

Empfehlungen D

Sandaufspülungen als Küstenschutz

Inhalt

1. Einführung und Begriffsbestimmung	284
2. Differenzierung der Anwendungsbereiche	285
2.1 Strandaufspülung bei negativer Sandbilanz	285
2.2 Strandaufspülung zur Sicherung und Entlastung von Schutzwerken und Verstärkung von Randdünen	285
2.3 Sanddamm zur Beeinflussung der Platananlandung	286
2.4 Sanddämme im Wattgebiet	286
2.5 Sicherstellung des gestörten Litoraltransportes	286
3. Veranlassung zur Strandaufspülung	287
3.1 Erfordernis von Schutzmaßnahmen, Schutzziele	287
3.2 Kriterien für einzuleitende Schutzmaßnahmen	287
3.2.1 Tideküste mit wechselnden Sandbilanzen am Beispiel der ostfriesischen Küste	287
3.2.1.1 Örtliche Gegebenheiten	287
3.2.1.2 Erosionsgefährdete Strand-Randdünen-Bereiche	289
3.2.1.3 Dünenabbruch in Abhängigkeit von der Strandbreite	290
3.2.1.4 Quantitative Bestimmung der Randdünenerosion durch Sturmfluten	291
3.2.1.5 Vorspülung zur Sicherung von Schutzwerken	292
3.2.2 Tideküste mit durchgehend negativer Sandbilanz am Beispiel Sylt	293
3.2.2.1 Örtliche Gegebenheiten	293
3.2.2.2 Vorspülung zur Sicherung von Dünen, Kliffs und Schutzwerken	297
3.2.3 Tidefreie Küste von Mecklenburg-Vorpommern	297
3.2.3.1 Örtliche Gegebenheiten	297
3.2.3.2 Aufspülung und Dünenwiederherstellung	298
3.2.3.3 Aufspülung vor Längswerken von Dünendeichen	300
4. Voruntersuchungen	301
4.1 Hydromorphologische Gegebenheiten, Wiederholungsintervall	301
4.2 Kriterien für die Auswahl des Auffüllmaterials	301
4.3 Erkundung von Lagerstätten	301
4.4 Ökologische Randbedingungen	302
5. Planung von Strandaufspülungen	303
5.1 Materialeigenschaften und Strandprofil	303
5.1.1 Beziehung zwischen Strandneigung und Korngröße	303
5.1.2 Beziehung zwischen Spülfeldneigung und Korngröße	304
5.2 Ausbildung von Aufspülkörpern	305
5.2.1 Zum Verhalten einer Strandaufspülung	305
5.2.2 Gestaltung des Aufspülkörpers im Tidegebiet	307
5.2.2.1 Profilineigung nach dem natürlichen Strandprofil	307
5.2.2.2 Aufspülprofile ostfriesische Küste, Sylt, Ostseeküste	308
5.2.2.3 Grundrißform	311
5.3 Verfahren zur Materialeingabe	315
5.3.1 Allgemeines	315
5.3.2 Eingabe im Vorstrandbereich	315
5.3.3 Flächenhafte Eingabe am Strand	315
5.3.4 Punktuelle Eingabe des Sandes	317
5.4 Ergänzende bauliche Maßnahmen	319
5.4.1 Bauwerke zur Verringerung der Längstransportraten	319
5.4.2 Maßnahmen gegen Sandverwehungen	319
6. Durchführung von Strandaufspülungen	320

6.1	Geräte	320
6.1.1	Allgemeines	320
6.1.2	Stationäre Naßbagger	320
6.1.3	Laderaumsaugbagger	320
6.2	Sonstige Hinweise	324
6.2.1	Ausführungszeiten und -fristen	324
6.2.2	Materialverluste	325
6.2.3	Aufmaß und Abrechnung	325
6.2.4	Vorschriften und Sicherheitsvorkehrungen	326
7.	Profilkontrolle und Materialbilanz	326
8.	Erfahrungen aus ausgeführten Beispielen	327
	Beispiel 1: Strandaufspülungen vor Schutzwerken auf Norderney	327
	Beispiel 2: Strandaufspülungen in Phasen unzureichender Sandversorgung und Platensteuerung auf Langeoog	333
	Beispiel 3: Aufspülungen Westerland/Sylt seit 1972	338
	Beispiel 4: Sandentnahmen und -transporte am Beispiel Sylt	341
	Beispiel 5: Sanddamm im Watt bei Vollerwiek/Eiderstedt	346
	Beispiel 6: Aufspülung Kloster/Hiddensee	348
9.	Schriftenverzeichnis	349

1. Einführung und Begriffsbestimmung

Sandaufspülungen werden als naturnahe Maßnahmen an sandigen Küsten und vereinzelt auch im Wattgebiet seit Jahrzehnten in zunehmendem Umfange durchgeführt. Durch die hydraulische Förderung können heute in kurzer Zeit die aus großen Sandmengen bestehenden Aufspülkörper geschaffen werden. In besonderen Fällen kommt es zu Sandaufschüttungen in trockenem Einbau, selten sind Kies- oder Geröllaufschüttungen. Aufspülung und Aufschüttung sind die Verfahren der Auffüllungen.

Ergebnis der Sandaufspülungen sind

- die Erhöhung und Verbreiterung von Stränden und Vorstränden,
- die Erhöhung und Verbreiterung von natürlichen Dünen,
- die Schaffung von Sanddepots und Vordünen vor den Kliffs,
- die Schaffung von Dämmen im Watt.

