

# Uferveränderungen und Küstenschutz auf Sylt

Von Heinz-Otto Lamprecht

## Inhalt

I. Einführung . . . . .	39
II. Veränderung der Küste und des Unterwasserstrandes	
A. Vermessungen	
1. Vermessungen von 1870 bis 1956 . . . . .	42
Vermessungen von 1870 bis 1935 . . . . .	42
Vermessungen von 1936 bis 1939 . . . . .	42
Vermessungen von 1940 bis 1956 . . . . .	42
2. Darstellung der Meßergebnisse . . . . .	45
3. Auswertung . . . . .	47
B. Lotungen	
1. Durchführung der Lotungen	
a) Methoden, Ortung und Beschilderung . . . . .	50
b) Genauigkeit der Lotungen . . . . .	51
c) Darstellung der Meßergebnisse . . . . .	54
2. Auswertung der Lotungen	
a) Querprofile . . . . .	54
b) Tiefenpläne . . . . .	56
c) Das Sandriff . . . . .	59
III. Angreifende Kräfte	
A. Wind . . . . .	60
B. Wellen und Brandung . . . . .	65
1. Allgemeines . . . . .	65
2. Wellenmessungen	
a) Beobachtungen von Wellengrößen . . . . .	65
b) Mikroseismische Messungen der Brandungsenergie . . . . .	66
C. Strömungen . . . . .	67
IV. Küstenschutzmaßnahmen	
A. Geschichtliche Entwicklung . . . . .	76
B. Beurteilung der Sylter Küstenschutzmaßnahmen	
1. Ansichten bis 1952 . . . . .	78
2. Bewertung der bisherigen Küstenschutzbauten auf Grund der Untersuchungen seit 1952	
a) Buhnen . . . . .	79
b) Deckwerke und Strandmauern . . . . .	81
c) Halmpflanzungen . . . . .	83
C. Gedanken über zukünftige Maßnahmen . . . . .	84
V. Zusammenfassung . . . . .	90
VI. Schriftenverzeichnis . . . . .	91

## I. Einführung

Vor der schleswig-holsteinischen Westküste zieht sich im Norden ein rund 30 km breites Gebiet hin, das dem ständigen Einfluß des Meeres unterliegt: das nordfriesische Insel- und Wattengebiet. Zweimal am Tage strömen bei Ebbe erhebliche Wassermassen aus dieser amphibischen Zone heraus und lassen sie zum größten Teil trockenfallen; anschließend wird bei Flut der gewaltige Raum wieder mit Wasser gefüllt. Wegen des unablässigen Wechsels der Bewegungsvorgänge und des verhältnismäßig wenig widerstandsfähigen Untergrundes unterliegt

dieser Raum einer ständigen Veränderung, so daß künstliche Eingriffe in dieses Kräftespiel einer sorgfältigen Planung bedürfen.

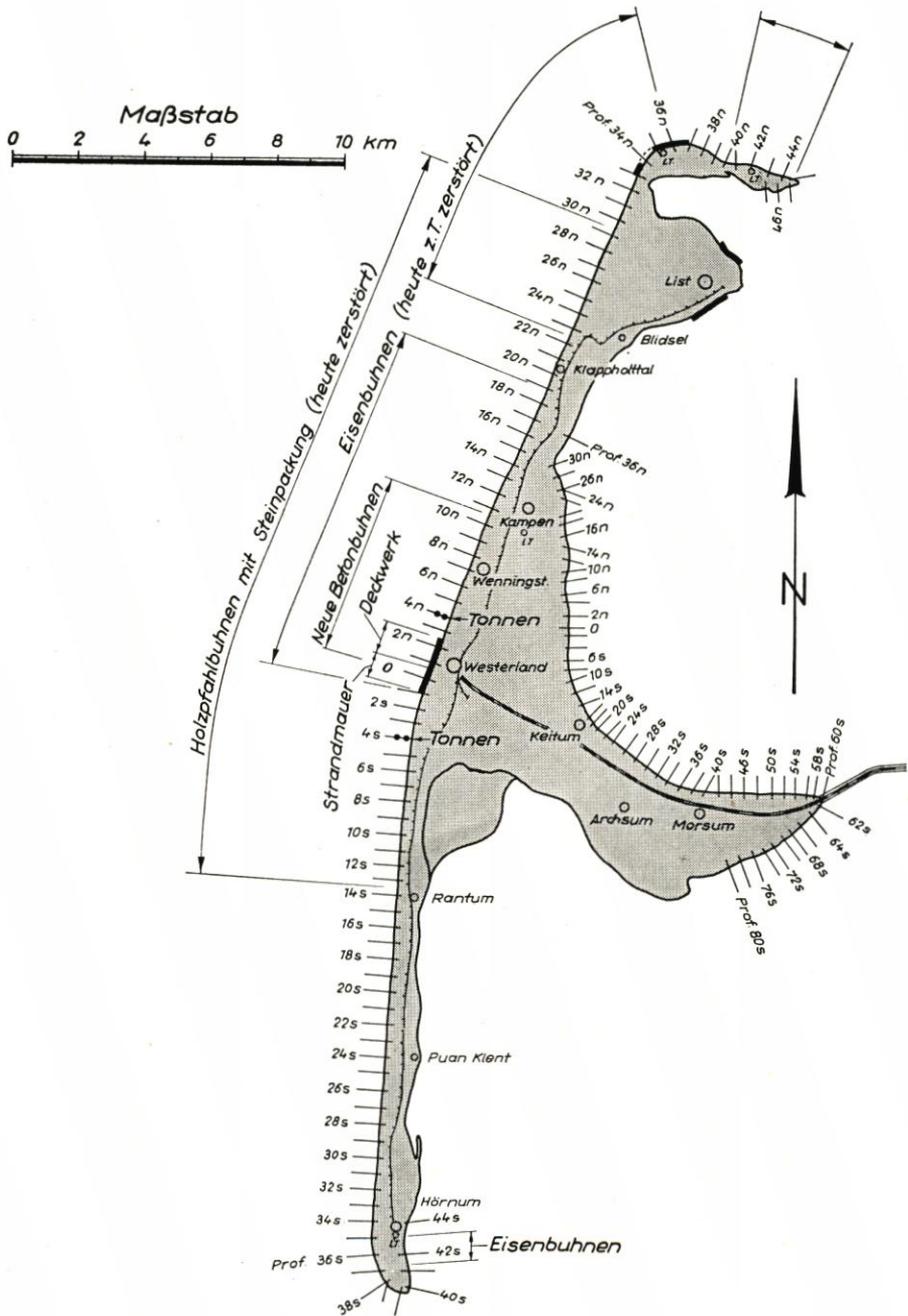


Abb 1. Übersichtsplan von Sylt mit Angabe der Bauwerke und Strandprofile

An der seeseitigen Grenze dieses Gebietes liegt im Norden die Insel Sylt; sie nimmt unter allen deutschen Sandinseln eine Sonderstellung ein. In rund 40 km Länge erstreckt sie sich als teilweise sehr schmales Gebilde von Norden nach Süden (Abb. 1), d. h. sie liegt mit der Breitenseite in der Hauptangriffsrichtung von Wind und Wellen. Darüber hinaus reichen die größeren Meerestiefen bis dicht an Sylt heran, so daß auch hohe Wellen bis in die Strandnähe gelangen und hier ihre Energie abgeben.

Als Folge dieser gefährdeten Lage haben sich schon seit Jahrhunderten erhebliche Abbrüche an der Westküste eingestellt (FÜLSCHER, 1905; MAGER, 1927; MÜLLER-FISCHER, 1938; ZAUSIG, 1939; LAMPRECHT, 1955b), so daß bereits mehrere Ortschaften im Meer versunken sind. Ge-



Abb. 2  
Kulturspuren am  
Sylter Weststrand;  
bei tiefer Strandlage  
trat vor Rantum alter  
Kulturboden mit  
Pflugfurchen zutage  
Aufn.: LAMPRECHT, Febr. 1954

legentlich geben Kulturspuren (Sodenbrunnen, altes Ackerland, Häuserreste) am heutigen Sylter Badestrand ein eindrucksvolles Zeugnis, daß hier vor langer Zeit besiedeltes Land gelegen hat (Abb. 2).

Während die Inselbewohner in früheren Jahrhunderten den Küstenschutz mit eigener Kraft betreiben mußten, unterstützte sie der Staat Preußen nach Übernahme der Insel im Jahre 1865 durch die Herstellung von massiven Schutzwerken an den gefährdeten Strecken.

Zu jener Zeit wurde auch erstmalig vom Staat die Frage nach den vor Sylt wirkenden Naturkräften gestellt und entsprechende Vermessungen eingeleitet, von denen im folgenden die Rede sein wird. In den Jahren 1936 bis 1939 veranlaßte die Forschungsstelle Westküste eingehende geologische und hydrologische Untersuchungen auf der Insel und im Seegebiet von Sylt.

1952 richtete die Abteilung Wasserwirtschaft des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein eine „Vorarbeitenstelle Sylt“ beim Marschenbauamt Husum ein, um die bis dahin durchgeführten Forschungen zu erweitern und zu vertiefen und damit in Zukunft eine richtige Wahl der Baumaßnahmen für einen möglichst wirkungsvollen Küstenschutz treffen zu können.

Die systematischen hydrologischen Untersuchungen von 1952 bis 1956 auf Sylt gingen von der folgenden Fragestellung aus:

1. In welcher Weise hat sich Sylt verändert?
2. Welche Naturkräfte sind dafür maßgebend und wie wirken sie?
3. Wie ist die Wirkungsweise der bisherigen Küstenschutzmaßnahmen auf Sylt zu beurteilen und welche Empfehlungen können für die Zukunft gegeben werden?

Die wichtigsten der in diesem Sinne durchgeführten Forschungsarbeiten und ihre Ergebnisse sollen nachstehend genannt werden.

Die Folgerungen aus diesen Untersuchungen sind von Ministerialrat Rieder in diesem Heft angegeben (S. 1).

## II. Veränderung der Küste und des Unterwasserstrandes

### A. Vermessungen

#### 1. Vermessungen von 1870 bis 1956

Gleichzeitig mit dem Bau der Schutzwerke, die den Abbruch der Insel verhindern sollten, tauchte die Frage nach ihrer Wirksamkeit auf. Seit etwa 1870 wurden Vermessungen der gefährdeten Strandabschnitte vorgenommen; diese Messungen wurden in mehrjährigen Abständen wiederholt und ließen durch vergleichende Betrachtung die Veränderungen des Weststrandes erkennen. Dabei bildete etwa die — 1,00 m NN-Linie die seeseitige Begrenzung dieses Geländes (heute gültiges MTnw für Westerland: — 1,07 m NN).

#### Vermessungen von 1870 bis 1935

Um 1870 wurde erstmalig eine katastermäßige Aufnahme der gesamten Insel vom Katasteramt Niebüll durchgeführt; die Ergebnisse sind in sogenannten „Urkarten“ im Maßstab 1:5000 eingetragen. An den Inselufren wurden zwei Linien angegeben: die MThw-Linie und die Linie des Dünenfußes<sup>1)</sup>.

Die Vermessungen stützten sich auf Standlinien, die am Strand verliefen und rückwärts an Festpunkte in den Dünen angeschlossen waren; von den Standlinien aus wurden Querprofile aufgenommen.

Da die Standlinie an einige damals markante Punkte angeschlossen, die heute nicht mehr vorhanden sind, ist die Bearbeitung der älteren Messungen nur durch eine nachträgliche Berechnung der Koordinaten möglich gewesen.

Die Bezeichnung der Querprofile erfolgte in Anlehnung an die Bezeichnung der Buhnen. Entsprechend dem Abstand der „Hauptwerke“ (im allgemeinen vier Pfahlreihen mit Faschinen und Stein-schüttung; Gesamtbreite 8 m; vgl. LAMPRECHT [1957] und Abb. 3) lagen die ersten Profile in rund 500 m Abstand voneinander; je nach Bedarf wurden Zwischenprofile eingefügt.

#### Vermessungen von 1936 bis 1939

In der Zeit von 1936 bis 1939 war in Westerland die Forschungsgruppe Sylt der damaligen Forschungsstelle Westküste tätig, der in erster Linie die Untersuchung des Gebietes um den „Ellenbogen“ (Nord-Sylt) übertragen war. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde unter Verwendung der alten Standlinien eine neue hergestellt und an allen markanten Punkten (z. B. Knickpunkten) mit „Eisenschraubpfählen“ gesichert, wie sie von HABERSTROH (1938) beschrieben wurden (Abb. 4).

Jedes Hauptprofil erhielt eine rückwärtige Sicherung durch drei Betonpfähle in den Dünen; der erste (seeseitige) Pfahl wurde mit der (römischen) Ziffer des betreffenden Profils versehen. Eine genaue Koordinierung der Festpunkte erfolgte nicht.

Für Höhenmessungen wurde das Nivellier Niv. B (ZEISS), für Winkelmessungen der Repetitions-Theodolit III (ZEISS) verwendet.

#### Vermessungen von 1940 bis 1956

Während des letzten Krieges und in den ersten Nachkriegsjahren ruhte die Vermessungsarbeit an der Westküste von Sylt. Erst 1949 nahm die Forschungsstelle Westküste die Vermessungen am Ellenbogen-Deckwerk und 1951 an der Sylter Westküste von Westerland bis Hörnum wieder auf. Von 1952 ab führte die Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum Vermessungen am gesamten Weststrand und um den Ellenbogen und die Südspitze der Insel herum sowie an der Ostküste von Kampen bis zum Nössedeich südlich Morsum durch. Zu Beginn der Arbeiten erwies es sich als notwendig, folgende Vorbereitungen zu treffen:

<sup>1)</sup> Eine Übersicht über sämtliche Strandvermessungen auf Sylt seit 1870 ist in LAMPRECHT (1954a) enthalten.

1. eine Neufestlegung der „Standlinie Westküste“, die von der 1939 benutzten ausgeht und um den Ellenbogen und die Südspitze herumreicht, und der „Standlinie Ostküste“ von Kampen um die Ostspitze herum bis zum Nössedeich;
2. eine Sicherung der Standlinie in markanten Punkten durch Eisenschraubpfähle und Bestimmung der Koordinaten (GAUSS-KRÜGER) durch Rückwärtseinschnitt;
3. die Neufestlegung einer einheitlichen Bezeichnung der Profile (Abb. 1);
4. eine gut sichtbare Markierung der Profile. Die Festlegung der Profile in den Dünen erfolgte in ähnlicher Weise wie 1936. Jedes Profil ist durch drei Betonpfähle (Querschnitt  $12 \times 12$  cm) nach rückwärts gesichert. Der erste (seeseitige) 3 m lange Pfahl trägt die (arabische) Profilvernummer, die beiden anderen Pfähle haben eine Länge von je 2 m; alle Pfähle stehen etwa 1 m frei.

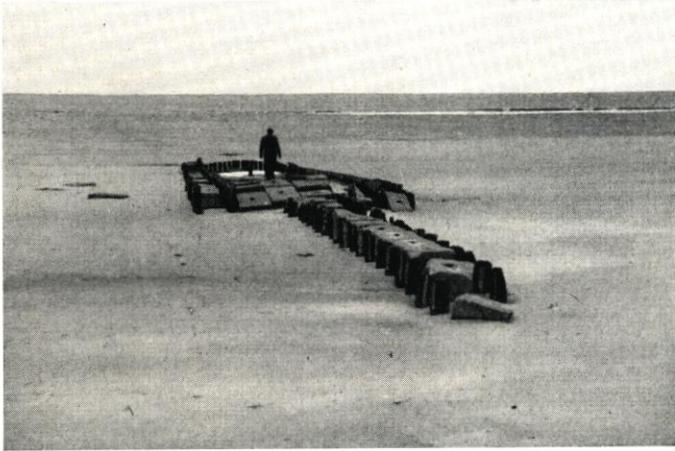


Abb. 3  
Rest einer alten Holzpfahl-  
Bühne mit Betonquadern  
vor Rantum;  
Baujahr 1898  
Aufn.: LAMPRECHT, Jan. 1955



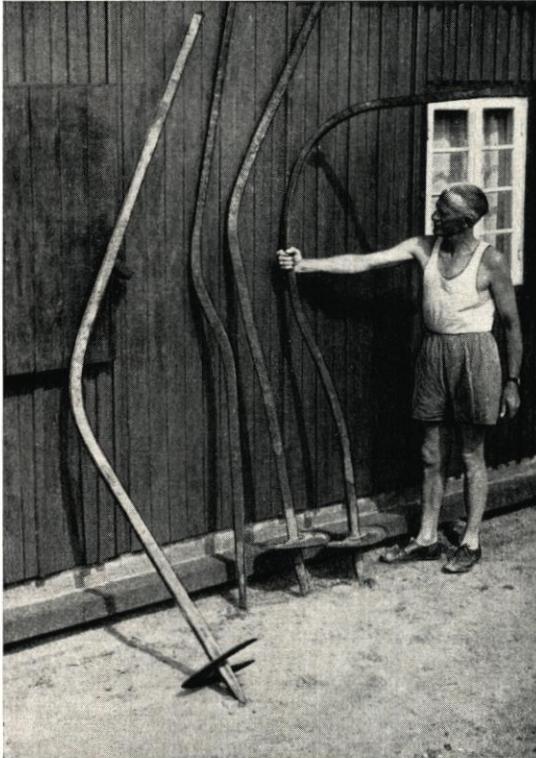
Abb. 4  
Ein Eisenpfahl wird als  
Vermessungsfestpunkt in den  
Strand eingedreht  
(im Vordergrund ist der  
„Schraubteller“ eines weiteren  
Pfahles zu sehen)  
Aufn.: LAMPRECHT, 1953

Diese Art der Sicherung der Standlinie und der Profile gestattet es, ohne großen Aufwand und in kurzer Zeit jeden Punkt am Strand eindeutig zu bezeichnen. Dies ist Voraussetzung für alle Vermessungen und besonders für alle Lotungen, da wegen der starken Wetterabhängigkeit die Meßzeiten nur dann richtig ausgenutzt werden können, wenn sich die Vorarbeiten möglichst schnell und einfach erledigen lassen. Darüber hinaus kommt die Sicherung allen Bauarbeiten, Dünenpflanzungen und Beobachtungen zugute.

Die Standlinie wurde im Jahre 1953 durch ein Fein-Nivellement über den Hindenburgdamm hinweg höhenmäßig an das Festpunktnetz des Festlands angeschlossen (DOLEZAL, 1954).

Als Quelle für die bei Rückwärtseinschnitten verwendeten Zielpunktkoordinaten diente das Verzeichnis des Reichsamts für Landesaufnahme, Trigonometrische Abteilung, Berlin, das nach Angaben der Katasterämter Husum und Niebüll ergänzt wurde.

Da die Verhältnisse am Sylter Strand für Vermessungsarbeiten meistens ungünstig sind (grelle Sonne, Wind, lockerer Untergrund), erwies sich bei den Profilmessungen der Einsatz moderner Instrumente als notwendig, die eine möglichst einfache und schnelle Aufstellung und Ablesung



Aufn.: LAMPRECHT, 1953

Abb. 5. Eisenpfähle, die rund 15 Jahre lang im Strande eingedreht waren und dort verbogen worden sind

auf dem Kliff anzulegen; dadurch war es möglich, den Steilhang oben und unten einzumessen.

Bei einem Vergleich zweier Strandprofile aus verschiedenen Jahrgängen können leicht Fehlschlüsse entstehen, wenn nicht die täglichen Strandveränderungen berücksichtigt werden. Sie sind besonders im Bereich des nassen Strandes (Gebiet zwischen der MThw- und der MTnw-Linie) erheblich, wie man gelegentlich auch ohne Messungen optisch deutlich wahrnehmen kann.

Da die Größenordnung dieser kurzperiodischen Höhenänderungen auch für Baumaßnahmen im Strandgebiet bekannt sein muß, wurden im Jahre 1954 zehn Monate hindurch täglich bei Tnw an drei ausgewählten Abschnitten Profilmessungen vorgenommen. Es zeigte sich, daß die mittleren täglichen Höhenänderungen am nassen Strand folgende Größe hatten:

Profil 5 n:	9,4 cm je Tag
Profil 0:	8,3 cm je Tag
Profil 2 s:	13,4 cm je Tag.

gestatten. Es wurden der Reduktionsdistanzmesser RDS, der Universal-Theodolit T 2 von WILD sowie der Repetitions-Theodolit Th III von ZEISS verwendet.

Sämtliche Höhenmessungen wurden mit Nivellierinstrumenten von ZEISS ausgeführt. Es gelangten das Nivellier B, das Nivellier Ni 2 mit automatisch horizontalisierter Ziellinie und für das Anschluß-Feinnivellement das Nivellier A mit Planplattenmikrometer und Invarlatten zum Einsatz.

Zur Bestimmung der Koordinaten durch Rückwärtseinschnitt wurden stets Doppelsätze mit Überbestimmungen gemessen, so daß Unsicherheiten bei der Berechnung der Koordinaten (gefährlicher Kreis) nach der Methode CASSINI ausgeschaltet werden konnten.

Zu Beginn einer Strandvermessung ist jeweils die Einwägung der Eisen-schraubpfähle erforderlich, da diese häufig verbogen sind (Abb. 5). Der Abstand von Profil zu Profil wurde mit einem Stahlbandmaß oder einem 50 m langen Drahtseil oder isoliertem Telefonkabel gemessen. Im Bereich des Roten Kliffs (Steilküste) erwies es sich als notwendig, je eine Standlinie am Kliffuß und oben

Im Profil 5 n senkte sich der nasse Strand in einem Falle innerhalb eines Tages im Mittel um 1,60 m, im Profil 2 s schwankte er innerhalb von vier Monaten um über 4 m. Die größte kurzperiodische Höhenschwankung wurde im Profil 0 (vor der Westerländer Ufermauer) gemessen und betrug innerhalb von zwei Tagen 2,60 m. Eine ausführliche Beschreibung der täglichen Strandveränderungen ist in LAMPRECHT (1955 b) gegeben.

Die zulässigen Fehlergrenzen für Vermessungsarbeiten der genannten Art sind von DOLEZAL (1948) festgelegt und in Tabelle 1 und 2 wiedergegeben. Lag die Ungenauigkeit bei Höhenmessungen (Nivellement) oberhalb der zulässigen Fehlergrenzen (Tabelle 1), so fand eine Wiederholungsmessung statt. Die größten Schwierigkeiten traten bei der Längenmessung auf. Die Verwendung eines langen Stahlbandmaßes erwies sich als unzuweckmäßig, da die Meter-Skala durch Sandschliff sehr schnell unleserlich wurde und die Bänder häufig brachen. Deshalb wurden für die Messung der Profilabstände zusätzlich Stahldrähte und isolierte Telefonkabel verwendet, deren Elastizität größer als die eines Meßbandes ist; daher mußte täglich die Länge kontrolliert werden. Darüber hinaus wurden alle Längenmessungen von stets den gleichen Meßgehilfen vorgenommen. Unter diesen Umständen konnten die Meßfehler innerhalb der zulässigen Grenzen gehalten werden (Tabelle 2).

