

## Schutz sandiger Küsten an Nord- und Ostsee Bestandsaufnahme und kritische Wertung

### Inhalt

1.	Veranlassung und Aufgabenstellung	322
2.	Natürliche Gegebenheiten	322
2.1	Räumliche Gliederung	322
2.2	Nordseeküste zwischen Ems und Jade	324
2.2.1	Allgemeines	324
2.2.2	Sandhaushalt	325
2.3	Nordseeküste zwischen Jade und Elbe	328
2.3.1	Allgemeines	328
2.3.2	Sandhaushalt	328
2.4	Nordseeküste zwischen Elbe und Lister Tief	329
2.4.1	Allgemeines	329
2.4.2	Sandhaushalt	332
2.5	Ostseeküste von der Flensburger Förde bis zur Trave	334
2.5.1	Allgemeines	334
2.5.2	Materialhaushalt	335
3.	Längswerke zur Sicherung von Dünen, Kliffs und Strandwällen	338
3.1	Einführung	338
3.2	Geschlossene Bauweisen (Deckwerke)	339
3.2.1	Strände mit negativer Sandbilanz	339
3.2.2	Strände mit ausgeglichener Sandbilanz	345
3.2.3	Strände mit positiver Sandbilanz	346
3.3	Offene Bauweisen	347
3.3.1	Pfahlwerke	347
3.3.2	Formkörperwerke	347
3.3.3	Buschbauweisen	348
3.4	Wellenbrecher	348
3.5	Zusammenfassung und Kritik	350
4.	Buhnen und flächenhafte Bedeckungen	352
4.1	Allgemeines	352
4.2	Buhnen	353
4.2.1	Strände mit negativer Sandbilanz	353
4.2.2	Strände mit ausgeglichener Sandbilanz	354
4.2.3	Strände mit positiver Sandbilanz	356
4.3	Flächenhafte Sinkstück-Bedeckungen	357
4.4	Zusammenfassung und Kritik	358
5.	Künstliche Materialzufuhr zur Stranderhaltung	358
5.1	Allgemeines	358
5.2	Erste Erfahrungen mit Strandvorspülungen an der deutschen Nordseeküste	358
5.3	Zusammenfassung und Kritik	359
6.	Schlußwort	360
7.	Schriftenverzeichnis	360

## 1. Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Arbeitsgruppe „Schutzwerke an sandigen Küsten“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee hat in den Jahren 1968 bis 1975 umfangreiches Material gesichtet und ausgewertet, das zu einer Bestandsaufnahme und kritischen Wertung geführt hat.

Später hat die Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“ in der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG) und Hafenbautechnischen Gesellschaft „Empfehlungen für Küstenschutzwerke“ erarbeitet, die gleichfalls in diesem Heft veröffentlicht werden.

Die Gliederung dieses Berichtes ist auf die Beurteilung der Funktion der Schutzwerke abgestellt. Konstruktive Einzelheiten werden nur so weit behandelt, wie dies zum Verständnis der funktionellen Zusammenhänge notwendig ist. Dabei werden durch eine Aufteilung nach der geographischen Lage der Küstenbereiche regionale Gleichartigkeiten herausgestellt:

- a) Küste von der Ems bis zur Elbe
- b) Küste von der Elbe bis zur dänischen Grenze
- c) Ostseeküste

Entscheidend für alle Maßnahmen des Küstenschutzes, besonders an sandigen Küsten, ist die Frage, ob und bejahendenfalls wann Bauten errichtet werden sollen; denn in jedem Fall wird der natürliche Zustand gestört.

Die „Bestandsaufnahme“ beginnt mit einer Darstellung der natürlichen Gegebenheiten für die nach der geographischen Lage geordneten Küstenbereiche. Im anschließenden Abschnitt werden Längswerke zur Sicherung von Dünen, Kliffs und Strandwällen in offener und geschlossener Bauweise behandelt. Buhnen und flächenhafte Bedeckungen an Stränden mit unterschiedlicher Sandbilanz werden in ihrer funktionellen Wirkung anhand ausgewählter Beispiele dargestellt. Abschließend wird in einem gesonderten Abschnitt die künstliche Materialzufuhr zur Stranderhaltung behandelt, in dem Möglichkeiten aufgezeigt werden, denen sich gerade in jüngster Zeit das technische Interesse zuwendet.

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe waren:

- MinDgt. Prof. Dr.-Ing. ZITSCHER (Obmann)  
Ltd. Reg.BauDir. CARSTENS, Itzehoe  
BauDir. ERCHINGER, Norden  
Dr.-Ing. LUCK, Norderney  
Ltd. BauDir. SCHWITTERS, Emden  
Reg.BauDir. WIEDECKE, Kiel

Herr Dr.-Ing. SIEFERT, Cuxhaven, hat ergänzend den Küstenabschnitt zwischen Jade und Elbe bearbeitet.

## 2. Natürliche Gegebenheiten

### 2.1 Räumliche Gliederung

Sandstrände sind an der deutschen Nordseeküste überwiegend im Bereich der seeseitigen Grenze der den Watten vorgelagerten Inseln anzutreffen (Abb. 1). Die Ostsee hat dagegen fast auf ganzer Strecke eine sandige Küste, wenn sie auch nicht überall als Sandstrand oberhalb der Mittelhochwasserlinie erkennbar ist. Nach den geographischen Gegebenheiten kann sich daher die Untersuchung von Schutzmaßnahmen an sandigen Küsten auf folgende Bereiche beschränken:

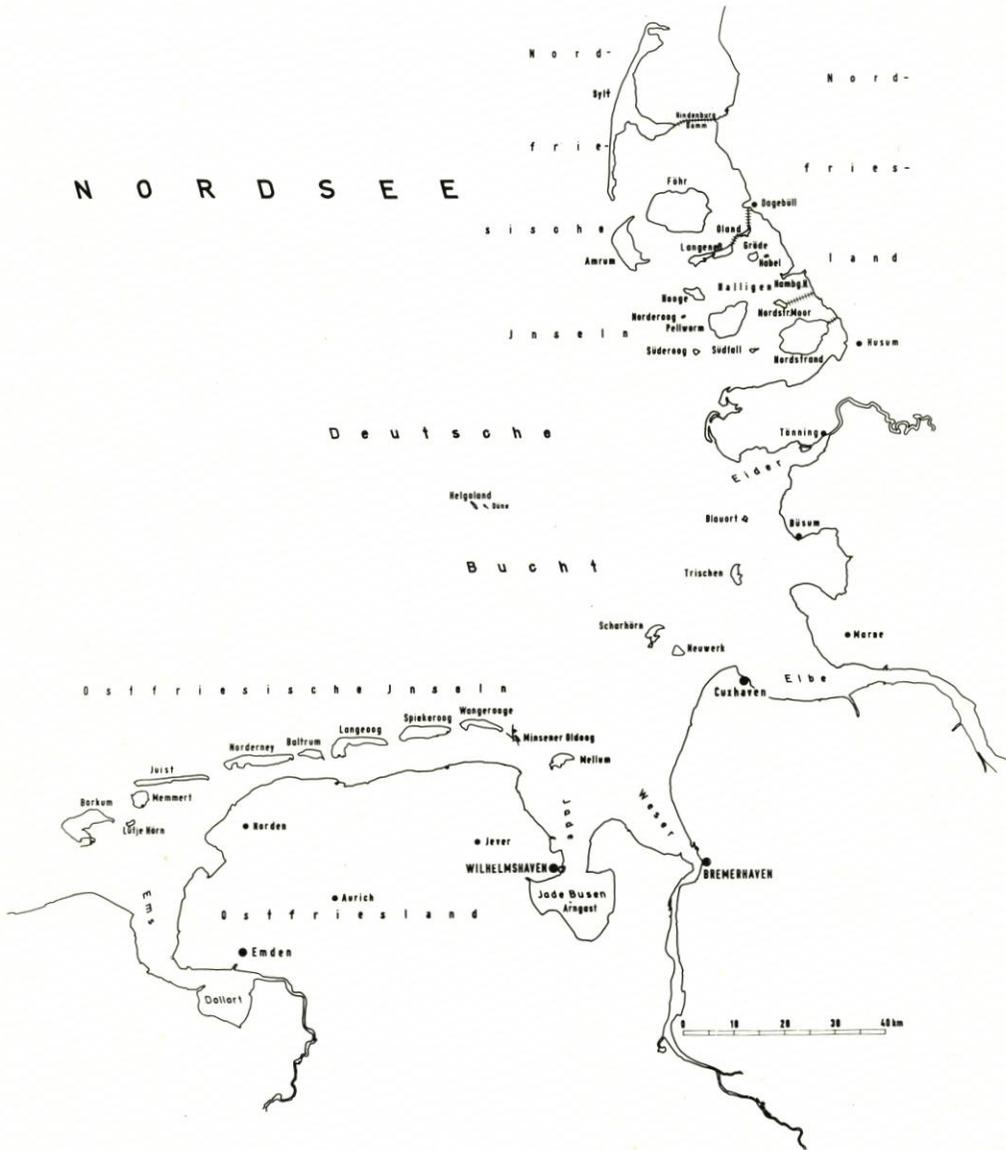


Abb. 1. Übersichtskarte der deutschen Nordseeküste

- a) Küstenabschnitt von der Ems bis zur Elbe
- b) Küstenabschnitt zwischen Elbe und Lister Tief
- c) Ostseeküste

Die thematische Trennung der Bereiche an der Nordsee von der Ems bis zur Elbe und von dort bis zum Lister Tief ist notwendig, weil die in diesen Abschnitten wirkenden Naturkräfte, vor allem wegen der verschiedenen Lage zur Hauptwindrichtung, ungleichartige Wirkungen auf sandige Ufer ausüben. Aus gleichen Gründen ist die Ostseeküste gesondert darzustellen.

## 2.2 Nordseeküste zwischen Ems und Jade

## 2.2.1 Allgemeines

Die Entwicklung des erdgeschichtlich jungen ostfriesischen Küstengebietes\*) und seine Gestaltung als Ergebnis sowohl des kausalen Zusammenspiels aktiver und passiver Kräfte als auch menschlicher Eingriffe in das natürliche Kräftespiel ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Im Sinne der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden daher nur jene morphologischen Gestaltungsvorgänge herausgearbeitet, die für die umfassende Beurteilung von Schutzwerken an sandigen Küsten von Bedeutung sind. Im Rahmen dieser Betrachtungen sind die sedimentologischen Bewegungsvorgänge im Bereich der Ostfriesischen Inseln als Grundlage für die funktionelle Planung und Gestaltung der vorhandenen Schutzwerke von Interesse (KÜSTENAUSSCHUSS NORD- u. OSTSEE, 1953).

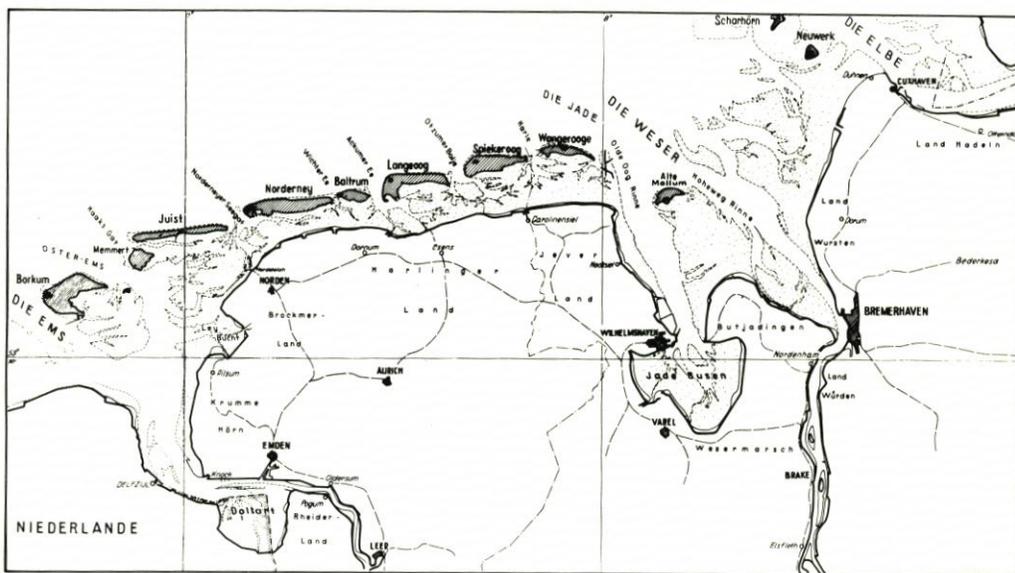


Abb. 2. Die Ostfriesischen Inseln

Der ostfriesischen Festlandküste (Abb. 2), an der keine natürlichen Sandstrände bestehen, sind die sieben Düneninseln Borkum, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog, Spiekeroog und Wangeroog sowie die drei Strandinseln Lütje Hörn, Memmert und Minsener Oog vorgelagert. Sie sind im Zusammenwirken von Strömung, Brandung, Wind und Vegetation entstanden (LÜDERS, 1953, u. KRÜGER, 1937).

Im natürlichen Kräftespiel sind die Inseln langfristig einer Ostwärtsverlagerung unterworfen (GAYE u. WALTHER, 1935; BACKHAUS, 1937 u. 1941), die von kurzfristigen Gestaltsänderungen begleitet wird. Der erstgenannte Vorgang verläuft räumlich und zeitlich keines-

\*) Küstengebiet: Das im weiträumigen Übergangsgebiet Festland/Meer liegende Gebiet (auch kurz Küste genannt). Das Küstengebiet umfaßt das Küstenland, das Wattgebiet, die Inseln, Halligen und Außensände sowie die Zone des Vorstrandes. Eine genau definierte Abgrenzung des Küstengebietes landwärts und seewärts gibt es nicht (LÜDERS, K. u. LUCK, G., „Kleines Küstenlexikon“ 2. Aufl., 1967).

falls stetig. Es handelt sich hierbei vielmehr um zeitweise aussetzende Abbrüche und Auflandungen, deren Richtung allgemein nach Osten geht. Dieser Verlagerungsvorgang ist ursächlich auf die im Bereich der südlichen Nordseeküste überwiegend nach Osten wirkenden Transportkräfte der Gezeitenströme, der Brandungsströme und des Windes zurückzuführen.

Die kurzfristigen Gestaltungsvorgänge, die in den Änderungen der Inselstrände ihren sichtbaren Ausdruck finden, sind dagegen vor allem durch die morphologisch besonders wirkungsvollen Brandungserscheinungen hervorgerufen und – im mittleren und östlichen Bereich der Inseln – durch starke Sandzufuhr (Riffbögen, siehe Abschn. 2.2.2). Allerdings sind regionale Unterschiede zu beobachten, die für die Sandbilanz der einzelnen Inseln und damit für die funktionelle Planung der Bauwerke des Insel schutzes von großer Bedeutung sind. Diese regionalen Unterschiede sind verursacht durch die hydrologisch besonders verwickelten Verhältnisse im Bereich der Seegaten zwischen den einzelnen Inseln, wobei Borkum infolge seiner Lage zwischen Wester- und Osterems eine Sonderstellung einnimmt.

Durch die Seegaten werden die hinter den Inseln liegenden Wattgebiete überflutet und entleert. Im einzelnen von Westen nach Osten:

Norderneyer Seegat	(Juist/Norderney)
Wichter Ee	(Norderney/Baltrum)
Accumer Ee	(Baltrum/Langeoog)
Otzumer Balje	(Langeoog/Spiekeroog)
Harle	(Spiekeroog/Wangerooge)

Die tiefen Rinnen der Seegaten werden im wesentlichen durch den Ebbestrom gestaltet, der bei ablaufendem Wasser nach Norden versetzt und nördlich der Inseln auf den nach Westen gerichteten Gezeitenstrom trifft. Von besonderer Bedeutung für die Sandbilanz der Inseln ist die Lage dieser tiefen Rinnen, in denen der Wasseraustausch in beiden Richtungen überwiegend verläuft (WALTHER, 1934, 1949 u. 1972; LUCK, 1966).

Die Seegaten verfügen über eigene Watteinzugsgebiete, deren topographische Watterscheiden unter entsprechenden Witterungsbedingungen von Triftströmen wechselnder Größe sowohl von Westen nach Osten (Westwindlagen) als auch umgekehrt (Ostwindlagen) überschritten werden. Die topographischen sind daher mit den hydrologischen Einzugsgebieten nicht immer identisch. Die Lage der tiefen Rinnen der Seegaten ist wesentlich durch die flächenmäßige Verteilung der westlichen und östlichen Teileinzugsgebiete bestimmt: Überwiegt der Abfluß aus den westlichen Teileinzugsgebieten, so schmiegt sich die tiefe Rinne an die Westköpfe der östlich benachbarten Inseln an (Norderney, Baltrum, Wangerooge). In der Harle ist die tiefe Rinne durch die 1,5 km lange Buhne H im Westen des Seegats freigehalten worden (LÜDERS, 1952). Im umgekehrten Falle, wenn das östliche Einzugsgebiet überwiegt, was besonders augenfällig für die Accumer Ee gilt, liegt die tiefe Rinne auf der westlichen Seite des Seegates. In der Otzumer Balje sind diese Verhältnisse nicht eindeutig.

Westerems und Osterems können nur im weitesten Sinne als Seegaten angesprochen werden, so daß die morphologischen Vorgänge auf Borkum und am Westende Juists nicht aus dem Wattgebiet heraus beeinflußt werden (NIEBUHR, 1952).

### 2.2.2 Sandhaushalt

Nördlich der Ostfriesischen Inseln werden – dem überwiegend in östlicher Richtung wirkenden Gezeitenstrom folgend – erhebliche Sandmengen nach Osten verfrachtet. Im Bereich der Ostenden der Inseln werden diese Sande zu Platen aufgeworfen, welche die Seegaten in Riffbögen umwandern, um sich dann an die östlich benachbarten Inselstrände

anzulagern. Das Bogenmaß dieser Riffbögen ist abhängig von der Größe der rückwärtigen Einzugsgebiete der Seegaten und des von dort bewirkten Stromarbeitsvermögens des Ebbestromes. Der Anlandungsbereich der Platen an den Inselstränden wird im wesentlichen durch die Lage der tiefen Rinnen, östlich oder westlich im Seegat, und die Stärke des Ebbestromes bestimmt.

Die Platen- und Riffbildung kann als Störzustand des küstenparallelen Sedimentversatzes aufgefaßt und gedeutet werden. Die Bedeutung der Riffbögen für die morphologischen Vorgänge auf den Inseln ist vielfältig und bekannt (KRAMER/HOMEIER, 1957 u. JANSSEN, 1933). Hingegen sind die inneren Vorgänge – Platenverlagerungen, Abspalten einzelner Platen, Verformungen usw. – noch wenig erforscht (KATTENBUSCH/LUCK, 1968).