Folgende Ziele werden i. a. angestrebt:

- Die Aufspülung des Strandes und Vorstrandes (auch Strandaufspülung genannt) und die dabei geschaffene Aufhöhung und Verbreiterung von Strand und Vorstrand gleicht die negative Materialbilanz aus, ersetzt die Erosionsrate und vermindert oder verhindert den Uferlinienrückgang. Sie reduziert die Seegangsbelastung auf Ufer (Düne, Kliff) und Uferschutzwerke.
- Die Aufspülung der Düne, des Sanddepots und der Vordüne vor Kliffs (auch Vorspülung genannt) schafft Sandkörper ausreichender Mächtigkeit zum Schutz gegen Durchbruch und Überschwemmung des Hinterlandes durch schwere Sturmfluten und zur Sicherung der Steilküsten vor Abbruch und Landverlust bei Sturmflutwasserständen und starken Seegangsbelastungen.
- Die Aufspülung eines Dammes vor einer Insel oder im Watt beeinflusst Seegang und Strömung. Der Damm wirkt auf den natürlichen Sandtransport vor den Inseln und entlastet Deich und Deichfuß.

2. Differenzierung der Anwendungsbereiche

2.1 Strandaufspülung bei negativer Sandbilanz

Strände von Erosionsküsten, die einem ständigen Materialverlust unterliegen, werden häufig so schmal und niedrig, daß sie ihre Funktion, die im anlaufenden Seegang enthaltene Energie weitgehend umzuformen, nicht mehr ausreichend erfüllen können. Als Folge können Abbrüche von dahinter liegenden Dünen und Kliffs auftreten, die bis zum Durchbruch von schützenden Randdünen und zu Landverlusten sowie zur Gefährdung und/oder Verlust von Bauwerken oder Anlagen der Infrastruktur führen können. Durch Strandaufspülungen kann der natürliche Materialverlust ausgeglichen werden. Durch die damit erzielte Verbreiterung und Erhöhung des Strandes wird seine Schutzfunktion wiederhergestellt, zumindest aber wieder verbessert. Im Vergleich zu starren Schutzbauten, wie z. B. Deckwerke, Buhnen, Ufermauern und dgl., weist die Methode der Strandaufspülung besondere Vorzüge auf:

- Sie ermöglicht – im Gegensatz zu starren Bauwerken –, daß der Strand sich den veränderlich angreifenden Kräften anpassen kann.
- Sie ist naturhaft und erhält oder verbessert das von den Wasser- und Windkräften geformte Landschaftsbild.
- Sie hat im allgemeinen keine negativen Randeffekte wie Lee-Erosion und Fuß-Erosion.
- Sie ist als naturhafte Maßnahme zur Überbrückung von Phasen mit Sandmangel im natürlichen Sandtransport besonders geeignet.

Die Strandaufspülung weist aber auch Schwachpunkte auf:

- Sie ist von zeitlich begrenzter Wirkung, wobei ihre Wirkungsdauer nur angenähert abzuschätzen ist (sie hängt z. B. vom Energieeintrag des Seegangs ab).
- Die Restsicherheit, d. h. der Schutz durch eine Düne, ist nach Ausräumungen als Folge von Sturmfluten nicht exakt berechenbar. Sie kann aus betrieblichen Gründen in den Wintermonaten als Schutzmaßnahme vor weiteren Sturmfluten nicht nachgebessert werden.

Strandaufspülungen müssen von Zeit zu Zeit wiederholt werden, da sie die naturgegebenen Erosionsprozesse nicht aufhalten können. Die Abstände ergeben sich aus der Erosionsrate und der Auffüllmenge. Aus diesem Grunde werden Strandaufspülungen häufig auch als „Verschleißbauwerke“ bezeichnet.

2.2 Strandaufspülung zur Sicherung und Entlastung von Schutzwerken und Verstärkung von Randdünen

Strandaufspülungen eignen sich auch zur zusätzlichen Sicherung von Uferschutzwerken oder sonstigen erosionsbedrohten Bauwerken in der Uferzone. Sie können die Unterspülung von Deckwerken und Ufermauern und ggf. von Buhnen verhindern und die Seegangsbelastung dieser Bauwerke zugleich verringern. Dadurch kann vielfach der Bestand vorhandener Schutzwerke sichergestellt werden.

Hinter erodierenden schmalen Stränden kommt es in schweren Sturmfluten vielfach zu Randdünenabbruch oder gar -durchbruch. Reicht die Restdüne für die Schutzfunktion nicht mehr aus, so ist auch sie – häufig zusammen mit der Strandaufspülung – aufzufüllen und zu verstärken. Je nach der Strand- und Dünensituation kann die Randdünenverstärkung an der Strandseite oder an der rückwärtigen Dünenseite vorgenommen werden. Bei nahegelegener Sandentnahme kann das Material auch mit Erdbaugeräten in die Randdüne eingebaut werden, wie auf Norderney 1981 und 1983 geschehen (s. Abschn. 8, Beispiel 1) [21].

2.3 Sanddamm zur Beeinflussung der Platananlandung

Häufig nähern sich Sandplatten – besonders an der ostfriesischen Küste – dem Strand einer Insel in sehr spitzem Winkel. Ein Strandpriel bzw. eine Strandbalje (Strömungsrinne auf dem nassen Sand) liegt dabei dann längere Zeit zwischen Strand und Plate. Stärkerer Seegang verursacht bei schrägem Wellenangriff erhebliche Strömungen in dieser Rinne.

Ein aufgespülter Sanddamm vom Strand zur sich nähernden Plate durch die Strandbalje unterbindet die Strömungen. Dadurch kann die Wanderrichtung der anlandenden Plate geändert und die Anlandung an den Strand beschleunigt werden. Das Beispiel über eine derartige Platensteuerung auf Langeoog wird in Abschn. 8 (Beispiel 2) beschrieben.

2.4 Sanddämme im Wattgebiet

Sanddämme eignen sich auch zum Einsatz im Wattgebiet, z. B. wenn Wattrinnen sich an einen Deich verlagern und den Deich gefährden und zu unterspülen drohen oder wenn Tide- und Brandungsströmung einen Abtrag des Watts in der Nähe des Deichfußes verursachen und die Deichsicherheit dadurch ebenfalls gefährden.