Tabelle 1  
Fehlergrenzen für Höhenmessungen

S km	Zeiss Niv. A	Zeiss Niv. II
	$m_S = 3 \cdot \sqrt{S^*}$ mm	$m_S = 5 \cdot \sqrt{S^*}$ mm
0,5	1,0	2,0
1,0	3,0	5,0
2,0	4,0	7,0
3,0	5,0	9,0
4,0	6,0	10,0
5,0	7,0	11,0
6,0	7,0	12,0
7,0	8,0	13,0
8,0	9,0	14,0
9,0	9,0	15,0
10,0	10,0	16,0

\*)  $m_S$  = mittl. Fehler je S km Doppelnivellement

Tabelle 2  
Fehlergrenzen für Längenmessungen

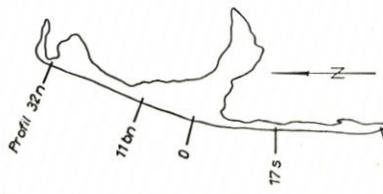
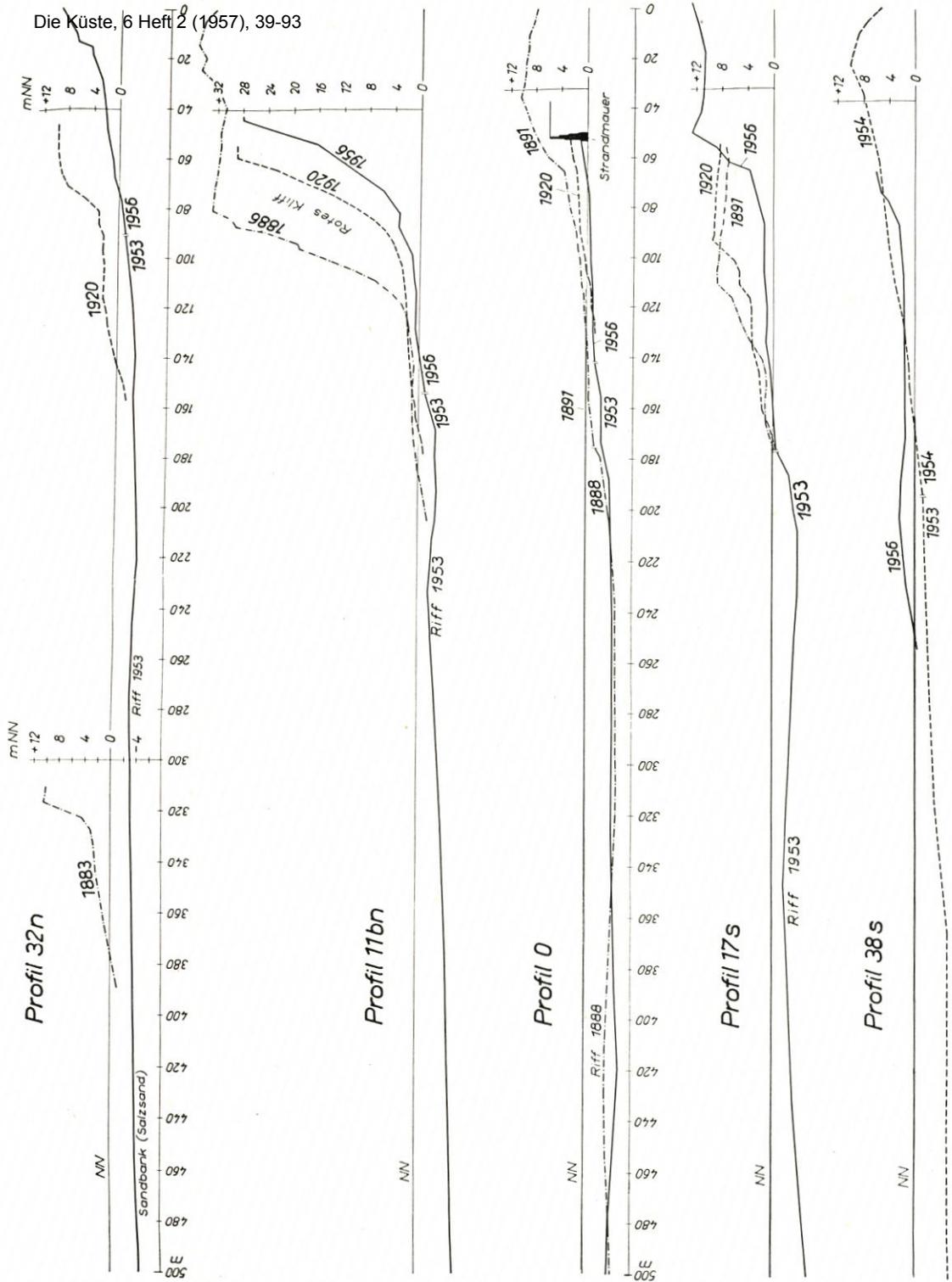
a) Standlinie: $f = 0,02 \sqrt{S^*}$		b) Querprofile: $f = 0,03 \sqrt{S^*}$	
Entfernung S m	Fehlergrenze f m	Entfernung S m	Fehlergrenze f m
100	$\pm 0,20$	100	$\pm 0,30$
1 000	$\pm 0,64$	500	$\pm 0,67$
2 000	$\pm 0,89$	1 000	$\pm 0,95$
3 000	$\pm 1,10$	2 000	$\pm 1,34$
4 000	$\pm 1,26$	3 000	$\pm 1,64$
5 000	$\pm 1,41$		
6 000	$\pm 1,55$		

\*) f = Fehlergrenze  
S = Entfernung

## 2. Darstellung der Meßergebnisse

Die meisten der früher beim Wasserbauamt Husum und seit 1936 beim Marschenbauamt Husum durchgeführten Messungen sind als Querprofile dargestellt. Diese Methode gestattet einen anschaulichen Vergleich verschiedener Messungen; sie wurde deshalb beibehalten. Abbildung 6 enthält die Küstenentwicklung seit 1883 in einigen ausgewählten Querprofilen.

Um die Küstenveränderungen darstellen und bewerten zu können, mußte zunächst die Küstenlinie, d. h. die Linie, an welcher der Fuß der Steilküstenböschung oder der Düne liegt (Abb. 7 und 8), eindeutig festgelegt werden. Dabei ergab sich für die Küstenlinie auf Sylt ein statistischer



Übersicht  
0 2 4 6 8 10 km

Abb. 6  
Ausgewählte  
Strandprofile der  
Sylter Westküste  
seit 1883

Mittelwert aus langjährigen Meßreihen, der auf + 3,75 m NN liegt und etwa der HHThw-Linie entspricht (LAMPRECHT, 1954 a u. 1955 b). An der Ostseite der Insel kam die Uferlinie (MThw-Linie) zur Darstellung (LAMPRECHT, 1956 b).

In welchem Maße sich die Lage der Umrißlinien geändert hat, veranschaulicht Abbildung 9 schematisch.

### 3. Auswertung

Der Wert und der Grad der Verwendbarkeit der älteren Karten sind im Schrifttum über Sylt ausführlich behandelt worden (MAGER, 1927; MÜLLER-FISCHER, 1938; PETERSEN, J., 1938; ZAUSIG, 1939). Es gilt heute als erwiesen, daß die auf der ältesten bekannten Karte von Sylt



Abb. 7  
Steiler Dünenhang nach einer Sturmflut; zum Sandfang am Dünenfuß ist erneut Strandhafer gepflanzt  
Aufn.: LAMPRECHT, 1955



Abb. 8  
Bildung einer „Vordüne“ durch Halmpflanzung.  
Der Dünenfuß ist nicht eindeutig zu erkennen  
Aufn.: HUNDT, 1938

(„Nordertheil vom Alt Nordt Frießlande biß an das Jahr 1240“ von Johannes MEYER) dargestellten Inselumrisse sehr unsicher sind und selbst für einen groben Vergleich mit der heutigen Inselgestalt nicht verwendet werden dürfen, so daß der von C. P. HANSEN um 1872 unternommene Versuch dieser Art (Abb. 10) nur als Hinweis darauf aufgefaßt werden kann, daß die Insel Sylt starken Veränderungen unterliegt und die Westküste erheblich zurückgewichen ist. Das gleiche gilt für die 1650 von Johannes MEYER und 1888 von Franz GEERZ unternommenen Versuche.



Abb. 9. Schematische Darstellung der Veränderung der Sylter Küstenlinie von 1870 bis 1955 (vgl. LAMPRECHT, 1955 b und 1957)

Als älteste zuverlässige Darstellung ist die 1793 von der Königlich Dänischen Gesellschaft der Wissenschaften, Kopenhagen, herausgegebene Karte zu betrachten.

Die vorliegende Untersuchung soll sich jedoch nur auf nachprüfbare, exakte Zahlenunterlagen stützen; daher ist auch von einer Verwendung der Karte von 1793 abgesehen worden.

Nach Abbildung 9 ist die Westküste (etwa Profil 34 n bis 37 s) mit Ausnahme der Profile 21 n bis 23 n und 5 s zum Teil erheblich zurückgewichen. Bei Profil 21 n bis 23 n und 5 s lagen bei der Aufnahme von 1870 starke Einbuchtungen der Küstenlinie vor, die sich später wegen der an der gesamten Sylter Westküste vorhandenen Ausgleichstendenz (der Küstenverlauf ist normalerweise fast geradlinig) allmählich auffüllten. Die Küstenlinie ist hier zwar in Richtung See gewandert, es handelt sich aber nicht um einen echten Anwachs.

Der Abbruch ist im mittleren Abschnitt der Westküste am kleinsten und nimmt nach den Enden der Insel hin stark zu. Für die Nordhälfte ergibt sich ein durchschnittlicher Jahresabbruch von 1,12 m, für die Südhälfte von 0,73 m. Nördlich und südlich an die Abbruchstrecken schließen sich Zonen bedeutenden Anwachs an. Während die stärksten Abbrüche der vergangenen 85 Jahre in Profil 32 n (West-Ellenbogen) mit 350 m (d. h. über 4 m je Jahr) auftraten (Abb. 6), hat sich die Insel nach Norden um

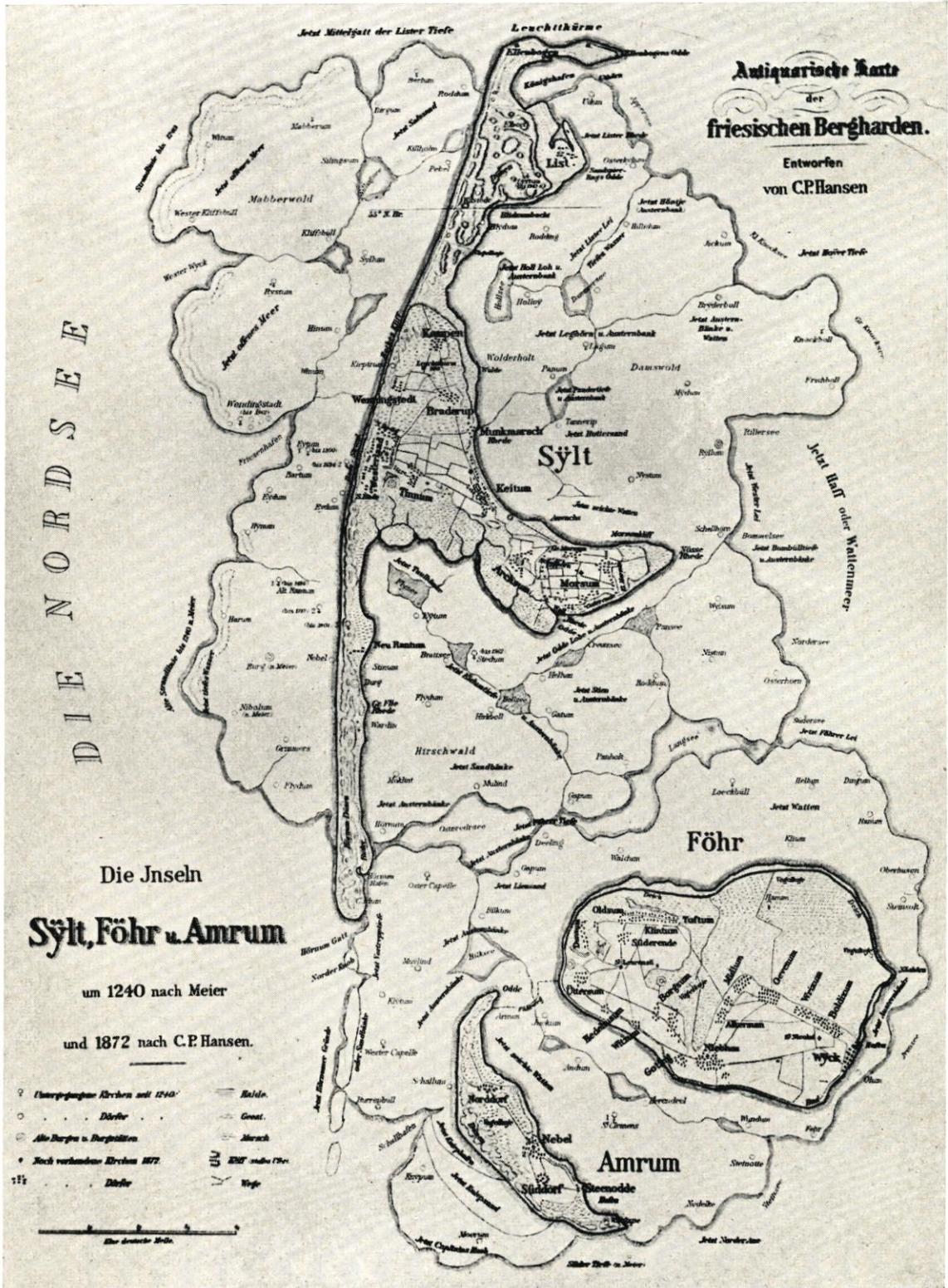


Abb. 10. Kartenvergleich von C. P. HANSEN, 1872

250 m und nach Süden um 600 m verlängert. Diese Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß sich ein Teil des nach Norden und Süden transportierten Abbruchmaterials der Westküste an den Inselenden wieder ablagert (Hakenbildung); der andere Teil dürfte jedoch weiter wandern und damit für die Insel verlorengehen.

Im Vergleich zu diesen Werten fallen die Abbrüche an der Ostküste kaum ins Gewicht; eine Bildung des arithmetischen Mittelwertes für die gesamte Meßstrecke führte zu der Größenordnung von 2 cm/Jahr. Es sei allerdings bemerkt, daß an einigen Stellen, wie z. B. im Bereich des Ortes Keitum, stärkere Abbrüche auftraten.

Der Strand reicht (im Querschnitt) vom natürlichen Dünenfuß, der Küstenlinie, bis zur Niedrigwasserlinie (MTnw) und läßt sich in den „trockenen“ und den „nassen“ Strand unterteilen (vgl. auch LÜDERS, 1953). Der trockene Strand wird durch den Dünenfuß und die

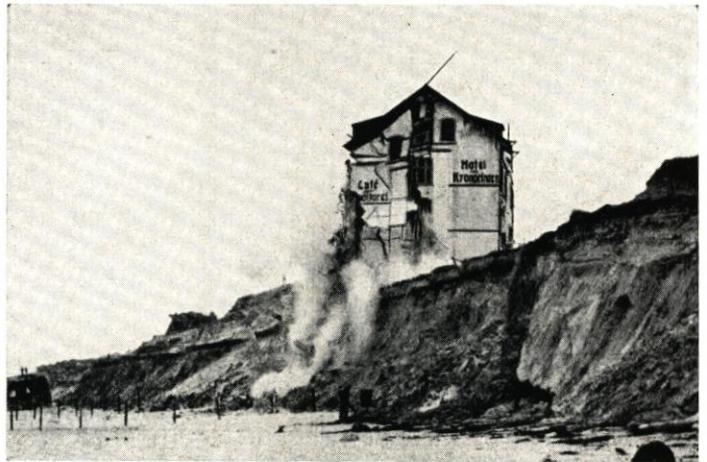


Abb. 11  
„Rotes Kliff“; vor dem  
„Hotel zum Kronprinzen“  
bei Wenningstedt brachen seit  
1905 über 50 m der Steilküste  
ab, so daß das Gebäude  
abgebrochen werden mußte  
Aufn.: LAMPRECHT, Jan. 1955

MThw-Linie (Uferlinie) begrenzt. Seine Breite schwankt auf Sylt zwischen 120 und 17 m; der Mittelwert beträgt etwa 50 m. Der nasse Strand liegt zwischen der Uferlinie und der MTnw-Linie und hat eine mittlere Breite von 26 m.

Eine Sonderstellung am Weststrand nimmt die Steilküste des „Roten Kliffs“ ein (Abb. 11), an der das Tertiär (Kaolinsand), das Diluvium (Geschiebelehm) und das Alluvium (Dünen-sand) offen zutage treten. Die Geschiebelehmschicht steigt bis zu + 26 m NN an, die aufgesetzten Dünen bis zu + 52 m NN. Der Strand am Kliffuß weist keine bemerkenswerten Unterschiede zum übrigen Strand auf.

Das Gefälle des Weststrandes von Sylt betrug in den letzten siebenzig Jahren am trockenen Strand im Mittel 1:17, am nassen Strand 1:15. Der Strand ist außer in der Nähe des Dünenfußes vegetationslos.

## B. Lotungen

### 1. Durchführung der Lotungen

#### a) Methoden, Ortung und Beschickung

Die Veränderungen einer Flachküste sind in entscheidendem Maße vom Kräftespiel in der ufernahen Unterwasserzone abhängig. Die Gestaltung dieser Zone – des sogenannten Unterwasser- oder Vorstrandes (er möge vor Sylt das Gebiet von der MTnw-Linie bis etwa zur – 10 m NN-Linie umfassen) – erfolgt durch Wellen und Strömungen.

Zur Beurteilung der Kraftwirkungen und Entwicklungstendenzen sowie insbesondere als Vorarbeit für Küstenschutzbauten in diesem Gebiet sind Wiederholungslotungen wichtige Voraussetzungen. Diese Erkenntnis ist nicht neu; die ältesten vor Sylt durchgeführten Lotungen des Vorstrandes gehen auf das Jahr 1870 zurück. Seit dieser Zeit erfolgten in mehrjährigen Abständen abschnittsweise Wiederholungslotungen.

Tiefenmessungen wurden ursprünglich mit einer Lotleine oder im flachen Wasser mit einem Lotstock durchgeführt. Die Schwierigkeit dieser Methode liegt darin, daß ein Ruhewasserspiegel geschätzt werden muß und zum andern eine Messung nur bei lotrechtem Faden oder Stock richtige Werte ergibt.

In neuerer Zeit werden für Tiefenmessungen allgemein das Echolot oder der Echograph verwendet.

Bei Lotungen muß in kurzen Zeitabständen der jeweilige Schiffsstandpunkt bestimmt werden. Während dieser bei großräumigen Messungen im allgemeinen durch Rückwärtseinschnitt nach bekannten Landzielen ermittelt wird, erfolgt die Lotung bei genaueren Vermessungen in Küstennähe zweckmäßigerweise in am Ufer abgesteckten Profilen, wobei der Schiffsstandpunkt durch Messung nur eines Winkels von Bord oder vom Land aus bestimmt wird.

Bei kurzen Profilen kann der Uferabstand mit einer Leine direkt gemessen werden. Dieses Verfahren findet häufig bei Kanal- und Flußmessungen Anwendung, hat jedoch bei Küstenvermessungen wegen der hier sehr langen Profile geringe Bedeutung.

Von einer Verwendung optischer Entfernungsmesser mußte vor Sylt wegen des bisher zu kleinen Meßbereichs der Geräte abgesehen werden. Eine Neuerung auf dem Gebiete der Ortungsmethoden scheint sich mit einem von den Atlas-Werken entwickelten Gerät abzuzeichnen, das auf funktechnischem Wege eine längengetreue Echolot-Registrierung ermöglicht.

Wegen des im Tidegebiet ständig wechselnden Wasserstandes ist eine Beschickung der gemessenen Tiefen auf eine festliegende Bezugsebene notwendig. Die Beschickung erfolgt im allgemeinen mit Hilfe von Schreibpegeln im Meßbereich. Da Lotungen nur bei sehr ruhigem Wetter möglich sind, kann der jeweilige Wasserstand notfalls auch an Lattenpegeln im Meßgebiet abgelesen werden.

Sämtliche Messungen werden auf Normalnull (NN) bezogen; das für Pegelwerte festgesetzte Pegelnull (PN) liegt auf  $-5,00$  m NN.

## b) Genauigkeit der Lotungen

Die Genauigkeit von Lotungen im Küstengebiet ist von der Genauigkeit der Tiefenmessung selbst, der Ortung und der Beschickung abhängig. Der Einfluß der einzelnen Faktoren ist bei verschiedenen Meßmethoden unterschiedlich. Entsprechend dem Zweck einer Lotung sind auch die Genauigkeitsforderungen verschieden. Eine Seekartenvermessung benötigt naturgemäß keinen so hohen Genauigkeitsgrad wie eine Vorstrandvermessung, die z. B. Aufschluß über kurzperiodische Sandverlagerungen geben soll.

### Tiefenmessung

Alle Messungen vor 1936 wurden auf Sylt mit einem Lotstock oder einem Handlot durchgeführt. Systematische Untersuchungen über die Genauigkeit sind nicht bekannt. Nach Erfahrung und Schätzung beträgt die Fehlergrenze etwa

Lotstock (bis 5 m Wassertiefe)  $\pm 10$  cm

Handlot (bis 10 m Wassertiefe)  $\pm 20$  cm

bei festem Seegrund und leichtem Seegang.

Nach 1936 erfolgten die Tiefenmessungen mit einem Echolot bzw. Echographen. In flachen Gebieten (Ufernähe, Sandriff bei Tnw usw.) mußte wegen der Strandungsgefahr jedoch nach wie vor von einem Boot aus mit einem Lotstock gemessen werden.

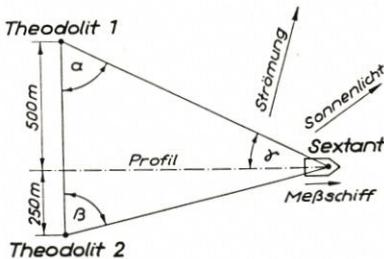
Die Genauigkeit von Echolotungen kann allgemein nach HUNDT (1951) und im besonderen für alle Messungen vor Sylt seit 1936 mit  $\pm 10$  cm angegeben werden. (Die Instrumenten-Fehler des Echolots durch Temperatur- und Dichteschwankungen sind vor Sylt so klein, daß sie vernachlässigt werden können.)

### Ortung

Die genaueste Einmessung des Schiffsstandpunktes ist eine Kreuzpeilung mit zwei Theodoliten von Land aus. Bei guten Sicht- und Windverhältnissen ergibt sich bei zwei geübten Ablesern eine Fehlergrenze von schätzungsweise  $\pm 10''$ , d. h. ein Abstandsfehler von weniger als  $\pm 50$  cm, wenn das Schiff bis zu 2000 m vom Ufer entfernt ist und der Abstand beider Theodolite 750 m beträgt.

Da der Aufwand für eine Kreuzpeilung bei den Sylter Messungen jedoch zu groß ist, erfolgte die Ortung von Bord aus mit einem Sextanten. Die Ablesegenauigkeit beträgt dabei 0,5' (Schätzung bis 0,1').

Zur Bestimmung der Genauigkeit einer Ortung mit dem Sextanten wurde eine Kontrollmessung bei ungünstigen Bedingungen (starke Strömung quer zur Kursrichtung des Schiffes, Messung gegen die grelle Sonne) an der Sylter Ostküste südlich von Hörnum durchgeführt. Abbildung 12 zeigt die Aufstellung bei der Messung.



Theodolit 2

Abb. 12. Schema der Instrumentenaufstellung zur Kontrolle einer Sextantablesung

Durch Messung der Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  ließ sich der tatsächliche Uferabstand  $S$  ermitteln, der dann dem Abstand  $S_1$  gegenübergestellt wurde, der sich unter Verwendung des Sextant-Winkels  $\gamma$  errechnete.

Eine Zusammenstellung der Meßwerte ist in Tabelle 3 vorgenommen. In der letzten Spalte ist der Abstandsfehler in Prozent des Uferabstands angegeben. Dieser Fehler enthält sowohl die Ungenauigkeiten der Sextantmessung als auch die Ungenauigkeiten durch Abtritt des Meßschiffes aus dem Profil. Da bei der Messung

ungünstige Verhältnisse vorlagen (vor der Sylter Westküste ist ein nennenswerter Strom quer zum Profil nicht zu erwarten), erscheint es gerechtfertigt, die Lagegenauigkeit an der Westküste mit  $\pm 1\%$  des Uferabstands anzugeben.

Die Genauigkeit der Ortungen vor 1936 läßt sich nicht mehr bestimmen, da in den Profilplänen und Akten keine Angaben über benutzte Geräte usw. zu finden sind. Die Fehlergrenze wurde mit  $\pm 2\%$  des Uferabstands angenommen.

### Beschickung

Die Wasserstandsbeschickung von Lotungen ist in der Deutschen Bucht nach HUNDT (1951) im allgemeinen mit Fehlern bis zu  $\pm 30$  cm behaftet, wenn unter Verwendung von Flutstundenlinien an Basispegel angeschlossen wird. Die Lotungen seit 1936 vor Sylt weisen dagegen einen höheren Genauigkeitsgrad auf, da an Hilfspegel angeschlossen werden konnte. Weil zudem nur bei Schönwetter gelotet werden kann, wird die Fehlergrenze mit  $\pm 15$  cm veranschlagt.

Die Fehlergrenze der Messungen vor 1936 dürfte dagegen wesentlich höher liegen, da nur die Pegel List und zum Teil Hörnum als Anschlußpegel in Frage kamen und nicht mit Flutstundenlinien gerechnet wurde. Dieser Fehler wird mit  $\pm 50$  cm angenommen.

Eine Zusammenstellung der einzelnen Fehlergrenzen ist in Tabelle 4 vorgenommen.

Die Zeichengenauigkeit beim Kartieren beträgt etwa  $\pm 0,25$  mm; dem entspricht für den Maßstab 1:10 000 eine Entfernung von 5 m in der Natur. Diese Genauigkeit wird jedoch nur in den Meßprofilen (gegenseitiger Abstand im allgemeinen 500 m) erreicht. Der Tiefenlinienverlauf zwischen den Profilen wird interpoliert. Über die Größenordnung des hierbei auftretenden Fehlers wurden auf Sylt bisher noch keine Untersuchungen angestellt. Sie kann

bis zu einem Uferabstand von 2 km mit etwa  $\pm 20$  m in der Natur angenommen werden; bei größerem Uferabstand der  $-10$  m NN-Linie (seewärtige Grenze des Meßbereichs vor Sylt) wird der Fehler größer.

Tabelle 3  
Genauigkeit von Sextantmessungen

Uhrzeit	Tatsächlicher Uferabstand S (Kreuzpeilung) m	Gemessener Uferabstand S <sub>1</sub> (Sextantmessung) m	Differenz S <sub>1</sub> - S m	Fehler in %
25. 9. 1953				
11.52	246	245	- 1	0,4
11.53	395	398	+ 3	0,8
11.54	550	552	+ 2	0,4
11.55	704	708	+ 4	0,6
11.56	863	864	+ 1	0,1
11.57	1 041	1 051	+ 10	1,0
11.58	1 187	1 195	+ 8	0,7
11.59	1 362	1 365	+ 3	0,2
12.00	1 530	1 535	+ 5	0,3
12.01	1 728	1 722	- 6	0,3
12.02	1 951	1 940	- 11	0,6
12.03	2 152	2 148	- 4	0,2
12.05	2 342	2 334	- 8	0,3
12.06	2 298	2 282	- 16	0,7
12.07	2 232	2 222	- 10	0,4
12.08	2 162	2 151	- 11	0,5
12.09	2 081	2 087	+ 6	0,3
12.10	2 002	2 011	+ 9	0,5
12.11	1 927	1 930	+ 3	0,2
12.12	1 851	1 860	+ 9	0,5
12.13	1 767	1 783	+ 16	0,9
12.14	1 710	1 718	+ 8	0,5
12.15	1 655	1 667	+ 12	0,7
12.16	1 604	1 616	+ 12	0,7
12.17	1 533	1 551	+ 18	1,2
12.20	1 342	1 350	+ 8	0,6
12.21	1 272	1 285	+ 13	1,0
12.22	1 222	1 218	- 4	0,3
12.23	1 132	1 147	+ 15	1,3
12.25	975	983	+ 8	0,8
12.26	892	898	+ 6	0,7
12.27	803	808	+ 5	0,6
12.28	700	711	+ 11	1,6
12.29	589	602	+ 13	2,2
12.31	354	360	+ 6	1,7
12.32	227	234	+ 7	3,1

Tabelle 4  
Fehlergrenzen bei Lotungen vor Sylt

	Fehlergrenzen	
	vor 1936	nach 1936
Tiefenmessung	$\pm 20$ cm	$\pm 10$ cm
Ortung	$\pm 2\%$ des Uferabstands	$\pm 1\%$ des Uferabstands
Beschickung	$\pm 50$ cm	$\pm 15$ cm

Die vorstehende Überlegung zeigt, daß eine Steigerung der Ortungsgenauigkeit nicht sinnvoll ist, da die Fehler bei der Ortung in der gleichen Größenordnung liegen wie die durch das Kartierverfahren bedingten; eine Vereinfachung des Ortungsverfahrens wäre dagegen erwünscht. Andererseits dürfen bei einem Vergleich von Tiefenplänen nur solche Veränderungen bewertet werden, die außerhalb der Fehlergrenzen liegen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5  
Fehlergrenzen bei Tiefenplänen 1:10 000

Höhengenaugigkeit		vor 1936 ± 70 cm	nach 1936 ± 25 cm
Lagegenauigkeit	bei einem 1 km	± 40 m	± 30 m
	Uferabstand 2 km	± 60 m	± 40 m
	von: 4 km	± 100 m	± 60 m

### c) Darstellung der Meßergebnisse

Die in Meßprotokollen festgehaltenen Lotungsergebnisse werden seit 1936 auf NN bezogen und in Querprofilen dargestellt. Die älteren Ergebnisse waren im allgemeinen auf „ordinäres Hochwasser“ bezogen und mußten umgerechnet werden.