Der Sand, aus dem die Inseln aufgebaut sind, vermag den angreifenden Kräften nur wenig Widerstand entgegenzusetzen. Daher unterliegen sie den eingangs umrissenen Gestaltungsänderungen. Abgesehen von langperiodischen Änderungen in der Sandzufuhr, die sich vor allem in der Anzahl und Mächtigkeit der Platen in den Riffbögen anzudeuten scheinen, dürfte der Sandhaushalt des gesamten Gebietes (Borkum bis Wangerooe) ausgeglichen sein. Wenngleich ins einzelne gehende Untersuchungen hierzu noch fehlen, so liegt diese Vermutung doch insofern nahe, als den Sandmangelgebieten solche mit erheblichem Wachstum gegenüberstehen: So haben z. B. die Sandvorräte in der Mitte und im Osten Norderneys in den letzten Jahrzehnten erheblich zugenommen, so daß trotz der großen Schrumpfungsprozesse im Westteil der Sandhaushalt der Insel insgesamt ausgeglichen erscheint.

Für die funktionelle Beurteilung von Schutzwerken an sandigen Küsten ist die Sandbilanz der einzelnen Inseln insofern von größter Bedeutung, als in Sandmangelgebieten – falls größere Werte zu schützen sind – früher oder später Eingriffe erwogen werden müssen und in Überschußgebieten im allgemeinen auf Bauwerke verzichtet werden kann, wobei zu berücksichtigen ist, ob es sich um lang- oder kurzfristige Veränderungen handelt (vgl. Abschn. 2.2.1).

Vom Westkopf Borkums erstreckt sich in nordwestlicher Richtung das „Hohe Riff“, aus dem die Insel Sandzufuhren wechselnder Größe erhält. Da die Anlandungen im Nordwestbereich liegen, wodurch sie in den Wirkungsbereich nordöstlich gerichteter Brandungsströme geraten, ist der Sandhaushalt im Südwestbereich negativ. Bereits 1869 sind daher Schutzwerke zur Sicherung des Westkopfes erstellt worden (KATTENBUSCH, 1950; HOMEIER, 1971; LUCK, 1971).

Der Sandhaushalt Juists ist insgesamt ausgeglichen. Die Sandzufuhren des Juister Riffes werden durch Brandungsströme und äolischen Transport nach Osten verlagert, wodurch Verluste des Nordstrandes stetig ergänzt werden. Die in Fehleinschätzung dieser Verhältnisse 1913 bis 1919 gebauten Strandschutzwerke waren schon 1920 völlig versandet und sind seither dem unmittelbaren Einfluß der wirkenden Kräfte nicht wieder ausgesetzt gewesen (LUCK, 1970).

Die von Juist herangeführten Sande umlaufen das Norderneyer Seegat in einem weit nach Norden ausschwenkenden Riffbogen, der erst in der Mitte der Insel den Strand erreicht. Von hier werden die Sande durch Brandungsströme und äolischen Transport weit überwiegend nach Osten und in das Innere der Insel verlagert. Der Westteil Norderneys erhält somit keine oder nur geringfügige Sandzufuhren, so daß die dort im natürlichen Kräftespiel entstehenden Sandverluste nicht ausgeglichen werden. Dem hierdurch bewirkten Schrumpfungprozeß der westlichen Strände wurde ab 1857/58 mit Schutzwerken begegnet (DECHAND u. a., 1950; KURZAK/THILO, 1952, KÜSTENAUSSCHUSS NORD- u. OSTSEE, 1953; HOMEIER/KRAMER, 1955; PEPER, 1955/56; AKKERMANN, 1956; HOMEIER/KRAMER 1957).

Die Verhältnisse auf Baltrum sind denjenigen Norderneys ähnlich. Da jedoch das Wateinzugsgebiet der Wichter Ee klein ist, ist auch das Bogenmaß des Baltrumer Riffbogens

klein im Verhältnis zu demjenigen Norderneys. Dementsprechend schwenkt der Riffbogen nicht so weit nördlich aus und erreicht den Baltrumer Strand noch im Westteil der Insel. Der Sandhaushalt Baltrums ist daher nur in dem engen Westkopfbereich unausgeglichen bzw. starken Schwankungen unterworfen. In diesem Gebiet wurden zur Bestandserhaltung bereits 1873 Schutzwerke erstellt.

Da die tiefe Rinne der Accumer Ee auf der westlichen Seite dieses Seegats dicht unter dem Ostende Baltrums verläuft, schwenkt der *Langeooger* Riffbogen bereits hier nach Norden aus und erreicht Langeoog im Bereich seines West- und Nordweststrandes. Obwohl insgesamt infolge der reichhaltigen Sandzufuhren der Sandhaushalt im Westen Langeoogs ausgeglichen bis positiv ist, kommt es hier zu alternierenden Abbruchs- und Anlandungserscheinungen, die auf einen Wechsel des Anlandungsbereiches zwischen Weststrand und Nordweststrand zurückzuführen sind. Die Abbruchserscheinungen erreichten im Nordwesten der Insel in den letzten Jahren derartige Ausmaße, daß Baumaßnahmen erforderlich wurden (s. Abb. 15). Die leichte Bauweise wurde in der Erwartung gewählt, daß in naher Zukunft im Schadensbereich wieder ausreichende Sandzufuhren erwartet werden können. Diese vor wenigen Jahren erhoffte Entwicklung zeichnet sich inzwischen insofern ab, als einige Platen des Riffbogens im Abbruchsbereich zwischenzeitlich Strandkontakt gefunden haben. Der Rückgang der Dünen konnte durch die gewählte Bauweise unterbunden werden (HOMEIER, 1954 u. 1956; HOMEIER/LUCK, 1971; LÜDERS u. RODLOFF, 1972).

Die tiefe Rinne der Otzumer Balje berührt *Spiekeroog* im Südwesten und verläuft dann in nordwestlicher Richtung. Der Riffbogen setzt bereits am Langeooger Ostende an, biegt weit nach Norden aus und erreicht den Spiekerooger Strand an seiner Nordseite. Der Westteil erhält somit aus dem küstenparallelen Sandtransport keine nennenswerte Sandzufuhr. Aus diesem Grunde wurden 1873 an der Westseite auftretende Dünenabbrüche durch Bauwerke abgesichert: Die Schutzwerke sind – zeitlich und räumlich allerdings sehr unterschiedlich – durch Sandzufuhren wechselnder Größe geschützt. Der Sand stammt aus dem nach Nordwesten ungeschützten Dünengebiet, aus dem er durch Brandungsströme auch nach Südwesten verlagert wird. Dieser unetstetige Vorgang reicht allerdings zum Aufbau stabiler Strände vor den Schutzwerken im Westen der Insel nicht aus (JANSEN, 1933; HOMEIER, 1961).

Im *Wangerooger* Seegat (Harle) sind die natürlichen Verhältnisse durch den Bau der Buhne H stark beeinflusst. Der Riffbogen (Harleriff) erreicht Wangerooge erst im Nordstrandbereich, so daß im Westen ebenfalls die natürliche Sandzufuhr fehlt. Auch hier wurden zur Sicherung der Insel bereits 1874 massive Schutzwerke erstellt (KRÜGER, 1937; LÜDERS, 1951; LÜDERS/WILLECKE, 1951).

Die Strandinseln *Lütje Hörn*, südöstlich Borkums (HOMEIER, 1963), und *Memmert*, südliches Westende von Juist (SCHUMACHER, 1952; HOMEIER, 1968; LUCK, 1968), sind – abgesehen von Dünenschutzarbeiten auf Memmert – nicht mit Schutzwerken versehen und dem freien Spiel der Kräfte ausgesetzt. Die Sandvorräte beider Inseln sind langfristig konstant. Kurzfristig müssen jedoch zeitweise erhebliche Sandeinbußen hingenommen werden.

Auf *Minsener Oog*, östlich von Wangerooge, wurde im Zuge der Jadekorrektur ein Buhnensystem angelegt (Baubeginn 1909), das unabhängig von den üblichen Gesichtspunkten der Inselficherung geplant wurde: Mit diesem Buhnensystem sollten die küstenparallel versetzten Sande möglichst schnell und unschädlich durch das zu erstellende Jadefahrwasser geleitet werden (LÜDERS, 1933; FREDE, 1938).

## 2.3 Nordseeküste zwischen Jade und Elbe

### 2.3.1 Allgemeines

Die Nordseeküste zwischen Jade und Elbe kann in drei Bereiche unterteilt werden, und zwar in die Küste Butjadingens zwischen Jade und Weser – die noch in geschichtlicher Zeit zum Weserästuar gehörte und keine natürlichen Sandstrände hat –, ferner in die Wurster Küste von Bremerhaven bis Cuxhaven – wo die eiszeitlichen Ablagerungen am Rande des Elbe-Urstromtales einen natürlichen Sandstrand im Gebiet Sahlenburg/Duhnen bilden – und schließlich den Bereich der hohen Außensände mit vorgelagertem Sandstrand und teilweise mit Dünenbildung – Mellum, Knechtsand und Scharhörn (Abb. 2). Die Insel Neuwerk hat keinen Sandstrand.

Von besonderem Interesse sind hier die Maßnahmen, die zur Erhaltung des Cuxhavener Strandes nach den schweren Schäden durch die Sturmfluten von 1973 und 1976 ergriffen worden sind, und vor allem, inwieweit sie sich bewährt haben. Ferner sollen Untersuchungen aus dem Scharhörner Wattbereich angeführt werden, die dazu dienen, Erkenntnisse über das Verhalten ungeschützter Sandstrände für den aktiven Küstenschutz zu verwenden.

### 2.3.2 Sandhaushalt

Da beide aus dem Küstenbereich zwischen Jade und Elbe interessierenden Bereiche zum Elbmündungsgebiet gehören, kann auf umfangreiche Untersuchungen des Amtes Strom- und Hafenaufbau, Hamburg, in den Jahren 1962 bis 1980 zurückgegriffen werden. Eine zusammenfassende Darstellung aller wichtigen Analysen gibt GÖHREN (1971). Er schreibt u. a.:

*„Die Entwicklung des engeren Gebietes um Scharhörn läßt sich nach den Archivunterlagen nur unvollständig rekonstruieren. Entstehung und Veränderung hochliegender Sandbänke werden in Segelanweisungen mehrfach genannt. Die über MThw aufragende Plate wurde erstmals 1868 kartiert und hat sich seit dieser Zeit um rd. 1,5 km nach Osten verlagert. Die Dünen sind um 1930 mit Hilfe von Buschzäunen und Strandhaferpflanzung im Sandfluggebiet der großen Scharhörner Plate angelegt worden. Infolge Erosion im Nordwesten und natürlicher Dünenbildung im Osten verlagert sich dieser kleine Dünenkomplex ebenfalls stetig in südöstlicher Richtung.“*

Dennoch ist der Materialumsatz im küstennahen Watt wie auch im Gebiet von Scharhörn verhältnismäßig gering. Der Scharhörner wie Cuxhavener Strandbereich sind praktisch nur bei Starkwindlagen Erosionen durch Seegang und Triftstrom ausgesetzt. Dazu heißt es weiter bei GÖHREN (1971):

*„Im Watt setzt der Triftstrom allgemein in Windrichtung; in den Stromrinnen ergibt sich als Sekundäreffekt ein verstärkter Unterstrom entgegen dem Staugefälle, bei den vorherrschenden auflandigen Winden also seewärts gerichtet. Für das Neuwerker Watt und Scharhörnriff sind vor allem die nordwestlich gerichteten Triftströmungen, die bei Südwest- und Westwind entstehen, maßgebend.“*

*Orbital- und Brandungsströmungen sind nicht direkt gemessen worden, ihre Einflüsse auf den resultierenden Transport können daher nur qualitativ beurteilt werden. Mit Ausnahme einiger Regionen im Randwatt und auf den Sandbänken haben Seegang und Brandung keine eigenständige Transportfunktion, sondern nur einen transporterhöhenden Effekt. Die Materialverfrachtung wird durch Gezeiten- und Triftströmungen bestimmt.“*

Zum Schutze des Strandes und der ufernahen Einrichtungen wurden ab Mitte des vorigen

Jahrhunderts an der Cuxhavener Küste Bühnen (i. M. 100 m lang) und Deckwerke errichtet (LUCK, 1970).

Über die Sedimente im Küstennahbereich wie im Scharhörner Watt liegen umfangreiche Arbeiten von LINKE (1969 u. 1970) vor. Speziell mit den Oberflächensedimenten an der Küste hat sich GÖHREN (1975) beschäftigt. Er zeigt, daß das küstennahe Watt vor Cuxhaven ein ausgesprochenes Sandwatt ist. Hohe Mittelsandanteile waren bis in die 1970er Jahre als Folge jährlicher Strandauffüllungen und deren Verfrachtung ins Watt bei Sturmfluten nachweisbar.

Die Größe der Umlagerungen in den betrachteten Gebieten untersuchte REINECK (1975). Er konnte nachweisen, daß an den der Brandung ungeschützt ausgesetzten Böschungen gelegentlich bis häufig hohe Energie wirksam wird, nicht dagegen am Dünenstrand von Scharhörn sowie am Sahlenburger Strand. Die Küste vor Duhnen ist nur häufig schwachwirksamer Energie ausgesetzt.

Detaillierte Untersuchungen im Elbmündungsgebiet zeigen, daß ungeschützte Sandstrände dann als stabil anzusehen sind, wenn sie Neigungen zwischen 1 : 60 und 1 : 100 haben. Üblicherweise bilden sich die Ränder der hohen Platen in dieser Weise aus. Daraus folgt generell, daß Strände desto stabiler sind, je schwächer geneigt sie angelegt werden. So stellte auch CHRISTIANSEN (1976) nach der Analyse von Strandabschnitten vor der deutschen und niederländischen Küste fest:

*„Bei der Ermittlung der Strandneigung in Abhängigkeit von den Parametern Seegang und Korndurchmesser ist der Korndurchmesser offenbar dominierend. Dieser Sachverhalt läßt sich aus der besonderen Beziehung der drei Größen zueinander deuten. Es korrelieren nämlich sowohl der Seegang mit dem mittleren Korndurchmesser als auch beide Größen für sich mit der Strandneigung. Zwischen Seegang und mittlerem Korndurchmesser eines Sandstrandes besteht auf Grund des Kornsortierungsvorganges infolge der Orbital- und Brandungsströmung der Zusammenhang: je größer der Wellenangriff, desto gröber der Strandsand.*

*Zwischen Seegang und Strandneigung bzw. Korngröße und Strandneigung lautet für Sandstrände die Beziehung: je größer der Wellenangriff und somit je gröber der Strandsand, desto steiler die Strandneigung.*

*Die aufgeführten Zusammenhänge erlauben es daher, allein den Parameter mittlerer Korndurchmesser als Einflußgröße für die Strandneigung heranzuziehen.“*

CHRISTIANSEN (1976) zeigt, daß die Angabe von mittleren Neigungen sturmflutgeformter Strände im Gezeitenbereich bei Korngrößen  $d_{50} < 0,20$  mm unsicher wird. Erst für die Fraktion des Mittelsandes kann die gesicherte Annahme getroffen werden, daß im untersuchten Küstenbereich der Nordsee bei Sturmfluten Gleichgewichtsprofile geformt werden, deren Neigungen i. M. nicht flacher als 1 : 60 und nicht steiler als 1 : 30 sind.

## 2.4 Nordseeküste zwischen Elbe und Lister Tief

### 2.4.1 Allgemeines

Der Küstenbereich kann nach der erdgeschichtlichen Entwicklung in die Abschnitte vom Lister Tief bis zur Eider und von dort bis zur Elbe unterteilt werden (Abb. 1). Mit dem Abschmelzen des Eises der letzten Weichseiszeit drang das Meer in das flache Küstenland ein und überflutete es bis zum Geestrand, etwa auf der Linie St. Michaelisdonn-Heide-Husum-Bredstedt. In dem westlich davon gelegenen Küstenraum entstanden die Marschen, die im nordfriesischen Raum schon bald dem Meereseinfluß entzogen wurden, da an der Westseite des heutigen Wattenmeeres nehrungsartige Umlagerungen zwischen Sylt und



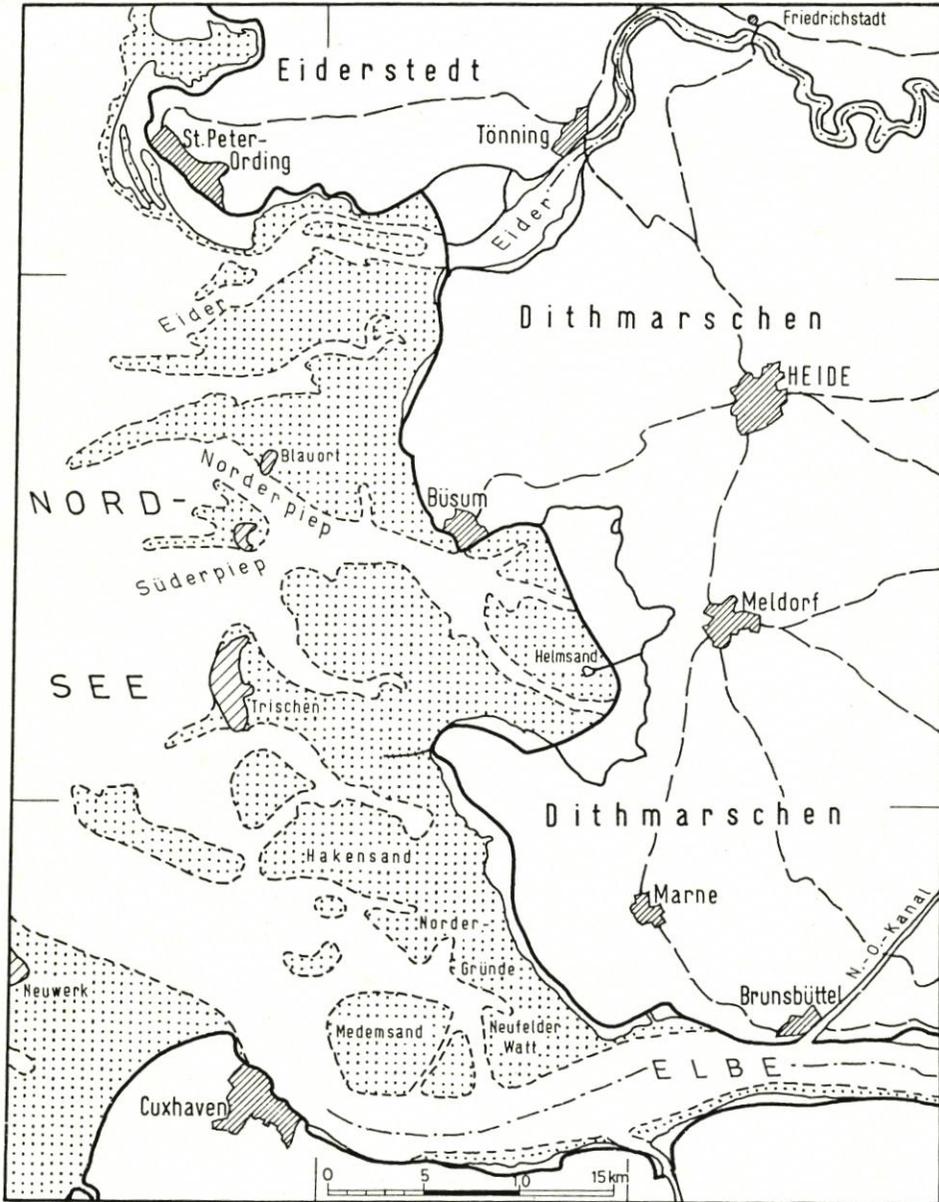


Abb. 4. Die Dithmarscher Küste

der Südwestspitze Eiderstedts entstanden. Hierzu lieferte der Abbruch der hochgelegenen voreiszeitlichen und eiszeitlichen Ablagerungen (Geestinseln) das meiste Material. Die flache Mulde zwischen dem Geestrand auf dem Festland und der Nehrung vermoorte. Nach Süden hin bildete die hochgelegene Eiderstedter Marsch den Abschluß.

