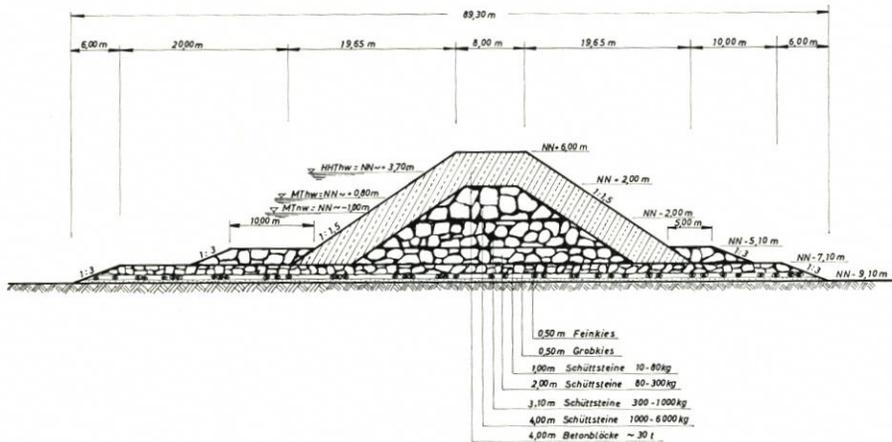


Abb. 33. Angenommener Wellenbrecher vor Westerland (Maßstab 1 : 400)

Für den nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Strandvorspülungen und massiven Schutzwerken ist eine Ermittlung der Bau- und Unterhaltungskosten erforderlich. Für eine Kostenermittlung müßten die genaue Lage, Bauweise und Höhe des Wellenbrechers bekannt sein. Die entsprechenden Angaben können aber erst durch die vorgenannten Untersuchungen gewonnen werden, so daß für die folgende Kostenermittlung einige Annahmen getroffen werden müssen. Im Ergebnis zeigt sich, daß die über-

schläglichen Annahmen die eindeutige Wahl der wirtschaftlichsten Lösung des Insel-schutzes nicht beeinträchtigen.

So wird beispielsweise angenommen, daß sich nach Abschluß aller Voruntersuchungen ergeben hat, daß der Wellenbrecher in etwa 1000 m Entfernung vom Ufer auf rd. 8,0 m Wassertiefe (SKN — 8,0 m bzw. NN — 9,1 m) gebaut werden soll (Abb. 33). Die Höhenlage der Krone möge sich zu NN + 6,00 m ergeben haben. Der zu schützende Strandbereich soll sich auf die Längswerke (2,9 km) vor *Westerland* beschränken. Außerdem wird für erforderlich gehalten, den Wellenbrecher um 0,5 km nach Norden und Süden vorzuziehen, so daß er 3,9 km lang wird, fernerhin, daß kein Querwerk zur Verhinderung von Längsströmungen zwischen Wellenbrecher und Strand erforderlich ist. Der Querschnitt des Wellenbrechers und das Baumaterial (Abb. 33) wurden in Anlehnung an Bauausführungen der letzten Jahre, insbesondere in den Niederlanden, gewählt, weil ihre Planung auf Grund von Messungen und Modellversuchen besonders sorgfältig war und inzwischen auch Erfahrungen über deren Bau und Bewährung vorliegen.

Dort hat sich gezeigt, daß die Kosten für das Steinmaterial und deren Einbau nur wenig von der Korngröße abhängig sind, so daß für einen Kostenüberschlag ein Mittelpreis angesetzt werden kann. Er beträgt für Wellenbrecher im niederländischen Küstengebiet rd. 50,— DM/t. Wegen der größeren Transportwege für die benötigten Steine, wegen der exponierten Lage der Baustelle vor *Westerland* und der begrenzten und baustellenfernen Hafeneinrichtungen muß mit mindestens 20 % höheren Kosten gerechnet werden, so daß etwa 60,— DM/t angesetzt werden müssen. Wird ein mittleres Schüttgewicht von 1,7 t/m<sup>3</sup> angesetzt, so ergibt sich für den angenommenen Wellenbrecher mit einem Querschnitt von rd. 560 m<sup>2</sup> ein Baupreis von  $60 \cdot 1,7 \cdot 560 = \text{rd. } 57\,000 \text{ DM/lf. m.}$