Für die Beurteilung flächenhafter und zonaler Zusammenhänge ist eine Herstellung von Tiefenplänen erforderlich. Zu diesem Zweck wurden die Meßergebnisse im Maßstab 1:10 000 in „Meßkarten“ eingetragen, in denen dann durch Interpolation die Tiefenlinien ermittelt wurden. Tiefenpläne liegen vor (LAMPRECHT, 1955a) von:

- 1870 vor Westerland
- 1888 Sylt-Nordhälfte und Sylt-Südhälfte
- 1900 Sylt-Nordhälfte, Sylt-Südhälfte und Ellenbogen
- 1936 Sylt-Nordhälfte, Sylt-Südhälfte und Ellenbogen
- 1952 Sylt-Nordhälfte und Ellenbogen
- 1953 Sylt-Nordhälfte, Sylt-Südhälfte, Ellenbogen und Hörnum.

## 2. Auswertung der Lotungen

### a) Querprofile

Eine Betrachtung der graphisch dargestellten Querprofile vermittelt einen Überblick über die Formen des Vorstrandes in den einzelnen Profilen; sie zeigt darüber hinaus, daß die Profilformen im Abschnitt von Profil 35 s bis 25 n (d. h. eine Strecke von rund 30 km Länge von Hörnum bis Klappholtal) in den letzten sieben Jahren im wesentlichen ähnlich geblieben sind. Aus diesem Grunde erschien es sinnvoll, für diesen Abschnitt ein „mittleres Profil“ zu konstruieren.

Unter Verwendung aller gemessenen Querprofile dieses Bereichs wurden eine obere und eine untere Umhüllende ermittelt; d. h. alle gemessenen Profile liegen zwischen diesen beiden Kurven (Abb. 13).

Riffbildungen traten nur in einer Zone von etwa 100 m bis 550 m Abstand von der Uferlinie auf. Die beiden Umhüllungskurven wurden zur Konstruktion eines mittleren Profils benutzt, das als Unterlage für überschlägliche Betrachtungen und für Baumaßnahmen in diesem Bereich angewendet werden kann.

Nördlich und südlich der bisher besprochenen 30 km-Strecke verläuft die — 10 m NN-Linie erheblich weiter vom Ufer entfernt, da hier ausgedehnte Sandbänke vor der Insel liegen. An der Nordküste und östlich der Südspitze bewirken das Lister- und das Hörnum

Tief, daß sich die  $-10$  m NN-Linie sehr dicht am Ufer hält. Im Lister Tief wurden Wassertiefen von über  $40$  m gemessen, im Hörnum Tief Tiefen bis  $25$  m.

Unter Verwendung der Profilpläne wurden die Veränderungen der  $6$ - und  $10$  m-Tiefenlinien vor Sylt (d. h. der Linie, von der ab landwärts der unregelmäßig geformte Vorstrand beginnt und der Linie, bei der die Welle im allgemeinen ihre erste Grundberührung bekommt)

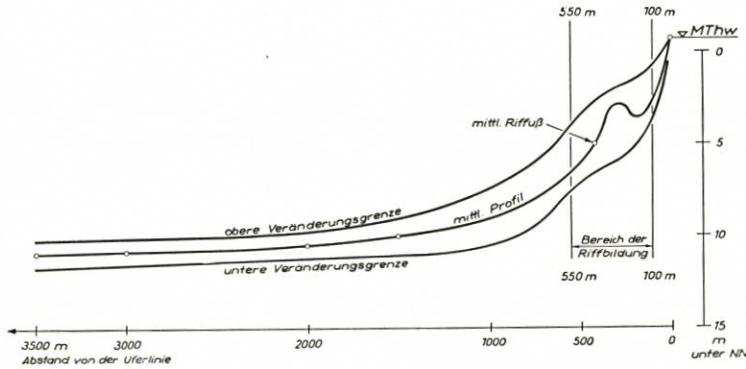


Abb. 13. Mittleres Unterwasserstrandprofil vor Mittel-Sylt (Profil 25 n bis 35 s) seit 1888

seit 1888 graphisch dargestellt (Abb. 14). Als Bezugslinie wurde die heute gültige Standlinie (idealisierte Strandverlauf) gewählt, die in Abbildung 14 als Gerade aufgetragen ist. (Wegen der verzerrten Darstellung der Strandveränderungen hätte eine naturgetreue Wiedergabe der Standlinie einen falschen Eindruck vermittelt.)

Zum Vergleich und als Anhalt wurde zusätzlich der Verlauf der Küstenlinie ( $= +3,75$  m NN) angegeben. Da die Strandvermessungen wesentlich genauer als die Lotungen sind, kann der Verlauf der Küstenlinie im Maßstab der Abbildung 14 als fehlerfrei betrachtet werden. Der Angabe der  $-6$  m NN-Linie haftet dagegen ein Fehler von  $\pm 30$  bis  $\pm 40$  m an und der  $-10$  m NN-Linie im Mittelteil der Insel  $\pm 40$  bis  $\pm 60$  m (Tabelle 5).

Die Abbildung 14 zeigt, daß die Veränderungen besonders bei der  $10$  m-Tiefenlinie im allgemeinen außerhalb der Fehlergrenze liegen, d. h. als tatsächliche Veränderungen angesprochen werden müssen. Die  $-6$  m NN-Linie liegt nach der jüngsten Messung im allgemeinen näher am Ufer als nach der ältesten.

Wenn man eine Mittelbildung der Differenzen zwischen der ältesten (1888) und der jüngsten (1952/54) Messung vornimmt, ergeben sich für den Abschnitt Profil 8 s bis 17 n (12,5 km langer Bereich vor dem Mittelteil der Insel, in dem fünf Jahres-Meßreihen vollständig vorliegen), d. h. etwa zwischen Rantum und Klappholttal für die Linie

$$\begin{aligned} -6 \text{ m NN: } & 81,5 \text{ m Rückgang} & = 1,24 \text{ m/Jahr} \\ -10 \text{ m NN: } & 19,6 \text{ m Vordringen} & = 0,30 \text{ m/Jahr.} \end{aligned}$$

Der Vergleich der ältesten mit der jüngsten Messung gestattet also nur die Aussage, daß die Veränderungen der letzten 66 Jahre nicht einheitlich und örtlich sehr verschieden sind. Zur besseren Übersicht wurden in Abbildung 15 die Veränderungen der  $-10$  m NN-Linie zwischen den einzelnen Messungen im Abschnitt Profil 8 s bis 17 n einzeln dargestellt und die Gebiete des Tiefenlinienrückgangs schraffiert. Danach lag von 1888 bis 1900 ein starker Rückgang vor, der jedoch im Intervall 1900 bis 1922 zum größten Teil durch ein Vordringen wieder ausgeglichen wurde. In den Zeiträumen 1922 bis 1936 und 1936 bis 1952/54 fand eine ähnliche Pendelbewegung statt, so daß insgesamt nur im Abschnitt Profil 4 n bis 11 n (d. h. im Gebiet des Roten Kliffs) eine nennenswerte Heranwanderung der  $-10$  m NN-Linie

**Veränderungen der -10m, -6m und +3,75m NN-Linien  
von 1888 bis 1954  
an der Westküste von Sylt**

**Zeichenerklärung**

- ..... 1888
- 1900
- 1922
- 1936
- 1952/54

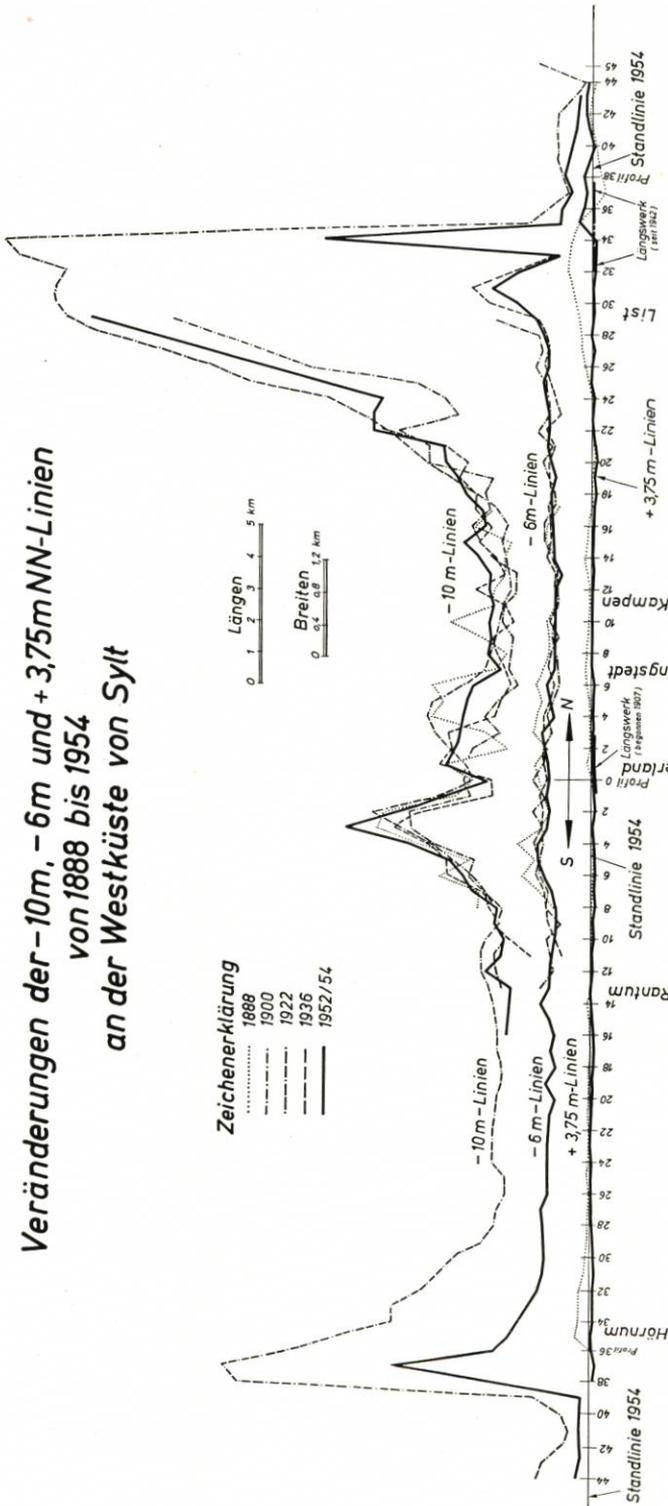
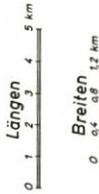


Abb. 14. Veränderung des Unterwasserstrandes vor der Sylter Westküste seit 1888

zu erkennen ist (Mittelwert  $205 \text{ m} = 3,10 \text{ m/Jahr}$ ).

Auch das Wandern der  $-6 \text{ m NN}$ -Linie ist in diesem Gebiet deutlich ausgeprägt; sie näherte sich um  $97,5 \text{ m} (= 1,47 \text{ m/Jahr})$  dem Ufer.

**b) Tiefenpläne**

Während Querprofile die Veränderungen und den Zustand eines kleinen Abschnitts veranschaulichen, vermittelt ein Tiefenplan einen zusammenhängenden Überblick über ein größeres Gebiet. Im großen und ganzen finden wir das bereits durch die Auswertung der Querprofile gewonnene Bild bestätigt. Darüber hinaus lassen sich aber erst jetzt genauere Aussagen über den Verlauf des Sandriffs vor der gesamten Küste machen. Auffällig ist, daß die Tiefenlinien von 6 bis 10 m vor dem Südteil von Westerland eine deutliche Ausbuchtung nach See zu aufweisen, d. h. vor dem „Knick“ der Sylter Westküste befindet sich unter Wasser eine „Nase“ (Abb. 14). Diese Tatsache erscheint merkwürdig, wenn man bedenkt, daß der Knick — diese am stärksten exponierte Stelle der Insel — seit fünfzig Jahren durch massive Bauwerke befestigt ist, d. h. nicht zurückweichen konnte. Man müßte hier ein

verstärktes Heranwandern der Tiefenlinien und damit nicht eine Nase, sondern im Gegenteil eine flache Einbuchtung erwarten. Die Nase dürfte entweder geologischen oder hydrologischen Ursprungs, d. h. entweder ein Restkörper oder eine Ablagerung sein.

Eine weitere Untersuchung dieser Frage ist für den Schutz gerade des Westerländer Strandabschnitts von erheblicher Bedeutung, da ein flacher Strand dem Küstenabbruch einen

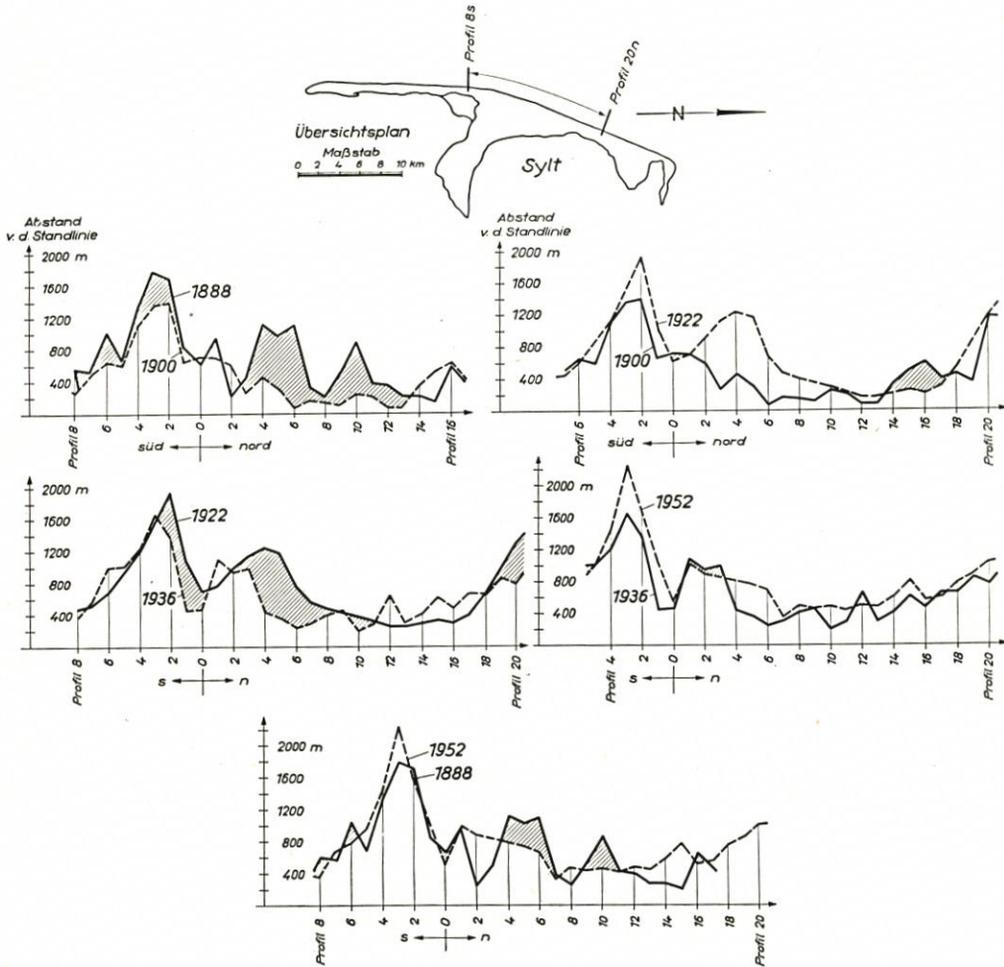


Abb. 15. Veränderung der  $-10$  m NN-Linie vor Mittel-Sylt von 1888 bis 1952

größeren Widerstand entgegengesetzt als ein steiler, und daher keinerlei Eingriffe in das Kräfte-spiel am Westerländer Unterwasserstrand vorgenommen werden dürfen, die diese natürliche Nase in ihrem Bestand gefährden.

Zur Gewinnung eines genauen Überblicks über kurzfristige Veränderungen des Unterwasserstrandes wären tägliche Lotungen notwendig. Da bisher Lotungen aber nur von Bord aus durchgeführt werden können („Schönwettermessung“), muß auf Messungen bei bewegten oder gar stürmischen Wetterlagen verzichtet werden.

Um dem Ziel einer täglichen Messung jedoch näher zu kommen, wurden im Zeitraum vom 20. 5. 1953 bis zum 8. 10. 1954 fünf Wiederholungslotungen vorgenommen.



sind; das Riff ist also abgeflacht und der Priel hat sich zum Teil aufgefüllt. Der bei Lotung 6 erkennbare etwa 1 km lange Riffkörper bei Profil 2 n und 3 n hat sich an das Ufer herangelegt und ragt bei Lotung 7 nur noch mit seinem südlichen Ende nach See vor. Ebenso ist die kleine Riffkuppe in Profil 1 n an das Ufer herangewandert und bei Lotung 7 als Nase wiederzuerkennen.

Im Gegensatz zu diesen starken Veränderungen sind die Unterschiede bei den Lotungen 7, 8, 9 und 10 gering. Lediglich ein Vergleich der Lotungen 9 und 10 gibt eine Tendenz an, nach der sich das Riff vor dem Südabschnitt stärker auszuprägen scheint, während andererseits der Priel hinter dem Riff deutlicher in Erscheinung tritt. Zwischen den Lotungen 7, 8 und 9



Aufn.: LAMPRECHT, 1954

Abb. 17. Riffzone vor Westerland durch stürmische Brecher gekennzeichnet  
(Wasserstand: 20 cm über MThw)

wurde kein Wasserstand beobachtet, der das MThw um 0,75 m oder mehr überragte; lediglich zwischen den Lotungen 9 und 10 traten einmal ein Wasserstand von mehr als 1,00 m über MThw und keine Wasserstände zwischen 0,75 und 1,00 m auf.

Abschließend kann gesagt werden, daß im Beobachtungszeitraum nur die stürmischen Wetterlagen (Wasserstände etwa ab 1,00 m über MThw) erkennbare Einflüsse auf die Topographie des Unterwasserstrandes gehabt haben. Die angewandte Methode läßt jedoch keine Schlüsse über die Sandwanderung in ihrer Gesamtheit zu, da ein gleichmäßig durch das Beobachtungsgebiet hindurchwandernder Materialstrom als solcher nicht erfaßt wird.

### c) Das Sandriff

Schon aus alten Beschreibungen und Chroniken ist das Sandriff vor der Sylter Westküste bekannt (MÜLLER-FISCHER, 1938). Seine Lage zeichnet sich an der hier bei niedrigen Wasserständen oder hohen Wellen auftretenden Brecherzone deutlich ab (Abb. 17 u. 18). Bei sehr niedrigen Wasserständen fällt das Riff gelegentlich trocken. Die starken Veränderungen, denen es unterliegt, werden ebenfalls in alten Beschreibungen erwähnt.

Sandriffe treten vor allen Flachküsten auf und verdanken ihre Entstehung den Wellenkräften (RUSSEL-INGLIS, 1953; GRIESSEIER-VOLLBRECHT, 1954).

Die Riffkörper vor Sylt weisen im allgemeinen einen etwas flacheren seeseitigen als landseitigen Hang auf, was für ihre Entstehung durch von See zum Land wirkende Kräfte spricht. Andererseits ist das Riffgebiet als Sandwanderungszone längs des Strandes anzusehen. PETERSEN (1952) bezeichnet die Sandriffe als „Förderbänder der Sandwanderung“.

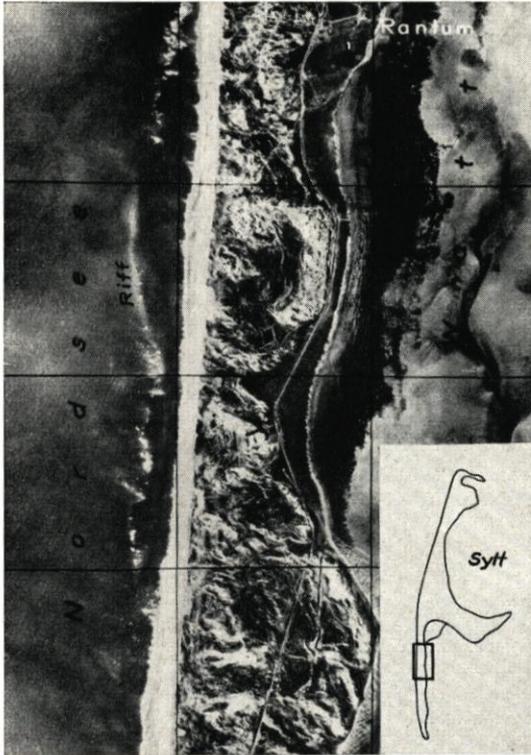


Abb. 18. Luftbild mit Riffzone (1938)

ist hier die Strandneigung sehr flach geworden, so daß weder bei der Januar-Sturmflut 1954 noch bei den weiteren Sturmfluten und hohen Wasserständen des Jahres 1954 in diesem Küstenabschnitt nennenswerte Abbrüche erfolgten.

Ein Riff steht demnach sowohl unter dem Einfluß von quer als auch längs zum Strand gerichteten Kräften (vgl. auch GRIESSEIER-VOLLBRECHT, 1954; MAGENS-WYRTKI-RODEN, 1954). Es wird an einer solchen Stelle entstehen, an der die Wechselwirkung zwischen Welle und Seegrund besonders ausgeprägt ist, d. h. in einer Tiefenlage, die von Wellengrößen und Strandneigung abhängt. Seit 1888 lag der seeseitige Riffuß vor Sylt im Mittel auf  $-5$  m NN.

Abbildung 19 vermittelt eine Übersicht über die Lage der Riffkette im Sommer 1952/53; als „Riff“ wurden alle Erhöhungen des Vorstrandes angenommen, die das landseitig gelegene Gebiet um wenigstens 1 m überragten. Ein Riff vor einer Flachküste zwingt bei Sturmfluten die Wellen zum vorzeitigen Brechen und entzieht ihnen dadurch einen Teil ihrer Energie. Von deutlich sichtbarem Nutzen für den Strand hat sich der nördlich von Westerland herangewanderte Riffkörper erwiesen (Abb. 16, Lotung 7). Durch die erheblichen Sandmassen vor dem Strand

### III. Angreifende Kräfte

#### A. Wind

Es wurde gezeigt, daß sich aus der Veränderung des Strandes und des Vorstrandes bis zu einem gewissen Grade Schlüsse auf die angreifenden Naturkräfte ziehen lassen. Diese Schlüsse sind jedoch für eine Beurteilung der Bewegungsvorgänge nicht ausreichend, so daß eine direkte Messung der Kraftgrößen notwendig ist.