Mit der Zerstörung der schützenden Nehrungen drang das Meer erneut in den Küstenraum ein, und es formte sich allmählich das derzeitige Bild.

Von den ursprünglichen Geestinseln Sylt, Föhr und Amrum sind heute Teile vorhanden, an deren Geestkerne mehr oder weniger große Marschgebiete angelagert sind.

Südlich von Sylt bis nach Eiderstedt sind seawärts die Sände Kniepsand, Japsand, Norderoogsand und Süderoogsand vorgelagert (Abb. 3).

Die Oberfläche der nordfriesischen Sände Süderoogsand, Japsand und Norderoogsand liegt bis zu + 2,0 m NN hoch und trägt keine Vegetation. Die nordfriesischen Sände werden nur langsam ostwärts verlagert. Ihre Westseite wird bis zur - 1,50-m-NN-Linie stark erodiert, die - 6,0-m-NN-Linie in diesem Bereich verschiebt sich dagegen seawärts.

In neuerer Zeit wird immer deutlicher, daß das Geschehen an den Sandküsten Schleswig-Holsteins wesentlich besser analysiert werden kann, wenn auch die „Außensände“ in die Betrachtung einbezogen werden.

Im Bereich zwischen Eider und Elbe (Dithmarschen) rückte das Meer in der Entstehungsgeschichte bis zum Geestrand vor. Seewärts fehlten Geestkerne, aus denen Nehrungen hätten aufgebaut werden können. Die Marschbildung begann ohne ihren Schutz am Geestrand und schritt von dort aus langsam westwärts vor. Durch die formenden Kräfte des Meeres entstand in der Dithmarscher Bucht die Hallig Helmsand. Weit vorgelagert sind die Außensände Blauort und Tertius und die Insel Trischen (vgl. Abschn. 2.4.2).

Mit Ausnahme der Westseite der Halbinsel Eiderstedt (vgl. Abschn. 2.4.2) sind an der Festlandküste nennenswerte Sandstrände nicht vorhanden.

Zwischen den Inseln, den Halligen und den Sänden haben sich unter dem Einfluß der Gezeiten Priele und Wattströme ausgebildet, deren Lage sich ständig verändert. Ihr jeweiliger Stromquerschnitt ist in erster Linie vom Wasseraustausch des dazugehörigen Watteinzugsgebietes abhängig (vgl. Abschn. 2.2.1).

#### 2.4.2 Sandhaushalt

An der Westseite der Insel Sylt, und zwar auf dem der Insel vorgelagerten Riff und am Strand, sowie am Westrand der nordfriesischen Außensände treten vor allem bei Stürmen aus Südwest bis Nordwest durch Brandungskräfte Sandverlagerungen auf. Den größten Formänderungen der Insel Sylt sind die Nehrungshaken im Einflußbereich der Wattströme ausgesetzt (Ellenbogen - List mit dem Lister Tief und Landtief, Hörnum - Odde mit Hörnum-Tief). Der Sylter Ostküste sind im allgemeinen hochliegende Watten vorgelagert, so daß Landverluste nur durch höhere Wasserstände, die bei Westwind-Wetterlagen auftreten, verursacht werden.

Vor der Südküste der Insel Föhr liegt ein hohes Watt, der Nordmannsgrund. Uferabbrüche treten vor allem bei hohen Wasserständen und Windrichtungen aus Süd und Südwest auf. Dem Angriff der Brandung sowie der Brandungsströmung folgend, wird gelöstes Material im wesentlichen vom Goting-Kliff, wo der größte Abtrag zu verzeichnen ist, ost- und westwärts verfrachtet.

Der Insel Amrum sind im Westen der Kniepsand und im Osten ein hoher Wattsockel vorgelagert, so daß Sandabtrag nur bei hohen Wasserständen auftritt. Größeren Veränderungen sind die Nehrungshaken im Einflußbereich der großen Wattströme ausgesetzt: im Norden die nehrungsförmige Halbinsel Odde, im Einflußbereich des Hörnum-Tiefs, und im Süden der Nehrungshaken von Wittdün, im Einflußbereich der Norderaue.

Die Morphologie des Meeresbodens seawärts des Nehrungshakens von Wittdün wird durch Sandhaken geprägt, die sich durch Verdriftungen bei Nordwestwinden am südlichen Ende des der Insel vorgelagerten Kniepsandes bilden. Diese Sandhaken wandern in südöstlicher Richtung in den Wattstrom Norderaue und an die Südspitze des Nehrungshakens.

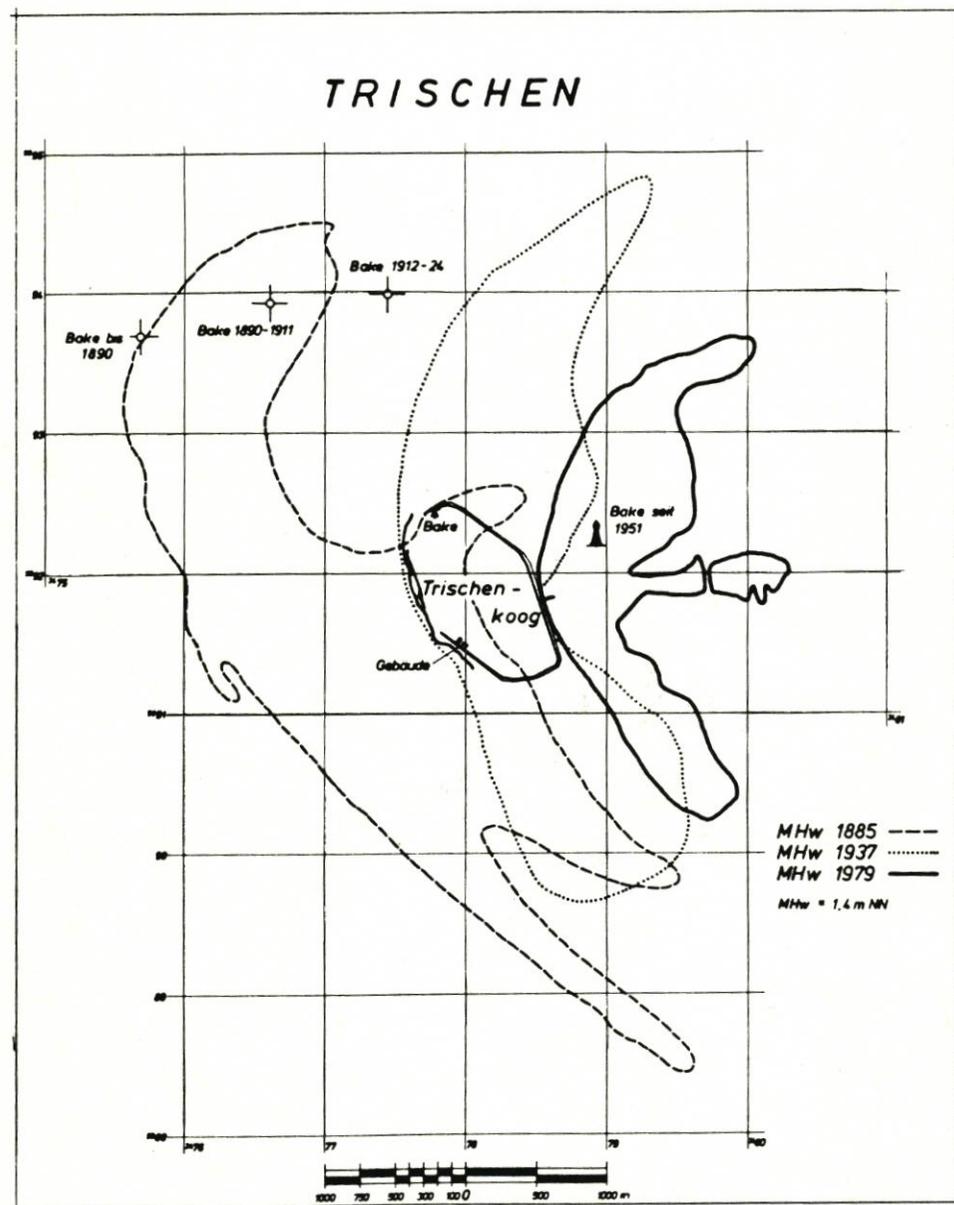


Abb. 5. Veränderungen der Insel Trischen

Vor der Ufermauer von Wittdün ist nach einer Prielbildung in den letzten Jahren infolge Umlagerung der vorgelagerten Sandbänke ein größerer Abtrag zu verzeichnen. An der Ostseite der Insel Amrum treten Abbrüche nur begrenzt auf, ähnlich denen an der Ostseite der Insel Sylt (s. Abschn. 3.2.2, b).

Die Westküste Eiderstedts ist ein gutes Beispiel für die räumliche Gliederung von Außensänden, Strandbereichen und Dünen. Hier hat sich ein natürliches Gleichgewicht hergebildet:

- die Meereszone, in der das sandige Material gelöst und verfrachtet wird,
- die Riffzone, zur Ebbezeit teilweise trockenfallend, über die ein Teil des Materials transportiert wird,
- die Strandzone (Sandbank), als Umlagerungsbereich über MThw heraufreichend, in der der größte Teil des Materials aufgeworfen wird,
- die Vorlandzone als schmaler Streifen, in die einzelne flache Dünenwälle eingestreut sind,
- die Dünenzone, bis zu + 11 m NN aufgeweht, seeseitig vereinzelt bei Sturmweatherlagen Wind- und Wellenkräften ausgesetzt, landseitig als flachere „Graue Düne“ mit eingestreuter Heidevegetation auslaufend.

Im Mündungswinkel zwischen Hever und Eider wird das im nordfriesischen Küstenraum südwärts transportierte Sandmaterial zum Teil aufgefangen.

Als einzige Sandaufschüttung ist *Trischen* (Abb. 5) in flächenhaftem Umfang, in der maximalen Höhe (bis + 5,0 m NN) und bezüglich der reichen Vegetation (Pflanzengesellschaften des Schlickwattes und der Dünen) einer Insel gleichzusetzen. *Trischen* wird ständig ostwärts verlagert, wobei die Substanz im wesentlichen erhalten bleibt.

Der Außensand *Blauort* wird wie *Trischen* im langjährigen Mittel zwischen 30 und 40 m pro Jahr ostwärts verlagert. Der im Winkel zwischen Prielarmlen der Piep im Einfluß der Tideströmungen liegende Außensand *Tertius* pendelt zwar, verlagert sich insgesamt aber kaum in eine bestimmte Richtung. Die Oberfläche beider Sände liegt bis zu + 2 m NN hoch.

## 2.5 Ostseeküste von der Flensburger Förde bis zur Trave

### 2.5.1 Allgemeines

Die Ostseeküste Schleswig-Holsteins verläuft in der Hauptrichtung von Nordwest nach Südost (Abb. 6). Sie liegt somit senkrecht zur schlauchartig von Nordost nach Südwest ausgerichteten westlichen Ostsee und ist daher insbesondere den Angriffen der See bei Winden aus Nord bis Ost ausgesetzt.

Von der Küstenform her kann zwischen der stärker gegliederten Fördenküste im Norden und der weniger stark gegliederten Buchtenküste, südlich der Kieler Förde, unterschieden werden. Für die Beurteilung der Funktion von Schutzwerken bestehen jedoch keine wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Küstenabschnitten.

Neben der starken Gliederung ist der häufige Wechsel zwischen Steilküsten und Flachküsten kennzeichnend für den hier beschriebenen Teil der Ostseeküste:

*Steilküsten* sind durch marine Kräfte angeschnittene Höhenzüge. Sie weisen darauf hin, daß sich die Küste im Abbruch befindet (aktive Kliffs) oder zumindest früher im Abbruch befunden hat (tote Kliffs).

*Flachküsten* treten als Strandwallküsten und strandwallfreie Flachküsten auf. Der erstgenannte Typ überwiegt. Eine solche Küste besteht aus einem parallel zum Ufer verlaufenden Wall aus Sand, Kies und Geröll oberhalb der Uferlinie.

Die Strandwälle werden bei hohen Wasserständen mit starkem Seegang gebildet. Ihre Höhe beträgt 1 bis 3 m über MW. Sie bilden dort, wo keine Deiche vorhanden sind, bis zu bestimmten Wasserständen einen begrenzten Hochwasserschutz. Strandwallfreie Küsten sind nur dort vorhanden, wo wegen der geschützten Lage auch bei Hochwasser keine wesentliche Seegangswirkung eintritt oder rolliges Material nicht vorhanden ist, z. B. an der Schlei.

Größere, zusammenhängende Dünenbereiche kommen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste nur selten vor, z. B. bei Weißenhaus und am Bottsand.

Kleinere, schmale Dünenbereiche werden häufiger angetroffen.

In der meeresgeschichtlichen Entwicklung ist die schleswig-holsteinische Ostseeküste in ihrem heutigen Aufbau und ihrer Form in der letzten Eiszeit (Weichseleiszeit) entstanden. Das Eis hinterließ nach dem Abtauen die derzeitige End- und Grundmoränenlandschaft. Während die Festlandküste weitgehend im Bereich der flachwelligen Grundmoränen liegt, weist die weit nach Osten vorgeschobene Insel Fehmarn den typischen Charakter einer Grundmoränenebene auf.

Kennzeichnend für die Moränenlandschaft ist der stark wechselnde geologische Aufbau. Das völlig unregelmäßige Auftreten von Geschiebelehm und Geschiebemergel als Trümmerschutt der Vereisung, von Sand, Kies und Ton als Schmelzwasserablagerungen des abtauenden Eises und von Ton und kieseligem Feinsand des Eozäns in einzelnen aufgepreßten Schollen ist eine Folge der wechselhaften Bewegungen des Eises und der örtlich und zeitlich unterschiedlichen Abschmelzvorgänge (BRESSAU, 1957; KANNENBERG, 1951). In den Niederungen sind die eiszeitlichen Erscheinungsformen durch alluviale Ablagerungen aus der Nacheiszeit überlagert.

Der unterschiedliche geologische Aufbau ist kennzeichnend für den Küstenbereich der Ostsee. Er gilt zugleich für den submarinen Untergrund der Ostseeküste und ist daher ein wichtiges Merkmal für etwaige Schutzmaßnahmen.

### 2.5.2 Materialhaushalt

Während und nach dem Eindringen des Meeres wurden die vorspringenden Höhenrücken durch marine Kräfte zu Kliffs umgestaltet und abgetragen. Der Abbruch der Kliffs war bei steigendem Meeresspiegel besonders stark. Jedoch sind auch gegenwärtig noch Abbrüche festzustellen, die auf Teilstrecken im langjährigen Mittel bis zu 1,0 m/Jahr und mehr betragen. Sie sind vor allem auf die Wirkung des Seeganges bei erhöhten Wasserständen mit Winden zwischen Nord und Ost zurückzuführen.

Durch klimabedingte und physikalische, aber auch chemische Einwirkungen auf die Steilküste wird dieser Vorgang beschleunigt. Der Abbruch erstreckt sich nicht nur auf die Kliffs, auch der submarine Untergrund im Bereich der „Schorre“ oder „Abrasionsplatte“ wird bis zu einer Wassertiefe von maximal 10 m durch die gleichen Kräfte mehr oder weniger verändert oder abgetragen (MARTHENS, 1927; BRESSAU, 1957; RUCK, 1952).

Wegen der gegliederten Küstenform bewirken auf Teilstrecken auch Winde aus Nord bis West erhebliche Abbrüche, insbesondere, wenn durch Windstau und „Schwappeneffekte“ eine Wasserstandserhöhung eingetreten ist. Auch wenn die Intensität der Brandungskräfte dann wegen der kurzen Wirkwege der Winde nur gering ist, treten durch größere Häufigkeit nicht unbedeutende morphologische Veränderungen auf. Als typische Beispiele gelten der Rückgang der Westküste Fehmarns und die Abbrüche an den Steilufern der Westküste der Halbinsel Oldenburg. Aus letzteren bauen sich Stein- und Graswarder als Nehrung vor Heiligenhafen auf.

Meeresströmungen verursachen an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste keine wesentlichen morphologischen Veränderungen. Nach Untersuchungen von DIETRICH (1952) sind in der westlichen Ostsee morphologisch wirksame Wasserbewegungen allenfalls die durch Windstau hervorgerufenen Ausgleichsströmungen. Durch sie kann besonders in den Buchten und Förden, wo derartige Strömungen auftreten, Material bewegt werden. Nur in Ausnahmefällen werden sie jedoch selbst Bodenerosion hervorrufen. Zumeist liegt ihre Wirkung darin, daß sie anderweitig gelöstes Material transportieren.