Der Verbau einer deichnahen Wattrinne erfordert zuvor die Baggerung einer weiter vom Deich entfernt liegenden Ersatzrinne. Es empfiehlt sich, den Damm durch die deichnahe Rinne bis etwa auf MThw aufzuspülen und mit flachen Böschungsneigungen, die dem verfügbaren Spülmateriale entsprechen, herzustellen. Bei derartigen Sanddämmen kann von einer zusätzlichen Befestigung der Krone abgesehen werden. Um einen unerwünschten, zu starken Abtrag der Krone durch Überströmung zu vermeiden, ist bei der Planung anzustreben, daß der als Durchdämmung hergestellte Damm durch den verbleibenden Reststrom nur noch mäßig umspült wird, d. h., daß sich beiderseits des Dammes nur geringe Wasserspiegelgefälle einstellen. Ein Ausführungsbeispiel, ein Sanddamm im Watt bei Vollerwiek (Außen-eider) zum Schutz des Deichfußes, ist als Beispiel 5 in Abschnitt 8 aufgeführt.

2.5 Sicherstellung des gestörten Litoraltransportes

An Brandungsstränden werden in der Regel große Materialmengen im resultierenden küstenparallelen Transport bewegt, unabhängig davon, ob Erosion oder Sedimentation vorherrschen oder ob sie sich im Gleichgewicht befinden. Küstennormal orientierte Einbauten, wie z. B. Molen bei Hafeneinfahrten oder Flußmündungen, unterbrechen den Küstenlängstransport mit der Folge, daß sich bei einer zumeist vorhandenen dominierenden Transportrichtung auf der Luvseite des Bauwerkes Sediment ablagert, während auf der Leeseite Erosion einsetzt (Lee-Erosion). Sowohl die Materialablagerungen an der Luvseite, die bei weiterem Fortschreiten zur Versandung einer durch eine Mole geschützten Hafeneinfahrt führen können, als auch die Erosionen auf der Leeseite sind von Nachteil. Sie können durch baggertechnische Entnahme des Sandes an der Luvseite und Aufspülung an der Leeseite behoben werden und somit den unterbrochenen Litoraltransport im Bauwerksbereich durch diese Bypass-Lösung wiederherstellen.

3. Veranlassung zur Strandaufspülung

3.1 Erfordernis von Schutzmaßnahmen, Schutzziele

Sandige Küsten unterliegen im allgemeinen ständigen Veränderungen. Da an den deutschen Küsten kaum Küstenformen mit einem geschlossenen Sandsystem auftreten (s. Empf. A, Abschn. 6), beschränkt sich die Betrachtung auf offene Sandsysteme. Gliedert man die Küste in Bereiche mit positivem, ausgeglichenem und negativem Sedimenthaushalt, so sind es die letzteren, die Küstenschutzmaßnahmen erforderlich machen. In derartigen Erosionsbereichen an Flachküsten kommt es durch Ausräumung der Strände zu erhöhten Wellenbelastungen von Dünen und Kliffs und dadurch zu verstärkten Abbrüchen (Küstenrückgang). Zur Verbesserung des Sturmflutschutzes und zur Erhaltung dieses natürlichen Schutzsystems werden Sandvorspülungen als aktive Schutzmaßnahmen zunehmend durchgeführt.

Strand und Randdüne bilden das natürliche Schutzsystem sandiger Küsten. Auf Küstenstrecken mit Erosionsphasen oder mit ständiger Erosion kommt es bei niedrigem und schmalen Strand vielfach zu beträchtlichen Dünenabbrüchen durch Sturmflutbelastung. Eine abnehmende Strandbreite bewirkt nämlich eine zunehmende Konzentration der Energieumwandlung des Seegangs und somit auch eine verstärkte Ausräumung des Strandes. Je geringer aber die Strandhöhe ist, desto höhere Wellen können ungebrochen bis zum Dünenfuß auflaufen und hier die erosionswirksame Linienbrandung verstärken. Andererseits wird mit abnehmender Breite des trockenen Strandes der für die Regeneration der Dünen wünschenswerte äolische Transport verringert. Diese Vorgänge führen daher bei negativer Sandbilanz zu strukturellen Abbruchserscheinungen. Der örtliche Küstenlängstransport, die Lage zur Hauptwind- und Wellenanlafrichtung sowie die unterschiedlichen Tideverhältnisse führen zu grundsätzlichen Unterschieden der Sandversorgung einzelner Küstenstrecken. Auf diese örtlichen Gegebenheiten wird daher zunächst eingegangen.

Für einzelne Küstenabschnitte ist das jeweils anzustrebende Schutzziel festzulegen. Ein zeitlich und in seiner Ausdehnung begrenzter Küsten- bzw. Dünenrückgang kann in unbebauten Gebieten gelegentlich, u. a. zum Erhalt der natürlichen Küstenprozesse, hingenommen werden. Vor besiedelten und bebauten Gebieten, vor Anlagen des Verkehrs und der Ver- und Entsorgung sowie vor schützenswerten Naturarealen müssen Küstenrückgang und Überflutungen auch bei extremen Ereignissen verhindert werden. Sandvorspülungen allein, z. B. vor Dünen und Kliffs und in Verbindung mit festen Schutzbauten, bieten sich hierfür an.