Als Ursache für die an der deutschen Küste maßgeblichen Meereskräfte sind der Wind und die Gezeiten anzusehen. Während der Wind den Seegang und damit die Brandung sowie Windtriften und Windstau erzeugt und am trockenen Strand Sand transportiert, entstehen durch die Gezeiten Ströme, die besonders in den Tiefs (Gaten, Priele) zwischen den Inseln eine

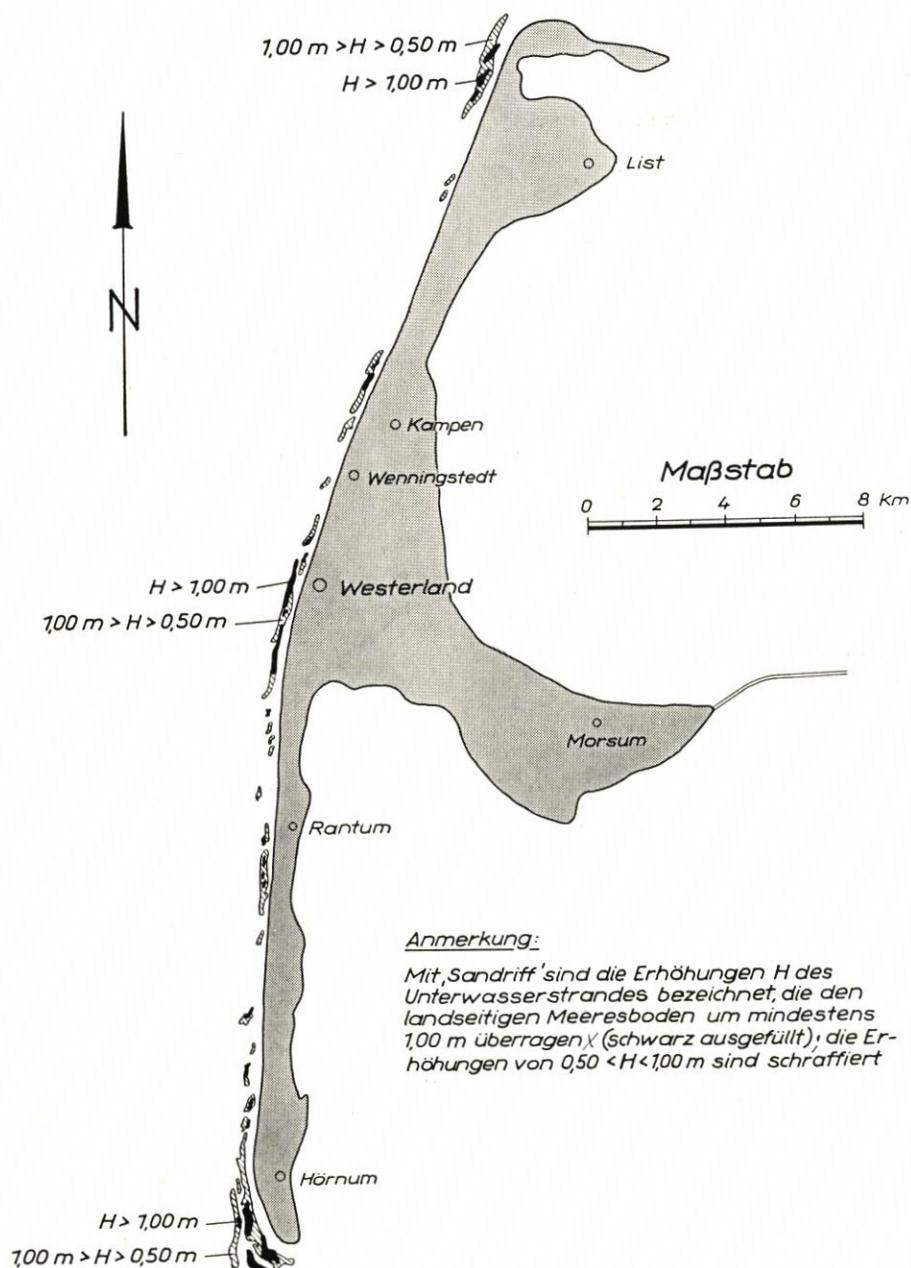


Abb. 19. Verlauf des Sandriffs vor Sylt (nach Lotungen 1952/53)

beachtliche Größenordnung aufweisen. Die Zusammenhänge zwischen Wind und Seegang sind in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt (SVERDRUP-MUNK, 1947; ROLL, 1953; BEACH EROSION BOARD, 1954). Auf Grund der neueren systematischen Untersuchungen ist es möglich, die Brandungsgrößen an einer beliebigen Küste vorauszubestimmen, wenn man die Windgrößen im Wellenerzeugungsgebiet kennt.

Da sich die vorliegende Arbeit auf das Sylter Gebiet beschränken muß, sei im folgenden eine Übersicht über die Windverhältnisse in Westerland gegeben. In den Abbildungen 20 und 21 sind die Auswertungen einer Zehnjahresreihe (1927—1936) von HUNDT (Akten des Marschenbauamts Husum) graphisch dargestellt worden. Die Windbeobachtungen wurden dreimal täglich (7.00, 14.00 und 21.00 Uhr) vorgenommen und sind nach relativer Häufigkeit und Richtungsverteilung der Winddruckstunden ausgewertet (Dimension für Winddruck:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ; für

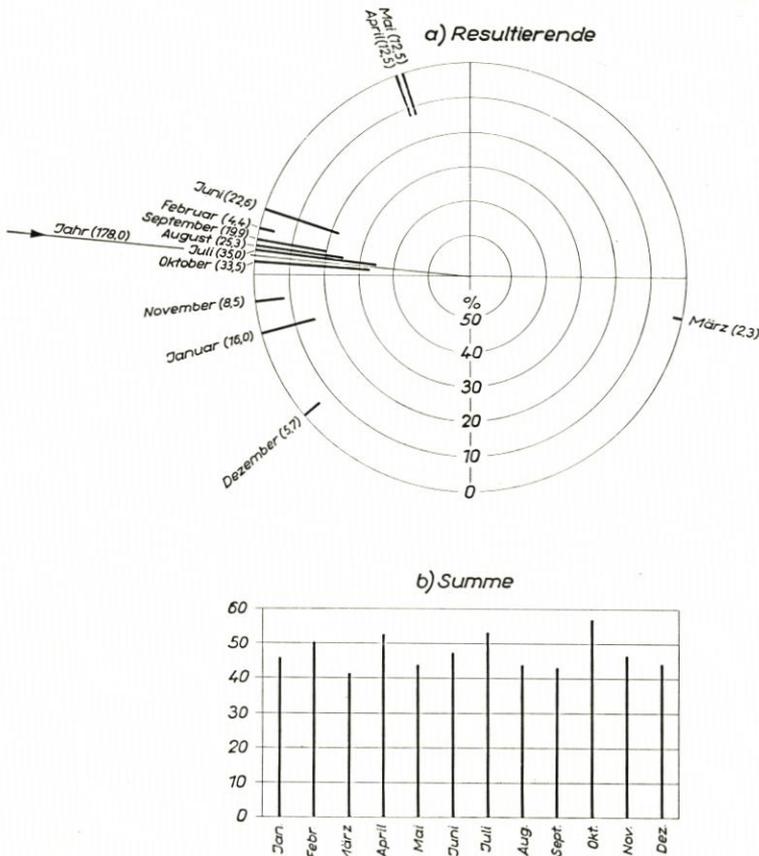


Abb. 20. Graphische Darstellung der monatlichen Winddruckstunden für Westerland/Sylt von 1927 bis 1936; alle Angaben in  $10^3 \cdot \frac{24}{3} \cdot 3600 \text{ m}^2/\text{s}$

Winddruckstunde:  $\text{m}^2/\text{s}$ ). Die Anzahl der Winddruckstunden ist insofern von entscheidender Bedeutung, als die Hebung des Wasserspiegels durch Windstau (z. B. Sturmflut) von ihr abhängt.

Abbildung 20 zeigt die Resultierenden und die Summen der monatlichen Winddruckstunden; von Juni bis Oktober ist eine verhältnismäßig starke Wirkung aus West bis Westsüdwest vorhanden. In den Monaten Januar bis Mai und November bis Dezember treten merklich kleinere und nicht einheitlich gerichtete Werte auf. Da die Monatssummen der Winddruckstunden nicht die gleiche Tendenz aufweisen, sondern ihre Größe etwa gleichmäßig schwankt, kann gefolgert werden, daß die Windstauwirkung stärkemäßig keinen auffallenden jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt; in bezug auf die Richtung ergibt sich, daß die Wirkung in

den Monaten Juni bis Oktober verhältnismäßig einheitlich verläuft, während in den übrigen Monaten die Richtung stark wechselt.

In Abbildung 21 sind die zu einem 10-Jahresmittel verarbeiteten Monatswerte aufgetragen. Die Darstellung der Richtungsverteilung der Winddruckstunden für die vorliegende Untersuchung ist der Darstellung der relativen Häufigkeit (allgemein übliche Darstellungsmethode)

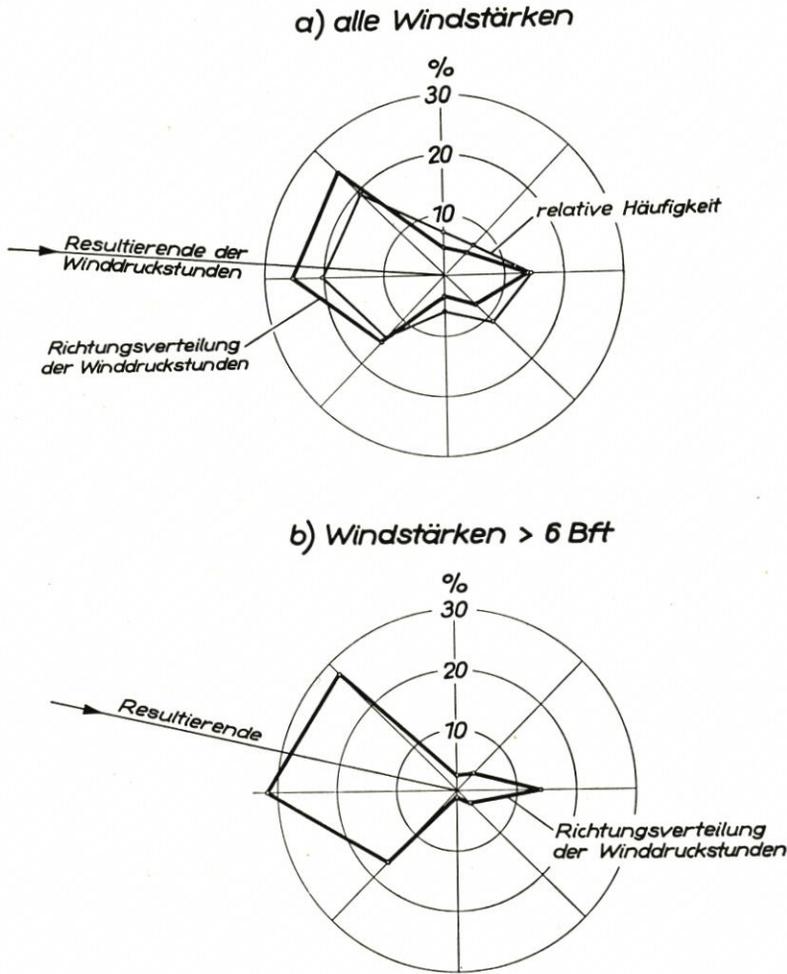


Abb. 21. Graphische Darstellung des 10-Jahresmittels (1927 bis 1936) der Windwerte für  
 Westerland/Sylt; alle Angaben in  $10^3 \cdot \frac{24}{3} \cdot 3600 \text{ m}^2/\text{s}$

überlegen, da die Hauptwirkungsrichtung deutlicher hervortritt. Nun werden die Küsten am stärksten bei Sturmfluten beansprucht und verändert, deshalb ist zusätzlich die Richtungsverteilung der Winddruckstunden für Windstärken größer als 6 Bft. angegeben. Auch hier liegt die Hauptwirkung bei Westsüdwest.

Abschließend sei kurz auf die Frage eingegangen, in welchem Maße eine Messung aus drei Punktwerten in 24 Stunden für eine Mittelbildung repräsentativ ist. Zu diesem Zweck wurden die Dauerregistrierungen der Wetterwarte List/Sylt für den Zeitraum vom 1. 3. bis 31. 12. 1954

einmal nach Stundenmitteln und zum andern nach täglich drei Punktwerten (7.00, 14.00 und 21.00 Uhr) ausgewertet (Abb. 22). Eine schwache Abweichung ist vorhanden, sie wird um so kleiner sein, je länger der Beobachtungszeitraum gewählt wird.

Meßzeitraum vom 1.3. bis 31.12.1954

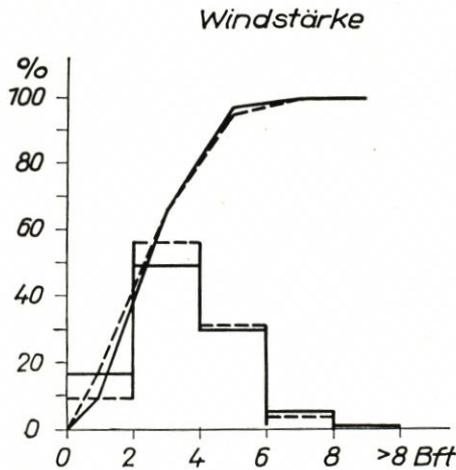
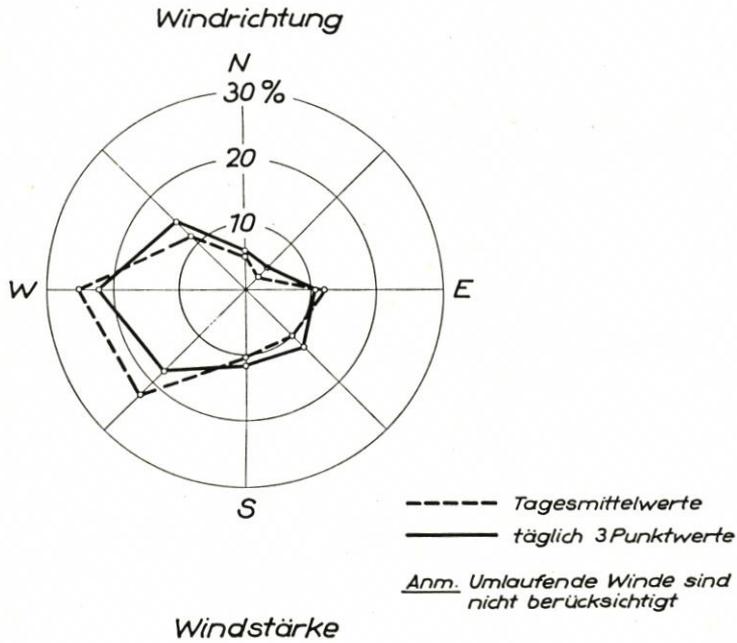


Abb. 22. Windwerte für Westerland/Sylt (aus LAMPRECHT, 1955 b)

Da die täglichen Überwasser- und Unterwasserstrandveränderungen von großer Bedeutung für Bauvorhaben sind und Windkräfte in mehreren Arbeiten als indirekte Ursachen angegeben wurden (MAGER, 1927; MÜLLER-FISCHER, 1938, u. a.), erstreckten sich die Sylter Untersuchungen auch auf die Zusammenhänge zwischen Windkräften, Wasserständen und kurzfristigen Strandveränderungen. Eine ausführliche statistische Behandlung dieser Fragen ist durch

LAMPRECHT (1955 b) erfolgt; es sei hier daher nur erwähnt, daß bei gleichen Wind- und Wasserstandsverhältnissen sowohl Strandabbruch als auch -anwachs gemessen wurde. Bei hohen Wasserständen, großen Windstärken und westlichen (aufländigen Winden) überwiegt jedoch der Abbruch, bei niedrigen Wasserständen, kleinen Windstärken und östlichen (abländigen) Winden der Anwachs.

Am trockenen Strand und im übrigen Inselgebiet tritt die Windwirkung als Sandwanderung in Erscheinung. Die großen Wanderdünen südlich List mögen hier als ein wirkungsvolles Beispiel genannt werden. Ihre Wandergeschwindigkeit lag in den letzten Jahren zwischen 2 und 10 m jährlich (Akten des Marschenbauamts Husum). Bei westlichen Winden werden am Strand gelegentlich bedeutende Sandmengen auf den Dünen-Luv-Hang geweht und verstärken auf diese Weise die Vordüne.

## B. Wellen und Brandung

### 1. Allgemeines

Die Größe der Wellen hängt von der Winddauer, -stärke und dem Windweg über See ab. Gelangt eine Welle in Ufernähe, so tritt sie schließlich in eine Zone ein, in der die Wassertiefe nicht mehr für eine ungestörte Kreisbewegung der Wasserteilchen ausreicht. In diesem Gebiet, dessen see-seitige Begrenzung etwa dort liegt, wo die Wassertiefe gleich der halben Wellenlänge ist, erfährt die Welle eine immer stärker sichtbar werdende Veränderung ihrer Höhe, Länge und Geschwindigkeit, bis sie in Strandnähe überbricht. Der stark mit Luft, Sand und Kies angereicherte Schwall der gebrochenen Welle läuft nunmehr auf den Strand, wo die restliche Energie verzehrt wird, wenn nicht eine Reflexion an einer steilen Wand stattfindet.

Eine Behandlung der wichtigsten Theorien und neueren Erkenntnisse auf dem Gebiet der Wellen- und Brandungsforschung sowie eine Begriffserläuterung sind vom Verfasser an anderer Stelle gegeben worden (LAMPRECHT, 1955 b); die folgenden Ausführungen lassen sich daher auf eine zusammenfassende Wiedergabe beschränken.

Bei Betrachtung des heutigen Standes der Wellenforschung zeigt sich, daß die Bewegungsvorgänge innerhalb einer Dünungswelle und ein Teil der Erscheinungen in der Brandungszone selbst durch Theorien und Untersuchungen weitgehend analysiert sind. Andererseits wird jedoch von mehreren Seiten (BEACH EROSION BOARD, 1954; MAGENS-WYRTKI-RODEN, 1954; VOLLBRECHT, 1954) darauf hingewiesen, daß sich Windwellen anders verhalten als Dünungswellen und daß der Bodenreibung der Welle vor der Brecherzone besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muß. Für eine Urteilsbildung über die Verhältnisse in einem bestimmten Küstengebiet hat es sich indes nach wie vor als notwendig erwiesen, die dort auftretenden Wellen- und Strömungsgrößen und Uferveränderungen zu messen, um durch eine Kombination der allgemeinen Erkenntnisse mit den örtlichen Werten zu einer Aussage zu gelangen. Der praktische Wert systematischer Wellenuntersuchungen tritt besonders in Erscheinung, wenn es gilt, die Abmessungen eines Küstenschutzbauwerks zu ermitteln; darüber hinaus stützen sich alle anderen Überlegungen über das Geschehen an der Küste (z. B. Sandtransport, Riffbildung, Wellenauflaufhöhe) auf die vorhandenen Wellenwerte. Für den Mittelteil von Sylt kommt den Wellenkräften eine hervorragende Bedeutung zu, da die Tideströmungen hier in Strandnähe gering sind.

### 2. Wellenmessungen

#### a) Beobachtungen von Wellengrößen

Die Wellengrößen wurden auf Sylt an feststehenden, z. T. 400 m vor dem Strand eingespülten Meßskalen mit einem Fernglas abgelesen. Auf einer 3,5 km langen Meßstrecke vor Westerland wurden 1954 neuneinhalb Monate hindurch täglich in vier Meßprofilen bei Thw und Tnw die Wellenhöhe, -länge, -periode, -geschwindigkeit und -richtung gemessen. Die Wellenbeobachtungen sind zu Monats- und zu einem 10-Monatsmittel verarbeitet (vgl. Abb. 23 und 24). Die größte zwischen 1952 und 1956 vor Westerland gemessene Wellenhöhe betrug

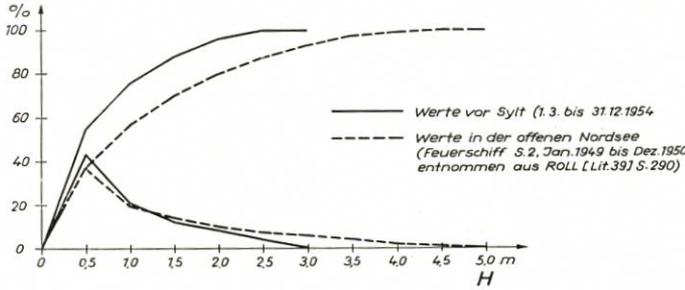


Abb. 23. Messung von Wellenhöhen der Nordsee (aus LAMPRECHT, 1955 b)

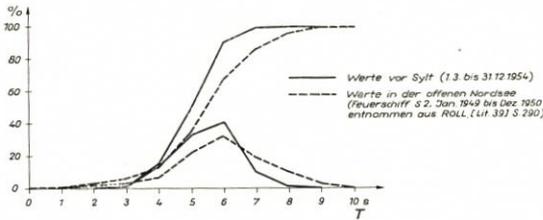
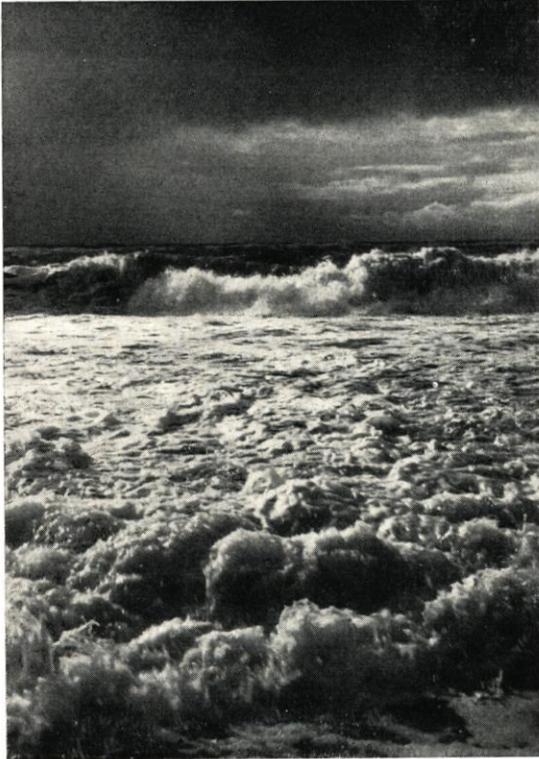


Abb. 24. Messung von Wellenperioden der Nordsee (aus LAMPRECHT, 1955 b)



Aufn.: LAMPRECHT, Jan. 1954

Abb. 25. Brandung bei Sturmflut

etwa 3 m (Sturmflut 16. 1. 1954; Abb. 25); als größtmögliche Wellenhöhe wird 4 m angenommen. Die Messungen der Wellenaufbauhöhen auf drei verschiedenen rauhen Deckwerken ergaben, daß sich durch Vergrößerung der Oberflächenrauigkeit die Aufbauhöhen bis auf 69 % vermindern lassen (Abb. 26 u. 27).

Auf Sylt wurde in mehreren Fällen beobachtet, daß Strandwälle durch Wellen auf- und auch wieder abgebaut wurden. Zusammenhänge zwischen Wellenwerten und Strandveränderungen sind im Schrifttum mehrfach erwähnt worden (DOBBIE, 1952; MAGENS-WYRTKI-RODEN, 1954 u. a.).

#### b) Mikroseismische Messungen der Brandungsenergie

Da es bis heute keine erfolgreiche Methode der direkten Messung von Wellenenergien vor der Küste gibt, wurde auf Sylt versucht, durch Messen der Bodenschwingungen am Strand Zahlenwerte über die in Strandnähe freiwerdende Wellenenergie zu erhalten (LAMPRECHT, 1955 b). In Zusammenarbeit mit dem Geophysikalischen Observatorium der Universität Hamburg, das die notwendigen Geräte entwickelte sowie die Messungen durchführte und sie physikalisch auswertete, wurde bei normalem Wetter (Windstärke 4-5 Bft. aus West bis Südwest) und bei einer Sturmflut (16. und 17. 1. 1954; höchster Wasserstand: + 7,90 m PN = 2,24 m über MThw) die Bodenerschütterung gemessen.

Für die physikalische Auswertung mußten folgende Annahmen getroffen werden, deren Richtigkeit noch zu untersuchen bleibt:

1. Die mikroseismischen Verhältnisse im trockenen Sand (Strand) sind gleich denen im nassen Sand (Meeresboden).

2. Die Oberflächenwellen geben die Schwingungsverhältnisse vollständig und richtig wieder (durch Fallversuche wurden Oberflächen-, Raum- und Schichtwellen nachgewiesen).

Unter Benutzung der Dreiecksaufstellung der Geräte, der Dispersionseigenschaft von Wellen und der Fallversuche zur Eichung des Verfahrens (ein Zentnergewicht wurde aus 1 m Höhe fallengelassen und die Schwingungen in verschiedenen Abständen von der Fallstelle registriert) war es möglich, Angaben über die Richtung, die Entfernung und die Größe von etwaigen Energie-Erregungszentren zu ermitteln.

Als wichtigste Ergebnisse seien erwähnt:

1. Die Energien bei Sturmflut verhielten sich zu denen bei normalem Wetter etwa wie 220 : 1.
2. Bei Sturmflut traten rund 100 m vor der Westerländer Strandmauer Stöße auf den Meeresboden bis zu 10 000 mkg auf (Abb. 28).
3. Bei einigen markanten Einzelwellen (solitary wave) erfolgte die Energieabgabe an den Meeresboden in einzelnen Stößen nacheinander; die größten Stöße lagen nicht in der Brecherzone, sondern rund 40 m weiter seawärts (Abb. 29).

Da diese Ergebnisse zum Teil auf Annahmen beruhen, dürfen sie noch nicht als Tatsachen angesehen werden. Die Mikroseismik zeichnet sich jedoch als eine Methode ab, mit deren Hilfe einige Probleme im Brandungsgebiet erfolgreich bearbeitet werden können. Es ist daher geplant, die Untersuchungen in dieser Richtung fortzusetzen.