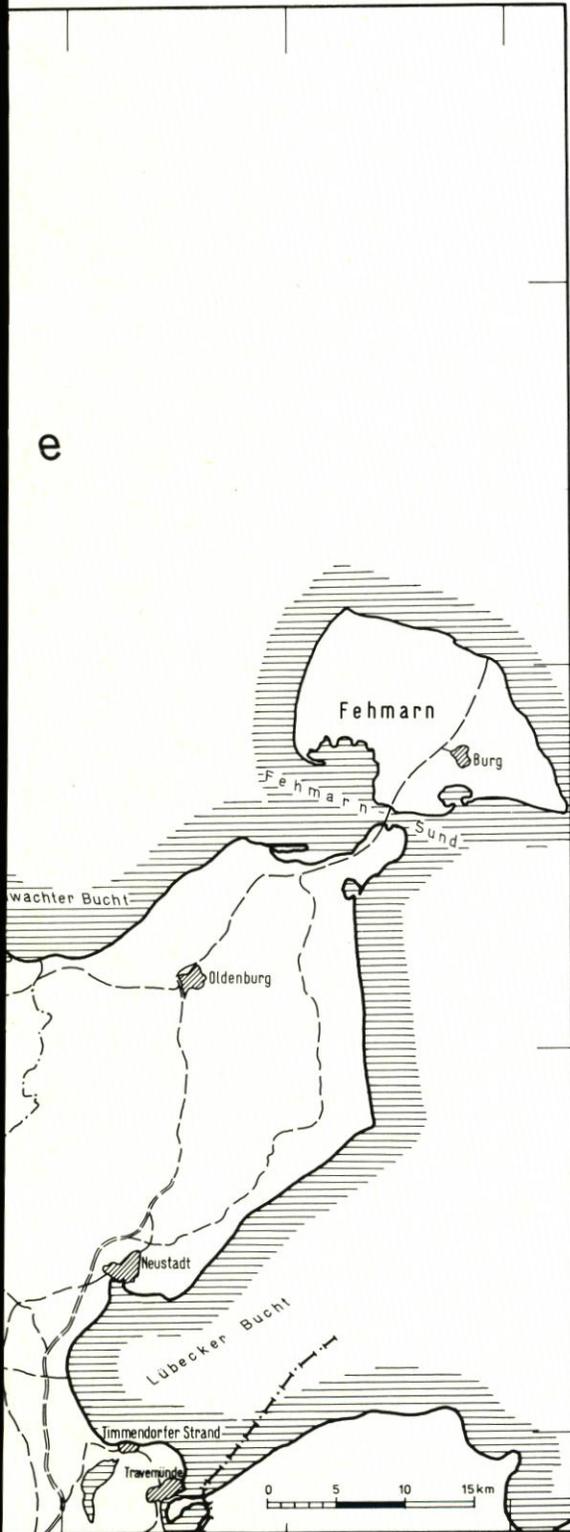


Abb. 6. Die Ostseeküste

Daneben können örtlich begrenzt andere Strömungen auftreten, die nicht ohne Einfluß auf die Gestalt der Küste sind. Als Beispiel hierfür kann die Travemündung gelten, wo sich der Oberwasserabfluß trotz des nur geringen Tidehubes der westlichen Ostsee mit den durch Trichterwirkung verstärkten Gezeitenströmungen überlagert (DIETRICH, 1952).

Das von den Kliffs und vom Unterwasserstrand abgetragene Material setzt sich je nach dem geologischen Aufbau der Abbruchküste zu unterschiedlichen Anteilen aus bindigem und rolligem Material zusammen. Das abbrechende Material wird in der Brandung aufgearbeitet und durch die Brandungsströmung unmittelbar am Strand und auf den der Küste vorgelagerten Riffen verdriftet. Der Hauptanteil der Materialfracht ist auf den Riffen festzustellen. Für die Beurteilung von Küstenschutzmaßnahmen ist die Strandverdriftung zu beachten.

Die Riffe bauen sich als „Transportbänder der küstenparallelen Sandwanderung“ vor den aktiven Kliffs aus dem Abbruchmaterial auf und treten in der Regel seitlich der Abbruchstrecken deutlich in Erscheinung. Sie sind vor den Innenküsten (Buchten) vielfach in mehrfacher Staffelung – im Mittel zwei bis drei Riffe – und vor den Außenküsten meist nur einfach vorhanden. Sie bilden sich zumeist bei Wassertiefen zwischen zwei und vier m und tiefer. Das innere Riff hat in der Regel einen Uferabstand von 50 bis 100 m, das äußere kann, je nach Anzahl der vorhandenen Riffe, bis zu 500 m vom Ufer entfernt sein. Je geringer der Strand geneigt ist, um so mehr sind die Voraussetzungen für das Entstehen mehrerer Riffe gegeben. Die meisten ragen über die 2-m-Tiefenlinie auf. Die Mächtigkeit der Sandauflagerungen beträgt in der Regel weniger als zwei m; zumeist handelt es sich nur um einen dünnen Sandschleier (KANNENBERG, 1951).

Der Bereich der eigentlichen Materialverfrachtung liegt im allgemeinen weder im Abtrag noch im Anwachs, sondern weist eine sich ausgleichende Materialbilanz auf.

In Richtung der resultierenden Transportkraft schließt sich an die Abtrags- und die Durchwanderungszone die Ablagerungs- bzw. Anlandungszone an. Voraussetzung für Materialablagerungen ist die Abnahme der den Materialtransport bewirkenden Kräfte.

Die bindigen Bestandteile werden in der Regel als Schwebstoffe über größere Entfernungen verfrachtet und gehen zumeist durch ablandige Strömungen dem engeren Küstenbereich verloren. Die rolligen Anteile werden bis zur Wassertiefe von etwa vier bis fünf m durch Brandungsströme küstenparallel verlagert. Je nach den örtlichen Gegebenheiten kommt es dann zur Bildung von Sandbänken, Strandwällen, Haken, Nehrungen und Höftländern (KANNENBERG, 1951; MARTENS, 1927; BRESSAU, 1957). Dabei nimmt die Korngröße mit zunehmender Entfernung vom Abtragungsort ab. Größere Steine bleiben an Ort und Stelle liegen und ergeben den Blockstrand (OTTO, 1952).

### 3. Längswerke zur Sicherung von Dünen, Kliffs und Strandwällen

#### 3.1 Einführung

Zum Schutz von Dünen, Kliffs und Strandwällen sind vor allem Deckwerke und Ufermauern in geschlossener Bauweise errichtet worden. Derartige Schutzwerke lassen sich bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen.

Im Deckwerksbau wurden die verschiedensten Formen entwickelt. Als steile Schutzmauern beispielsweise das Norderneyer S-Profil sowie das Borkumer und das Juister Profil. In

neuerer Zeit haben Erfahrungen und Modellversuche dazu geführt, von den steilen Profilen abzugehen und flach geböschte, möglichst rauhe Deckwerke zu bauen (ZITSCHER, 1955).

Um die Dünen gegen starke Brandung zu schützen, waren durchlässige Längswerke in Form von Pfahlwerken, z. B. auf Borkum, Norderney und Baltrum, errichtet worden. Dadurch wurden die Wellen vor ihrem Auftreffen auf die Randdünen gebrochen.

Längswerke aus Formkörpern, wie z. B. Tetrapodenwerke, sind eine Fortentwicklung der durchlässigen Bauweisen. Durch die besondere Form der Bauelemente wird ein Durchschwingen der Wellen weitgehend verhindert. Derartige Längswerke wirken je nach ihrem Abstand von den zu schützenden Dünen oder Kliffs auch als Wellenbrecher.

In nachfolgenden Abschnitten werden für verschiedene Strandtypen Beispiele aus den Küstenbereichen zwischen Ems und Elbe (a), Eider und Lister Tief (b) sowie Flensburger Förde und Trave (c) behandelt.

### 3.2 Geschlossene Bauweisen (Deckwerke)

#### 3.2.1 Strände mit negativer Sandbilanz

a) Durch die Verlagerung des Norderneyer Seegats nach Osten lag der Nordweststrand auf Norderney stark im Abbruch (THILO, 1953; BACKHAUS, 1939/40). Im Jahre 1957/58 kam es zum Bau eines 975 m langen Dünendeckwerkes. Seine Form ist als Norderneyer S-Profil bekannt geworden (FÜLSCHER, 1905) (Abb. 7). Davor mußten Bühnen angeordnet werden (Abb. 8), weil das Bauwerk durch das heranwandernde Seegat und den zunehmenden Strandabtrag gefährdet wurde. Dennoch wurden die Fußpfahlreihe des Deckwerkes freigelegt und unter der Vorlage Sand ausgespült, was zu Sackungen führte. Im Verlauf von Ausbau und Unterhaltungen wurden die Vorlagen bis auf die neue Strandlage hinunter mit einer Fußspundwand verlängert.

Als diese Arbeiten während des Zweiten Weltkrieges weitgehend unterblieben, stellten sich erhebliche Schäden ein, die später beseitigt werden mußten. Die erforderlichen Investitionen gaben Anlaß, die grundlegende Verbesserung und Verbilligung des Insel-schutzes auf Norderney zu untersuchen, was 1951/52 aufgrund einer Empfehlung der „Arbeitsgruppe Norderney“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee zur ersten Strandauffüllung führte (KRAMER, 1958/1959).

Aus dieser und weiteren Strandauffüllungen in den Jahren 1967 und 1978 wurde die Erkenntnis gewonnen, daß die Insel Norderney allein mit Deckwerken und Bühnen nicht gehalten werden kann, daß aber eine wirtschaftliche Unterhaltung dieser Bauwerke und damit ihre Sicherung durch regelmäßige Strandauffüllungen erreichbar ist.

Auf 6,5 km Sandstrand verteilen sich in Cuxhaven insgesamt 61 Bühnen von je etwa 100 m Länge. Das hinter dem Sandstrand liegende Deckwerk ist sehr unterschiedlich ausgebildet. Zum Schutze der Bühnen und der Deckwerke wurden ab 1950 jährlich rd. 5000 m<sup>3</sup> Sand aus der nahen Geest an den Strand gebracht (LUCK, 1970). Dies entsprach der jährlichen Erosionsrate. Als der Strand nach den Sturmfluten vom Herbst 1973 weit stärker in Mitleidenschaft gezogen war, wurden im Jahre 1974 auf 3,8 km Länge rd. 220 000 m<sup>3</sup> Sand aus dem Watt vorgespült, nach den Sturmfluten vom Januar 1976 erneut 200 000 m<sup>3</sup>. Schon durch die erste Vorspülung wurde der Strand wesentlich stabiler, weil ein flacheres Profil hergestellt werden konnte und Bühnen und Deckwerk so weit von Sand überdeckt waren, daß sie nicht mehr als Störkörper wirken konnten (CHRISTIANSEN, 1976).

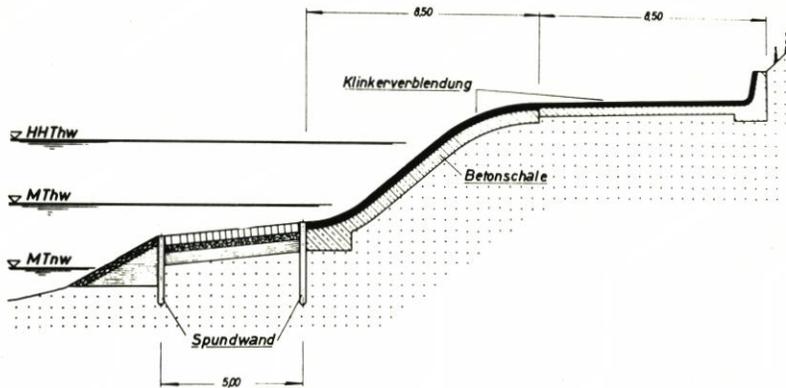


Abb. 7. Querschnitt des S-Profiles auf Norderney

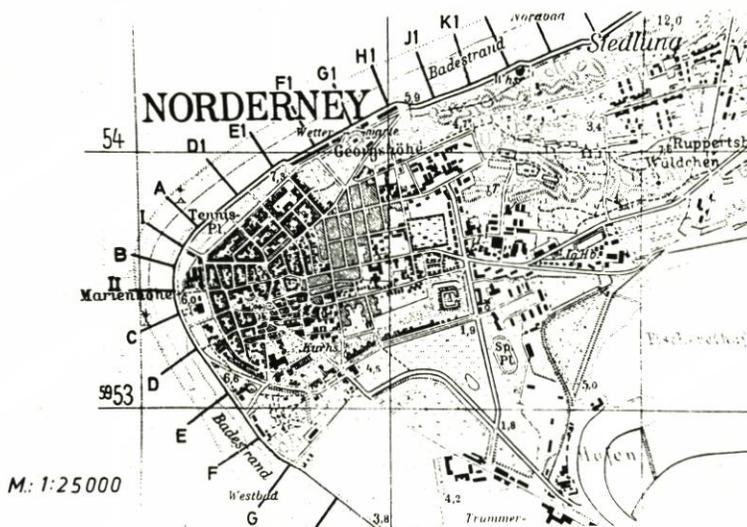


Abb. 8. Inselschutzwerke auf Norderney

b) An der vor Westerland/Sylt (Abb. 9) im Jahre 1907 errichteten Schutzmauer zeigte sich bald die Wirkung der Lee-Erosion, so daß bereits 1912 eine Verlängerung nötig wurde. Der fortschreitende Abtrag des Strandes und Vorstrandes sowie die Strandumlagerungen bei Sturmfluten vor der Ufermauer machten von 1960 bis 1970 die Verstärkung ihres Fußes erforderlich, z. B. durch einen Spundwandkasten mit asphaltvergossenen Granitblöcken oder mit Basaltpflaster durch eine Steinasphaltvorlage (ZITSCHER, 1967). Diese sackte durch weiteren Strandverlust während mehrerer Sturmfluten teilweise ab und ist mehrfach wieder aufgehöhrt worden. Ein länger anhaltender Erfolg konnte 1969 durch eine Vorschüttung aus Granitsteinen erreicht werden (Abb. 10). Diese Form der Ufersicherung kommt einer Verfelsung gleich (GRIPP, 1966).

In den Jahren 1936 bis 1938 ist ein 1 : 4 geneigtes Basaltdeckwerk gebaut worden. Dieses wurde 1946 verlängert, als ein Teil der zerstörten Ufermauer durch ein Deckwerk aus



Abb. 9. Uferschutzmauer vor Westerland/Sylt



Abb. 10. Schutz der Ufermauer Westerland/Sylt durch Tetrapoden und eine Steinvorschüttung

Betonplatten ersetzt wurde (Abb. 11). Die vor Westerland/Sylt befindlichen Längswerke sind 1954 letztmalig verlängert worden, und zwar durch Basalt in Form eines Rauhdeckwerks, um die auflaufenden Wellen nachhaltig zu bremsen (ZITSCHER, 1955).

Ein weiteres Beispiel ist der südwestliche Teil des Basaltdeckwerks am „Ellenbogen“ der Insel Sylt, das zu Beginn des Zweiten Weltkrieges in gleicher Bauweise wie vor Westerland errichtet wurde. Durch den laufenden Abtrag des Strandes, sowohl durch die Einwirkung der Brandung als auch der Strömungen in dem unmittelbar vor dem Deckwerk liegenden „Landtief“, wurde schon bald der Deckwerksfuß freigelegt. Die ursprünglich vorgesehenen



Abb. 11. Basaltdeckwerk vor Westerland/Sylt

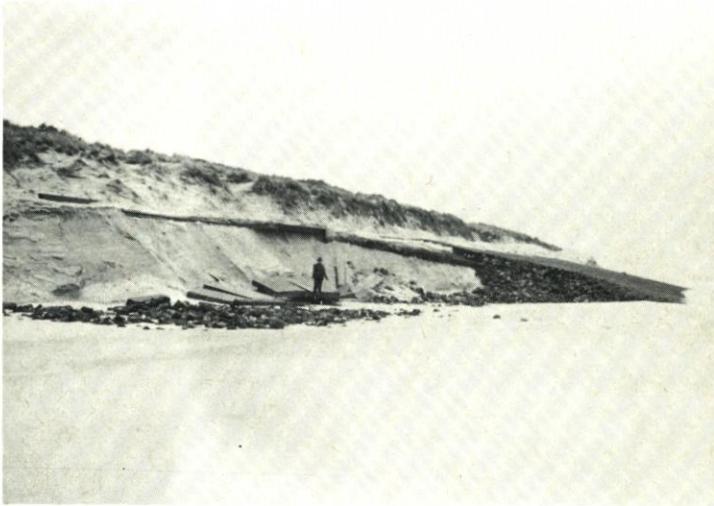


Abb. 11a. Basaltdeckwerk vor dem Ellenbogen/Sylt (1955)

Unterwasserbuhnen konnten aus Kostengründen nicht errichtet werden, so daß der Verfall des Deckwerks begann. Die seeseitige Stahlspundwand wurde unterspült, und das Deckwerk verfiel gänzlich (Abb. 11a).

Weitere Beispiele für eine „Verfelsung der Küste“ sind das im Jahre 1968 erstellte Tetrapodenwerk vor Hörnum/Sylt (Abb. 12) und das im Jahre 1937 an der Südwestecke der Insel Föhr vor Utersum errichtete Basaltdeckwerk. An solchen Deckwerken wird deutlich, daß sie bei negativer Sandbilanz ohne stranderhaltende Maßnahmen nicht mit vertretbarem Aufwand zu erhalten sind.

c) Die Ufermauer vor Marienleuchte auf Fehmarn schützt im Nordosten der Insel auf 200

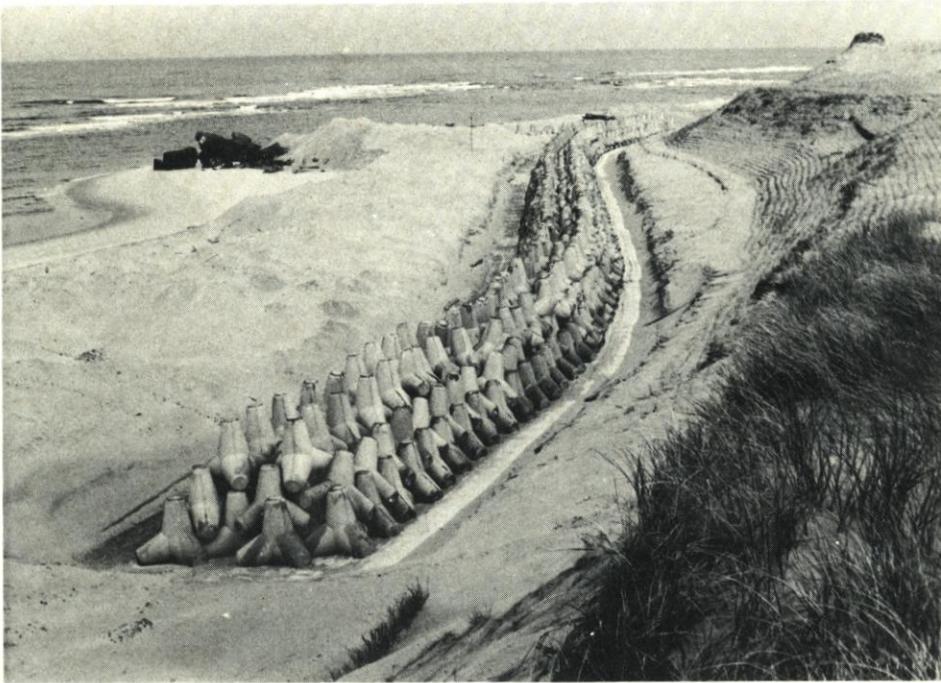


Abb. 12. Einbau eines Tetrapodenschutzwertes vor Hörnum/Sylt (5/1968)



Abb. 13. Ufermauer vor Marienleuchte auf Fehmarn

m Länge die Steilküste vor Abbrüchen (Abb. 13). Das Bauwerk ist eine Gewichtsmauer aus Beton mit Verblendung aus Natursteinen. Um das in einem Abstand von nur wenigen Metern vor der Uferlinie errichtete Bauwerk vor Unterspülung zu sichern, wurde ein etwa fünf Meter breiter Streifen vor der Mauer durch eine schwere Vorlage aus Setzsteinen vor Erosion geschützt (HEISER, 1927).