Für eine Gesamtlänge des Wellenbrechers von 3,9 km würden die Baukosten rd. 222 Mio. DM betragen. Die jährlichen Unterhaltungskosten werden für eine sorgfältig geplante, ausreichend schwere Bauweise gering sein. Auf längere Sicht werden sie zu 1 % veranschlagt, so daß jährliche Kosten von rd. 2,2 Mio. DM zu erwarten sind.

#### 7. Schlußbetrachtung und Empfehlung für den künftigen Insel-schutz vor *Westerland*

Zusammenfassend ergibt das Teilgutachten D, dessen Aufgabenstellung in der Einleitung umrissen ist, für den Schutz der 2,9 km langen befestigten Uferstrecke von *Westerland*:

Für die als Großversuch im Jahre 1972 durchgeführte Sandvorspülung wurde der Sand im *Rantum-Watt* gewonnen und durch eine rd. 7 km lange Rohrleitung zum Strand vor *Westerland* gefördert. Neben dem Entnahmeggerät waren drei Zwischenpumpstationen eingesetzt, deren Zusammenwirken ohne besondere Schwierigkeiten gesteuert werden konnte. Das gewählte Transport- und Einspülverfahren hat sich bewährt; in einem Wiederholungsfalle wären noch Verbesserungen möglich.

Vom 1. 6. 1972 bis zum 27. 10. 1972 wurden rd. 1 000 000 m<sup>3</sup> Sand aus dem *Rantum-Watt* entnommen und hydraulisch zum Strand gefördert. Im Mittel konnte dabei eine Leistung von 8000 m<sup>3</sup>/Tag im Abtrag erreicht werden. Das Aufmaß nach Abschluß der Spülarbeiten ergab einen aufgespülten Sandkörper von rd. 700 000 m<sup>3</sup> Inhalt, so daß die Spülverluste rd. 30 % betragen.

Die vorgespülte Sandbuhne erreichte eine Länge von rd. 350 m, gemessen am Spülrohr-auslauf. An ihrem seeseitigen Hang stellte sich eine Böschung mit einer Neigung von

1 : 3 bis 1 : 4 ein, weil ständig Material nachgeführt wurde, so daß sich die Hangneigung dem Wellenklima nicht anpassen konnte. Die seitlichen Böschungen der Sandbuhne nach Norden und Süden hatten dagegen Neigungen von 1 : 70 bis 1 : 80. Schon während der Spülarbeiten formte sich die Sandbuhne – beschleunigt durch häufige Schlechtwetterlagen – verhältnismäßig schnell in ein Sandhöft um, wodurch frühzeitig große Sandmengen in die nördlichen und südlichen Strandstrecken verlagert wurden. Auf diese Weise waren die gefährdeten Inselfschutzwerte auf rd. 2,9 km Uferlänge vor *Westerland* sehr bald durch eine Sandvorlage gedeckt.

Die sehr schweren Sturmfluten des Winters 1973/74, als ein rd. 40 m und mehr breiter hochwasserfreier Strand vor der befestigten Uferstrecke bestand, haben die Wirkung und den Erfolg der Sandvorspülung erwiesen. Durch Fernhalten der Brandung konnten Schäden an den Uferschutzwerten verhindert werden, die sonst aufgetreten wären. Deren Beseitigung hätte wahrscheinlich Kosten verursacht, welche die der Sandvorspülung 1972 von rd. 7 Mio. DM erreicht hätten, wie Vergleiche mit anderen Inseln zeigen, deren Schutzwerte schwere Schäden erlitten.