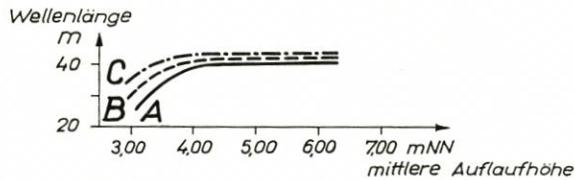
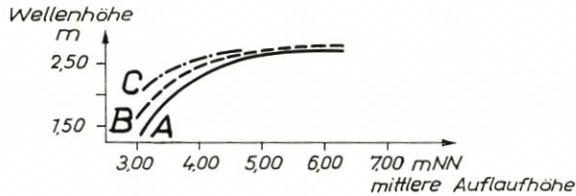
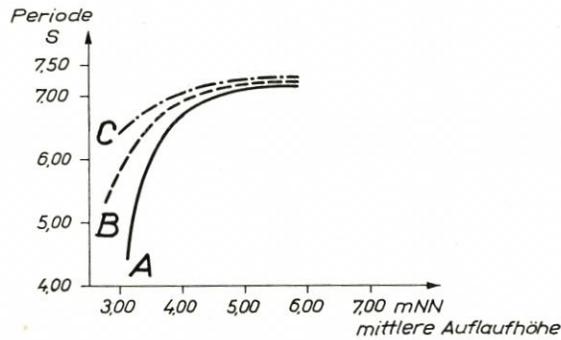
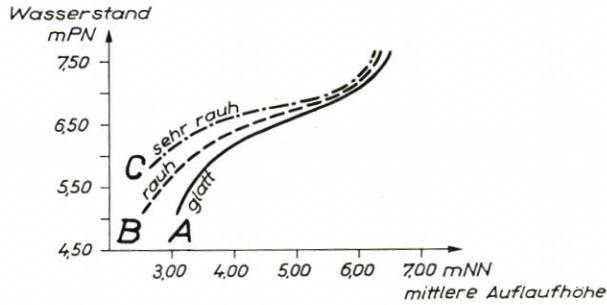


Abb. 26. Zusammenhang zwischen Wasserstand und Wellenwerten einerseits und der mittleren Wellenaufhöhe auf Deckwerken vor Westerland/Sylt andererseits (aus LAMPRECHT, 1955 b) (vgl. Abb. 27)

### C. Strömungen

Der Nord- und Südteil von Sylt wurden als Hakenbildungen charakterisiert, d. h. ihre Entstehung setzt nördlich und südlich gerichtete Strömungsergebnisse voraus. Dabei läßt sich zunächst noch nicht entscheiden, ob dies auf die Tide (Ebbe- und Flutstrom), den Wind (Windtrift, Windstau), die Wellen (Brandungsstrom) oder auf ein Zusammenwirken der drei Faktoren zurückzuführen ist. Auf Grund neuerer Forschungsergebnisse (BEACH EROSION BOARD,

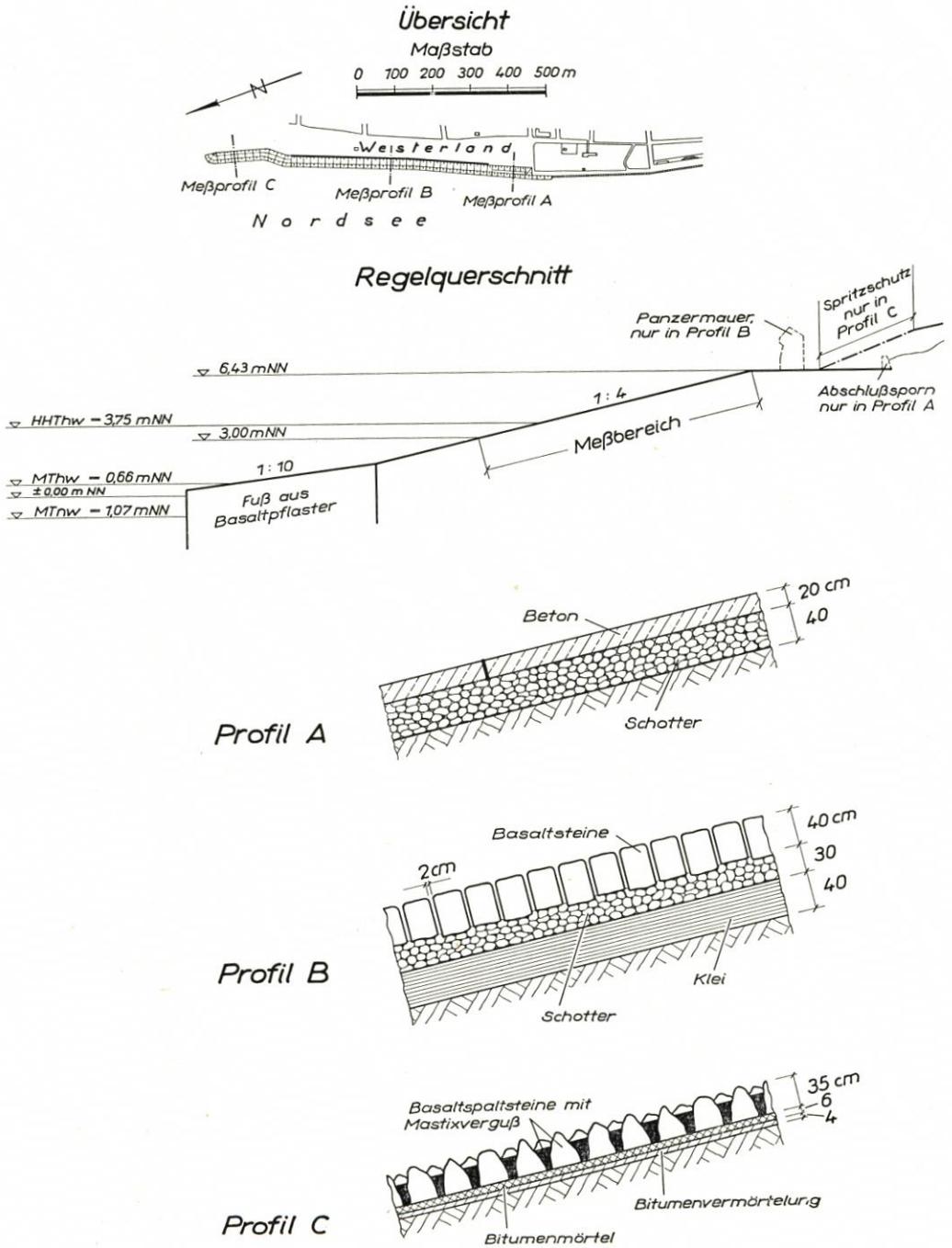


Abb. 27. Darstellung der Meßprofile für den Wellenauflauf auf Deckwerken vor Westerland/Sylt (aus LAMPRECHT, 1955 b)

1954; MAGENS-WYRTKI-RODEN, 1954; GRIESSEIER-VOLLBRECHT, 1955) wird jedoch bei Verhältnissen wie vor Mittel-Sylt den Brandungskräften der überwiegende Einfluß zugeschrieben.

Eine erschöpfende Beurteilung der Strömungen um Sylt ist noch nicht möglich, da entsprechende Messungen fehlen. Jedoch sollen im folgenden die bisher vorgenommenen Untersuchungen genannt und daraus die möglichen Schlüsse gezogen werden.

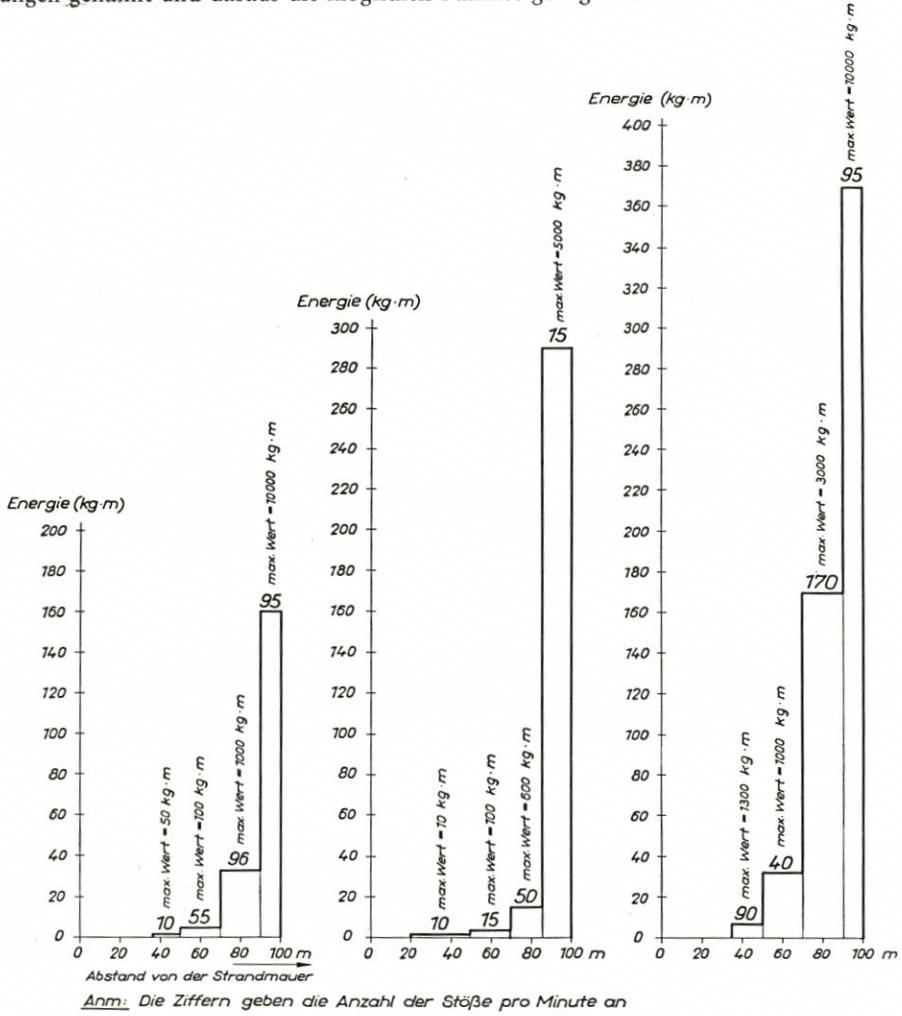


Abb. 28. Mikroseismische Messungen der Wellenenergie an drei Punkten vor der Strandmauer Westerland/Sylt bei der Sturmflut am 17. 1. 1954. Es sind die mittleren und maximalen Stoßenergien auf dem Meeresboden sowie die mittlere Anzahl der Stöße je Minute angegeben (vgl. LAMPRECHT, 1955 b)

Die ersten bekannten Strömungsmessungen vor Mittel-Sylt wurden 1869/70 mit einem WOLTMANNschen Flügel und mit eingeworfenen Flaschen (Schwimmermessung) durchgeführt und ergaben Maximalgeschwindigkeiten von 0,42 m/s; der Flutstrom lief etwa nach Norden, der Ebbestrom nach Süden (MÜLLER-FISCHER, 1938). Damals wurde bereits darauf hingewiesen, daß diese „Schönwettermessungen“ keine Auskunft über die Verhältnisse bei stürmischem Wetter geben können.

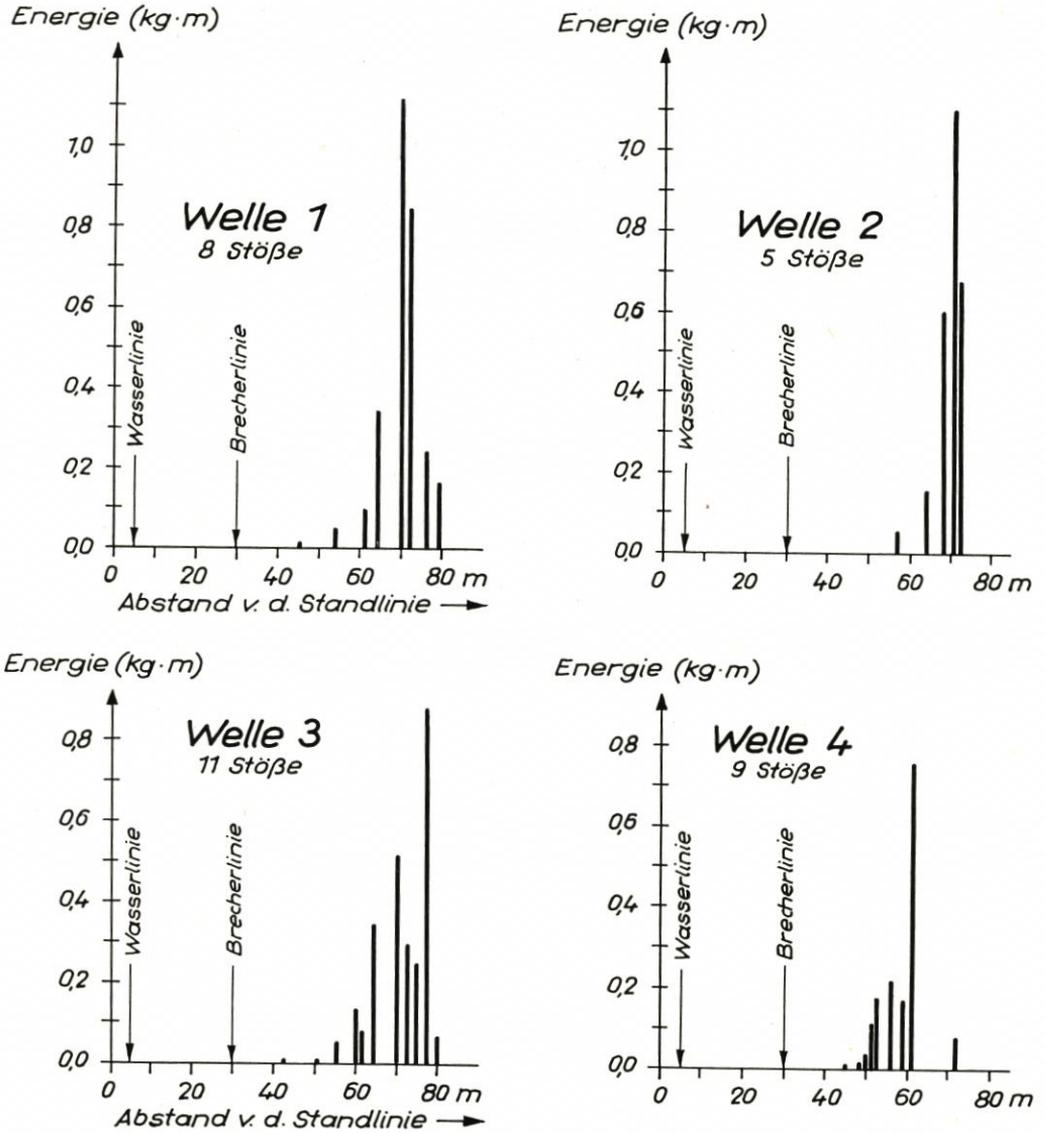


Abb. 29. Mikroseismische Messungen der Wellenenergie vor Sylt; Energieabgabe einzelner Wellen (vgl. LAMPRECHT, 1955 b)

Im August 1921 wurde in den Tiefs um Sylt ein Meßprogramm gemeinsam von der Marineleitung, dem Institut für Meereskunde an der Universität Berlin und der Deutschen Seewarte abgewickelt (SCHUMACHER-THORADE, 1923). Es gelangten fünf Fahrzeuge zum Einsatz. Wegen zahlreicher meßtechnischer Schwierigkeiten — insbesondere infolge ungünstigen Wetters — konnten die meisten Messungen nicht in dem Maße ausgewertet werden, wie es geplant war. Es ergab sich, daß in den Prielsystemen Lister- und Hörnum Tief — auch in den „Unterläufen“ — ein rein alternierender und an einem Meßpunkt rund 40 km westlich von Sylt-Ellenbogen bei etwa 20 m Wassertiefe ein Übergangszustand von einem alternierenden zu einem

Drehstrom vorhanden war; während die Flutstundenlinien vor der Insel im wesentlichen in Nordsüdrichtung verliefen, zeigte sich im Wattgebiet ein Ostwestverlauf, wobei ein Reststrom nach Norden festgestellt wurde.

Die zusammenfassende Betrachtung gipfelt in der Forderung nach möglichst langfristigen und gleichzeitigen Messungen an vielen Punkten (synoptische Messung).

Die dann folgenden systematischen Strömungsmessungen bei Sylt fanden von 1936 bis 1939 durch die Forschungsgruppe Sylt der Forschungsstelle Westküste statt und beschränkten sich auf das Gebiet des Lister Tiefs (vgl. Aufsatz HUNDT in diesem Heft).

Die Beobachtung, daß die Sandwanderung im westlichen Teil des Lister Tiefs nach Westen, die im östlichen aber nach Osten gerichtet ist, läßt den Schluß zu, daß das Lister Tief fortwährend weiter ausgeräumt wird (vgl. auch ZAUSIG, 1939). Dabei wirkt das von der Sylter Westküste herant transportierte Material diesem Vorgang entgegen.

Die Untersuchungen der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum von 1952 bis 1956 mußten auf Grund

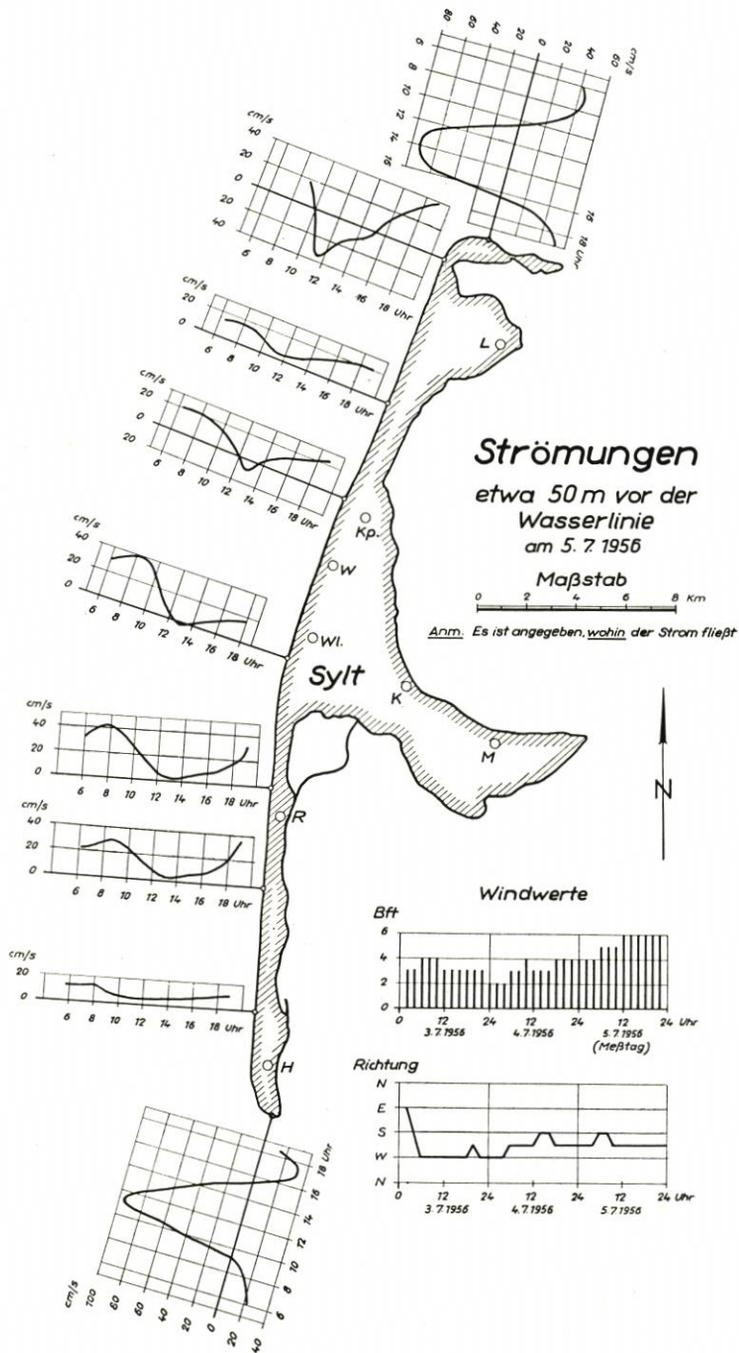


Abb. 30. Graphische Darstellung von gleichzeitigen Schwimmermessungen an neun Meßpunkten über dreizehn Stunden

Tabelle 6  
Strömungsrichtungen vor Mittel-Sylt  
(beobachtet an Strömungstonnen jeweils rund 200 und 400 m vor der Wasserlinie, vgl. Abb. 1)

Datum (Meßtag)	Windwerte (List/Sylt) Tagesmittel der jeweils letzten 3 Tage (einschließlich Meßtag)				Profil 4 nord				Profil 4 süd				Bemerkungen	
	Rich- tung	St. St.	Rich- tung	St. St.	Flutstrom von: S nach N	Stunden nach Tnw	Ebbestrom von: S nach N	Stunden nach Thw	Flutstrom von: S nach N	Stunden nach Thw	Ebbestrom von: S nach N	Stunden nach Tnw		Flügelmessung Flügelmessung
25. 6. 1953	E	5	E	4	ENE	3								
30. 6. 1953	ENE	3	umfld.	2	NNE	3	×	×	1,9	×	×	2,2	Flügelmessung Flügelmessung	
22. 9. 1953	SSE	4	S	5	SW	5	×							
5. 10. 1953	WSW	3	NW	5	NNW	6	×	×						
6. 10. 1953	NW	5	NNW	6	N	4		×						
7. 10. 1953	NNW	6	N	4	NNE	2	×	×						
8. 10. 1953	N	4	NNE	2	umfld.	2	×	×						
9. 10. 1953	NNE	2	umfld.	2	WSW	3	×	×						
12. 10. 1953	W	5	SSW	3	SSE	4	×	×						
13. 10. 1953	SSW	3	SSE	4	SE	3	×	×						
16. 10. 1953	ESE	3	NE	3	NE	2	×	×						
22. 10. 1953	E	2	SE	3	ESE	4	×	×						
23. 10. 1953	SE	3	ESE	4	SSE	3	×	×						
21. 11. 1953	WNW	5	W	5	WNW	5		×						
19. 12. 1953	SE	2	SSE	3	ENE	4	×	×						
30. 12. 1953	NNW	4	NNE	3	ENE	2	×	×						
8. 1. 1954	SSE	2	ENE	3	NW	3	×	×						
9. 1. 1954	ENE	3	NW	3	NNW	5	×	×						
10. 2. 1954	SE	5	E	3	ENE	3	×	×						
Mittel:														
				1,3					2,4					1,8
									3,0					2,9
														Eistreiben

der bisher auf Sylt und auch andernorts durchgeführten Messungen davon ausgehen, daß nur synoptische Methoden erfolgversprechend sind; zudem war es wichtig, die Beobachtungen auch auf stürmische Wetterlagen auszudehnen. Da die Durchführung eines großräumigen langfristigen Meßprogramms mit selbstschreibenden Geräten, z. B. Schaufelradstrommessern, aus tech-

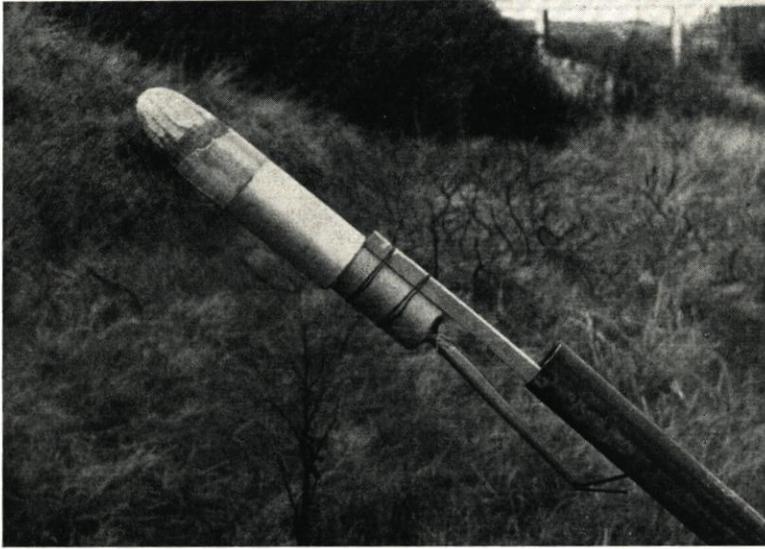


Abb. 31  
Rakete mit Farblösung für Schwimm-  
messungen bei  
Sturm (Raketenlänge  
etwa 20 cm)  
Aufn.: LAMPRECHT,  
Mai 1955

Tabelle 7  
Strömungsgeschwindigkeiten vor Westerland/Sylt bei stürmischem Wetter  
(Messung mit Farbraketen)

Dat. im	Windwerte				Wellenwerte		Uhrzeit	Strömungs- geschwindig- keit	Strömungs- richtung nach	Abstand von der Wasser- linie	Bemerkungen
	Tagesmittel		z. Z. d. Messg.		Richtung	Höhe					
	Stärke	Richtung	Stärke	Richtung							
	Bft		Bft		m		m/s		m		
5. 5. 1955	6	WSW	6	WSW	WSW	2,5	11.45	0,60	N	100	Thw: 11.50 Uhr (noch schwacher Flutstrom nach N)
							12.15	0,36		200	
							12.35	0,38		300	
							12.40	0,51		300	
18. 5. 1955	7	SSW	6	SW	SW	3	18.30	0,63	N	150	Tnw: 16.13 Uhr (schon schwacher Flutstrom nach N)
							18.35	0,84		150	
							18.50	0,72		150	
							18.55	0,85		150	

nischen Gründen bisher nicht möglich war, konnten sich die Untersuchungen vorerst nur provisorischer Methoden bedienen, die indes eine Reihe wertvoller Aussagen ermöglichten.

Zur Beobachtung der Strömungsrichtung und der Kenterpunkte vor Mittel-Sylt wurden 2 km nördlich (Profil 4 n) und 2 km südlich (Profil 4 s) von Westerland (Abb. 1) je zwei Schiffahrtstonnen in etwa 200 m und 400 m Abstand von der Uferlinie mit rund 15 m langen Ketten an Betonklötzen verankert. Die Tonnen waren so beschwert, daß sie nur etwa

20 cm aus dem Wasser ragten und trugen oben ein 1,50 m langes rotes Gasrohr (Durchmesser 3 cm), so daß eine sichere Beobachtung mit einem Glas auch bei Sturm möglich war und andererseits der Windeinfluß möglichst klein wurde. Mit Hilfe dieser Tonnen wurden 1953/54 in neunzehn Fällen die Strömungsrichtung und die Kenterung<sup>2)</sup> ermittelt.