Die Ufermauer hat bis heute den Abbruch der Steilküste unterbunden. Durch die Erosion des Unterwasserstrandes hat sich die Wassertiefe unmittelbar vor der Mauer immer mehr vergrößert. Das Bauwerk konnte nur erhalten werden, indem der Fuß zusätzlich durch schwere Findlinge geschützt wurde. Die Steinschüttung muß infolge der Erosion und wegen der ungenügenden Unterlage von Zeit zu Zeit ergänzt werden.

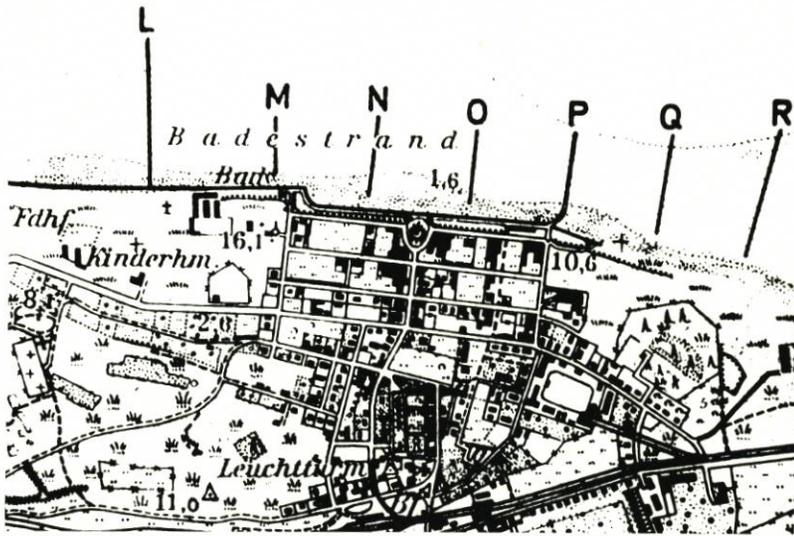


Abb. 14. Inselfschutzwerte auf Wangerooge



Abb. 14a. Nordmauer auf Wangerooge

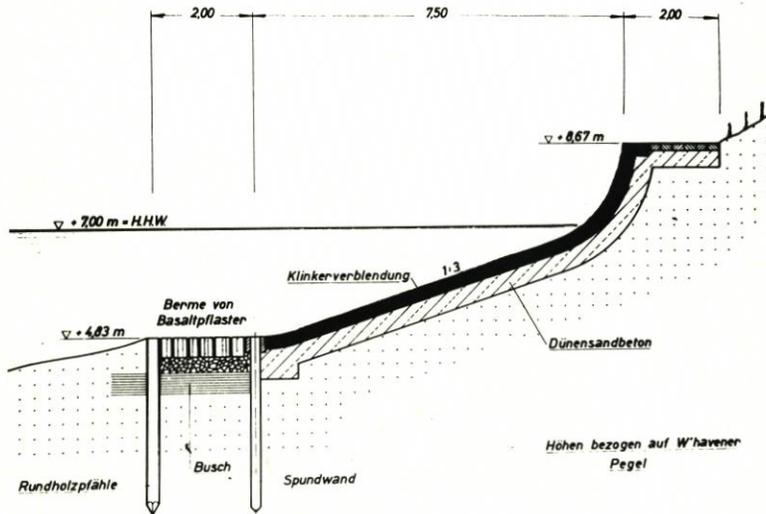


Abb. 14b. Querschnitt der Nordmauer auf Wangerooge

### 3.2.2 Strände mit ausgeglichener Sandbilanz

a) Das 500 m lange Deckwerk (Oldenburger Mauer) vor dem Ort Wangerooge (Abb. 14) wurde 1899 erbaut, weil die Randdünen in diesem Bereich abbrechen und dadurch Bauplätze für zwei größere Hotels gefährdet waren (LÜDERS/WILLECKE, 1951). An den Fuß der „Oldenburger Mauer“, der 50 cm über MThw liegt, schließt sich ein 1 : 2,25 geneigtes schräges Deckwerk aus Dünen sandbeton mit Klinkerverblendung an (Abb. 14a).

Vor der „Oldenburger Mauer“ lag seit der Erbauung ein durch Bühnen geschützter Strand, dessen Höhenlage im wesentlichen zwischen dem Fuß des Deckwerks und seiner Oberkante (Wandelbahn) schwankte. Die Fußspundwand stand zeitweilig für kurze Zeit frei, es bestand aber keine Gefahr für die Standsicherheit der Strandschutzmauer.

b) Vor Wittdün, am südöstlichen Nehrungshaken der Insel Amrum (Abb. 3), ist in den Jahren von 1905 bis 1915 eine Ufermauer gebaut worden. Wegen des in Abschn. 2.3.2 beschriebenen Wechselspiels des Sandhaushaltes hat sich die Ufermauer nur teilweise bewährt: In Zeiten mit negativer Sandbilanz gerät die Mauer schnell in Gefahr. Aus diesem Grunde mußte ein knapp 400 m langes Stück der Mauer schon sehr bald durch eine neue Mauer vor der alten gesichert werden. Durch den insgesamt ausgeglichenen Sandhaushalt sind die Verhältnisse nicht so extrem wie vor Westerland/Sylt. Es zeigt sich aber auch hier deutlich, daß die Reflexion der Brandungsenergie an einer steilen Wand zu einer verstärkten Ausräumung und Vertiefung des Strandes vor der Wand führt. So ist in den letzten Jahren der Strand stetig, wenn auch sehr langsam, vor der Mauer zurückgegangen. Die Kette der schweren Sturmfluten am Ende des Jahres 1973 hat die Ufermauer stark in Mitleidenschaft gezogen und die Fußsicherung so weit freigelegt, daß eine Verstärkung und Instandsetzung unumgänglich waren. Im Sommer 1974 wurde die Ufermauer durch ein schräges Deckwerk in schwerer Pflasterung verstärkt (ZITSCHER, 1980). Das schräge Deckwerk wird die Reflexion der Wellenenergie weitgehend abbauen, und es bietet somit die Gewähr, daß der vorzuspülende Sand über längere Zeitabschnitte dem Küstenschutz dient.

c) Vor Sierksdorf/Ostsee ist in den Jahren 1960/62 ein Deckwerk als erster Teil der

Hochwasserschutzanlagen für die Bädergemeinden in der Lübecker Bucht gebaut worden. Vor diesem Küstenabschnitt wird das an der nördlich anschließenden Steilküste abbrechende Material transportiert, so daß – von örtlichen Störungen abgesehen – dieser Küstenabschnitt daher langfristig als ausgeglichen angesehen werden kann. Das Sierksdorfer Deckwerk wurde als Kombination aus Betonformsteinen und Setzpack mit Asphaltverguß gebaut. Einzelheiten der konstruktiven Ausbildung vermittelt Abb. 15.

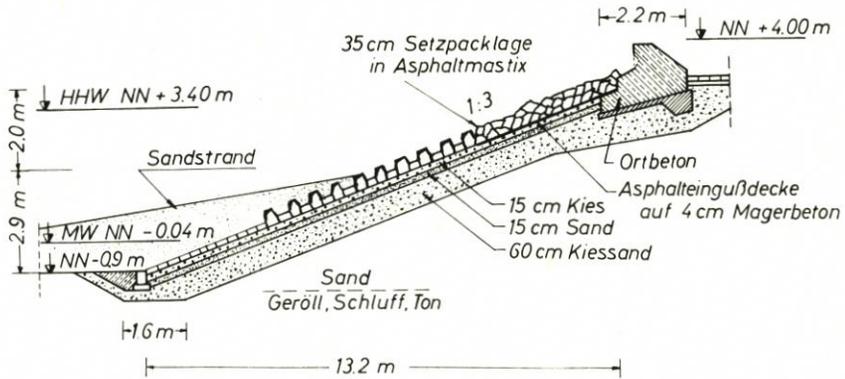


Abb. 15. Deckwerk Sierksdorf, Lübecker Bucht

### 3.2.3 Strände mit positiver Sandbilanz

a) Nach der Jahrhundertwende traten auf der Insel Juist (Abb. 16) starke Strand- und Dünenverluste unmittelbar vor dem Ort auf (s. Abschn. 4.2.3a und THILO, 1953). Zur Abwendung der Gefahr wurde ein 2450 m langes Deckwerk mit 14 Buhnen geplant. Als die Bauarbeiten 1913 begannen, entwickelte sich die Sandbilanz im westlichen Abbruchbereich wieder positiv, die Aufsandung breitete sich nach Osten aus und behinderte zunehmend den

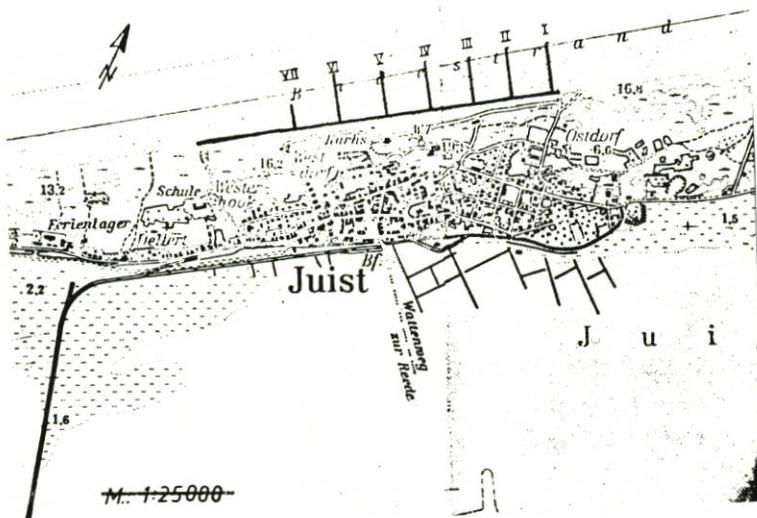


Abb. 16. Inselfschutzwerte auf Juist

Bau der Schutzwerke, so daß 1920 die Arbeiten eingestellt werden mußten. Durch diese Entwicklung bedingt, erhielt das Deckwerk nur eine Länge von 1400 m mit sieben Bühnen.

Während alle bis dahin auf den Ostfriesischen Inseln errichteten Deckwerke als massive Bedeckung des seeseitigen Randdünenhanges zu werten sind, entstand auf Juist eine Mauer aus Beton mit Klinkerverblendung. Diesem „Juister Profil“ wurde gegenüber den bis dahin

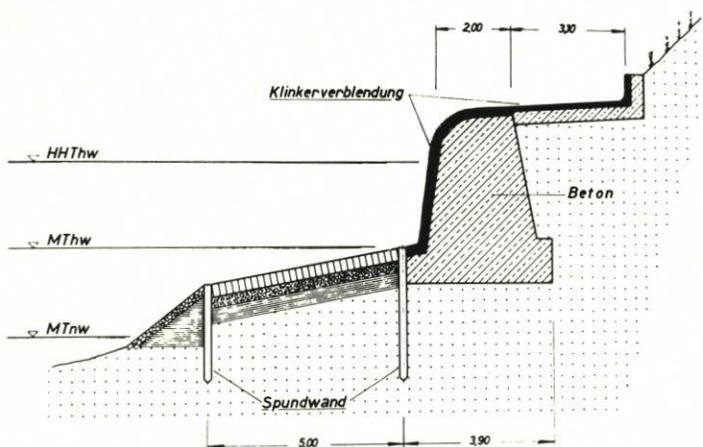


Abb. 16a. Querschnitt des Deckwerks auf Juist

ausgeführten Deckwerken der Vorteil zugeschrieben, seine Standsicherheit zu bewahren, wenn es einmal hinterspült werden würde (Abb. 16a).

b) Während der Ellenbogen der Insel Sylt im Westen erodiert wird, verlagert sich dessen nordöstlicher Teil bei Anlandung ostwärts, wodurch in diesem Bereich das vorhandene Deckwerk von Dünen überlagert wird. Bei einer weiteren Umformung des Ellenbogens besteht die Möglichkeit, daß das Deckwerk späterhin wieder freigelegt wird.

c) Die mit Klinkern verblendete und am seeseitigen Fußpunkt ausgerundete Strandmauer (Strandpromenade) in Travemünde ist 1898 gebaut worden. Anlandungen haben sie bisher stets gut geschützt.

### 3.3 Offene Bauweisen

#### 3.3.1 Pfahlwerke

Die ersten Längswerke in durchlässiger Bauweise sind im Bereich der Ostfriesischen Inseln in den Jahren 1874 bis 1877 auf Norderney gebaut worden, anschließend an das erste im Jahre 1857/58 erbaute Deckwerk (vgl. Abschn. 3.2.1a) nach starkem Dünenabbruch. Die Seeseite war durch eine Steinböschung gesichert, deren Unterbettung aus Faschinen und Betonschotter bestand.

Das Pfahlwerk brach zwar die anlaufenden Wellen, konnte aber ihr Durchschwingen durch die Zwischenräume nicht verhindern. Obwohl die Energie der anlaufenden Wellen wesentlich geschwächt wurde, war das Wasser hinter dem Werk noch stark bewegt. Bei hohen Sturmfluten hatte das Bauwerk wegen zu geringer Höhe keine nennenswerte Wirkung. Sehr ungünstig machte sich dadurch eine zwischen Pfahlwerk und Randdüne auftretende Längs-

strömung bemerkbar. Sie verursachte beträchtliche Abbrüche an der Randdüne und Sandverluste auf dem Strand. Das Pfahlwerk bot nicht den von ihm erwarteten Schutz.

Wegen der großen Wellenkräfte unterlag das Werk starken Beanspruchungen, denen es wegen seiner Holzbauweise nicht gewachsen war. Deshalb traten, abgesehen von umfangreichen Unterhaltungsarbeiten, mehrfach größere Schäden auf, so daß nach 20 Jahren das Pfahlwerk aufgegeben und durch ein Deckwerk mit dem „Norderneyer S-Profil“ ersetzt werden mußte.

Für durchlässige Längswerke sind beständige Baumaterialien zu verwenden. Sie müssen eine ausreichende Höhe und Standfestigkeit haben. Das Durchschwingen von Wellen sowie Längsströmungen hinter einem durchlässigen Längswerk sind zu unterbinden.

### 3.3.2 Formkörperwerke

Vor Westerland wurde zur Abminderung des Wellenschlages auf die Ufermauer erstmals 1960/61 auf der Basaltsteinvorlage eine Tetrapodensicherung erstellt. Seit dieser Zeit sind weitere Tetrapodenwälle zum Schutze des Fußes der Randdüne und des Kliffs an der Westseite der Insel Sylt entstanden (Abb. 10). Zunächst wurde eine Bauweise gewählt, bei der der Fuß der Tetrapoden durch eine Steinaspaltunterlage mit seeseitiger Schürze vor Unterspülungen geschützt wird (ZITSCHER, 1967).

Ein Tetrapodenwerk am nördlichen Ende der Westerländer Uferschutzanlagen hat eine Nylongewebematte als Unterlage erhalten, deren seeseitige und landseitige Schürze mit sandgefüllten Taschen beschwert ist (ZITSCHER, 1971).

### 3.3.3 Buschbauweisen

Buschbauweisen finden sich an sandigen Küsten nur in Form von Faschinenabdeckungen an den Enden bestehender Deckwerke, z. B. am östlichen Ende des Basaltdeckwerkes vor Utersum, an der Südwestecke der Insel Föhr.

## 3.4 Wellenbrecher

Zu den Wellenbrechern können die Tetrapodenwerke an der Westseite der Insel Sylt gezählt werden. Sie sind dort zunächst in funktioneller und konstruktiver Hinsicht als Deckwerkersatz entwickelt worden. Das später (1965) vor Hörnum/Sylt (Abb. 12) gebaute Tetrapodenwerk ist in dieser Hinsicht als Wellenbrecher anzusehen.

Zwischen den Bauwerken und dem Dünen- bzw. Kliffuß kommt es bei hohen Wasserständen zu Turbulenzen und Strömungen, die einen – wenn auch geringen – Abtrag der Düne bzw. des Kliffs bewirken. Bei extrem hohen Wasserständen, die den Strand vor dem Bauwerk ausräumen, werden eine Zerstörung der Fußsicherung und ein Absacken der Tetrapoden in Kauf genommen. Die ausreichende Funktion als Wellenbrecher soll dann durch Nachpacken von Tetrapoden wiederhergestellt werden.