3.2 Kriterien für einzuleitende Schutzmaßnahmen

3.2.1 Tideküste mit wechselnden Sandbilanzen am Beispiel der ostfriesischen Küste

3.2.1.1 Örtliche Gegebenheiten

Die Ostfriesischen Inseln sind sogenannte Düneninseln. Durch Tideströmung und Brandung erfolgt eine resultierende Sandbewegung entlang den Stränden und im Küstenvorfeld der Ostfriesischen Inseln von West nach Ost. Im Bereich der Seegaten formen sich seewärts geschwungene Platenbögen (Riffbögen). Die Platen des Riffbogens nähern sich dem Strand der nächsten (östlichen) Insel. Die Sandversorgung der einzelnen Inseln ist trotz der Vergleichbarkeit des vorherrschenden Sedimenttransports völlig unterschiedlich (Abb. D1).

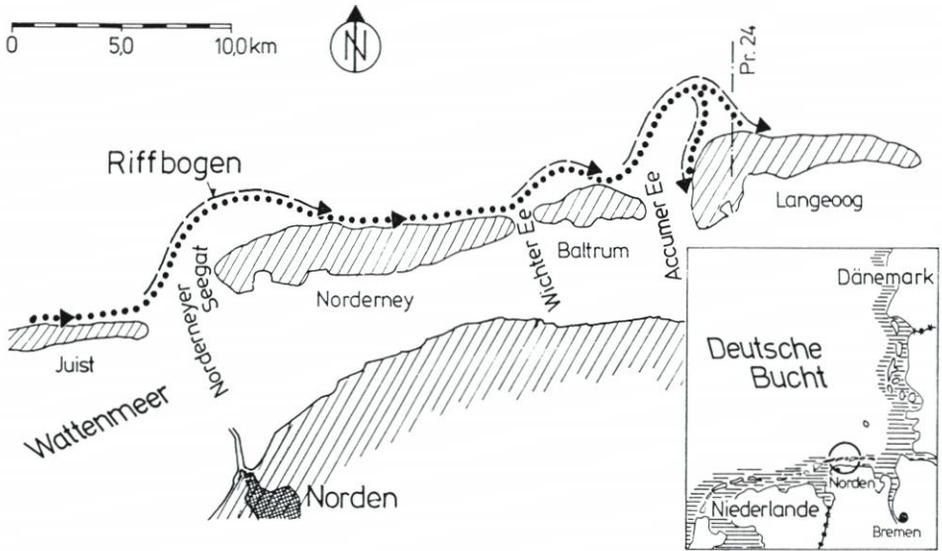


Abb. D 1. Küstenparalleler resultierender Sandtransport entlang der ostfriesischen Inselkette mit Riffbogen (Außendelta) vor dem jeweiligen Seegat [21]

Bei Norderney liegt dieser Anlandungspunkt der Platen z.B. vier bis fünf Kilometer östlich des Westkopfes im Bereich der Weißen Düne. Von dort ostwärts herrscht Sandüberschuß, der einen breiten, hohen, sich aufbauenden Strand zur Folge hat. Westlich dieses Anlandungspunktes fehlt der Sandnachschub. Daher bewirken hier die Kräfte der Tide und Brandung die für Sandmangelgebiete typische anhaltende Strand- und Dünenerosion. Besonders schwerwiegend wirkt sich der Strandabtrag an der 25 m tiefen Rinne des Norderneyer Seegats aus. Kurze, bis in 25 m Tiefe reichende Buhnen sichern hier den schmalen Inselsockel gegen die Tideströmung des Seegats (s. Empf. F, Beispiel 13). Der Westteil der Insel kann nur mit Hilfe von Schutzmaßnahmen gehalten werden.

Vom Ostende Norderneys lösen sich die Platen und berühren die kleine Insel Baltrum nur kurz. In Richtung Langeoog (Riffbogen der Accumer Ee) schwenken die Platen weit nach Norden aus. Die Lage und Ausrichtung der tiefen Rinne an der Westseite des Seegats hat einen engen Riffbogen zur Folge, so daß die Platen im Nordwesten Langeoogs anlanden und im Regelfall den Nordstrand wie den Nordwest- und Weststrand ausreichend versorgen (Abb. D 2). Aus diesem Grunde konnte hier bisher auf den Bau von Schutzwerken verzichtet werden. Aber nicht immer ist die gleichmäßige Verteilung des Sandes aus den anlandenden Platen auf den Nord- und den Weststrand sichergestellt. 1970 hat sich beispielsweise die Platen­gruppe D überwiegend nach Süden gewandt [39], so daß am Nordstrand 1971/72 dem starken Dünenabbruch mit einer Strandaufspülung begegnet werden mußte. Auch 1984 und 1987 mußten erodierte Strandstrecken aufgespült und 1982 durch Steuerung der Platananlandung aufgehöhht werden (s. Abschn. 8, Beispiel 2).

An den zwei beispielhaft beschriebenen Strandtypen der Ostfriesischen Inseln mit unterschiedlicher Sandversorgung werden die Schutzmaßnahmen exemplarisch erörtert:

- Das Westende von Norderney mit Schutzwerken auf 6 km Strandstrecke, das mit dem Westkopf unmittelbar an das 25 m tiefe Norderneyer Seegat angrenzt, erfährt keine natürliche Sandversorgung. Seit der ersten Aufspülung 1951/52 – auch die erste in Europa –