Nach diesen Erfahrungen bietet das Sandpolster der Vorspülung den erstrebten Schutz für die vorhandenen Deckwerke. Da die Strandvorspülung jedoch flexibel ist, müssen die Deckwerke mit zunehmendem Sandabtrag bis zur nächsten Aufspülung den Schutz der rückliegenden Bebauung oder des Dünengürtels mit übernehmen. Aus diesem Grunde müssen die Deckwerke in ihrem jetzigen Ausbauzustand unterhalten werden. Sollte sich bei Wiederholungen der Vorspülung zeigen, daß örtlicher Sandmangel auftritt, so könnte dort durch herkömmliche Baumaßnahmen ein Ausgleich geschaffen werden. Ihr Schutz durch die Sandvorspülung vermindert ihre Unterhaltungskosten so weit, daß sie bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unberücksichtigt bleiben konnten, die als überschläglich zu werten sind.

Über die Auswirkung des Buhnensystems auf die Sandumlagerung konnten in dem Beobachtungszeitraum bis zum Sommer 1974 keine abschließenden Erkenntnisse gewonnen werden, weil sie noch weitgehend vom Sand überdeckt waren. Jedoch dürfte den Buhnen, wie bereits im Teilgutachten B angeführt, eine stützende Wirkung auf den Strand zuzusprechen sein.

Die umfangreichen Messungen und Beobachtungen vor, während und nach dem Großversuch der Sandvorspülung 1972 ermöglichten nach ihrer Auswertung die Veränderung der Vorspülung – von der Form einer Sandbuhne über ein Sandhöft bis zum ausgedehnten hochwasserfreien Strand – zu beurteilen. Es wurden sowohl die im Teilgutachten B getroffenen Annahmen bestätigt, wie auch weitere Erkenntnisse für eine möglicherweise zu wiederholende Vorspülung gewonnen. Für die abschließende Beurteilung der künftigen Entwicklung ist jedoch der Zeitraum von 2 Jahren nach Abschluß der Vorspülung sehr kurz bemessen.

Die Untersuchungen bestätigen, daß der Bereich der Vorspülung am Nordende der senkrechten Ufermauer vor *Westerland* richtig gewählt war. Er lag dort, wo die größte Gefahr für die Uferschutzwerte bestand, weil die Strandausräumung hier am weitesten fortgeschritten und außerdem das Riff streckenweise nur schwach ausgebildet war. So wurde in diesem Uferbereich die Energie der anlaufenden Brandung im Vorstrandbereich am wenigsten abgebaut, so daß die Uferschutzwerte sehr stark beansprucht waren. Hier bot die Aufspülung bereits vom Spülstadium an einen unmittelbaren Schutz.

Die Art der Aufspülung in Form einer Buhne als Sandlager war günstig, weil durch die Wellenkräfte vom gewählten Aufspülbereich aus dessen Substanz nach Norden und Süden in die schutzbedürftigen Strandbereiche etwa gleichmäßig verteilt wurde.

Gleichzeitig erzeugten die Wellenkräfte eine Strandneigung, die im Gegensatz zu der eines auf der gesamten Länge erzeugten Spülstrandes den Wellenwirkungen angepaßt war. Nachteilige Lee-Erosion, wie sie sonst an massiven Quer- und Längswerken unvermeidlich ist, konnte nicht beobachtet werden.

Die Aufspülung in Form einer Bühne bis nahe an das Riff bewirkte einen Eingriff in das Kräftespiel der Brandungszone. Dadurch gelang es im Winter 1972/73, zusätzlich Sand aus der natürlichen Sandbewegung aufzufangen.