Der erste Wellenbrecher an der Ostseeküste entstand 1927/28 an der Übergangsstelle zwischen Steil- und Flachküste am südlichen Ausläufer der Brodtener Steilküste vor Travemünde. Der nach seinem Erbauer genannte „Söhrmandamm“ erhielt einen Abstand von 25

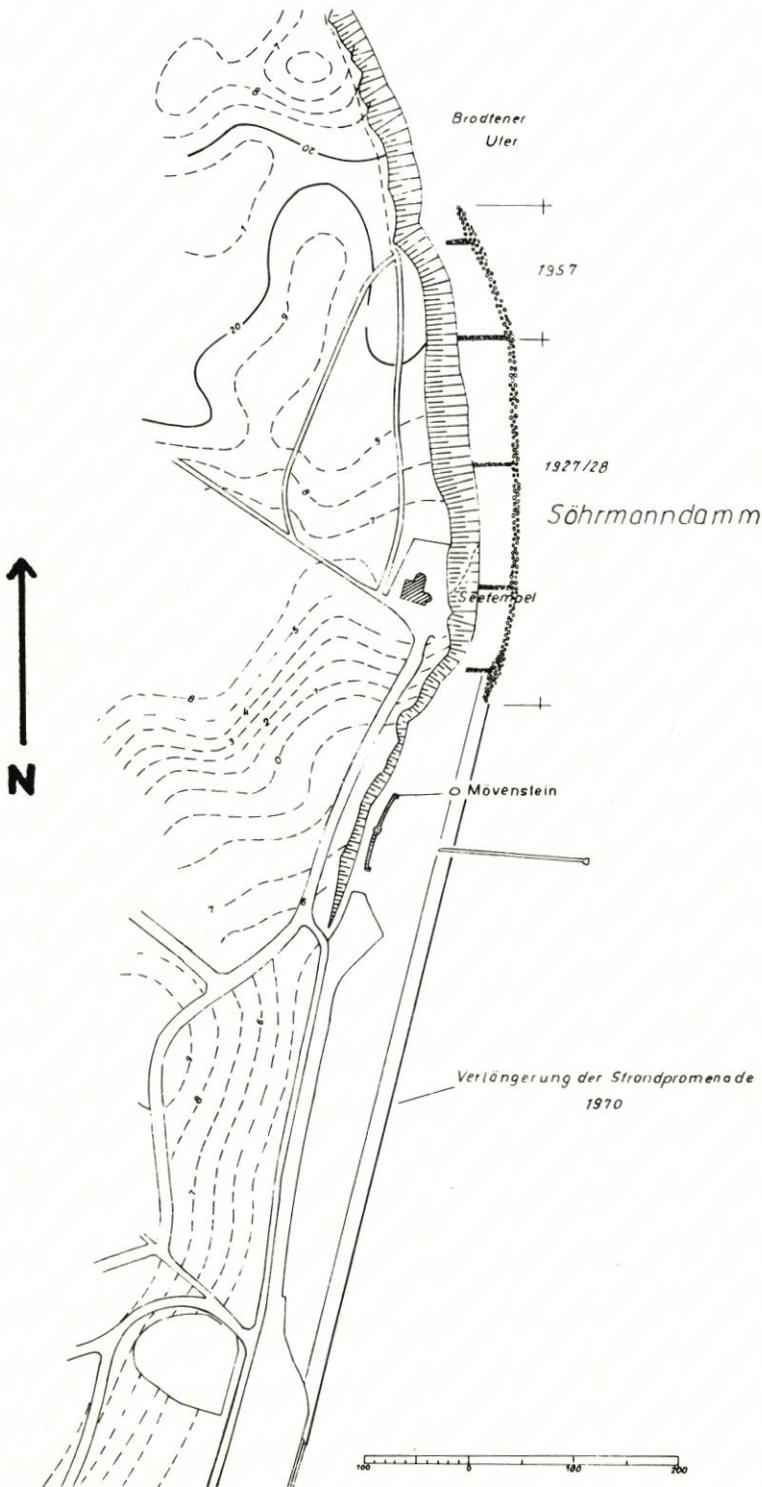


Abb. 17. Lageplan des Söhrmandammes vor dem Brodtener Ufer



Zugleich sind Querriegel zwischen Wellenbrecher und Steilküste eingebaut worden (Abb. 19), um bei Hochwasser aufgetretene Längsströmungen zu unterbinden. Nach dem Bau des Wellenbrechers ist zwischen diesem und der Steilküste langfristig ein stabiler Strand entstanden; Ausspülungen traten nur vorübergehend durch Längsströmungen bei Hochwasser ein. Heute ist die im Schutz des Wellenbrechers gelegene Steilküste weitgehend begrünt, ein Zeichen dafür, daß ein Abbruch nicht mehr stattfindet. Am südlichen Ende des Söhrmann-dammes ist Lee-Erosion zu beobachten.

Ein weiterer Wellenbrecher wurde in den Jahren 1958/59 vor dem östlichen Ende des Landesschutzdeiches des Deich- und Entwässerungsverbandes Probstei, an der Anschlußstelle des Sommerdeiches „Schmoel“, errichtet (Abb. 6). Durch den Wellenbrecher sollten die Wellenkräfte vor dem dort nahezu scharliegenden Seedeich gebrochen und ein weiterer durch die Brandung hervorgerufener Sandabtrag vor dem Deich verhindert werden. Das Bauwerk ist rd. 400 m lang und wurde bei einer Wassertiefe von etwa 2 m aus Ostseefindlingen auf einer Unterlage aus Faschinenmatten geschüttet (Abb. 20). Die Kronenhöhe liegt auf NN + 0,50 m, die seeseitige Böschungsneigung beträgt 1 : 3, die landseitige 1 : 2.

Vor der Probstei ist ein resultierender Sandtransport von Ost nach West zu verzeichnen. Die Materialbilanz war im Bereich des Wellenbrechers vor seiner Errichtung negativ, wenn auch nur in geringem Umfang. Als Folge der Unterbrechung der Brandungsströmung haben sich landseits des Wellenbrechers größere Sandmengen abgelagert. Dabei hat sich die hinter uferparallelen Wellenbrechern typische Ablagerungsform herausgebildet (MAGENS, 1958). An beiden Enden des im Schutz des Wellenbrechers liegenden Anlandungsbereichs ist Lee-Erosion festzustellen, so daß der Deichfuß durch Findlinge gegen weiteren Sandverlust geschützt werden mußte.



Abb. 20. Wellenbrecher vor Schmoel bei Schönberg/Ostsee

### 3.5 Zusammenfassung und Kritik

Durch den Bau von Längswerken ist es an allen drei hier betrachteten Küstenabschnitten gelungen, Dünen, Kliffs und Strandwälle auf Teilstrecken vor Abbrüchen durch Seegangskräfte zu schützen.

Die Beispiele zeigen, daß Ufermauern und Deckwerke auf jeden Fall dort einen wirksamen Schutz der Küste gegen die Erosion durch *S t u r m f l u t w i r k u n g e n* bilden können, wo positive oder zumindest ausgeglichene Sandbilanz zu verzeichnen ist. Voraussetzung ist dabei eine ausreichende Bemessung der Längswerke gegen Wellenkräfte.

Vor Längswerken bilden sich starke Längsströmungen aus, weshalb sie eine ausreichende Fußsicherung erhalten müssen. Sofern die Sandbilanz negativ ist, muß der vor dem Deckwerk liegende Strand durch Buhnen gesichert werden, weil sonst das Deckwerk gefährdet wird. Wirtschaftlicher kann es ggf. sein, den Strand durch künstliche Sandzufuhr (vgl. Abschn. 5.) zu erhalten.

Ebenso wichtig wie eine ausreichende Fußsicherung ist der obere Deckwerksabschluß eines Längswerkes. Er muß so gestaltet sein, daß überschlagendes Wasser keine Ausspülungen, die das Deckwerk gefährden, verursachen kann.

*W e l l e n b r e c h e r* in leichter Bauweise und mit einer größeren Durchlässigkeit haben sich konstruktiv und funktionell nicht bewährt. Die Tetrapodenbauweise ist nach den bisher vorliegenden Erfahrungen geeignet, Steilufer und Dünen zu schützen. Dabei ist funktionell ein rückwärtiger Bereich in doppelter Hinsicht beteiligt, da die Uferlinie infolge Erosion bei hohen Wasserständen mit Längsströmung und infolge Sandstäubung bei Wind beeinflusst bleibt. Wellenbrecher müssen grundsätzlich landwärts eines stabilen Unterwasserstrandes errichtet werden, um standfest zu bleiben. Als Sonderfall liegt der „Söhrmandamm“ an der Übergangsstelle vom Abbruch- zum Anwachsgebiet. Sofern der Unterwasserstrand abgetragen wird, muß der Fuß des Dammes gesichert werden. An diesem Beispiel zeigt sich, daß es vorteilhaft sein kann, zwischen Wellenbrecher und Ufer Querriegel anzuordnen, um Längsströmungen hinter dem Wellenbrecher zu verhindern. An den Enden von Wellenbrechern kann Lee-Erosion auftreten.

#### 4. Buhnen und flächenhafte Bedeckungen

##### 4.1 Allgemeines

Buhnen ist die Aufgabe zugeordnet, erodierende Strömungen vom Ufer fernzuhalten und zugleich den durch Strömungen uferparallel bewirkten Transport des Sandes zu verzögern bzw. zu verhindern. Schon frühzeitig ist erkannt worden, daß Buhnen in der Lage sind, Dünen, Strandwälle sowie Längswerke vor Schäden durch Brandung und Strömung zu schützen. Als Baumaterial dienten zunächst ausschließlich Pfähle und Reisigbündel, erst später kamen Steinbauweisen hinzu.

Die älteste Nachricht über Buhnen im Bereich der Ostfriesischen Inseln liegt von der Insel Wangerooge aus den Jahren 1818 bis 1834 mit dem Bau von 10 Buschbuhnen vor; auf Norderney waren es 1846 zwei Buschbuhnen. Die Buschbauweise widerstand den Brandungs- und Strömungskräften nicht lange und verursachte einen erheblichen Unterhaltungsaufwand. Daraufhin wurden schwerere Bauweisen entwickelt, die den Brandungs- und Strömungskräften widerstehen konnten. Gleichzeitig wurde versucht, einen Buhnenquerschnitt zu finden, der wenig Angriffsflächen bot und sich in den Strand einpaßte. So entstand 1860 auf Norderney die erste flachgewölbte schwere *S t e i n b u h n e*.

An der Westseite der Insel Sylt sind ab 1871 Buhnen gebaut worden. Ihr Kopf war verbreitert und ihr Fuß in die Düne eingebunden. Die Buhnen bestanden aus Holzpfehlreihen, die mit Findlingen gefüllt waren. Reste dieser Buhnen sind südlich von Westerland zu

erkennen. 1936/37 entstanden nördlich von Westerland 110 Buhnen aus *Stahlspondbohlen*, die alle durch Sandschliff – meistens innerhalb von 10 Jahren – zerstört wurden.

Bereits 1921 waren *Stahlbeton-Pfahlbuhnen* probeweise errichtet worden. Die damit gewonnenen Erfahrungen konnten für die ab 1950 als Ersatz der zerstörten *Stahlspondwandbuhnen* aus Stahlbetonpfählen erstellten neuen Buhnen genutzt werden. Infolge der Ausräumung des Vorstrandes vor Westerland sind mehrere Betonpfähle umgekippt (ZITSCHER, 1967).

Stahlspondwand- und Stahlbeton-Pfahlbuhnen sind auch an anderen sandigen Küsten Nordfrieslands verwendet worden. An der Südseite der Insel Föhr wurden vor Utersum und Wyk ein- und zweireihige Holzpfehlbuhnen gebaut.

Die seit mehr als einem Jahrhundert vorliegenden guten Ergebnisse mit Strombuhnen an Flüssen waren vermutlich beteiligt, ihre Funktion auf die durch Brandungsströmungen beeinträchtigten Küsten zu übertragen. Im Laufe der Zeit wurde das unterschiedliche Verhalten von Strombuhnen und Strandbuhnen immer deutlicher erkannt. Vor allem aus den Niederlanden sind Erfolge bekanntgeworden, so daß auch an den deutschen Küsten weitere Buhnen errichtet wurden (ZITSCHER, 1960).

So entstanden von 1958 bis 1966 an der Westseite der Insel Sylt vor Westerland vier Flachbuhnen mit einer Oberflächensicherung aus *Steinsphalt* (ZITSCHER, 1973). Sie sind etwa 150 m lang. Im Jahre 1968 wurde an der Westseite der Insel Sylt vor Hörnum eine ca. 270 m lange Buhne aus Tetrapoden errichtet. Die Tetrapoden liegen auf dem Strand und Vorstrand ohne Unterlage und sind inzwischen teilweise unterspült und versackt.

An der Südküste der Insel Föhr, vor dem „Grevelingdeich“ und dem Ort Nieblum, sind 1971 zwei Buhnen aus Findlingen (150 m und 170 m) hergestellt worden. Die Oberkante liegt im Mittel auf 0,40 m über MThw. Die Findlinge liegen auf einer Buschmatte.

An der schleswig-holsteinischen Ostseeküste läßt sich der Buhnenbau bis in das Jahr 1845 zurückverfolgen. Zunächst entstanden Buhnen als einfache Buschzäune, in Pfahl- und Kastenbauweise sowie aus einem Schüttsteingerüst in den unterschiedlichsten Abmessungen.

Für die Ostseeküste fehlte wegen der vielen Einzelvorhaben von privater Hand eine einheitliche und zusammenhängende Planung. Eine systematische Überwachung und Beobachtung, auch im Hinblick auf die Konstruktion und die Funktion, ist unterblieben. So nimmt es nicht Wunder, daß in Ausnahmefällen einzelne Buhnen von ihren Erbauern wegen nachteiliger Wirkungen wieder entfernt wurden. Aussagen über den Nutzen der einzelnen Bauwerke können in den meisten Fällen nur aufgrund optischer Eindrücke vermittelt werden.

Die Bauweise von Buhnen wurde im Laufe der Zeit weiterentwickelt. Heute sind auf den Inseln die Ausführungen in großer Vielfalt anzutreffen. Analog zu Abschn. 4.2 sollen im folgenden mit Buhnen geschützte Strände, nämlich mit negativer, ausgeglichener und positiver Sandbilanz, an Beispielen beschrieben werden, wobei wieder die Nordseeküsten vor Ostfriesland (a), Schleswig-Holstein (b) sowie die Ostseeküste (c) behandelt werden.

## 4.2 Buhnen

### 4.2.1 Strände mit negativer Sandbilanz

a) Die Buhnengruppe A bis E auf Norderney (Abb. 7) befindet sich an einem Strand mit negativer Sandbilanz (vgl. Abschn. 3.2.1a). In diesem Bereich wurden in den Jahren 1860 bis 1862 die schweren Steinbuhnen A, B und C gebaut, denn durch das Heranwandern des Seegats

wäre das in den Jahren 1857/58 gebaute 975 m lange Dünendeckwerk gefährdet worden. In den Jahren 1863 bis 1867 folgten die Bühnen D, E, F und D1. Die Steinbühnen erhielten fünf stützende und verankernde Längspfahlreihen mit einer Ausfachung aus Sandsteinquadern auf Busch- und Schotterunterbettung. Sie sind 150 bis 210 m lang.

Der Strandabbruch setzte sich beiderseits des mit Schutzwerken versehenen Strandbereiches fort, so daß neben Verlängerungen des Deckwerkes weitere Bühnen erforderlich waren. Insgesamt wurden auf Norderney 32 Bühnen gebaut. Die oben erwähnte Bühnengruppe liegt im Bereich des stärksten Strandabtrages, der seit 1867 beobachtet wird.

Durch den Bau der Bühnen konnten die Sandverluste in den Bühnenfeldern zwar vermindert, aber nicht unterbunden werden. Hierbei nahm die Strandhöhe langsam ab, so daß die Bühnen nach und nach freigespült wurden und ihren seitlichen Halt zu verlieren drohten. Um diese Gefahr abzuwehren, sind die Flanken der Bühnen mit einer bis zur neuen Strandhöhe abfallenden Berme gesichert worden. Beim Fortschreiten der Strandabnahme erhielten die Bühnen weitere seitliche Bermen und dadurch Breiten bis zu 14 m.

b) Seit Jahrzehnten wird untersucht, in welcher Weise die an der Westseite der Insel Sylt gebauten Bühnen (vgl. Abschn. 4.1) den Abtrag des Strandes beeinflusst haben (LAMPRECHT, 1957). Nach dem Stand der bisherigen Erkenntnisse besteht der Eindruck, daß alle Bühnen bei geringem Seegang und bei Wasserständen, die niedriger sind als ihre Konstruktionshöhe, hemmend auf den Sandlängstransport wirken. Dabei ist die Wirkung der Einwandbühnen aus Stahl- und Stahlbetonbohlen am geringsten. Günstiger ist der Einfluß der flacheren Holzpfaahlbühnen mit Findlingen. Die Wirksamkeit der breiten Flachbühnen auf die Stranderhaltung ist am besten, weil sie bis zu mittlerem Seegang eine Beugung der Wellen herbeiführen und auch dann noch wirken, wenn sie geringfügig überspült werden. Eine nachteilige Wirkung der Einwandbühnen ist bei hohen Wasserständen und starkem Seegang zu erkennen, die auf Wellenreflexion zurückgeführt wird.

Ein weiteres Beispiel für eine Buhne an einem Strand mit negativer Sandbilanz ist die Tetrapodenbuhne vor Hörnum (Abb. 12), wo das Sandmaterial resultierend von Norden nach Süden verfrachtet wird. Schon während der Bauzeit hat sich im Norden der Buhne Sand abgelagert. Der Sandverlust südlich der Buhne infolge Lee-Erosion war in den ersten beiden Jahren nach ihrer Fertigstellung nur gering, was auf die Durchlässigkeit der Buhne zurückgeführt wurde. In jüngster Zeit ist jedoch eine umfangreiche stärkere Lee-Erosion erkennbar.

c) Wiederholt ist versucht worden, Teilstrecken der Brodtener Steilküste nördlich von Travemünde vor weiteren Abbrüchen zu schützen. Dazu wurden vor Jahren die nach ihrem Erbauer genannten „Borchert-Bühnen“ 1 und 2 als betonierete Findlingsbühnen mit loser Steinpackung am Kopf gebaut. Ihre Länge betrug etwa 20 m, die Höhe fiel von etwa NN + 2,00 m an der Wurzel auf etwa NN + 1,00 m am Bühnenkopf.

Bald nach Fertigstellung wurden die Bühnen durch weiteren Abbruch der Steilküste hinterläufig. Die nördlich gelegene Buhne fiel daher innerhalb kurzer Zeit der Zerstörung anheim. Die andere ist durch zwei Spundwandreihen mit Betonfüllung bis an den Fuß des Kliffs verlängert worden. Auf der Luv-Seite lagerte sich daraufhin Sand an, während sich auf der Lee-Seite eine verstärkte Erosion bis hin zum Söhrmandamm zeigte (Abb. 17).

Als Folge der fortschreitenden Erosion des Unterwasserstrandes sackte der Bühnenkopf ab, so daß auch die verbliebene Buhne nicht mehr erhalten werden konnte. Die Borchert-Bühnen haben den Abbruch der Steilküste nicht verhindern können. Die zeitweilige Anlandung auf der Luv-Seite war mit starker Lee-Erosion verbunden.

Gleiche Feststellungen können an der Ostsee überall dort getroffen werden, wo versucht wurde, im Abbruch befindliche Küstenabschnitte durch Einzelbühnen kleinerer Abmessungen zu schützen.