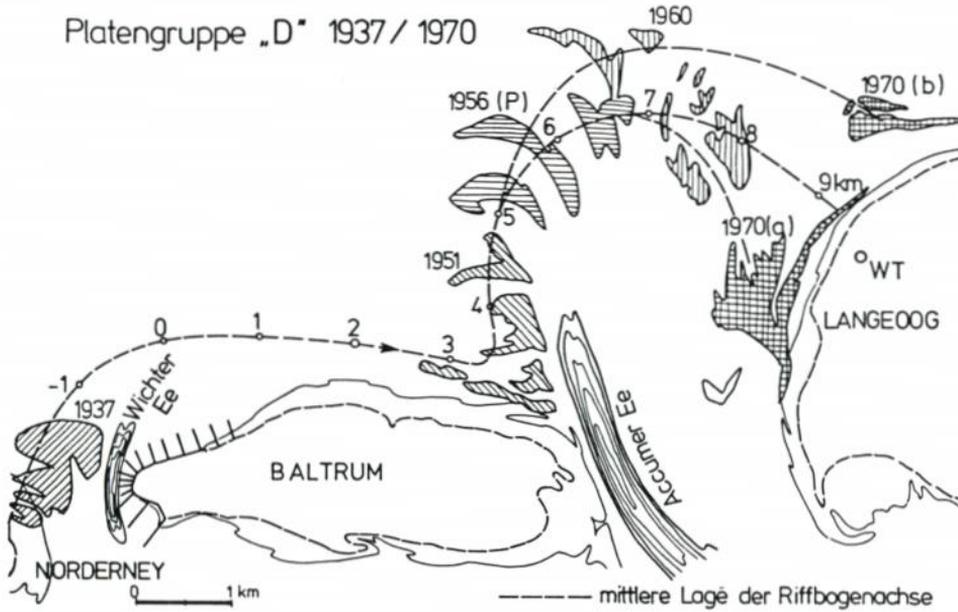


Abb. D 2. Räumlich-zeitliche Veränderung von Platen – Beispiel Platengruppe D von Norderney nach Langeoog 1937/1970 [39]

ist 1992 die 7. Aufspülung auf der rd. 2 km langen Strandstrecke am Westkopf und Nordweststrand durchgeführt worden.

- Der West- und Nordweststrand von Langeoog werden i. d. R. durch anlandende Platen ausreichend versorgt, weisen aber Erosionsphasen auf infolge von Versorgungslücken. Hier werden von Zeit zu Zeit Aufspülungen des nicht durch Schutzwerke gesicherten Strand-Randdünen-Bereichs notwendig.

Die Strandstrecken der anderen Ostfriesischen Inseln können i. d. R. einem dieser Typen zugeordnet werden.

3.2.1.2 Erosionsgefährdete Strand-Randdünen-Bereiche

Strukturelle Abbruchserscheinungen bei negativer Sandbilanz geben Veranlassung zu untersuchen, ob und inwieweit der erodierende Randdünenbereich den Sturmflutschutz für das Hinterland noch gewährleisten kann. Daher sind Kriterien bzw. Verfahren entwickelt worden,

- die anhand des Zustandes des erodierten Strandes eine mögliche Abbruchgefahr der Randdüne im voraus erkennen lassen bzw.
- die es ermöglichen, bei der gegebenen Situation von Strand und Randdüne den Sturmflutabbruch der Düne zu berechnen.

Eine auf den Ostfriesischen Inseln vorgenommene Typisierung der Strand-Randdünen-Situation ermöglicht von vornherein eine Eingrenzung möglicher Gefahrenbereiche. Hinsichtlich der Schutzwirkung bilden Strand und Randdüne eine funktionelle Einheit. Stärkere und bleibende Strand- und Randdünenerosion tritt nur bei niedrigen, schmalen Stränden ein.

Bei den West- und Ostfriesischen Inseln führen Ort und Zeitpunkt von Platananlandungen auf bestimmten Strandstrecken zu einem starken Wechsel der Strandsituation. Für die Ostfriesischen Inseln wurde daher eine Typisierung von Strand-Randdünen-Bereichen vorgenommen (Abb. D 3) [19]. Sandaufspülungen sind nur auf Strandstrecken des Randdünen-Typs 3 mit ständigem Sandmangel und ggf. des Typs 2 in Zeiten mit Sandmangel zwischen Platananlandungen erforderlich.

3.2.1.3 Dünenabbruch in Abhängigkeit von der Strandbreite

Selbst hinter hohen, breiten Stränden werden die Randdünen durch schwere Sturmfluten erodiert. Sie können sich jedoch bei dem ausreichenden Sandangebot eines breiten, trockenen Strandes in den Frühjahrs- und Sommermonaten wieder völlig regenerieren. Vielfach wird diese Sandablagerung durch Buschzäune gefördert und durch Strandhaferbepflanzung gesichert. Bei schmalen, niedrigen Stränden treten in schweren Sturmfluten wesentlich größere Dünenabbrüche ein, die nicht durch äolische Sandablagerungen ausgeglichen werden können.

Mit Hilfe von Zeit-Weg-Diagrammen der Strandentwicklung, aus denen die Abstände zwischen den Strand-Höhenlinien MThw, NN, MTnw und dem Dünenfuß bzw. der Standlinie ablesbar sind, können Phasen der Randdünenerosion, z. B. zwischen Platananlandungen, ermittelt werden. Abb. D 4 gibt die Strandentwicklung vor dem Hauptbad der Insel Langeoog im Zeit-Weg-Diagramm seit 1920 beispielhaft wieder [21].

Aus den Zeit-Weg-Diagrammen mehrerer Ostfriesischer Inseln wurde abgeleitet, daß bleibender Randdünenabbruch zu befürchten ist, wenn die Breite „b“ des Strandes zwischen $NN \pm 0$ und $NN \pm 3,0$ m (Dünenfuß) $b_{krit} = 150$ m unterschreitet und die Breite des nassen Strandes zwischen NN und MThw dabei weniger als $a_{krit} = 85$ m beträgt [21, 23], siehe auch Abb. D 5. Für die Ostfriesischen Inseln führte dies zu dem Vorschlag, daß bei $b < 150$ m ggf. Schutzmaßnahmen durch Sandaufspülungen einzuleiten sind, wenn zur Erhaltung des Schutzwertes der Randdüne kein Abbruch zugelassen werden soll [21, 23]. Dieses Kriterium ergibt andererseits auch Hinweise für die Bemessung einer Aufspülung (s. Abschn. 5.2.3.1).