Da zu erwarten war, daß bei stürmischen Winden aus Nordwest oder Südwest vor Mittel-Sylt die Brandungsströmung die Tideströmung überdeckt, wurden die meisten Beobachtungen bei ruhigen Wetterlagen vorgenommen. Die Ergebnisse in Tabelle 6 zeigen, daß bei ruhigen

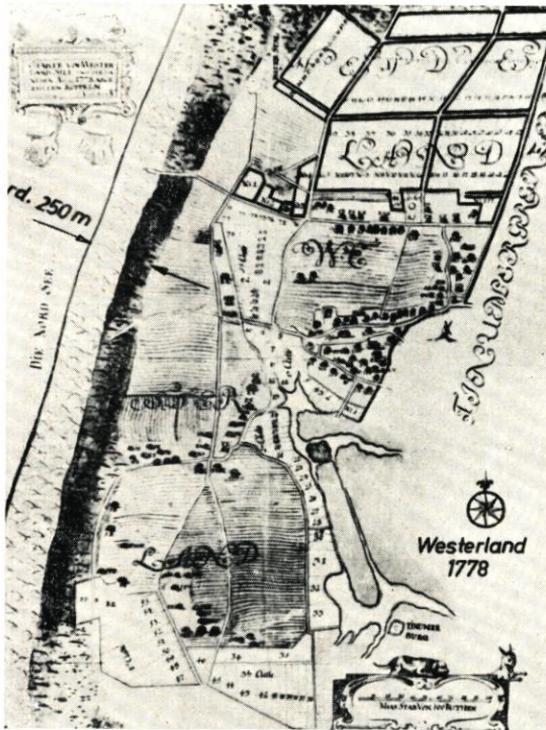


Abb. 32. Karte von Westerland (1778)

Punkte waren über die Sylter West-, Nord- und Südküste verteilt; die Messungen fanden in halbstündigen Abständen statt und dauerten dreizehn Stunden. Gemessen wurde mit wurfgranatenähnlichen Holzschwimmern, deren Laufzeit durch zwei (am Strande abgesteckte) Profile gestoppt wurde. Abbildung 30 enthält die Ergebnisse einer Messung vom 5. 7. 1956, die insofern beachtenswert ist, als hier offenbar eine Wetterlage erfaßt wurde, bei der noch gerade eine Stromkenterung vor Mittel-Sylt stattfindet. Während an den beiden Vortagen Winde um Stärke 3 Bft. aus West bis Südwest auftraten, steigerte sich die Stärke am Meßtag bis auf 5 und 6 Bft. Für die nördliche Hälfte von Sylt ist jedoch trotz des frischen Windes noch eine Kenterung festzustellen. Weiterhin wird deutlich, daß die Strömungen an fast allen Punkten dem Strömungsrythmus des Tiefs folgten.

Unter Verwendung von Raketen mit einer Farbfüllung (Uranin) konnten vor Sylt erst-

<sup>2)</sup> Unter Kenterung wird der vom Strand aus zu beobachtende Wechsel der Strömungsrichtung verstanden.

Wetterlagen der Flutstrom etwa von Süd nach Nord und der Ebbestrom umgekehrt von Nord nach Süd verläuft. Bei Windstärken etwa von 4 Bft. ab aus Nordwest oder Südwest beginnt die Brandungsströmung den Tidestrom zu überdecken, d. h. eine Kenterung entfällt.

Bei ruhigem Wetter trat die Kenterung nach Thw im nördlichen Profil stets eher auf als im südlichen, die Kenterung nach Tnw dagegen im südlichen eher als im nördlichen. Ein „Scheitelpunkt“ der Strömung vor Westerland (vgl. GRIPP, 1944) konnte in keinem Falle nachgewiesen werden.

Zur Gewinnung eines Bildes über die Größenordnung der Strömungen wurden in beiden Profilen je zwei Flügelmessungen bei ruhigem Wetter durchgeführt; die größte Flutstromgeschwindigkeit lag bei etwa 30 cm/s, die größte Ebbestromgeschwindigkeit bei etwa 35 cm/s (Strömungen über die Lotrechte gemittelt).

Um der Forderung nach synoptischen Messungen näher zu kommen, erfolgten vier Messungen an je neun bis zwölf Meßpunkten gleichzeitig. Die

malig die Strömungen bei stürmischen Wetterlagen gemessen werden. Die von der Vorarbeitenstelle Sylt entwickelten Raketen (Abb. 31) tragen einen Natriumkopf, der beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche zerspritzt und die Farblösung freigibt. Vom Land aus wurde dann das seitliche Abwandern des Farbflecks eingemessen. Einige Ergebnisse sind in Tabelle 7 angegeben. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß bei der sturmflutähnlichen Wetterlage am 18. 5. 1955 nur Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 0,85 m/s gemessen wurden, obwohl Brandung und Wind aus Südwesten kamen, d. h. in etwa 45 Grad zur Küste und damit in einer Richtung verliefen, die den größten Brandungsstrom erzeugt.

Außerdem erfolgten bei entsprechenden Wetterlagen Beobachtungen des vor der Küste treibenden Eises. Dabei wurden unter anderem unterschiedliche Strömungsverhältnisse zwischen Nord- und Mittel-Sylt beobachtet: Während sich bei Nord-Sylt in den Bühnenfeldern durch die außen vorbeiziehende, kontinuierliche Tideströmung ein Neerstrom (Walze mit

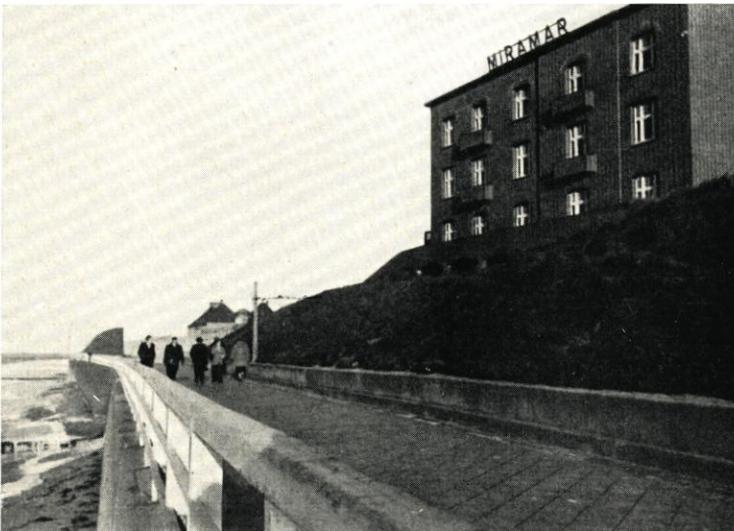


Abb. 33  
Strandmauer Westerland mit „Hotel Miramar“  
Aufn.: LAMPRECHT, Dez. 1956

senkrechter Achse) ausbildete, so daß die Strömung am Strand entgegengesetzt wie draußen verlief, wurde vor Mittel-Sylt in den Bühnenfeldern am Strand die gleiche Strömungsrichtung wie draußen festgestellt. Vor Mittel-Sylt entstand also in jedem Bühnenfeld eine Brandungsströmung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die für den Abbruch der Sylter Westküste entscheidenden Strömungen im etwa 25 km langen Mittelabschnitt in ihrer Entstehung nicht auf die Tide, sondern auf die Brandung zurückgeführt werden müssen. Die Brandung ist für den Küstenabbruch in zweifacher Hinsicht von Bedeutung: Einmal wird durch Wellen und Schwall auf der Schorre und am Strand Material losgelöst und aufgenommen; zum andern transportiert der Brandungsstrom dieses Material mit pulsierenden Bewegungen längs der Küste entsprechend der Stromrichtung nach Norden oder Süden. Die resultierende Geschwindigkeit der Brandungsströmung ist nicht groß; es wird vermutet, daß auch bei Sturmfluten vor Sylt keine Längsströmungen auftreten, die das Maß von 1,50 m/s wesentlich überschreiten.

Erst an den Inselenden gewinnt die Tideströmung an Bedeutung, um in den gewaltigen Tiefs – vermutlich auch bei Sturmfluten – die Brandungsströmung zu überdecken.

## IV. Küstenschutzmaßnahmen

### A. Geschichtliche Entwicklung

In Nordfriesland gehen die ältesten überlieferten Sturmflutkatastrophen in das frühe Mittelalter zurück (MÜLLER-FISCHER, 1938); sie übertrafen in ihren Zerstörungen teilweise die Holland-Sturmflut 1953 noch bei weitem.

Auf Sylt sicherte man sich ursprünglich gegen Sturmfluten, indem man die Siedlungen einige hundert Meter von der Küste entfernt anlegte. So bedeuteten Dünenabbrüche am Weststrand nur eine mittelbare Gefahr. Eine Karte von Westerland aus dem Jahre 1778 zeigt z. B., daß damals alle Häuser mindestens 250 m von den Dünen entfernt waren (Abb. 32). Durch die ständige Zunahme des Badebetriebs auf Sylt dehnte sich die Stadt Westerland jedoch weiter nach Westen aus, so daß heute bereits mehrstöckige massive Gebäude auf der Düne liegen (Abb. 33).

Während der Küstenschutz durch Dünenbepflanzung bis 1865 den Anliegergemeinden allein oblag, begann danach erstmalig der Staat Preußen, mit massiven Bauwerken in das Kräftespiel am Strand einzugreifen, um dem Küstenabbruch wirkungsvoller als bisher zu begegnen. Eine Beschreibung der Küstenschutzentwicklung auf Sylt wurde vom Verfasser an anderer Stelle (LAMPRECHT, 1958) gegeben; hier soll nachstehend nur eine zusammenfassende Darstellung folgen.

Wegen der guten Erfahrungen, die Preußen seit Jahrhunderten im Flußbau mit Buhnen gesammelt hatte (NEGER, 1932), wendete man dieses erprobte Bau-Element auch an der Sylter Küste an, denn auch hier galt es, ein abbrechendes Ufer zu schützen.

Die ältesten auf Sylt eingebauten Buhnen (1872) reichten etwa bis zur MTnw-Linie (heute gültiges MTnw für Westerland: — 1,07 m NN), wiesen einen flachen und breiten Querschnitt auf und wurden meistens aus vier Holzpfehlreihen mit dazwischengepackten Findlingen oder Betonquadern auf Buschunterlage hergestellt (Abb. 3). Da sich der gegenseitige Abstand von rund 500 m als zu groß erwies, errichtete man zwischen je zwei solchen „Hauptwerken“ je zwei leichtere Zwischenwerke. Bald zeigte es sich jedoch, daß wegen Bohrmuschelbefalls, Sandschliffs und vor allem wegen der zu kleinen Pfahlänge die Unterhaltungskosten zu hoch waren, so daß man die Suche nach einem anderen Baustoff aufnahm. Die nach anfänglichen Erfolgen seit 1927 in großer Zahl eingebrachten Buhnen aus Stahlspundwänden (Abb. 1) waren zwar billiger und ließen sich schneller herstellen; sie erwiesen sich jedoch als noch ungeeigneter, da nach einigen Jahren selbst die bis zu 12 mm starken Spundbohlen durch Sandschliff zerstört waren. Seit 1947 ist man zum Bau von Buhnen aus vorgespannten Betonpfählen übergegangen. Inzwischen sind auf der Strandstrecke von Westerland bis nördlich Wenningstedt 35 solche Buhnen hergestellt worden (Abb. 1). Darüber hinaus wurden besonders gefährdete Strandabschnitte mit Ufermauern und Deckwerken versehen.

Die Westerländer Uferschutzmauer geht in ihren Anfängen auf eine 1907 von privater Hand errichtete Schutzmauer vor dem auf der Düne liegenden „Hotel Miramar“ zurück, hat eine Länge von rund 660 m (Abb. 1) und liegt mit ihrer Oberkante auf + 6,15 m NN. Nördlich setzt sie sich in einem seit 1936 hergestellten rund 850 m langen Deckwerk aus Basaltpflaster fort, das eine Neigung von 1 : 4 aufweist (PFEIFFER, 1938). Ein 140 m langer Abschnitt wurde mit Betonplatten abgedeckt. Die nördlichen 200 m sind neuerdings in einer Asphalt-Basalt-Bauweise (Mastix-Eingußdecke) mit sehr rauher Oberfläche hergestellt worden (ZITSCHER, 1955). Die steile Mauer läßt bei Sturmfluten die Wellenenergie schlagartig freiwerden (Abb. 34), dadurch wird der Strand am Fuß der Mauer stark angegriffen und abgetragen; dagegen bewirkt das schräge und rauhe Deckwerk durch seine Bremswirkung eine allmähliche Energie-Abgabe (Abb. 35; Hann. Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, 1953; LAMPRECHT, 1955 b).

Im Nordteil der Insel — am sogenannten Ellenbogen — wurde 1938 ebenfalls ein Basaltdeckwerk errichtet (LÜPKES und SIEMENS, 1940), das seine Entstehung an dieser Stelle jedoch im wesentlichen militärischen Gesichtspunkten verdankte und eine Länge von 2,24 km aufwies (Abb. 1). Infolge des Krieges unterließ der geplante Bau von strömungsabweisenden Buhnen, so daß dieses Deckwerk 1945 während einer Sturmflut beschädigt und seitdem weiter zerstört wurde (LAMPRECHT, 1958 und Abb. 36). Für die erforderliche Instandsetzung und Vervollständigung des vorgesehenen Schutzsystems fehlten damals die Voraussetzungen.

Neben den beschriebenen Baumaßnahmen zum Schutz der Insel wird auch heute noch die jahrhundertalte Methode des Dünenschutzes durch Strandhaferanpflanzungen angewendet. Eine mit Strandhafer oder zusätzlich mit „Buschzäunen“ (in den Sand gestecktes Gestrüpp) befestigte oder aufgehöhte Düne am Strand soll nicht den Sturmfluten trotzen, sondern die Brandung möglichst lange von den eigentlichen Dünen fernhalten. Es handelt sich hierbei also um eine „hinhaltende Verteidigung“.



Abb. 34  
Brecher vor der Strand-  
mauer Westerland  
bei Sturmflut  
Aufn.: LAMPRECHT, 16. 1. 1954



Abb. 35  
Auflaufende Welle wird  
durch rauhe Oberfläche  
stark gebremst (Rauh-  
deckwerk Westerland)  
(aus LAMPRECHT, 1955 b)



Abb. 36  
Zerstörungen am  
„Ellenbogen“-Deckwerk  
infolge Lee-Erosion  
Aufn.: LAMPRECHT, 1955

## B. Beurteilung der Sylter Küstenschutzmaßnahmen

### 1. Ansichten bis 1952

Im Schrifttum über Sylt und insbesondere im Archiv des Marschenbauamts Husum liegt eine größere Reihe von Arbeiten vor, die eine Behandlung der Sylter Küstenschutzmaßnahmen zum Inhalt haben. Im folgenden sollen die zusammengefaßten Ergebnisse genannt und kritisch betrachtet werden.

FÜLSCHER (1905) gelangt zu der Auffassung, daß die auf Sylt errichteten Buhnen bis 1905 keinen erkennbaren Nutzen gezeigt haben; die Ursache sieht er in der mangelhaften Unterhaltung und schlechten Eignung der verwendeten Baustoffe. Er schlägt Betonbuhnen vor, d. h. er ist grundsätzlich vom Nutzen der Buhnen am Sylter Weststrand überzeugt. Sein Hinweis auf die bisherigen Mißerfolge mit Buhnen gründet sich auf eine Auswertung von Lotungen und Strandvermessungen und ist daher als stichhaltig anzusehen. Sein Urteil über die grundsätzliche Wirkung von Buhnen auf Sylt trägt den Charakter einer Vermutung und muß entsprechend gewertet werden.

Die Denkschrift von LEU (1920) befaßt sich in erster Linie mit bautechnischen Fragen; es werden ausführliche Vorschläge zur Herstellung und Einbringung von Betonpfählen für Buhnen gemacht. Auch LEU vertritt die Ansicht, daß eine mangelhafte Wirkung der Sylter Buhnen nur bei schlechtem Bauzustand aufgetreten ist. Als Beweis für die günstige Wirkung der ältesten Buhnen sieht er die Tatsache an, daß auch noch weiterhin Buhnen gebaut wurden. Die zuletzt genannte Begründung hat keine Beweiskraft. Über die grundsätzliche Ansicht von LEU gilt auch das für FÜLSCHER Gesagte. Die praktischen Vorschläge für die Buhnenbaustelle zeugen von Sachkenntnis und Ideenreichtum, sind für funktionelle Fragen jedoch ohne Bedeutung.

Nach Beobachtungen von PFEIFFER (1920) zeigt sich die günstige Wirkung der Sylter Buhnen in der Ausbildung eines gleichmäßigen Strandes. PFEIFFER versucht, die Zusammenhänge zwischen Buhnenbau und Küstenrückgang graphisch darzustellen. Er faßt den mittleren Küstenrückgang größerer, mit Buhnen versehener Strecken zusammen und stellt ihm den Rückgang an ungeschützten Abschnitten gegenüber. Aus den Ergebnissen leitet er die günstige Wirkung der Buhnen ab. Diese Methode setzt einen an der gesamten Sylter Westküste etwa gleich großen Küstenrückgang voraus. Da die mittleren jährlichen Abbrüche an der Westküste zwischen weniger als 1 m und mehr als 4 m schwanken (Abb. 9), trifft diese Annahme nicht zu.

Die Denkschrift von SCHADE (1936) geht von einer ausführlichen Tabelle über den Küstenrückgang in den einzelnen Strandprofilen aus, wobei der Beobachtungszeitraum von 1883 bis 1935 in drei Abschnitte eingeteilt wird. SCHADE folgert aus einem Vergleich der Küstenrückgangswerte in Zeiträumen mit und ohne Buhnen, daß die alten Buhnen den Küstenrückgang weder verhindert noch verzögert haben. Auf Grund von Beobachtungen „finge“ eine Buhne an der Sylter Westküste um so mehr Sand, als sie den Querschnitt des Küstenlängsstromes einengt. Lange, undurchlässige Buhnen seien erforderlich. SCHADE mißt den Wellenkräften mehr Bedeutung zu als den Tidekräften. Die durch Messungen bestätigten Beobachtungen können als gesichert angesehen werden, die übrigen beruhen vorwiegend auf subjektiven Eindrücken. SCHADES Beurteilung der Bedeutung der Wellenkräfte hat sich als richtig erwiesen.

FISCHER (1938) geht bei seiner Untersuchung von einer Gegenüberstellung der Küstenveränderung vor und nach dem Beginn von Baumaßnahmen auf Sylt aus. Diese Methode ist um so zuverlässiger, als nur nachprüfbare Unterlagen benutzt werden und Beobachtungen eine Nebenrolle spielen. FISCHER vergleicht die Karten von 1793 (Karte der Königlich Dänischen Gesellschaft der Wissenschaften, Kopenhagen), von 1878 (Meßtischblätter) und von 1929 (Meßtischblätter) und folgert, daß im Bereich der Buhnenbauten an der Westküste (von Rantum im Süden bis um den Ellenbogen im Norden herum) der mittlere jährliche Abbruch vor Baubeginn größer war als nachher. Als Ursache gibt FISCHER die Buhnenwirkung an. Dieser Folgerung kann nicht zugestimmt werden, da sich nachweisen läßt, daß der Küstenabbruch auf Sylt vor 1878 infolge einer natürlichen Entwicklung größer war, als nach 1878 (LAMPRECHT, 1957).

Die Arbeit von M. PETERSEN (1938) vermittelt einen Einblick in die Planung, technische Ausführung und Wirkungsweise von Dünenschutzmaßnahmen durch Setzen von Halm (Strandhafer) und Buschzäunen. PETERSEN sieht den Sinn dieser beweglichen Verteidigungsmethode für die Westküste darin, daß bei normalen Wetterbedingungen Sandablagerungen am seeseitigen Dünenfuß herbeigeführt werden, damit bei Sturmfluten den Wellen Material „angeboten“ werden kann und die eigentliche Düne möglichst lange dem unmittelbaren Angriff der Brandung entzogen wird.

Die Denkschrift von HUNDT (1939) (vgl. den Aufsatz von HUNDT in diesem Heft) enthält nahezu ausschließlich Untersuchungsergebnisse über den Nordteil von Sylt (Ellenbogen-Gebiet) und geht nur am Rande auf die Frage der Buhnenwirkung im gesamten Inselgebiet ein. Eine Beeinflussung des Kü-

sterrückgangs durch Buhnen ist nach Ansicht von HUNDT nur dort zu erwarten, wo starke Uferlängsströmungen vorhanden sind. Diese Meinung gründet sich nur auf Beobachtungen; sie ist jedoch richtig, wie noch gezeigt wird.

Die Arbeit von LAMBERT (1939) bringt eine Zusammenfassung der bis 1939 auf Sylt eingebauten Buhnen und geht vorwiegend auf Probleme der Baupraxis ein; sie ist insofern bemerkenswert, als festgestellt wird, daß man auf Sylt bisher sein Augenmerk nur auf die Entwicklung von Buhnen legte, die bei Sturmflut standsicher sind, und nicht die Frage nach der Wirkung einer Buhne an sich stellte. Es wird außerdem die Schwierigkeit erwähnt, die Wirkung natürlicher und künstlicher Einflüsse zu trennen.

In dem Aufsatz über Erfahrungen mit Stahlbuhnen auf Sylt berichten LÜPKES und SIEMENS (1941) ausführlich über die bisher aufgetretenen Schäden und gelangen zu dem Schluß, daß diese Schäden durch Verwendung größerer Wandstärken und flacherer Spundbohlenprofile wesentlich vermindert werden können. Die Bauverwaltung sei auf Grund von Beobachtungen und der Erfahrung eindeutig zu dem Urteil gelangt, daß sich der Wert der Buhnen in einer erheblichen Verlangsamung des Küstenabbruchs gezeigt hätte. Ein zahlenmäßiger Nachweis könne noch nicht gebracht werden. Als Beweis für die positive Buhnenwirkung werden zwei Strand-Photos verwendet, die jedoch nicht als Beweismittel bewertet werden dürfen, da heute auf Grund systematischer Vermessungen feststeht, daß sich günstige und ungünstige Strandlagen sowohl an mit Buhnen geschützten als auch an ungeschützten Strandstrecken ausbilden (LAMPRECHT, 1955 b). Inzwischen hat die Zeit gelehrt, daß jede Art von Stahlbuhnen an der Westküste von Sylt ungeeignet ist, denn auch den Verbesserungsvorschlägen blieb der gewünschte Erfolg versagt.

RUHNKE (1950) beschränkt sich in seiner kritischen Betrachtung über Küstenschutzmaßnahmen auf Sylt auf massive Bauwerke, ohne systematische Beobachtungen angestellt zu haben. In einer Wirtschaftlichkeitsberechnung wird festgestellt, daß Betonbuhnen auf die Dauer die geringsten und Eisenbuhnen die höchsten Kosten erfordern. Er gelangt zu der Auffassung, daß Buhnen bei sorgfältiger Unterhaltung den Rückgang der Sylter Westküste erheblich verlangsamt haben, und schlägt vor, in Zukunft breite, durchlässige und flach geböschte Buhnen zu bauen. Auch RUHNKE beurteilt die Buhnenwirkung nach subjektiven Eindrücken; die Wirtschaftlichkeitsberechnung und der Hinweis auf flache Buhnen verdienen Beachtung.

In der Arbeit von LUX (1954) wird eine Untersuchung über die Möglichkeiten biologischer Dünenbau- und Dünenbefestigungsmaßnahmen auf Sylt beschrieben. LUX geht von Möglichkeiten und Grenzen einer Verbesserung der Lebensbedingungen des auf Sylt zum Anpflanzen benutzten „Halms“ (Strandhafer; *Ammophila arenaria*) aus und macht Vorschläge zur Verwendung des Silbergrases (*Corynephorus canescens*). Als Voraussetzung für einen wirkungsvollen biologischen Dünenschutz muß jedoch in jedem Falle eine Sandanlieferung vorhanden sein. Die Bedeutung der von LUX durchgeführten Untersuchungen liegt außer in der Behandlung des Strandhafer-Problems in dem Hinweis, daß die alleinige oder zusätzliche Verwendung anderer Pflanzen zu besseren Erfolgen im Dünenschutz führen kann.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Sylter Küstenschutzprobleme in einer großen Reihe von Arbeiten behandelt worden sind: Strandmauern und Deckwerke werden als zweckmäßig bezeichnet, da nach Anlage solcher Schutzwerke der Dünenabbruch aufhörte. Eine leichtere Art des Dünen-schutzes bildet das Setzen von Strandhafer und Buschzäunen; diese Methode ist wegen ihrer Wirtschaftlichkeit für einen „beweglichen Küstenschutz“ von Bedeutung. Die Behandlung des Buhnenproblems erstreckt sich vorwiegend auf bautechnische Fragen; die funktionelle Wirkung wird im allgemeinen nur auf Grund zufälliger Beobachtungen beurteilt. In einigen Fällen kommen die Verfasser zu dem Schluß, daß eine Beeinflussung des Küsterrückgangs durch Buhnen bisher nicht erkennbar ist; in anderen Fällen wird das Gegenteil gefolgert. Ein Beweis der positiven Buhnenwirkung wird in keiner Arbeit geführt.

## 2. Bewertung der bisherigen Küstenschutzbauten auf Grund der Untersuchungen seit 1952

### a) Buhnen

Eine Beweisführung über den Nutzen der Buhnen auf dem Wege über Ursache und Wirkung ist heutzutage noch nicht möglich, da eine zahlenmäßige Trennung der künstlichen und

natürlichen Einflüsse im Strandgebiet nicht gelingt. Während eine Beurteilung auf Grund mehrfacher, zufälliger Beobachtungen des Strandbildes erhebliche Unsicherheiten in sich birgt, kann selbst eine tägliche Vermessung des Oberwasserstrandes bis zur MTnw-Linie zu Fehlschlüssen führen, wie sich auf Grund der Sylter Untersuchungen ergab (LAMPRECHT, 1957).