Der erhöhte Sandstrand vor *Westerland* bleibt den Naturkräften ausgesetzt, die den Sand weiterhin abtragen und in nördliche und südliche Richtung transportieren werden. Auch wenn der besonders brandungsempfindliche, hochwasserfreie Strand abgetragen ist, bleiben noch der erhöhte nasse Strand und Vorstrand, die brandungsdämpfend und damit belastend für die Schutzwerke wirken. Da wesentliche Sandverluste über das Riff seewärts nicht entstehen, kommt der ursprünglich in den Aufspülbereich gebrachte Sand nicht nur der durch Uferschutzwerke befestigten Uferstrecke vor *Westerland* zugute, sondern wirkt sich in der Folgezeit auf die Sandbilanz der angrenzenden Strecken günstig aus.

Der aus dem Aufspülbereich transportierte Sand wird bei Fortsetzung des eingeschlagenen Weges im Inselfchutz durch Nachspülungen ersetzt werden müssen. Maßgebend für die Häufigkeit von Nachspülungen ist der Strandzustand entlang der befestigten Uferstrecke vor *Westerland*. Eine Nachspülung wird hier für erforderlich gehalten, wenn die Gesamtmenge des vorgespülten Sandes sich auf etwa die Hälfte vermindert hat oder an einzelnen Stellen der Strandzustand für den Schutz der Längswerke und Bühnen nicht mehr ausreicht.

Für den Zeitpunkt der Abnahme der Gesamtsandmenge um 50 % wurde der Begriff der „Halbwertszeit“ geprägt, die in Abhängigkeit von der Wellenenergie gestellt wird, welche vor allem die Winterstürme liefern. Aus der kurzen Beobachtungsdauer der Vorspülung von bisher 2 Jahren läßt sich abschätzen, daß langfristig eine Halbwertszeit von im Mittel 5 Jahren zu erwarten ist, wenn keine außergewöhnlichen Verhältnisse auftreten. Zur unmittelbaren Erfassung der Wellenenergie müssen die Wellenmessungen fortgeführt werden, wie zur Ermittlung ihrer mittelbaren Auswirkungen weitere großräumige Strandvermessungen – mindestens einmal jährlich – erforderlich sind.

Eine nach Eintritt der Halbwertszeit erforderliche Nachspülmenge von rd. 350 000 m<sup>3</sup> auf den Strand verbleibenden Sand entspricht einer Fördermenge von rd. 500 000 m<sup>3</sup> Sand, da nach den Erfahrungen der Vorspülung 1972 mit rd. 30 % Spülverlust gerechnet werden muß. In Fällen örtlichen Sandmangels ist zu prüfen, ob bereits eine Nachspülung vorzunehmen ist oder ob eine Sicherung durch gezielte herkömmliche Baumaßnahmen wirtschaftlicher ist.

Untersucht wurden zunächst die Möglichkeiten für künftige Nachspülungen, den Sand im Seegebiet vor der Insel zu gewinnen und von See her einzubringen. Infolge der verhältnismäßig geringen Nachspülmengen von rd. 500 000 m<sup>3</sup> Sand, die den weiteren Überlegungen zugrunde gelegt werden müssen und im Mittel in Abständen von jeweils 5 Jahren erforderlich sind, ist eine den schwierigen Seegangsbedingungen angepaßte Baustelleneinrichtung zu kostenaufwendig. Eine Strandauffüllung von See her würde erst bei einem Mehrfachen dieser Nachspülmenge kostenmäßig interessant sein. Die wirtschaftlichste Möglichkeit des Inselfschutzes vor *Westerland*, die Stranderhaltung durch Sandvorspülung, ist eingehend untersucht worden. Entscheidend für die örtliche Nachspülung einer begrenzten Sandmenge ist die Erkenntnis, daß unter den hydrologisch-morphologischen Gegebenheiten vor *Sylt* der Strand von einer Stelle aus mit Sand versorgt werden kann, indem er durch die Naturkräfte in nördlicher und südlicher Richtung transportiert wird.