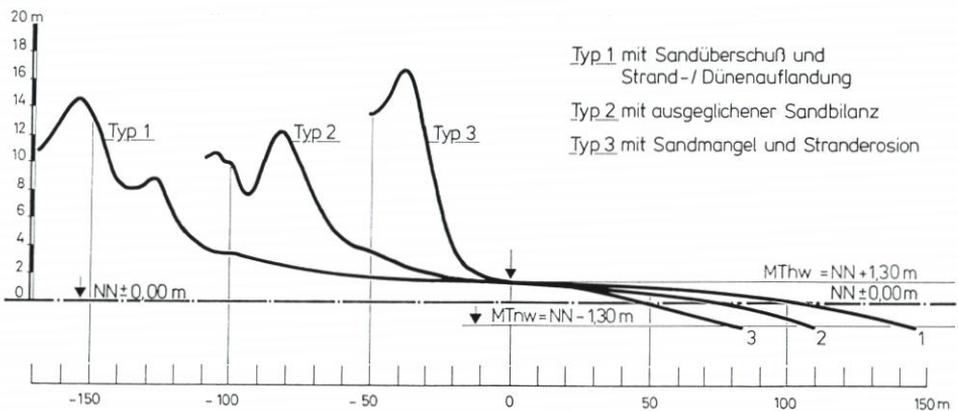


Abb. D 3. Schutzdünen-Strand-Profile der Ostfriesischen Inseln [19]

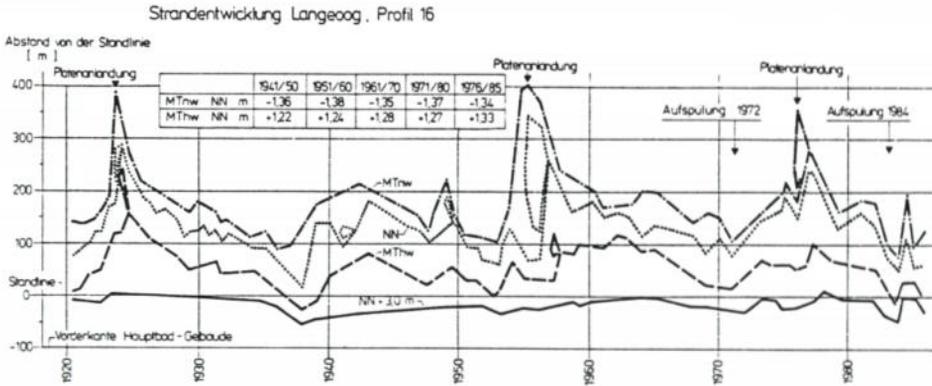


Abb. D 4. Strandentwicklung vor dem Hauptbad Langeoog im Profil 16 – Zeit-Weg-Diagramm seit 1920 – [21]

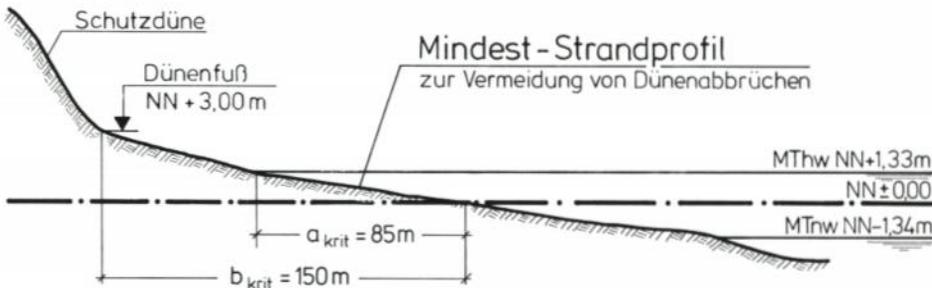


Abb. D 5. Mindeststrandprofil mit den Strandbreiten a_{krit} und b_{krit} zur Beurteilung der Dringlichkeit der Aufspülung eines schutzwerkfreien Strandes einer Ostfriesischen Insel [21]

3.2.1.4 Quantitative Bestimmung der Randdünenerosion durch Sturmfluten

In den Niederlanden sind – insbesondere nach der Sturmflut von 1953 – allgemeingültige Beziehungen zur quantitativen Bestimmung der Dünenerosion entwickelt und als Richtlinien herausgebracht worden.

Diesen in den Niederlanden entwickelten Verfahren zur quantitativen Bestimmung der Dünenerosion bei Sturmfluten liegt eine einheitliche physikalische Modellvorstellung zugrunde. In Abhängigkeit von dem vorhandenen Randdünen-Strand-Profil und den hydrodynamischen Randbedingungen bildet sich ein Sturmprofil aus, das einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit unterliegt. Die Ausbildung eines Sturmprofils erfolgt dabei durch die Umlagerung des Dünenabbruchs auf den vorgelagerten Strand mit vollständigem Massenausgleich (Abb. D 6). Seeseitig ist dieser Prozeß durch die äußere Brecherlinie begrenzt, die durch die Brecherwassertiefe (h_b)

$$h_b = H_{max} \quad (1)$$

bezogen auf die Verhältnisse während des Sturmflutscheitels und des Sturmprofils festgelegt wird. Der seeseitige Übergang vom Sturm- zum Ausgangsprofil wird durch eine Böschungseigung von 1 : 12,5 vorgegeben. Landseitig des neu ausgebildeten Dünenfußes wird ebenfalls