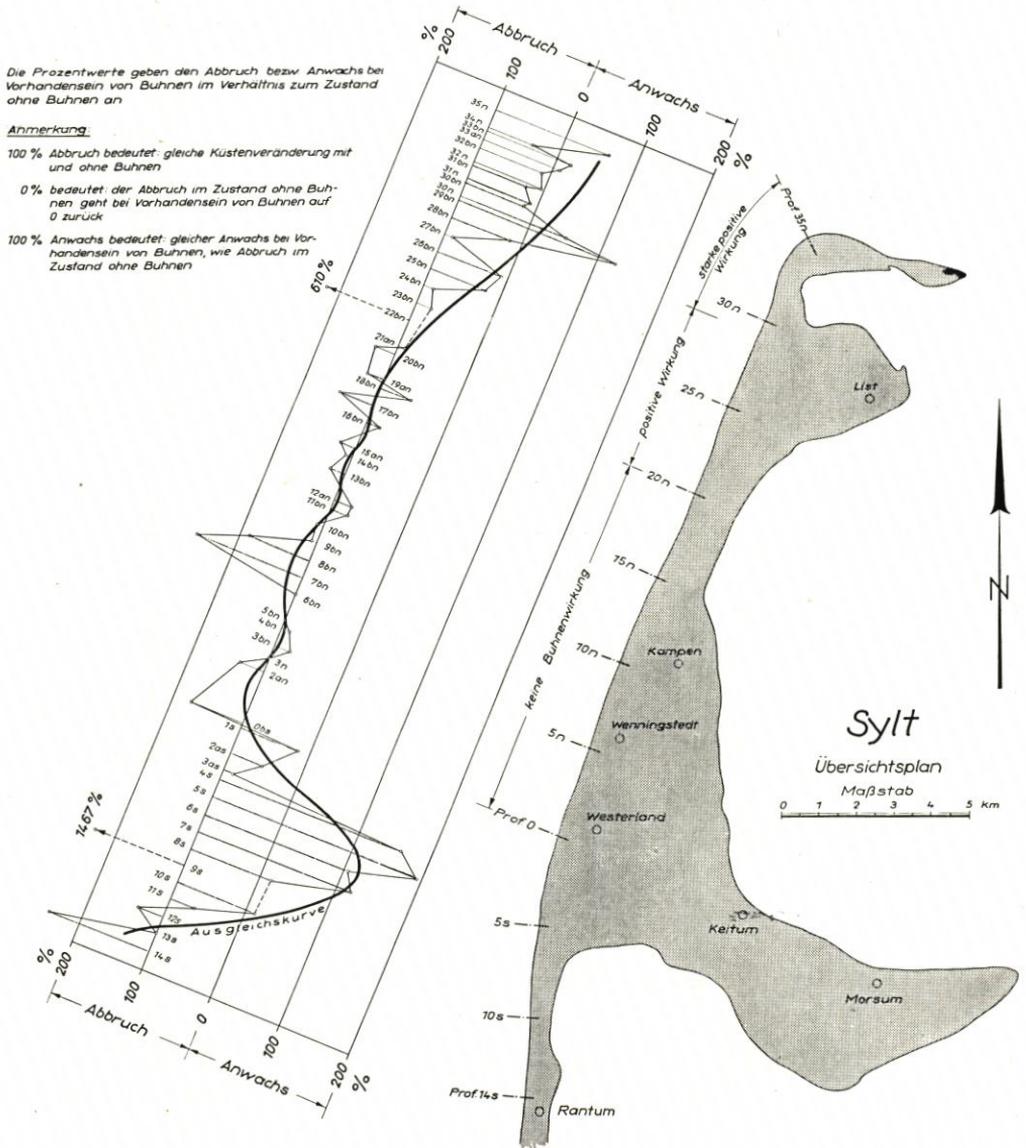


Abb. 37. Graphische Darstellung einer Korrelation zwischen dem Vorhandensein oder Fehlen von Buhnen und den zeitlich entsprechenden Küstenveränderungen von 1888 bis 1954 (aus LAMPRECHT, 1957)

Daher können vorläufig nur Untersuchungsmethoden erfolgreich sein, die systematische Beobachtungen, möglichst langjährige und umfangreiche Meßreihen, statistische Auswertungen und physikalische Deutungen umfassen.

Wegen der entscheidenden Bedeutung einer möglichst sicheren Beurteilung der Wirkung von Buhnen wurde daher eine Korrelation durchgeführt, in der für die letzten achtzig Jahre die mittleren jährlichen Küstenveränderungen in Zeiträumen ohne Buhnen denen in Zeiträumen mit Buhnen gegenübergestellt wurden. Dieses Verfahren erschien sinnvoll, da sich eine positive Buhnenwirkung in einer Verlangsamung des Küstenabbruchs äußern müßte und durch die zeitlich aufeinander folgende Anwendung mehrerer verschiedener Buhnenbauweisen jeder Küstenpunkt, an dem mehr als eine Buhne eingebaut wurde (man errichtete neue Buhnen möglichst an der gleichen Stelle wie die alten), Zeitabschnitte aufweist, in denen Buhnen vorhanden waren und solche, in denen sie fehlten; zudem verlief der jährliche Rückgang der Sylter Westküste in dem genannten Zeitraum insgesamt etwa gleichmäßig.

Aus diesem Grunde wurde für jedes Profil ein Zeitplan mit Bau- und Zerstörungsjahr der Buhnen und mit den entsprechenden Küstenveränderungen aufgestellt (LAMPRECHT, 1956 a). Die Ausgleichskurve der Einzelwerte in Abbildung 37 gibt für jeden Küstenpunkt an, in welchem Maße eine Verringerung des Küstenabbruchs bei Vorhandensein von Buhnen eingetreten ist. Danach ist nur im Küstenabschnitt nördlich von Klappholtal (Profil 20 n) der Rückgang in Zeiträumen mit Buhnen vermindert und zum Teil verhindert worden; im 10 km langen Abschnitt von Westerland bis Klappholtal trat keine Verminderung ein, d. h. ein Nutzen der Buhnen ist hier nicht zu erkennen. Der Verlauf der Kurve südlich von Westerland darf nicht gewertet werden, da hier in Zeiträumen mit Buhnen die Küstenlinie zwar langsamer zurückwich bzw. sogar in Richtung See vordrang, diese Tatsache jedoch auf eine hier 1870 vorhandene Einbuchtung zurückgeführt werden muß, die sich infolge der Ausgleichstendenz an der Sylter Küste allmählich auffüllte.

Der mittlere Teil von Sylt (etwa von Klappholtal bis Rantum) steht vorwiegend unter Brandungseinfluß; Tideströmungen haben nur untergeordnete Bedeutung. Hier konnte der Uferrückgang durch Buhnen der bisher angewendeten Bauweise nicht erkennbar vermindert werden.

Der Nordteil von Sylt gehört hydrographisch zum Einflußgebiet des Lister Tiefs. Die Wirksamkeit der Buhnen hat hier nach Norden in etwa dem gleichen Maße zugenommen wie der Einfluß der Strömungen des Lister Tiefs, d. h. es ist mit Hilfe der Buhnen gelungen, die Tideströmungen vom Ufer abzudrängen und damit den Abbruch zu verzögern. Für den Südteil von Sylt kann mit ähnlichen Verhältnissen gerechnet werden.

#### b) Deckwerke und Strandmauern

Ein Dünendeckwerk oder eine Strandmauer schützen nur die Stranddüne, d. h. der Schutz erstreckt sich lediglich auf die landseitige Begrenzung des im Abbruch liegenden Gebietes oberhalb der Uferlinie. Da nach wie vor ein seitlicher Sandabtransport am Strand stattfindet, wird sich der Vorstrand bei einer negativen Sandbilanz in zunehmendem Maße aufsteilen und vertiefen, bis schließlich die Standsicherheit der Schutzbauten nicht mehr vorhanden ist, bzw. die Kosten für ihre Unterhaltung zu hoch werden.

Die Schäden an den Fuß-Sicherungen der Strandmauern und Deckwerke entstanden meist durch Sandschliff (Zerstörung der seeseitigen Stahlspundwand) oder freistehende Spundwände infolge Sandabtransports. Eine freistehende Spundwand (vor Sylt bis etwa 2 m; vgl. LAMPRECHT, 1954 b) ist deswegen besonders gefährlich, weil sie zu weiterer Strandvertiefung Anlaß gibt (VOLLBRECHT, 1955) und weil die Stoßbelastung durch Wellen den gepflasterten Verband des Deckwerks lockert, so daß Einbrüche entstehen können (Abb. 36 und 38).

Im Vergleich zu den Schäden am Bauwerksfuß erreichten die an der Wellen-Leseite der Strandmauern und Deckwerke auftretenden Abbrüche ein bedeutend größeres Ausmaß.



Abb. 38  
Zerstörung der Strand-  
mauer Westerland 1921  
(aus „Akten“)



Abb. 39  
Dünenabbruch am Lee-Ende  
des Deckwerks Westerland  
(im Mittelgrund: abgestürzte  
Seenot-Stelle)  
Aufn.: LAMPRECHT, Jan. 1954



Abb. 40  
Rauhdeckwerk Westerland  
in Asphalt-  
Basaltbauweise (gleicher  
Aufnahme-Standpunkt  
wie Abb. 39)  
Aufn.: LAMPRECHT, Aug. 1956

Die Abbruchkante bildete sich in diesen Fällen der Lee-Erosion im Grundriß stets stromlinienförmig aus (Abb. 39 und 40 sowie LAMPRECHT, 1958); die Erscheinung kann an allen Deckwerken und Strandmauern beobachtet werden (Borkum, Norderney, Goeree-Overflakkee u. a.). Eine erschöpfende Analyse der hier wirkenden Kräfte ist zur Zeit noch nicht möglich; es gilt jedoch als sicher, daß die Lee-Erosion hinter Dünendeckwerken sowohl auf die durch das Deckwerk verhinderte Sandzufuhr als auch auf die „Kolk“-Wirkung zurückgeführt werden muß, die durch die vor dem Deckwerk oder der Mauer angestauten und seitlich abfließenden Wassermassen entsteht (vgl. auch HENSEN, 1957).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß ein möglichst flaches und möglichst rauhes Deckwerk mit einer möglichst tief hinabreichenden Fußsicherung die günstigste Wirkung hat. Die Erosion in Lee von Deckwerken und Mauern wird sich nur vermindern lassen, wenn es gelingt, den Übergang vom starren Bauwerk zum natürlichen Strand



Abb. 41  
Dünendurchbruch auf  
etwa 50 m Breite  
südlich von Hörnum  
Aufn.: LAMPRECHT, Jan. 1954

den angreifenden Kräften entsprechend auszubilden. Die zu Lasten der verhinderten Sandzufuhr gehende Komponente dieser Lee-Erosion kann allerdings durch Bauwerke nicht verhindert, sondern nur örtlich verschoben werden.

Als Versuche zur Verminderung der Lee-Erosion durch Baumaßnahmen sind das Übergangsbauwerk in Norderney (LAMPRECHT, 1956 a) und das Brems- und Leitwerk vor Westerland (LAMPRECHT, 1958) aufzufassen, die beide aus doppelten Holzpfahlreihen mit dazwischengepackten Faschinen und Betonbrocken hergestellt sind; während die Linienführung auf Norderney in Verlängerung des Deckwerksfußes verläuft (wichtigste Funktion: Wellenbrecher und Leitwerk), weist die Westerländer Konstruktion zusätzlich einen quer zum Deckwerk verlaufenden Riegel auf, der die vom Deckwerksende herabströmenden Wassermassen bremsen (Bremswerk) und dadurch die Kolkwirkung vermindern soll. Die bisherige Wirkung auf Norderney und auf Sylt ist positiv; ein endgültiges Urteil über die Bewährung kann jedoch noch nicht gefällt werden.

#### c) Halmpflanzungen

Bei der bereits erwähnten Methode der Halmpflanzung und des Setzens von Buschzäunen steht der Aufwand in einem günstigen Verhältnis zum Erfolg; aus diesem Grunde wird dieses bewährte Verfahren auch heute noch in starkem Maße angewendet.

Auf Sylt gelang es mehrfach, bei günstigen Sandflugbedingungen nach starken Dünenabbrüchen durch Halmpflanzung eine „Vordüne“ (flach geneigte Sandansammlung am see-seitigen Dünenfuß) aufzuziehen (Abb. 7 und 8), so daß das Strandprofil den bei Sturmfluten heranbrechenden Wellen möglichst wenig Widerstand entgegenseetzte, d. h. lange standhielt.

Ein während der Sturmflut am 16. 1. 1854 südlich von Hörnum aufgetretener Dünen-durchbruch von rund 50 m Breite (Abb. 41) konnte innerhalb eines Sommers bereits wieder mit einem etwa 2 m hohen Sandwall abgeriegelt werden, der lediglich durch die Verwendung von Halm und Buschzäunen entstand.

Bei der Bepflanzung einer Stranddüne ist zu prüfen, ob die Sandablagerung am Luv- oder am Lee-Hang erwünscht ist. Wenn bei einer Sandküste ein langsamer, stetiger Rückgang in Kauf genommen werden kann, ist ein Sandfang am Lee-Hang zweckmäßig (Sylter Methode bis etwa 1850; heute z. T. an der Ostseeküste üblich), damit sich hinter der alten, durch Sturmfluten allmählich zerstörten Düne eine neue bilden kann. Bei dieser Methode bleibt die Strandneigung etwa konstant, so daß auch die Strandbreite nicht abnimmt. Ist man jedoch gezwungen, den Dünenrückgang möglichst stark zu verzögern, so läßt sich außer einer Festlegung der Düne durch Bewuchs eine Bepflanzung des Luv-Hanges nicht umgehen. Auf Sylt ist normalerweise die gesamte Düne dicht bewachsen; nach jeder Sturmflut wird jedoch ein erneutes Bepflanzen des Dünenfußes am Luv-Hang notwendig.

### C. Gedanken über zukünftige Maßnahmen

In den letzten hundert Jahren hat durch den aufkommenden Seebäderverkehr besonders auf den Inseln die Besiedlung ständig zugenommen. Damit wuchsen auch die Sicherheitsforderungen.

Tabelle 8  
Kosten (abgerundet) für Küstenschutzwerke und -untersuchungen auf Sylt seit 1870  
(ohne Unterhaltungskosten)

Baujahr	Baukosten in Mio Goldmark, RM, DM						Untersuchungen			
	Buhnen	Deckwerke u. Strandmauer	Dämme und Deiche	insgesamt (2+3+4)	angenommen. Weizenpreis in jeweiliger Mark/Ztr.	Mio Ztr. Weizen (Gegenwert v. Sp. 5)	heutiger Wert d. Baukosten in Mio DM	in Mio RM, DM	heutiger Wert in Mio DM	
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1878—99	3,0			3,0	10,—	0,300	7,500			
1907—23	0,1	2,0		2,1	12,—	0,175	4,375			
1924—27			14,2	14,2	15,—	0,947	23,675			
1928—36	1,5			1,5	15,—	0,100	2,500			
1937—39	2,5	7,5	6,2	16,2	12,—	1,350	33,750	0,4	0,833	
1940—46		0,5		0,5	20,—	0,025	0,625			
1947—51	1,33		0,83	2,16	25,—	0,0864	2,160			
1952—55	1,4	1,0		2,4	25,—	0,096	2,400	0,3	0,300	
				<u>42,06</u>			<u>76,985</u>	<u>0,7</u>	<u>1,33</u>	
1878—1955	für Halmpflanzungen und Buschzäune*)							20,000		

\*) Nach Schätzung des Landesamts für Wasserwirtschaft, Kiel

Eine Übersicht über die seit 1870 für den Sylter Küstenschutz verausgabten Mittel wird in Tabelle 8 und Abbildung 42 gegeben. Sowohl die tatsächlichen Kosten in der jeweils gültigen Währung als auch der heutige Wert der Baukosten sind ermittelt worden. Zu dem Wert der Baukosten von rund 77 Mio. DM kommen etwa 20 Mio. DM für Halmpflanzungen und Buschzäune hinzu.

Da das Beispiel Sylt für viele spricht, ist es angesichts der ständig steiler ansteigenden Kosten-Kurve nur verständlich, daß die Forderungen nach umfassenden und systematischen

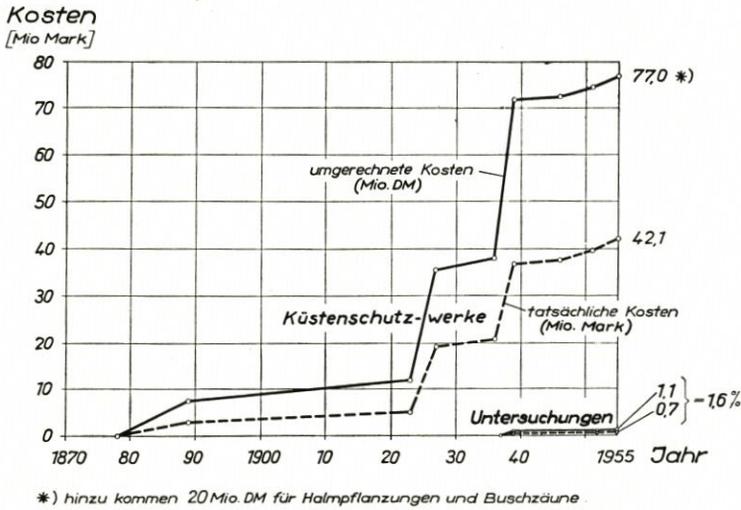


Abb. 42. Kosten für Küstenschutzwerke und -untersuchungen auf Sylt (außer den in der jeweils gültigen Währung aufgetretenen Kosten sind die auf DM umgerechneten Kosten angegeben)

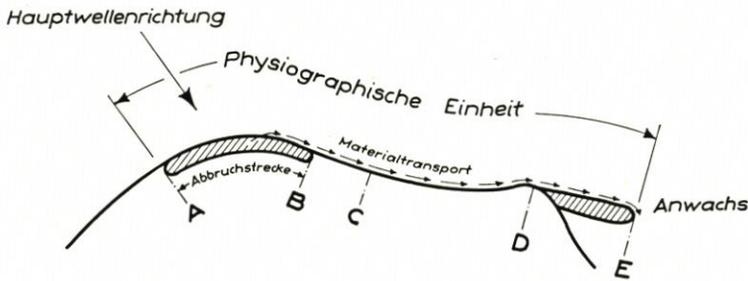


Abb. 43. Schematisches Beispiel einer Physiographischen Einheit

Voruntersuchungen immer nachdrücklicher erhoben wurden. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Untersuchungen des BEACH EROSION BOARD in Amerika hingewiesen, die – durch den letzten Krieg veranlaßt – mit einem für unsere Begriffe ungeheuren Aufwand betrieben wurden. Aber auch die Bemühungen der letzten zwei bis drei Jahrzehnte in Deutschland, Frankreich, Holland, England und Italien haben zum Teil beachtliche Erfolge gezeitigt, so daß die praktische Bedeutung von hydrologischen Forschungsarbeiten an den Seeküsten heutzutage allgemein anerkannt wird (PETERSEN, 1952; KIRSCHMER, 1952; HENSEN, 1954; GAYE, 1955; GRIESSEIER-VOLLBRECHT, 1955; LORENZEN, 1955 u. a.).

Der Wert von Voruntersuchungen tritt besonders deutlich in Erscheinung, wenn man an die dafür verhältnismäßig geringen Kosten denkt (vgl. Abb. 42) und sich ferner die zahlreichen Fälle vor Augen führt, wo durch Voruntersuchungen erhebliche Mittel gespart werden konnten, oder jene Fälle, bei denen infolge fehlender oder unzureichender Entwurfsgrundlagen Millionenbeträge nutzlos verbaut wurden (vgl. auch GAYE, 1955). Von einem Verschulden der verantwortlichen Stellen kann hier jedoch nicht die Rede sein, da die Bedeutung von Forschungsarbeiten erst nach und nach erkannt wurde und die erforderlichen Untersuchungsmethoden und -geräte erst entwickelt werden mußten.

Die im Dienste des Küstenschutzes durchgeführten Untersuchungen müssen auf eine möglichst umfassende Kenntnis des Kräftespiels im Vorstrandgebiet (Unterwasserstrand) und am Strand hinzielen. Die Folgen eines künstlichen Eingriffs in dieses Kräftespiel werden sich um so sicherer voraussagen lassen, je besser die natürlichen Verhältnisse bekannt sind.

Als Hilfsmittel für die Bearbeitung von Küstenschutzproblemen hat sich der Begriff der „Physiographischen Einheit“ eingebürgert (vgl. auch WYRTKI, 1953); darunter soll im folgenden eine Küstenstrecke verstanden werden, an der die Materialbilanz ausgeglichen ist; d. h. sie umfaßt Abbruchstrecken und solche Strecken, an denen sämtliches Abbruchmaterial wieder anlandet. Sind die Grenzen einer Physiographischen Einheit bekannt, so lassen sich die Folgen von künstlichen Eingriffen unschwer übersehen.

Im Beispiel der Abbildung 43 möge die Strecke A—B einer sandigen Dünen-Küste im Abbruch liegen und das Abbruchmaterial zur Verlängerung der Nehrung D—E verbraucht werden. Die Tideströmung soll vernachlässigbar klein und die Hauptwellenrichtung durch den Pfeil gekennzeichnet sein. Die resultierende Materialwanderung verläuft in der Weise, daß durch direkte und indirekte (z. B. Brandungsströmung) Wellenkräfte im Bereich A—B Material aufgenommen und am Strand entlang verfrachtet wird. Im Bereich B—D möge die ans Ufer gelangende Wellenenergie kleiner als im Bereich A—B (Konzentration der Wellenorthogonalen) sein, so daß diese Energie zum Weitertransport des aus A—B gelieferten Materials verbraucht wird. Da die Küste ursprünglich bei D scharf zurücksprang, setzte hier infolge starker Querschnittsverbreiterung und damit Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit eine Nehrungsbildung ein; hinter E werden keine Wellenkräfte zur Erzeugung eines neuen Strandversatzes mehr frei, so daß der Materialtransport hier endet.

Zur Verhinderung eines Küstenabbruchs im Abschnitt A—B kommen für die in Abbildung 43 dargestellten Verhältnisse vier grundsätzliche Methoden in Frage:

1. Vernichtung der Wellenenergie bereits seewärts des am Ufer liegenden Erosions-(Abrasions-)streifens,
2. Verhinderung einer Erosion durch Befestigung des Erosionsstreifens,
3. Verhinderung eines Materialabtransports durch Festhalten des Sandes,
4. künstliche Sandzufuhr.

An Hand einiger Beispiele soll im folgenden die Wirkung von Eingriffen durch Bauwerke in dieses Kräftespiel besprochen werden.

Zu 1.: Eine Vernichtung der Wellenenergie im tieferen Wasser vor der Strecke A—B (z. B. durch einen Wellenbrecher) würde am Strand und am Vorstrand (Unterwasserstrand) den Abbruch aufhalten oder sogar in einen Anwachs verwandeln (Abb. 44). Dadurch würde jedoch eine Materiallieferung in den Abschnitt B—D unterbunden, so daß die hier ans Ufer gelangende Wellenenergie nun nicht mehr für den Materialtransport verbraucht wird, sondern als Erosionskraft in Erscheinung tritt.

Die Erosion wird im Abschnitt B—C am stärksten sein (jedoch schwächer als vorher in A—B) und bis zu derjenigen Stelle abnehmen, an welcher der Materialstrom gerade so groß ist, daß sich wieder sämtliche freiwerdende Wellenenergie in Transportkräfte umsetzt. Von dieser Stelle ab hört die Erosion auf; liegt die Stelle vor (luvseitig) dem Punkt E, so verlängert sich die Nehrung weiterhin.

Zu 2.: Die Erosion und die Sandwanderung in der Strecke A—B sind eine Funktion der in diesem Abschnitt freiwerdenden Wellenenergie, d. h. sie gehen im wesentlichen auf die gleiche Ursache zurück. Aus diesem Grunde wird jeder Eingriff, der einem der beiden Faktoren gelten soll, im allgemeinen auch den anderen beeinflussen. Eine Befestigung und künstliche Aufrauhung des Erosionsstreifens wird sowohl eine Verzehrerung der Wellenenergie und dadurch eine Verminderung der Erosion als auch eine Verringerung der Sandwanderung bewirken. Eine Befestigung des Vorstrandes (z. B. mit Senkfashinen, Steinpackungen oder großen Asphaltmatten) im Gebiet A—B

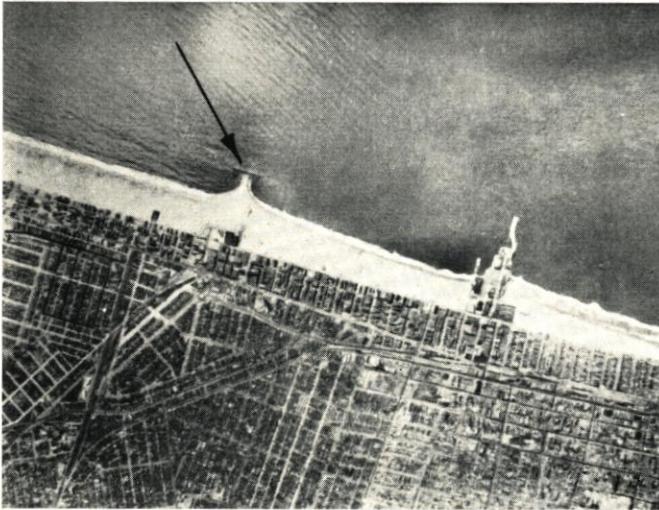


Abb. 44  
Starke Sandablagerung  
hinter (leewärts) einem  
Wellenbrecher in  
Venice-California  
(aus BEACH EROSION  
BOARD, 1954)

würde die gleiche Wirkung wie ein Wellenbrecher zeigen: Im Abschnitt A—B Verhinderung weiterer Erosion, im Abschnitt B—D jedoch Abbrüche (schwächer als vorher in A—B). Wenn nur die Dünen durch ein Deckwerk geschützt werden, hält die Erosion am Strand und Vorstrand (Unterwasserstrand) weiter an, d. h. die Neigung des gesamten Strandes wird steiler. Beim Bau eines glatten Deckwerks (z. B. Beton) wird durch seine Leitwirkung der Uferlängsstrom in Strandnähe verstärkt, so daß die Erosion am Lee-Ende (Strecke B—C) größer ist als vorher im Abschnitt A—B. Bemerkenswert ist, daß bei Sturmflut die Küstenabbrüche unmittelbar hinter dem Lee-Ende von Deckwerken und Uferschutzmauern besonders stark sind und z. B. die Erosion in Lee von Bühnen erheblich übertreffen.