Abb. 21. Buhne N auf Wangerooge

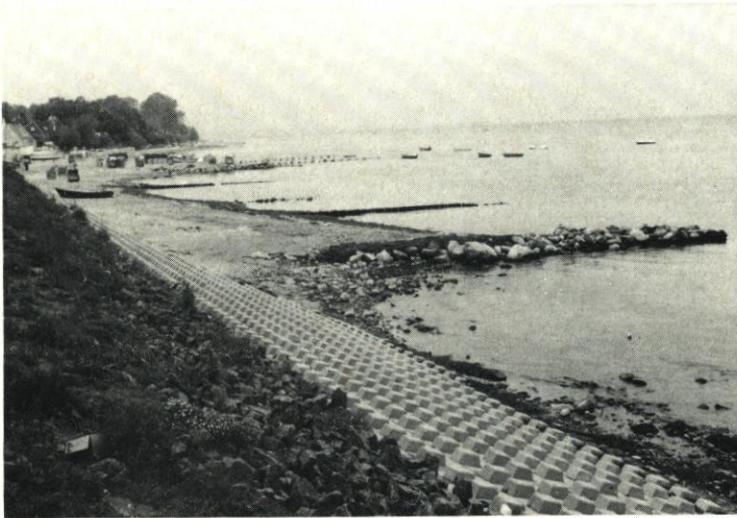


Abb. 22. Buhnen vor dem Deckwerk in Sierksdorf, Anlandungen auf der Luv-Seite

#### 4.2.2 Strände mit ausgeglichener Sandbilanz

a) Mit Buhnen am Strand mit ausgeglichener Sandbilanz liegen Erfahrungen von der Buhnengruppe M, N, O auf Wangerooge vor (Abb. 21, s. auch Abschn. 3.2.2).

Kurz vor der Jahrhundertwende begann der Strand unmittelbar vor dem Ort Wangerooge stark abzunehmen (LÜDERS/WILLECKE, 1951), wodurch die in diesem Bereich liegende Randdüne abbrach. Gleichzeitig rückte die Ortsbebauung bis an die Randdüne heran, so daß ein Dünenschutzwerk und die drei genannten Buhnen erstellt wurden.

Nach dem Bau der Buhnen wechselte die Strandsituation mehrfach, indem die Buhnen

entweder in ganzer Länge von einem schützenden Sandpolster bedeckt oder teilweise – vor allem im vorderen Bereich – aber auch in ganzer Länge freigelegt waren. Niemals nahm jedoch der Strand so weit ab, daß den Bühnen Zerstörung drohte.

b) Ein Strand mit ausgeglichener Sandbilanz (vgl. Abschn. 3.2.2) befindet sich vor Wittdün, an der Spitze des südlichen Nehrungshakens der Insel Amrum. Dort wirken die Bühnen strandaufbauend in Zeiten positiver Sandbilanz. In Zeiten negativer Sandbilanz wird der Sand zwischen den Bühnen ausgeräumt. Sie schützen jedoch auch dann den Fuß der Ufermauer, indem sie die Strömung abweisen.

c) Im Zusammenhang mit dem Bau eines massiven Deckwerkes vor Sierksdorf (Abb. 15) wurden ab 1962 Schüttsteinbühnen angelegt (Abb. 22). Sie ergänzen oder ersetzen die dort bereits vorhandenen Pfahlbühnen, die die Materialbilanz nicht entscheidend beeinflußt hatten. Durch die Schüttsteinbühnen soll der schmale Strand verbreitert oder vor den scharf liegenden Deckwerksabschnitten ein Strand geschaffen werden.

Die Bühnen wurden in Längen bis zu 60 m und unterschiedlichen Abständen gebaut. Damit sollten sie den örtlichen Gegebenheiten angepaßt und die Wirkung der zuvor gebauten Querwerke auf den Strand sollte berücksichtigt werden. Dabei wurden zunächst größere Abstände von 200 m und mehr gewählt und später kürzere Bühnen dazwischengelegt, die bei Bedarf verlängert werden können.

Auf der Luv-Seite der in den Jahren 1962 bis 1966 gebauten Bühnen sind inzwischen Anlandungen eingetreten, und die Uferlinie ist zum Teil bis zum Bühnenkopf vorgerückt.

Auf der Lee-Seite herrscht dagegen ein Abtrag. Durch den Bau weiterer Bühnen im Bereich der Lee-Erosion ist versucht worden, den weiteren Rückgang zu bremsen.

Die vorläufige Bilanz ist, daß die Bühnen vor dem Deckwerk vor Sierksdorf bei nicht zu vermeidender Lee-Erosion den Strand verbreitert haben. Erst in einigen Jahren kann ein endgültiges Urteil abgegeben werden.

#### 4.2.3 Strände mit positiver Sandbilanz

a) Um Gefahr nach starken Dünenabbrüchen vom Ort Juist (Abb. 16) abzuwenden, sind in den Jahren 1913 bis 1920 neben einem 1400 m langen Deckwerk (vgl. Abschn. 3.2.3) sieben Bühnen, und zwar vier Basaltplasterbühnen und dazwischen jeweils eine Pfahlbühne, gebaut worden. Sie haben Abstände von 170 m und sind 180 m lang, die westliche nur 110 m.

Zu Beginn der Bauarbeiten im Jahre 1913 setzte im Westen der zu schützenden Randdünen Auflandung ein, während sich im Osten die Abbrüche fortsetzten. Im Laufe der Bauzeit breitete sich die Auflandung nach Osten aus, so daß statt der geplanten 15 Bühnen nur sieben zur Ausführung kamen.

Im Jahre 1922 sind die gesamten Arbeiten wegen zu hoher Sandanhäufungen eingestellt worden. Die Tatsache, daß bei Baubeginn eine Anlandung einsetzte und ungewöhnlich stark fortschritt, läßt darauf schließen, daß die Bühnen – oder das Deckwerk – mit Sicherheit nicht die positive Sandbilanz herbeigeführt haben. Diese Entwicklung konnte nicht vorausgesehen werden, weil ausreichende Beobachtungen und Messungen nicht vorlagen.

Seit etwa 30 Jahren liegen die Bühnen unter Sand, an den Bühnenköpfen z. Z. etwa ein bis zwei m dick und zu den Bühnenwurzeln hin zunehmend. Letztere liegen unter bis zu 17 m hohen Randdünen.

b) Vor dem Deckwerk am Ellenbogen/Sylt (vgl. Abschn. 3.3.2b) sind die Bühnen z. Z. vollständig eingesandet, weil entlang der Westküste Sylts große Sandmassen dorthin verfrachtet werden. Zum Bau dieser Bühnen mit Deckwerk (vgl. Abschn. 3.2.3b) wäre es nicht

gekommen, wenn nicht militärische Bedürfnisse eine vorsorgliche Sicherung erfordert hätten. Andernfalls wären langjährige Untersuchungen über die Sandbilanz dieses Uferbereiches vorhergegangen.

c) Der 10 m breite Strand vor der 1898 gebauten Ufermauer in Travemünde verlor zeitweilig an Breite und Höhe, obwohl das Gebiet eine positive Bilanz aufgewiesen hatte. Nach der Jahrhundertwende wurde daher versucht, die Strandentwicklung durch den Bau von Buhnen zu fördern. Wegen der eintretenden unharmonischen Entwicklung des Strandes sind die Buhnen in den darauffolgenden Jahren wieder beseitigt worden.

Dem Gedanken des Lübecker Wasserbaudirektors REHDER folgend, am nördlichen Abschluß der Strandmauer einen Damm von 350 m Länge und 70 m Breite herzustellen, wurde im Jahre 1933 auf + 0,70 m NN eine 180 m lange Buhne gebaut, seeseitig 80 m als Stahlspundwand, landseitig 100 m als verholzte Holzspundwand. Der Bühnenkopf bestand aus einem Spundwandkasten von 15 m Länge und 2,20 m Breite. Nach dem Bühnenbau zeigte sich eine starke Lee-Erosion am Hauptbadestrand. Um den Strandverlust rückgängig zu machen, wurde die Buhne in den Jahren 1949/50 auf 85 m verkürzt, und in die Holzspundwand wurden neun Öffnungen eingeschnitten, um einen Sanddurchgang zu ermöglichen.

Der Erfolg blieb jedoch aus. Der Rest der Buhne wurde daher in den Jahren 1950/51 beseitigt oder bis auf Strandhöhe abgeschnitten. Damit waren die Voraussetzungen für eine gleichmäßige Strandausbildung wieder gegeben. Der Strand konnte im Bereich der Anfang der 60er Jahre verlängerten Nordermole, die aus den Jahren 1836/39 stammt und eine positive Sandbilanz bewirkt hatte, weiter zunehmen und hat heute eine Breite bis zu 90 m erreicht.

Das Beispiel zeigt, daß Buhnen an einem Strand mit positiver Sandbilanz schädliche Wirkungen erzeugen können.

#### 4.3 Flächenhafte Sinkstück-Bedeckungen

Flächenhafte Sicherungen werden wegen ihrer hohen Kosten nur an Ufern ausgeführt, die eine negative Sandbilanz durch besonders starken Strömungsangriff aufweisen, wie am Westkopf der Insel Norderney, im Bereich des Norderneyer Seegats. Hier konnten die Buhnen den Sandverlust zwar verringern, das Heranwandern der Tiefen des Norderneyer Seegats bewirkte aber vor den Bühnenköpfen eine immer steilere Böschung und gefährdete schließlich die Schutzwerke. Zur Abwendung dieser Gefahr erhielt der Hang vor den Bühnenköpfen eine breitflächige Sinkstückbedeckung mit Steinbewurf. Auf diese Weise wurden insgesamt neun Buhnen in Form sogenannter *Unterwasserbuhnen* verlängert und der Strand erfolgreich gesichert.

Aufgrund dieser Erfahrungen können stark in Abbruch liegende steile Inselufer, die sich durch Buhnen allein nicht halten lassen, flächenhaft geschützt werden. Es kommen Matten aus Busch oder Kunststoff, jeweils mit Steinbewurf, zur Ausführung (ZITSCHER, 1971).

Ein Beispiel hierfür ist auch die Südostecke der Insel Texel, die der Texelstrom unmittelbar berührt und wo unweit des Ufers Tiefen von 20 bis 30 m bestehen (ZITSCHER, 1957). Die steile Unterwasserböschung wurde großflächig durch Sinkstücke mit Steinbedeckung erfolgreich geschützt. Diese Bauweise ist zwar teuer, aber sicherer als Unterwasserbuhnen. Letztere bieten bei starkem Strömungsangriff den zwischen ihnen liegenden Böschungen ungenügend Schutz. Sie gefährden diese in ihrem Nahbereich sogar, weil sie die vorbeiziehende Strömung verwirbeln und Auskolkungen entstehen.

Die flächenhafte Bedeckung auf Texel wird im Oberwasserbereich durch ein Asphaltdeckwerk ergänzt. Diese Kombination stellt eine Form der „Verfelsung“ des Strandes dar, die

in den stark durch Strömungen angegriffenen Abschnitten nach heutigen Erkenntnissen den umfassendsten Inselfchutz bildet, allerdings unter Aufgabe des Strand.

An den Küsten der Nord- und Ostsee Schleswig-Holsteins sind bisher keine flächenhaften Bedeckungen ausgeführt worden.

#### 4.4 Zusammenfassung und Kritik

Die Wirkung der bisher gebauten Buhnen beschränkt sich überwiegend darauf, die Längsströmungen an sandigen Küsten zu beeinflussen, und zwar gegenüber Tide-, Wind- oder Brandungsströmungen.

Wenn Buhnen in einem Küstenbereich mit negativer Sandbilanz liegen, vermögen sie zwar die Sandverluste zu verzögern, aber nicht zu verhindern. Diese können durch künstliche Materialzufuhr ausgeglichen werden. (s. Abschn. 5).

An Stränden mit ausgeglichener Sandbilanz können Buhnen den gewünschten Erfolg insofern erbringen, als sie am Strand den Spielraum für den gelegentlichen Sandabtrag so weit einschränken, daß Fußsicherungen von Längswerken oder die Längswerke selbst nicht gefährdet werden. Sie können beim Fehlen bestimmter Voraussetzungen aber auch nachteilig wirken.

Starke Strömungsangriffe auf den steilen Hang einer strandnahen Stromrinne lassen sich durch Unterwasserbuhnen oder großflächige Bedeckungen wirksam schützen.

Buhnen zur günstigen Beeinflussung der Brandung konnten bisher nur als Flachbuhnen verwirklicht werden, die im unteren Bereich der wechselnden Wasserstände durch Refraktion wirken. Ihre weitere Entwicklung scheiterte an den hohen Kosten, obwohl die Wirksamkeit von Flachbuhnen mit ihrer Länge und Höhenlage zum höchsten Sturmflutwasserstand zunimmt.

Um die Schutzwirkung von Buhnen nicht zu verlieren, bedürfen die Bauwerke einer dauernden sorgfältigen Unterhaltung. Die Erfahrung lehrt, daß sich kleine Schäden durch Wellenangriff schnell ausweiten und dann hohe Reparaturkosten verursachen.

Mit Bauwerkschäden ist vor allem dann zu rechnen, wenn Buhnen im Strandbereich mit negativer oder ausgeglichener Sandbilanz errichtet werden. Dies entfällt bei Konstruktionen, die den Veränderungen des Strand und des Unterwasserstrandes Rechnung tragen. Buhnen in Sinkstück- und Asphaltbauweise bedürfen nur geringfügiger Unterhaltungsarbeiten.

### 5. Künstliche Materialzufuhr zur Stranderhaltung

#### 5.1 Allgemeines

Längswerke und Buhnen haben nur dort eine bleibende Wirkung, wo ihre Gründung von einem Sandpolster geschützt ist, so daß Bauwerkschäden durch Brandung und Strömung vermieden werden. Das ist nur an Stränden mit positiver Sandbilanz in vollem Umfange und an Stränden mit ausgeglichener Sandbilanz bedingt der Fall. An Stränden mit negativer Sandbilanz, die des Schutzes besonders bedürfen, ist die Errichtung und Unterhaltung von Bauwerken schwierig und aufwendig, da sie letztlich zur „Verfelsung“ führen.

Aus dieser Erfahrung entstand die Lösung, den von den Wasserkraften abgetragenen Sand künstlich wieder zu ersetzen und damit die Sandbilanz am Strand auszugleichen.

## 5.2 Erste Erfahrungen mit Strandvorspülungen an der deutschen Nordseeküste

Soweit bekannt, wurde eine künstliche Materialzufuhr zur Stranderhaltung zum ersten Male 1899 auf der Insel Norderney durchgeführt, indem im „Schluchter“, der westlichen Einfahrt zum Norderneyer Seegat, 150 000 m<sup>3</sup> Sand gebaggert und vor dem Westkopf von Norderney verklappt wurden. Dadurch soll eine Verbesserung der Strandverhältnisse eingetreten sein, so daß in den Jahren 1906 bis 1909 auf die gleiche Weise nochmals 500 000 m<sup>3</sup> Sand vor dem Westkopf abgelagert wurden. Es ist nicht bekannt, ob auch diese Materialzufuhr erfolgreich war. Aus der Tatsache, daß danach eine Weiterführung unterblieb, muß gefolgert werden, daß dieses Verfahren nicht befriedigte. Dafür sind drei Gründe zu vermuten. Einmal war die Sandgewinnung im „Schluchter“ wegen der Brandungsverhältnisse sehr seegangsbeeinflusst, zum anderen waren die Baggergeräte klein, seegangsempfindlich und wenig leistungsfähig. Indem der Sand verklappt wurde, lagerte er sich auf dem Vorstrand ab, wo er durch die starken Strömungen des Norderneyer Seegats bald wieder abgebaut wurde, ohne auf den zu schützenden Strand gelangt zu sein.

Auf Norderney ist nach dem Zweiten Weltkrieg erneut versucht worden, den Strandabtrag durch Verwendung gröberer Materials zu vermindern. Bei diesem Versuch wurde in einem Bühnenfeld Kies vom Deckwerk aus durch Lastkraftwagen auf den Strand gekippt. Der Kies wurde von der Brandung zunächst, wie vorgesehen, vor dem Fuß des Deckwerks verteilt, dann aber aus dem Bühnenfeld verdriftet. Er war ungeeignet, den Strand zu stabilisieren, weil er sich mit dem natürlichen Material am Strand nicht mischte, vor allem aber wurde er von der Brandung weiterverfrachtet und lagerte sich in Form von Nestern an den Strandschutzwerken ab (KRAMER, LUCK u. MÜLLER, 1963).

Die Strandaufspülungen vor Norderney haben durch diese Erkenntnisse ergeben, daß sich hierdurch Bühnen und Deckwerke schützen lassen, so daß der Unterhaltungsaufwand wesentlich zurückgeht und der Inselsockel erhalten werden kann.

Den weiteren, durch Untersuchungen sehr sorgfältig vorbereiteten Versuch einer Strandsicherung stellt die Aufspülung einer sogenannten Sandbühne vor Westerland auf Sylt dar. Hier entstehen die Sandverluste nicht durch Lee-Erosion, sondern vorwiegend durch Brandungskräfte, die das Sandmaterial des Strandes je nach Wellenrichtung nach Norden oder Süden verfrachten. Die Sandbühne wurde im Strandbereich an die Stelle gelegt, von der aus der Sand in beide Richtungen gelangte, so daß die angrenzenden Strandstrecken gleichermaßen ernährt worden sind (KRAMER et al., 1971).

Mit der Sandbühne war ein nachhaltiger Eingriff in das Geschehen am Strand und Vorstrand beabsichtigt. Allerdings hat sich die Erwartung nicht erfüllt, daß die ca. 300 m lange „Bühne“ aus dem Riffbereich zusätzliche Sandmengen am Strand festlegen würde. Ihre Rückbildung – zunächst zu einem Sandhöft – durch Verteilung des eingebrachten Sandes auf die sandbedürftigen Strandbereiche war nach ca. fünf Jahren abgeschlossen. Diese Aufspülung hat damit generell den Erwartungen entsprochen; inwieweit die inzwischen festgestellte parallele Strandaufspülung vorzuziehen ist, wird nach Auswertung der Messungen festgestellt werden können.

## 5.3 Zusammenfassung und Kritik

Die Kornverteilung des Spülgutes darf nicht feiner sein als die des Strandes, weil sonst hohe Spülvverluste auftreten und das Material zu leicht erodiert wird. Vorteilhafter ist daher ein

etwas gröberes Material als am Strand vorhanden. Wesentlich gröberes Material ist jedoch nicht zu empfehlen, weil die Körnungen sich nicht mischen. Eine Verringerung des Strandabtrages konnte in derartigen Versuchen nicht festgestellt werden.