Ausgehend vom heutigen Stand der Technik sollte daher für die Zeit der übersehbaren Zukunft der Inselchutz auf Sandvorspülung abgestellt werden, so lange nicht grundlegende Veränderungen der äußeren Bedingungen, des Schutzbedürfnisses der Insel oder auch der Technik eintreten. Nach den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ist die günstigste Lösung die Sandzufuhr zum Strand aus dem *Rantum-Becken*. Sie würde je Nachspülung nach dem heutigen Kostenstand einen Betrag von 3,0 Mio. DM erfordern. Dabei sind die geringen verbleibenden Unterhaltungskosten der bestehenden Deckwerke unberücksichtigt geblieben. Für die erstmalige Sandentnahme aus dem *Rantum-Becken* ist außerdem ein Betrag von 1,0 Mio. DM anzusetzen, um damit Belangen der Abwasserbehandlung und des Naturschutzes zu genügen.

Um die künftige Inselerhaltung mit dem geringsten Kostenaufwand zu erreichen, sollte unbedingt die Sandentnahme aus dem *Rantum-Becken* angestrebt werden. Dabei kann der Forderung entsprochen werden, den Naturschutz so wenig wie möglich zu beeinträchtigen, was bei der Größe des Naturschutzgebietes und der technischen Möglichkeiten der Sandentnahme unterhalb der Wasserfläche auch erreichbar ist. Ein für die Inselicherheit bedeutender Vorteil einer derartigen Entnahme ist, daß im Gefahrenfalle unabhängig von der Jahreszeit Sand zum Strand nachgespült werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit der künftigen Stranderhaltung durch Nachspülungen läßt sich an den Kosten messen, die für den Bau und die Unterhaltung massiver Uferschutzwerke erforderlich wären, wenn diese allein den Uferschutz bewirken sollten. So betragen die Kosten für ein Uferdeckwerk in gleicher Länge von 2,9 km wie das bestehende, das bis zu einer Tiefe hinabgeführt wird, unterhalb derer Erosion an seinem Fuß ausbleibt, rd. 136 Mio. DM; seine Unterhaltung würde mit 1 % der Bausumme jährlich rd. 1,4 Mio. DM erfordern. Die Baukosten eines uferparallelen Wellenbrechers, unter dessen Wirkung ein begrenzter Strand erhalten bliebe, betragen rd. 222 Mio. DM. Dagegen kostet eine Nachspülung von 500 000 m<sup>3</sup> Sand, entnommen aus dem *Rantum-Becken*, im Abstand von 5 Jahren jeweils 3,0 Mio. DM; das sind jährlich rd. 600 000 DM. Hinzu kommen geringe jährliche Unterhaltungskosten für die Schutzwerke, die durch die Vorspülung gedeckt werden.

Hervorgehoben werden muß, daß bei diesem Kostenvergleich völlig unberücksichtigt geblieben ist, daß zunächst einmal ein Kapital von 136 Mio. DM bzw. 222 Mio. DM aufgebracht werden muß, um das Deckwerk bis unterhalb der Erosionszone auszubauen oder den Wellenbrecher im offenen Wasser vor *Westerland* zu erstellen. Wenn auch die Problematik der Sandvorspülung auf Grund der verhältnismäßig kurzen Beobachtungsdauer noch nicht abschließend beurteilt werden kann, so ist doch die eines Deckwerksausbaues oder eines Wellenbrechers – unabhängig von den Kosten – sehr viel größer.

Als Ergebnis des Teilgutachtens D wird deshalb empfohlen, den künftigen Inselchutz vor *Westerland* auf die Stranderhaltung durch Nachspülung von Sand abzustellen, der im *Rantum-Becken* entnommen wird und dort in größeren Zeitabständen aus dem *Rantum-Watt* wieder aufgefüllt werden kann. Als Form dieser Vorspülung ist wie 1972 ein Sandlager in Form einer Sandbühne anzustreben, von dem aus der Sand durch Wellenkräfte nach Norden und Süden verteilt wird. Auf diese Weise läßt sich in Zukunft der Inselchutz am wirtschaftlichsten gestalten.