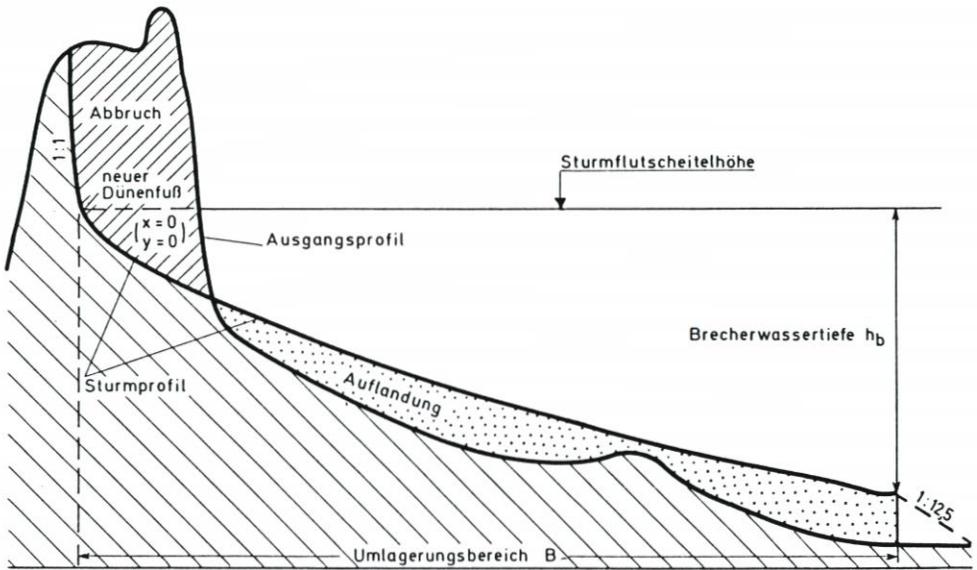


Abb. D 6. Rechnerische Ermittlung von Sturmprofilen – Prinzipskizze – [57, 71]

eine einheitliche Neigung angenommen, deren Winkel 45° beträgt. Die Form des Sturmprofils zwischen äußerer Brecherlinie und neuem Dünenfuß wird durch definierte funktionale Zusammenhänge bestimmt, für welche unterschiedliche Ansätze entwickelt worden sind.

Nach den ersten vorläufigen niederländischen Richtlinien (bei [57]) haben verschiedene niederländische Wissenschaftler nach weiteren Naturmessungen und Modellversuchen zu dem heutigen, völlig neuen Rechenmodell beigetragen [35, 71]. Anhand von Sturmflutprofilen von 1976 und 1983 auf den Ostfriesischen Inseln wurden die Verfahren mit gutem Erfolg angewandt [57].

Eine für den Sturmflutschutz nicht mehr ausreichende Randdüne kann durch Sandvorspülung verstärkt und gesichert werden.

3.2.1.5 Vorspülung zur Sicherung von Schutzwerken

Strände, die einem ständigen Abtrag unterliegen und keine Sandversorgung durch den Küstenlängstransport erhalten, sind vielfach seit Jahrzehnten, im Falle Norderney seit 1858, durch Deckwerke und Buhnen gesichert. Sie unterlagen nachfolgend einem nicht endenden Abbruch von Strand und Randdüne und erzwangen daher fortlaufende Anpassungen.

Auf der Insel Norderney dient die Aufspülung primär dazu,

- Deckwerke und Buhnen vor Unterspülung zu sichern und
- die Seegangsbelastung des Deckwerks in Grenzen zu halten.

Nach diesen Anforderungen ist daher ein Mindeststrandprofil, das nicht unterschritten werden darf, zu bestimmen. Es wurde so festgelegt, daß oberhalb MTnw in dem Zwickel vor dem Deckwerk stets mindestens ein Restvorrat (s. Beispiel 1, Ziff. 6) vorhanden ist. Die damit in den verschiedenen Buhnenfeldern festgelegten Mindestprofile sind auf Norderney das Kriterium dafür, wann spätestens erneut aufgespült werden muß. In der Regel wird das Mindestprofil zuerst im Divergenzbereich des Brandungsstromes erreicht.

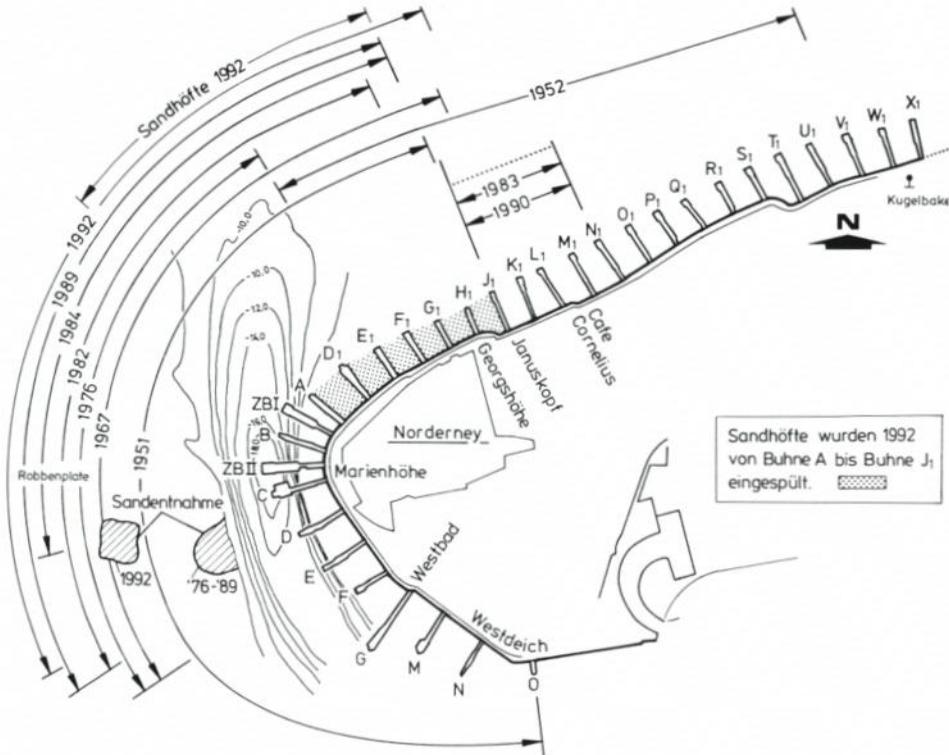


Abb. D 7. Westende der Insel Norderney mit Kennzeichnung der Aufspülstrecken und Sandentnahmen der Strandaufspülungen 1951 bis 1992 [26]

Durch Strandaufspülungen auf Norderney mit einer Materialeingabe am Westkopf auf unterschiedlicher Länge (s. Abb. D 7) von 1,5 bis 2,0 km Strandstrecke erhalten unter Ausnutzung des Küstenlängstransportes etwa 6 km unterversorgter Strände den erforderlichen Sandnachschub.