Unter den verschiedenen möglichen Verfahren des Materialersatzes ist die unmittelbare Aufspülung auf den zu schützenden Strand am besten geeignet. In Abhängigkeit von den Sandverlusten muß von Zeit zu Zeit nachgefüllt werden. Eine in der Wirkung besonders gleichmäßige und zugleich flexible Methode ist die kontinuierliche Strandvorspülung; sie wird immer dann vorteilhaft sein, wenn an nur einer Stelle Sand eingebracht werden kann und von dort in die sandbedürftigen Gebiete durch natürliche Kräfte verteilt wird. Nach den bisherigen Erfahrungen erscheint das Verklappen von Sandmaterial im Vorstrandbereich weniger geeignet zu sein, weil in den meisten Fällen das Material nicht in genügendem Maße in den zu schützenden Strandbereich transportiert wird.

Bevor der Bau massiver Strandschutzwerke in Erwägung gezogen wird, sollte stets untersucht werden, ob eine Strandvorspülung für den Erhalt der Küste günstiger und wirtschaftlicher ist. Vorspülungen haben den Vorteil großer Flexibilität. Sie können im Grunde kaum nachteilig sein und lassen sich während der Ausführung weitgehend anpassen und damit optimieren, besonders wenn es sich um eine schrittweise Verwirklichung handelt.

Wo Aufspülungen allein den Angriffen der See nicht ausreichend widerstehen, können sie auch mit der Anlage von Strandschutzwerken verbunden werden. Insbesondere können Aufspülungen die Gefährdung von Strandschutzwerken durch Strandabtrag mildern.

Die inzwischen gesammelten Erfahrungen haben Strandvorspülungen zu einem besonders geeigneten Verfahren zum Schutz von Stränden mit negativer Sandbilanz werden lassen.

## 6. Schlußwort

Im Hinblick auf die umfangreichen Aufgaben des hier behandelten Bereichs des Küstenschutzes, von der Erhaltung der Düneninseln und Sandküsten an Nord- und Ostsee bis zum Bau künstlicher Inseln im Tiefwasser für den Seeverkehr, ist eine Begutachtung der damit verbundenen Probleme zwingend erforderlich.

Die wichtige Frage der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Uferschutzmöglichkeiten, bestimmt durch die Bau- und Unterhaltungskosten, bedarf der Untersuchung und Beantwortung. Dadurch werden Fehlinvestitionen vermieden.

Wegen der hohen Kosten von Schutzwerken muß sichergestellt werden, daß alle Erfahrungen und Unterlagen über ihre Funktion, Konstruktion und Wirtschaftlichkeit zusammengetragen und ausgewertet werden. Daraus herzuleitende Empfehlungen sollen dem Planenden künftig eine unentbehrliche Unterlage sein, weil er auf dieser Grundlage seine weitreichenden Entscheidungen treffen kann.

## 7. Schriftenverzeichnis

- ALTENKIRCH, J. u. EIBEN, H.: Einsatz von sonographischen Geräten für die Sandsuche zur Deichverstärkung Probstei. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- AUGUSTIN, B.: Die morphologische Entwicklung der Strandwall-Landschaft der Probstei nach der Zeitwende. Geograph. Inst. der Univ. Kiel, 1975 (unveröffentlicht).
- BAENSCH: Die Sturmfluten vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des Preußischen Staates. Zeitschrift f. Bauwesen, 23. Jg., 1875.

- BOUWS, E.: Wind and wave climate in the Netherlands sector of the North Sea between 53° and 54° north latitude. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Inst. De Bilt, Niederlande, Bericht W. R. 78 - 9, 1978.
- BRAND, G.: Neuzeitliche Veränderungen der Ostseeküste der Kolberger Heide. Meyniana, Bd. 4, 1955.
- BRESSAU, S. u. SCHMIDT, R.: Geologische Untersuchungen zum Sedimenthaushalt an der Küste der Probstei und erste Erkundungen zur Sandgewinnung in der westlichen Ostsee. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- BRESSAU, S.: Abrasion, Transport und Sedimentation in der Beltsee. Die Küste, Jg. 6, H. 1, 1957.
- CHRISTIANSEN, H.: Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten. Hamb. Küstenf., H. 35, 1976.
- CHRISTIANSEN, H.: Economic Profiling of Beach Fills. Proc. Conf. Coastal Sediments '77, ASCE, New York, 1977.
- CZOCK, H. u. WIELAND, P.: Naturnaher Küstenschutz am Beispiel der Hörnum-Düne auf der Insel Sylt nach der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- DECHAND, W., KURZAK, G., LINKE, O., SCHAUBERGER, H. u. THILO, R.: Die Ursachen der Abbruchserscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney und die Beurteilung der zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1949, Bd. I, 1950.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereiche hoher REYNOLDS-Zahlen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 41, 1974.
- DETTE, H. H. u. MANZENRIEDER, H.: Modelluntersuchungen zur Optimierung von Deichprofilen und Buhnensystemen vor der Probstei. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- DETTE, H. H. u. STEPHAN, H.-J.: Über den Seegang und Seegangswirkungen im Küstenvorfeld der Ostsee. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- DÜCKER, A.: Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und Errichtung eines Uferschutzwerkes. Die Küste, Jg. 1, H. 2, 1952.
- EIBEN, H. u. SINDERN, J.: Die Wintersturmflut 1978/79 - Wasserstände und Windverhältnisse an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- EIBEN, H. u. MÖLLER, M.: Zur quantitativen Erfassung von morphologischen Änderungen im Küstenvorfeld der Probstei. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- EIBEN, H. u. MÖLLER, M.: Erfahrungen beim Aufbau und Betrieb der Wellenmeßanlage vor der Probstei. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- ERCHINGER, H. F.: Die Erhaltung der Dünen zum Schutze der Inseln in Ostfriesland. Bauwirtsch. Inf., Nr. 11, Neumünster, 1970.
- ERCHINGER, H. F.: Dünenchutzmaßnahmen und Versuche zur Dünenbegrünung auf Norderney. Deutscher Rat für Landespflege, H. 14, 1970.
- ERCHINGER, H. F.: Kunststoffe im Dünenbau. Wasser und Boden, H. 11, 1972.
- ERCHINGER, H. F. u. SNUIS, G.: Kunststoffgewebesläuche im Küstenwasserbau. Wasser und Boden, H. 1, 1972.
- FRANZIUS, O.: Küstenschutz auf Langeoog in neuer Bauweise. „Ostfriesland“, Zeitschr. für Kultur, Wirtschaft und Verkehr, H. 1, 1972.
- FÜHRBÖTER, A.: Refraction Groyne built by Sand. 14th Intern. Conf. on Coastal Eng., Copenhagen, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergien bei Sturmfluten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. STEPHAN, H.-J.: Hydrologische Untersuchungen zur Deichverstärkung vor der Probstei. Bericht Nr. 385 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1978 (unveröffentlicht).
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. MANZENRIEDER, H.: Buhnensystem als Stabilisatoren für Strandaufspülungen an der Probstei/Ostsee. Bericht Nr. 457 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1979 (unveröffentlicht).
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H., STEPHAN, H.-J. u. VOIGT: Wellenauflaufuntersuchungen für den Landesschutzdeich vor der Probstei/Ostsee. Bericht Nr. 252 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1974 (unveröffentlicht).

- FÜHRBÖTER, A. u. DETTE, H. H.: Erweiterte Optimierungsuntersuchungen für Regelprofile des Landesschutzdeiches vor der Probstei. Bericht Nr. 383 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1978 (unveröffentlicht).
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. MANZENRIEDER, H.: Erweiterte Modelluntersuchungen für den Landesschutzdeich vor der Probstei. Bericht Nr. 433 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1979 (unveröffentlicht).
- FÜLSCHER, J.: Über Schutzbauten zur Erhaltung der Ost- und Nordfriesischen Inseln. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1905.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- GÖHREN, H.: Die Sedimente im küstennahen Watt zwischen Elbe und Weser. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- HARNISCHMACHER: Die Dünenlandschaft der Ostfriesischen Inseln im Hinblick auf den Dünen-schutz. Wasser und Boden, H. 8, 1954.
- HERGERÖDER: Heimatkundliches aus der Probstei. Druck und Verlag: Hergeröder, Schönberg, 1977.
- HIBBEN, J. A.: Die Schutzbauten auf der Insel Borkum. Die Bautechnik, Jg. 13, H. 53, 1935.
- HINTZ, R. A.: Die Entwicklung der Schleimündung. Meyniana, Bd. 4, 1955.
- HINTZ, R. A.: Die Strandwälle im Gebiet der Kolberger Heide und die Entstehung des Laboer Sands. Meyniana, Bd. 6, 1958.
- HINTZ, R. A., ERLÉN, K., HEUSER, H., ERNST, T. H. u. WILLKOMM, H.: Sedimentabfolge und Transgressionsverlauf im Küstenraum der östlichen Kieler Außenförde während der letzten 5000 Jahre. Offa 31, Neumünster, 1974.
- HOMEIER, H.: Die morphologische Entwicklung der Insel Spiekeroog und die Auswirkung der Strandschutzwerke. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1960, Bd. XII, 1961.
- HOMEIER, H. u. KRAMER, J.: Die Auswirkungen der Insel-schutzwerke auf die Strandentwicklung im Westteil von Norderney. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1954, Bd. VI, 1955.
- HOMEIER, H. u. LUCK, G.: Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge im Bereich der Accumer Ee als Grundlage für die Beurteilung der Strand- und Dünenentwicklung im Westen und Nordwesten Langeoogs. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1970, Bd. XXII, 1971.
- KACHHOLZ, K.-D.: Gestalt und Entwicklung der Ostseeküste im Bereich Laboe - Bottsand. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Kiel, 1978.
- KANNENBERG, E.-G.: Die Steilufer der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Schr. Geogr. Inst. Kiel, Bd. 14, H. 1, 1951.
- KANNENBERG, E.-G.: Niederungsgebiete an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Teilbericht II. Archiv des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 1955.
- KATTENBUSCH, E.: Bilanzbericht über 80 Jahre Küstenschutz auf der Nordseeinsel Borkum 1869 bis 1949. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe Küstenschutz, 1950.
- KIECKSEE, H.: Die Ostsee-Sturmflut 1872. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1972.
- KÖSTER, R.: Die Sedimente im Küstengebiet der Probstei. Ein Beitrag zu Sedimenthaushalt und Dynamik von Strand, Sandriffen und Abrasionsfläche. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- KRAATZ: Strand- und Küstenveränderungen an der Westküste Sylts und deren Beeinflussung durch technische Maßnahmen. Bericht 21/66 der Vorarbeitenstelle Nordfriesland, MBA Husum, 1966.
- KRAMER, J., FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., SCHWITTERS, J. u. SINDERN, J.: Sandbuhne vor Sylt zur Stranderhaltung. Die Küste, H. 23, 1971.
- KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1957, Bd. IX, 1957.
- KRAMER, J., LUCK, G. u. MÜLLER, C.: Stellungnahme zur versuchsweisen Stranderhöhung durch Kies am Westende von Norderney. Jahresber. 1962 der Forschungsstelle Norderney, Bd. XIV, 1962.
- KRANZ: Die Arbeiten und Bauten auf den Ostfriesischen Inseln von Borkum bis Spiekeroog. Jahrb. der Hafenbautechn. Ges., 12. Bd., 1930/31.

- KRÜGER, W.: Die heutige Insel Wangerooge, ein Ergebnis des Seebaues. „Wangerooge, wie es wurde, war und ist“. Landesverein Oldenburg für Heimatkunde und Heimatschutz, Bremen, 1929.
- KRUHL, H.: Sturmflut-Wetterlagen an der Ostsee im Winter 1978/79. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, Arbeitsgruppe Norderney: Gutachtliche Stellungnahme zu den Untersuchungen über die Ursachen der Abbruchserscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney sowie zu den zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, Arbeitsgruppe Küstenschutz: Bilanzbericht über die wasserbaulichen Inselschutzmaßnahmen der ostfriesischen Inseln Memmert, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog und Spiekeroog. Unveröffentlicht, 1953.
- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, Arbeitsgruppe Küstenschutz: Bilanzbericht über die Inselschutzmaßnahmen auf Wangerooge. Unveröffentlicht, 1951.
- LAMPRECHT, H.-O.: Uferveränderungen und Küstenschutz auf Sylt. Die Küste, Jg. 6, H. 2, 1957.
- LANDESREGIERUNG SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz vom 20. 12. 1963 mit Fortschreibung vom 29. 11. 1977. Ministerium f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 1963 und 1977.
- LINKE, G.: Die Entstehung der Insel Scharhörn und ihre Bedeutung für die Überlegungen zur Sandbewegung in der Deutschen Bucht. Hamb. Küstenf., H. 11, 1969.
- LINKE, G.: Über die geologischen Verhältnisse im Gebiet Neuwerk/Scharhörn. Hamb. Küstenf., H. 17, 1970.
- LUCK, G.: Stellungnahme zur Stranderhaltung durch künstliche Sandzufuhr im Raume Döse, Duhnen und Sahlenburg. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1968, Bd. XX, 1970.
- LUCK, G.: Bericht über die zweite Strandaufspülung am Weststrand von Norderney. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1968, Bd. XX, 1970.
- LUCK, G.: Bemerkungen zu den Dünenabbrüchen im Westen der ostfriesischen Insel Juist. Neues Archiv für Niedersachsen, Bd. 19, H. 2, 1970.
- LUCK, G.: Fortführung des Inselschutzes am Südweststrand von Borkum. Forschungsstelle Norderney, Jahresber. 1969, Bd. XXI, 1971.
- LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung am Weststrand von Norderney. Unveröffentlichter Bericht der Forschungsstelle Norderney, Okt. 1970.
- LÜDERS, K.: Der Seebau auf der Insel Wangerooge. In: „Wangerooge, wie es wurde, war und ist“. Verlag Edo Dieckmann, Oldenburg, 1951.
- LÜDERS, K.: Die Wirkung der Buhne H in Wangerooge-West auf das Seegat „Harle“. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- LÜDERS, K.: Dünenschutzwerk auf Norderney. Wasser und Boden, Jg. 6, H. 3, 1954.
- LÜDERS, K., FÜHRBÖTER, A. u. RODLOFF, W.: Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog. Die Küste, H. 23, 1972.
- LUX, H.: Der 10-Jahres-Plan des Landes Schleswig-Holstein über Dünenschutz und Waldbildung auf den nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum. Informationen des Inst. für Raumforschung, Bad Godesberg, H. 11, 1958.
- LUX, H.: Planmäßige Festlegung der schadhafte Binnendünen auf den nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum. Natur und Landschaft, H. 6, 1969.
- MAGENS, C.: Brandungsuntersuchungen an den Küsten von Fehmarn und Nordwagrien. Die Küste, Jg. 6, H. 1, 1957.
- MAGENS, C.: Seegang und Brandung als Grundlage für Planung und Entwurf im Seebau und Küstenschutz. Mitt. des Franzius-Inst. der TH Hannover, H. 8, 1955.
- PEPER, G.: Die Entstehung und Entwicklung der Inselschutzwerke auf Norderney mit besonderer Berücksichtigung der Bauten der letzten Jahre. Neues Archiv für Niedersachsen, Bd. 8, H. 3, 1955/56.
- PETERSEN, M.: Das deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten. Die Küste, Jg. 9, 1961.
- POPKEN, W.: Wangerooge – Geschichte einer Insel und ihrer Schutzbauten. Der Ingenieur der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, H. 3, 1965.
- PRALLE: Beobachtungen über den Verlauf der Ostseesturmflut vom 13. November 1872. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover, Bd. XXI, H. 4, Jg. 1875.

- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- REINEKE, H.: Die Konzeption des technischen Küstenschutzes an der Ostsee zwischen Trave und Swine. Wissensch. Zeitschr. der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar, H. 4, 1966.
- RODLOFF, W.: Deiche und Uferschutz bei Ostseesturmfluten. Die Wasserwirtschaft, H. 12, 1974.
- RODLOFF, W.: Zur historischen Entwicklung der Probsteier Salzwiesen und ihres Sturmflutschutzes. Sonderdruck aus Jahrbuch für Heimatkunde im Kreis Plön-Holstein, 6. Jg., 1976.
- SINDERN, J.: Der Eiswinter 1978/79 in der westlichen Ostsee. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- SCHÄFER, U.: Wellenmeßanlage vor der Probstei - Meßeinrichtung. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- SCHWITTERS, J.: Inselschutz am Beispiel der Insel Norderney. Nordwestdeutscher Wasserwirtschaftsverband, Jahresversammlung 1968.
- THILO, R.: Bilanzbericht über den Inselschutz auf den Ostfriesischen Inseln. Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe Küstenschutz, 1953.
- TIEDEMANN, H. O., EIBEN, H. u. SCHINDLER, J.: Dokumentation der Sturmflutschäden an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste im Winter 1978/79. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- WALGER, E.: Untersuchungen zum Vorgang der Transportsondierung von Mineralien am Beispiel von Strandsanden der westlichen Ostsee. Meyniana, Bd. 16, 1966.
- WERNER, F.: Die Sedimentverteilung außerhalb der Riffzone vor der Probstei aufgrund von Sidescan-Sonar-Aufnahmen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- WIEDECKE, W., EIBEN, H. u. DETHLEFFSEN, G.: Zur Geschichte der Sicherung der Probstei-Niederung vor Hochwasser der Ostsee. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979.
- WITTE, H. H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. Die Küste, H. 19, 1970.
- ZITSCHER, F. F.: Wirksame Seebuhnen durch Asphaltbauweise. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche und verwandte Stoffe, 11, H. 10, 1960.
- ZITSCHER, F. F.: Schutz des Weststrandes der Insel Sylt durch Flachbuhnen. Wasser und Boden, H. 9, 1960.
- ZITSCHER, F. F.: Analyse zur Bemessung von Außenböschungen scharliegender Seedeiche gegen Wellenbeanspruchung. Wasser und Boden, H. 10, 1962.
- ZITSCHER, F. F.: Möglichkeiten und Grenzen in der Konstruktion, Anwendung von Asphaltbauweisen bei Küstenschutzwerken. Mitt. der Hann. Versuchsanstalt für Grund- und Wasserbau, H. 12, 1957.
- ZITSCHER, F. F.: Der Bau des Uferdeckwerks vor Westerland/Sylt in kombinierter Asphalt-Basalt-Bauweise. Bitumen, H. 5, 1955.
- ZITSCHER, F. F.: Entwicklungsstufen der Asphaltbauweisen für Deichschutzwerke an den Küsten Schleswig-Holsteins. Bitumen, H. 2, 1980.