Im Abschnitt A—B wird also durch ein Deckwerk der Dünenrückgang verhindert; diese Wirkung ist jedoch nur so lange vorhanden, bis sich der Strand so vertieft hat, daß sich das Deckwerk nicht mehr halten läßt.

Die Errichtung von Bühnen im Abschnitt A—B ist eine Maßnahme zum Schutz des Strandes und Vorstrandes, die bei den hier geschilderten Verhältnissen in der Praxis mehrfach ergriffen wurde. Man rechnete in solchen Fällen damit, daß die transportierenden und erodierenden Längsströmungen durch Bühnen von der Küste abgedrängt würden. Bisher ist jedoch kein Fall bekannt geworden, in dem ein in erster Linie durch Wellenwirkung (einschließlich Brandungsströmung) verursachter Küstenabbruch durch Bühnen entscheidend beeinflusst wurde (vgl. auch MAGENS-WYRTKI-RODEN, 1954; KRAMER-HOMEIER, 1955; LORENZEN, 1955).

Eine Begründung für diesen Sachverhalt kann zur Zeit nur auf dem Wege einer physikalischen Deutung gegeben werden (vgl. nächster Abschnitt), da eine vollständige meßtechnische Erfassung der Brandungsvorgänge in den Bühnenfeldern bis heute noch nicht gelungen ist.

Zu 3.: Viele im Dienste des Küstenschutzes angestellte Überlegungen gehen davon aus, daß man den aus einer Abbruchstrecke vorhandenen Sand durch geeignete Maßnahmen festhalten müsse, um einen Küstenrückgang zu verhindern.

Das würde allerdings im vorliegenden Beispiel zur Folge haben, daß die Sandanlieferung in den Abschnitt B—E vermindert wird oder unterbleibt und sich nunmehr hier Abbrüche einstellen.

Bei der Suche nach baupraktischen Möglichkeiten zum Sandfang wird gelegentlich das Beispiel einer Wand oder eines Zaunes angeführt, wie man sie mit Erfolg zum Schneefang oder zum

Sandfang in den Dünen benutzt und daraus gefolgert, daß eine große Buhne am Lee-Ende der Abbruchstrecke (hier bei Punkt B) das erodierte Material wieder fangen müsse.

Bei einem Schnee- oder Buschzaun lagert sich das Material aber hinter dem Zaun (d. h. in Lee) ab, während bei einer Buhne an einer Brandungsküste die Ablagerung vor derselben (d. h. in Luv) stattfindet und hinter ihr erodiert wird; die Bewegungsvorgänge verlaufen also nicht gleichartig.

Das gilt auch für ein Buhnensystem an einer sandigen Küste. Die Wirkungsweise einer Flußbuhne (Ablagerung in Lee) darf nicht mit der einer Seebuhne an einer Brandungsküste (Ablagerung in Luv und Erosion in Lee) gleichgesetzt werden.

Bei der Beurteilung der Bewegungsvorgänge in einem Buhnensystem muß von folgenden Überlegungen ausgegangen werden:

Es ist bekannt (BEACH EROSION BOARD, 1954; GRIESSEIER-VOLLBRECHT, 1954; MAGENS-WYRTKI-RODEN, 1954; VOLLBRECHT, 1954), daß sich die Oberwasser- und Unterwasserstrandneigung an jeder unbefestigten Küstenstrecke so einstellt, daß sie sich mit den angreifenden Wellen- und Strömungskräften im „Gleichgewicht“ befindet. Da die Angriffskräfte wetterbedingt sind, d. h. stark schwanken können, muß sich der Strand von Fall zu Fall den neuen Bedingungen anpassen.

Befestigt man nun einen Abschnitt einer Brandungsküste mit einem Buhnensystem, so verändert man den ursprünglichen Zustand in der Weise, daß sich innerhalb der Bühnenfelder eine im Mittel schwächere Neigung des Strandes dadurch ausbilden kann, daß sich nunmehr ein Teil des ursprünglich küstenparallel abwandernden Sandes vor den Bühnen (in Luv) abgelagert. In Lee der Buhne wird jedoch erodiert. Die sandfangende Wirkung des Buhnensystems erreicht ihr Optimum nur bei einer bestimmten Wetterlage.

Hand in Hand mit der schwächeren Vorstrandneigung in den Bühnenfeldern geht jedoch eine Aufsteilung des Vorstrandgebietes vor sich, das seawärts an die Bühnenstreichlinie (gedachte Verbindungslinie der Bühnenköpfe) grenzt. Die angreifenden Kräfte werden hier nicht verändert, sondern bleiben so wie bisher bestehen. Daher muß in einem Strandquerschnitt die Verbindungslinie des unveränderten tiefen Vorstrandgebietes zu dem nunmehr erhöhten Gebiet in der Nähe der Bühnenstreichlinie steiler verlaufen. Dieser Zustand des Vorstrandes ist insofern labil, als jede Änderung der Wetterlage auch eine Änderung des Strandes bewirkt, und eine Sturmflut demzufolge durchaus in der Lage ist, eine unter Umständen in Monaten aufgebaute „gute“ Strandlage in wenigen Stunden in das Gegenteil zu verwandeln und entsprechende Schäden anzurichten. Daraus muß der Schluß gezogen werden, daß ein Buhnensystem vor einer im Abbruch liegenden Brandungsküste auf die Dauer den Küstenrückgang nicht entscheidend behindern kann.

Eine dauernde Sicherung des Strandes im Abschnitt A—B wird nur mit flächenhaft (d. h. quer und längs zum Strand) wirkenden Baumaßnahmen zu erreichen sein, die dem pulsierenden und alternierenden Charakter der Wellen und der Brandungsströmung und den verschiedenen Wetterlagen wesentlich besser Rechnung tragen, als es eine linienhafte Verteidigung durch eine oder mehrere Bühnen vermag.

Zu 4.: Eine künstliche Sandzufuhr in Abschnitt A—B — etwa in Form einer Sandaufspülung — (vgl. LAMPRECHT, 1957), würde zur Folge haben, daß ein Teil oder die gesamte im Abschnitt A—B freiwerdende Wellenenergie nunmehr für die Aufnahme und den Transport des aufgespülten Sandes verbraucht wird; d. h. die ursprüngliche Erosion wird so lange vermindert oder verhindert, bis der zugefügte Sand fortgeräumt ist.

Mit der Erläuterung der Physiographischen Einheit und den genannten Beispielen sollte eine schematische Übersicht über das Kräftespiel in der Brandungszone gegeben werden.

Physiographische Einheiten sind in der Natur nur selten anzutreffen; auch Sylt stellt keine derartige Physiographische Einheit dar, sondern weist eindeutig eine negative Sandbilanz auf. Das Beispiel der Abbildung 43 macht deutlich, daß bei der Behandlung von Küstenschutzfragen stets von der Sandbilanz auszugehen ist.

In einem Gebiet mit negativer Sandbilanz kann durch geeignete Maßnahmen ein Küstenrückgang verringert werden; bei Zulieferung von Sand aus Nachbargebieten ist es unter Umständen sogar möglich, eine negative in eine positive Bilanz zu verwandeln. In jedem Falle wird aber ein Aufhalten des Küstenrückgangs an einer bestimmten Strecke eine Erosion in Lee dieses Gebietes nach sich ziehen. In einem

Küstengebiet mit positiver Sandbilanz sind Küstenschutzwerke nicht erforderlich.

Die besondere Problematik des Sylter Küstenschutzes ist darin zu sehen, daß heute die Siedlungen vor allem im Mittelabschnitt bis unmittelbar an und zum Teil auf die Dünen reichen, so daß man hier unbedingt zu einer starren und daher massiven Verteidigung gezwungen ist. Gelegentlich wird die Frage gestellt: Was würde geschehen, wenn man die Sylter Westküste sich selbst überläßt? Wegen des spekulativen Charakters einer Antwort auf diese Frage soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Eine zweite Frage, die ebenfalls nicht selten gestellt wird, ist die nach der Rentabilität von Küstenschutzmaßnahmen überhaupt.

Es lassen sich Beispiele anführen, bei denen die aufgewendeten Kosten für den Küstenschutz erheblich über dem Wert des unmittelbar zu schützenden Objekts liegen. Man wird der hier vorliegenden Problematik jedoch nur gerecht, wenn man auch die mittelbaren Folgen von Schutzmaßnahmen berücksichtigt. Die Wirkung einer Insel als Bollwerk für das dahinterliegende Festland wird zwar gelegentlich überschätzt. Es steht jedoch fest, daß eine Insel wie Sylt bei Sturmfluten die Energie der größeren Nordseewellen vernichtet, so daß an die dahinterliegende Festlandküste nur die über dem Watt entstandenen Windwellen gelangen. Aus diesem Grunde genügen am Festland die heute üblichen Deiche.

Der Sylter Küstenschutz ist also nicht nur eine lokale Angelegenheit, sondern muß auch von einer höheren Warte aus gesehen werden.

Für die zukünftige Sicherung der Sylter Siedlungen und der Insel selbst werden nach den heute bekannten Erfahrungen und Zusammenhängen an einer offenen Abbruchküste im allgemeinen und dem Kräftespiel vor Sylt im besonderen folgende Maßnahmen empfohlen:

1. Die strikte Einhaltung einer mindestens 100 m breiten bebauungsfreien Zone am Ufer, gerechnet von der Dünen- bzw. Steiluferoberkante an.
2. An der gesamten Küste eine umfassende Anlage von Halmpflanzungen und Buschzäunen zur Ausbildung eines möglichst flachen Dünenhanges.
3. Der Nordteil der Insel etwa ab Klappholtal und vermutlich der Südteil etwa ab Puan-Klent können wirkungsvoll durch Buhnen geschützt werden, wenn zwingende örtliche Gründe dafür vorliegen. In einem solchen Falle werden abgeflachte und breite Buhnen für wirkungsvoller gehalten als die bisher verwendeten, steilwandigen Pfahlbuhnen.
4. An der mittleren Küstenstrecke von Rantum bis Klappholtal haben Buhnen der bisherigen Bauweise den Küstenrückgang nicht aufhalten können.

Durch jede der folgenden, nach ihrer Wirksamkeit geordneten Baumaßnahmen wird in diesem Küstenabschnitt ein Verlangsamten bzw. Aufhalten des Uferrückgangs zu erzielen sein:

- a) Durch flächenhaften Küstenschutz, d. h. durch die Befestigung und Aufrauhung des Unterwasserstrandes etwa mit besonders haltbaren Senkfaschinen, Asphaltnetzen oder ähnlichen rauen und schweren Bau-Elementen; dabei könnten zunächst die bestehenden Buhnen als Stabilisierungsrippen des Befestigungssystems ausgebaut werden. Erfahrungen mit einem flächenhaften Küstenschutz an Küsten mit starken Brandungsangriffen sind bisher nicht bekannt geworden.

In Holland wurden jedoch in mehreren Fällen mit Steinen beschwerte Faschinenteppeiche bis zu einer Größe von rund  $20 \times 35$  m (v. VEEN, 1950) und große Asphaltmatten (Vortrag von H. A. FERGUSON, Den Haag 1952) zum Schutz gegen Erosion durch Strömung eingebaut und haben gute Erfolge gezeitigt.

- b) Durch Wellenbrecher in rund 400 m Uferabstand (Abb. 44) außerhalb des Sandriffs; von den bisher bekannten Typen (massiv, schwimmend, pneumatisch; vgl. LAMPRECHT, 1957) dürfte nur ein massiver Wellenbrecher in Frage kommen, etwa in Form von Beton-Senkkästen wie die bei der neuen Westmole auf Helgoland oder einer vergossenen oder mit einer Tetrapodenschicht überdeckten Steinschüttung auf Faschinen.
  - c) Durch ein flach geneigtes und rauhes Uferdeckwerk.
  - d) Durch Sandaufspülung am Strand bis etwa zur — 3 m NN-Linie. Die Aufspülung hätte eine Strandverbreiterung zur Folge und käme daher den Interessen der Badeverwaltung sehr entgegen; sie müßte jedoch nach verhältnismäßig kurzer Zeit wiederholt werden.
5. An der Sylter Ostküste könnten örtlich begrenzte stärkere Abbrüche durch kräftige Lahnungen verhindert werden.

Welcher der genannten Methoden der Vorzug gebührt und auf welche Weise die dann auftretenden konstruktiven Probleme am glücklichsten gelöst werden können, wird Gegenstand weiterer — und nicht nur ingenieurmäßiger — Überlegungen sein müssen.

#### V. Zusammenfassung

Die wichtigsten Untersuchungsarbeiten und -ergebnisse der von 1952 bis 1956 in Westerland/Sylt stationierten „Vorarbeitenstelle Sylt“ werden erläutert.

Die Untersuchungen gingen von der Fragestellung aus:

1. In welcher Weise hat sich Sylt verändert?
2. Welches sind die dafür maßgeblichen Naturkräfte und wie wirken sie?
3. Wie ist die Wirkungsweise der bisherigen Küstenschutzmaßnahmen auf Sylt zu beurteilen und welche Empfehlungen können für die Zukunft gegeben werden?

Die langfristigen und täglichen Veränderungen der Küste und des Strandes wurden durch Vermessungen und Lotungen festgestellt. Die angewendeten Methoden, Geräte und die Meßfehler sind angegeben. Die Auswertung der Messungen zeigte, daß die Sylter Westküste im Mittel rund 1 m/Jahr zurückweicht, während sich die Insel nach Norden und Süden verlängert. Die täglichen Höhenänderungen des Strandes können erheblich sein (bis zu 2,60 m innerhalb von zwei Tagen) und müssen daher bei allen Baumaßnahmen berücksichtigt werden.

Als Ursache der Veränderungen wurden die angreifenden Kräfte Wind, Wellen und Strömungen untersucht. Für die Veränderungen an der Sylter Westküste kommt dabei den Wellen die ausschlaggebende Bedeutung zu. Aus diesem Grunde nahmen die Wellenmessungen eine besondere Stellung innerhalb der Untersuchungen ein und führten zur Anwendung neuer Meßmethoden (Messung von Wellenenergie auf mikroseismischem Wege).

Außer einer Darstellung der geschichtlichen Entwicklung der Küstenschutzmaßnahmen auf Sylt und deren Kosten wird mit Hilfe generalisierender Annahmen (Physiographische Einheit) ein Überblick über die Bewegungsvorgänge in Küstennähe gegeben und nachgewiesen, daß man bei allen Küstenschutz-Untersuchungen von der Materialbilanz ausgehen muß. Sylt stellt keine Physiographische Einheit dar, sondern weist eindeutig eine negative Materialbilanz auf.

Die Beurteilung der Sylter Küstenschutzmaßnahmen, die sich auch auf die bisher über dieses Thema verfaßten Arbeiten stützt, führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Die auf Sylt bisher eingebauten Buhnen haben nur dort eindeutig positiv gewirkt, wo starke Uferlängsströmungen auftreten; für den mittleren Teil der Sylter Westküste, der vorwiegend unter Brandungseinfluß steht, läßt sich eine positive Wirkung nicht nachweisen.
2. Die auf Sylt errichteten Deckwerke und Strandmauern haben ihren Zweck bisher erfüllt, jedoch muß berücksichtigt werden, daß ihre Wirkung zeitlich und örtlich begrenzt ist.

3. Der „bewegliche Küstenschutz“ mit Hilfe von Strandhaferpflanzungen und Buschzäunen hat sich bewährt, da bei seiner Anwendung der Erfolg in einem günstigen Verhältnis zum Aufwand steht.

Für den zukünftigen Sylter Küstenschutz werden folgende Empfehlungen gegeben:

1. An der gesamten Küste:  
Einhaltung einer bebauungsfreien Zone am Ufer sowie Anlage von Halmpflanzungen und Buschzäunen.
2. An der Westküste:
  - a) Im Mittelteil der Insel, d. h. im Abschnitt Rantum bis Klappholtal (vorwiegend unter Brandungseinfluß):  
Soweit wirtschaftlich vertretbar, sollten im Vorstrandgebiet Küstenschutzwerke mit flächenhafter Wirkung angeordnet werden; diese Werke müßten sich auf einen möglichst breiten Küstenstreifen erstrecken, um die Sandwanderung wirkungsvoll zu bremsen und die freiwerdende Brandungsenergie möglichst weitgehend zu vernichten.
  - b) Im Nordteil der Insel etwa ab Klappholtal und im Südteil etwa ab Puan-Klent (unter Strömungs- und Brandungseinfluß):  
Wenn zwingende örtliche Gründe vorliegen, Anlage von Buhnen mit flachem Querschnitt.
3. An der Ostküste:  
Anlage kräftiger Buschlahnungen an den Abbruchstrecken.

## VI. Schriftenverzeichnis

1. BEACH EROSION BOARD: Shore Protection, Planning and Design, Technical Report No. 4. Washington 1954.
2. DOBBIE, C. H.: Küstenschutz (Übersetzung). Civ. Eng., No. 11, 1952.
3. DOLEZAL, R.: Vermessungsbericht III. (Nicht veröffentlicht; Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1948.
4. DOLEZAL, R.: Anschlußnivellement der Insel Sylt 1953. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsbericht 3 der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum) 1954.
5. FISCHER, O.: Einfluß der Schutzbauten auf den Abbruch der Sylter Westküste. Zentralbl. d. Bauverw. 23, 1938.
6. FÜLSCHER: Über Schutzbauten zur Erhaltung der ost- und nordfriesischen Inseln. Berlin 1905.
7. GAYE, J.: Die deutsche Küstenforschung und der Seewasserbau. Die Küste 3, H. 1/2, 1955.
8. GRIESSEIER, H. u. VOLLBRECHT, K.: Untersuchungs- und Beobachtungsergebnisse über einige Gesetzmäßigkeiten im litoralischen Geschehen. Acta Hydrophysica II, H. 3, 1954.
9. GRIESSEIER, H. u. VOLLBRECHT, K.: Über einige neuere Gesichtspunkte in der Küstenforschung. Forschungen u. Fortschr. 29, H. 1, 1955.
10. GRIPP, K.: Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht. Arch. Deutsch. Seewarte 63, Nr. 2, 1944.
11. HABERSTROH, E. G.: Forschungsarbeiten im dithmarscher Wattenmeer. Westküste 1, H. 1, 1938.
12. HANNOV. VERSUCHSANST. F. GRUNDBAU U. WASSERBAU: Wellenversuche für das Uferschutzwerk bei Westerland auf Sylt. (Nicht veröffentlicht) 1953.
13. HANSEN, C. P.: Die nordfriesische Insel Sylt. Leipzig 1859.
14. HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenaufbau an Seedeichen im Wattengebiet. Mitt. Hannov. Versuchsanst. H. 5, 1954.
15. HENSEN, W.: Modellversuche über den Strandabbruch an den Enden von befestigten Küstenstrecken — Lee-Erosion. Mitt. Hannov. Versuchsanst. H. 10, 1957.
16. HUNDT, Cl.: Denkschrift über die Abbruchursachen an der Nordwestküste des Ellenbogens auf Sylt und Folgerungen für die Sicherung dieser Küstenstrecke. (Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1939.
17. HUNDT, Cl.: Wassertiefenmessung. Abschnitt II aus dem Bilanzbericht der Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. (Nicht veröffentlicht) 1951.
18. KIRSCHMER, O.: Die Theorie der Meereswellen als Grundlage von Modellversuchen für Seebauten. MAN-Forschungsh., 2. Halbjahr, 1952.
19. KRAMER, J. u. HOMEIER, H.: Die Auswirkung der Inselnchutzwerke auf die Strandentwicklung im Westteil von Norderney. Jahresber. 1954, Forschungsstelle Norderney, 1955

20. LAMBERT: Entwicklung und Wirkung der Bühnenbauten unter besonderer Berücksichtigung der Eisenbetonbühnen auf Sylt. (Nicht veröffentlicht; Bücherei d. Marschenbauamts Husum) 1939.
21. LAMPRECHT, H.-O.: Ufervermessungen auf Sylt. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsber. 4 der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum) 1954 a.
22. LAMPRECHT, H.-O.: Tägliche Veränderungen am Weststrand von Sylt. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsber. 6 der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum) 1954 b.
23. LAMPRECHT, H.-O.: Veränderungen des Unterwasserstrandes an der Westküste von Sylt seit 1870. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsber. 9 der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum) 1955 a.
24. LAMPRECHT, H.-O.: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste von Sylt. Diss. T. H. Hannover; Mitt. Hannov. Versuchsanst. H. 8, 1955 b.
25. LAMPRECHT, H.-O.: Wirkungsweise von Küstenschutzmaßnahmen auf Sylt. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsber. 10 der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum) 1956 a.
26. LAMPRECHT, H.-O.: Ufervermessungen der Sylter Ostküste. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsber. 12 der Vorarbeitenstelle Sylt des Marschenbauamts Husum) 1956 b.
27. LAMPRECHT, H.-O.: Wirkungsweise von Küstenschutzbauwerken auf Sylt. Wasserwirtschaft 47, H. 5, 1957.
28. LAMPRECHT, H.-O.: Düenschutzwerke auf Sylt. Die Bautechnik, H. 1, 1958.
29. LEU: Denkschrift über den Bühnenbau auf der Insel Sylt. (Nicht veröffentlicht; Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1920.
30. LORENZEN, J. M.: Hundert Jahre Küstenschutz an der Nordsee. Die Küste 3, H. 1/2, 1955.
31. LÜDERS, K.: Die Entstehung der ostfriesischen Inseln und der Einfluß der Dünenbildung auf den geologischen Aufbau der ostfriesischen Küste. Probleme d. Küstenforschung im südl. Nordseegebiet, Bd. 5, 1953.
32. LUX, H.: Die biologischen Grundlagen der Strandhaferpflanzung und Silbergrasansaat im Dünenbau. Diss. Univ. Kiel, 1954.
33. LÜPKES, H. u. SIEMENS, H. P.: Planung und Stand der Maßnahmen zur Sicherung des Ellenbogens von Sylt. Westküste 2, H. 2/3, 1940.
34. LÜPKES, H. u. SIEMENS, H. P.: Erfahrungen mit Stahlbühnen auf der Insel Sylt. Die Bautechnik, H. 46/47, 1941.
35. MAGENS, C., WYRTKI, K. u. RODEN, G.: Die Brandungswirkungen an den Küsten Fehmarns und Wagriens. (Nicht veröffentlicht; Untersuchungsber. d. Gewässerkundl. Untersuchungsstelle des Wasser- und Schiffsamts Kiel) 1954.
36. MAGER, Fr.: Der Abbruch der Insel Sylt durch die Nordsee. Schr. Balt. Komm. zu Kiel; Breslau 1927.
37. MARSCHENBAUAMT HUSUM: Akten über Untersuchungen auf Sylt.
38. MÜLLER, Fr. u. FISCHER, O.: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Sylt. Berlin 1938.
39. NEGER, R. Die Entwicklung des Bühnenbaues in den deutschen Stromgebieten. Berlin 1932.
40. PETERSEN, J.: Uferabbruch und Gestaltwandel der Insel Sylt in geschichtlicher Zeit. Ann. Hydr. 66, H. 7, 1938.
41. PETERSEN, M.: Erfahrungen und Beobachtungen an den Düenschutzarbeiten auf Sylt. (Nicht veröffentlicht; Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1938.
42. PETERSEN, M.: Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste (Samland bis Schleswig-Holstein). Diss. T. H. Hannover; Die Küste 1, H. 2, 1952.
43. PFEIFFER: Denkschrift über den Bühnenbau auf der Insel Sylt. (Nicht veröffentlicht; Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1920.
44. PFEIFFER, H.: Die Arbeiten an der schleswig-holsteinischen Westküste seit 1933. Westküste 1, H. 1, 1938.
45. ROLL, H. U.: Von der Initialwelle bis zur Sturmsee. Methoden und Ergebnisse der modernen Seegangsforschung. Hansa 90, H. 6/7, 1953.
46. RUHNKE, C. M.: Technischer Bilanzbericht über die Küstenschutzmaßnahmen im Baubezirk Sylt des Marschenbauamts Husum. (Nicht veröffentlicht; Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1950.
47. RUSSEL, R. C. H. u. INGLIS, C.: The Influence of a Vertical Wall on a Beach in Front of it. Proc. Minnesota Internat. Hydraul. Convention, 1953.
48. SCHADE: Denkschrift über den Bühnenbau auf Sylt. (Nicht veröffentlicht; Bücherei des Marschenbauamts Husum) 1936.

49. SCHUMACHER, A. u. THORADE, H.: Die Gezeiten der Sylter Gewässer nach den Beobachtungen im August 1921. Arch. Deutsch. Seewarte, Nr. 2, 1923.
50. SVERDRUP, H. U. u. MUNK, W. H.: Wind, Sea and Swell: Theory of relations for Forecasting. U.S. Navy Department Hydr. Off., Publ. No. 601. Washington 1947.
51. VAN VEEN, J.: Dredge, Drain, Reclaim. The art of a nation. 3. Ausg., Den Haag 1950.
52. VOLLBRECHT, K.: Beiträge zum Problem brandender Wellen. Acta Hydrophys. II, H. 1, 1954.
53. VOLLBRECHT, K.: Über die Natur des Sedimentgleichgewichtes im Litoral. Geofisica pura e applicata, Milano, Vol. 28, 1954.
54. VOLLBRECHT, K.: Strandabtragung durch Wellenreflexion an steilwandigen Küstenschutzbauten. Wasserwirtschaft — Wassertechnik 5, H. 8, 1955.
55. WYRTKI, K.: Die Bilanz des Längstransportes in der Brandungszone. Deutsch. Hydrogr. Z. 6, H. 2, 1953.
56. ZAUSIG, F.: Veränderungen der Küsten, Sände, Tiefs und Watten der Gewässer um Sylt (Nordsee) nach alten Seekarten, Seehandbüchern und Landkarten seit 1585. Geol. Meere u. Binnengew. 3, H. 4, 1939.
57. ZITSCHER, F. F.: Der Bau eines Uferdeckwerkes vor Westerland/Sylt in kombinierter Asphalt- und Basaltbauweise. Bitumen, H. 5, 1955.