Um die zeitlichen und räumlichen Grundlagen für künftige Sandnachspülungen zu schaffen, sind unbedingt ständig weitere Messungen und Beobachtungen erforderlich. Das

sind vor allem die jährliche Frühjahrspeilung entlang der Uferstrecke im Bereich der Sandumlagerung zur Ermittlung der Sandmassen, tägliche Wellenmessungen an der Station W<sub>4</sub> mit Auswertung der jährlichen Wellenenergie bei Sturmfluten (Wellenhöhe über 3 m), Registrierung der Wasserstände an den Schreibpegeln sowie in dreijährigen Abständen Entnahme von Sandproben zur Bestimmung der Kornzusammensetzung.

## 8. Schriftenverzeichnis

- AGEMA, D. F.: Havendammen van Zee. Ndl. Zeitschr. Cement, Nr. 12, Jg. XXIV, 1972.
- ANWAR, J.: Der holozäne Meeressand im Seegebiet westlich von Sylt zwischen Kampen und Rantum (Ausgangsmaterial und Sedimentation). Meyniana, H. 24, 1974.
- BÜSCHING, F.: Über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 42, 1974.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974a.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974b.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 41, 1974c.
- DIETZ, C. u. HECK H.-L.: Erläuterung zu den Blättern Sylt Nord und Sylt Süd. Geologische Karte von Deutschland 1 : 25 000, Kiel 1952.
- VAN DIXHOORN, J.: Nieuwe Havenmond Hock van Holland. Sonderschrift des ndl. Rijkswaterstaat, 1971.
- DOLEZAL, R., PETERSEN, M. u. REINHARD, R.: Messung der Sandwanderung an Brandungsküsten. 4. Int. Atomkonf. Genf 1971.
- FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J., SCHWITTERS, J. u. SINDERN, J.: Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung. Die Küste, H. 23, 1972.
- FÜHRBÖTER, A.: Eine Refraktionsbuhne aus Sand vor Sylt. Wasser und Boden, H. 12, Jg. 25, 1973a.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974b.
- FÜHRBÖTER, A.: A Refraction Groyne Built by Sand. Proc. 14th Intern. Conf. on Coastal Eng., Kopenhagen 1974.
- HAKKELING, B.: Zink- en aauverwaute werken, benevens het hoe en de wijze warop. Rotterdam 1970.
- HOFFMANN, D.: The Marine Holocene of Sylt. Discussion of the Age and Facies. Geologie en Mijnbouw, Vol. 48, 1969.
- HOFFMANN, D.: Zum geologischen Aufbau der Hörnummer Halbinsel auf Sylt. Meyniana, H. 24, 1974.
- KÖSTER, R.: Geologie des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum. Meyniana, H. 24, 1974.
- KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/1952. Forschungsst. Norderney, Jahresber. 1957, Bd. IX.
- KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951/1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 1958/1959.
- LAMPRECHT, H. O.: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste von Sylt. Mitt. Franzius-Inst., H. 8, 1955.
- LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung am Westrand von Norderney. Forschungsst. Norderney, Jahresber. 1968, Bd. XX.
- NACHTIGALL, K. H.: Über die Unterwasserhangmorphologie vor Rantum und Kampen auf Sylt. Meyniana, H. 18, 1968.
- ZAUSIG, F.: Veränderungen der Küsten, Sände, Tiefs und Watten der Gewässer um Sylt (Nordsee) nach alten Seekarten, Seehandbüchern und Landkarten seit 1585. Geologie der Meere und Binnengewässer, H. 3, 1939.

### Berichte und Gutachten

Gutachten des Geologischen Landesamtes Schleswig-Holstein (Gutachter Dr. S. Bressau): Kornverteilung von Bohrproben für eine Sandvorspülung vor der Insel Sylt, Kiel 1971.

Bericht des Geologisch-Paläontologischen Institutes der Universität Kiel (Berichtersteller Dipl.-Geol. H. Kirchner): Untersuchung zur Sandvorspülung vor Westerland/Sylt - Geologie, Kiel 1974.