Nach der Strandaufspülung 1976 konnte eine Sandverfrachtung entlang des Nordstrandes mit rd. 1 km je Jahr ermittelt werden [21]. Erst 1983 erreichte die „Sandwelle“ die Buhne X1 an der Kugelbake (s. Beispiel 1, Ziff. 2).

3.2.2 Tideküste mit durchgehend negativer Sandbilanz am Beispiel Sylt

3.2.2.1 Örtliche Gegebenheiten

An der nordfriesischen Küste ist die Westküste der rd. 38 km langen Insel Sylt dem Seegang besonders ausgesetzt und unterliegt ständiger Erosion. Nach Abb. D 8 bildet die Küstenlinie Sylts bei Westerland einen Winkel von 22° . Nördlich verläuft sie in Kompaßrichtung 22° und südlich in 180° . Im Gegensatz zu den Ostfriesischen Inseln ist Sylt überwiegend ehemaliges Festland.

Der Energiefluß an den Stränden ist abhängig von der Seegangsenergie und der Wellen-

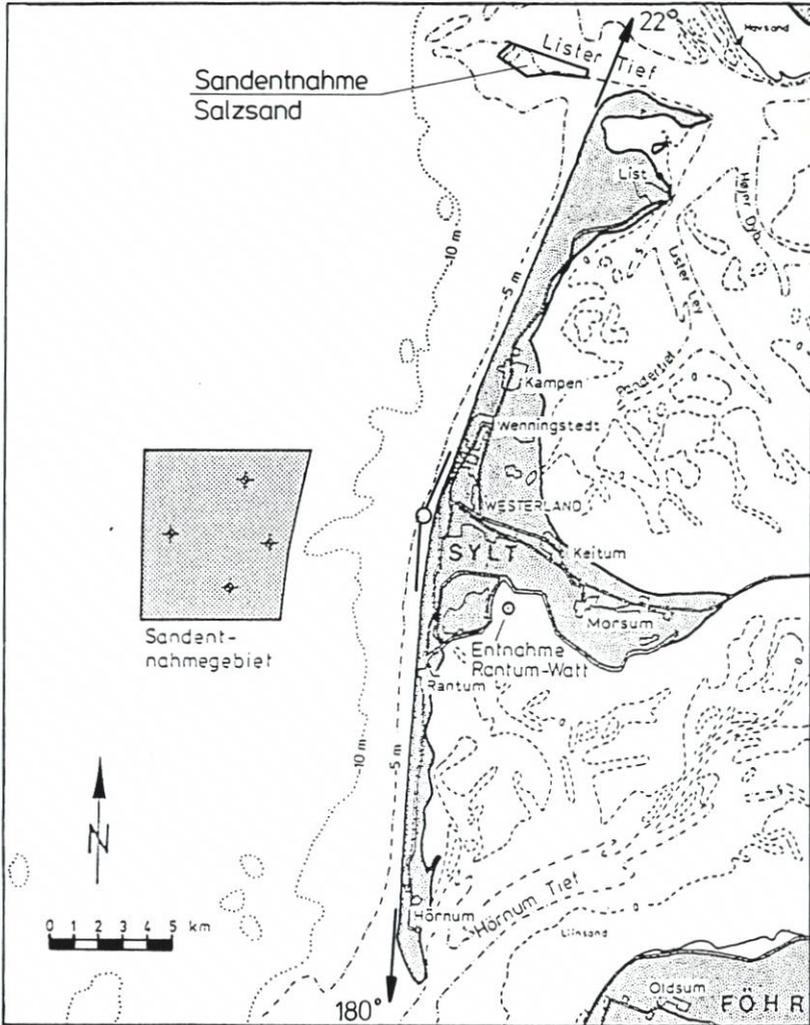


Abb. D 8. Lageplan der Insel Sylt mit Richtung des Küstenverlaufs und Lage der Sandentnahmegebiete (außer Hörnum, s. Abb. D 49) [2]

richtung (s. Empf. A, Abschn. 6). Im langzeitigen Mittel ist der resultierende Energiefluß und damit der Sandtransport im Nordteil der Insel nach Norden und im Südteil nach Süden gerichtet [15, 64]. An beiden Inselenden geht der Sand der Insel dann verloren.

Die Westküste der Insel Sylt ist als Festlandsrest seit Jahrhunderten auf der gesamten Länge von etwa 38 km dem Angriff der offenen Nordsee unter den vorherrschenden Wind- und Wellenrichtungen ausgesetzt. Der ständige Abtrag von Strand und Vorstrand bei normalen Bedingungen durch Seegangs- und Gezeitenkräfte sowie der Abbruch von Randdüne und Kliff bei schweren Sturmfluten führen zu dem ständigen Rückgang der Westküste, der sich nach 1952 im Mittel auf 1,5 m/Jahr gegenüber 0,9 m/Jahr vor 1952 erhöht hat. Die Übersicht über die mittleren Rückgänge der Westküste Sylts zeigt, daß sowohl vor als auch nach 1952 die größten Abbruchraten jeweils an den Inselenden auftraten (Abb. D 9). Weiterhin ist

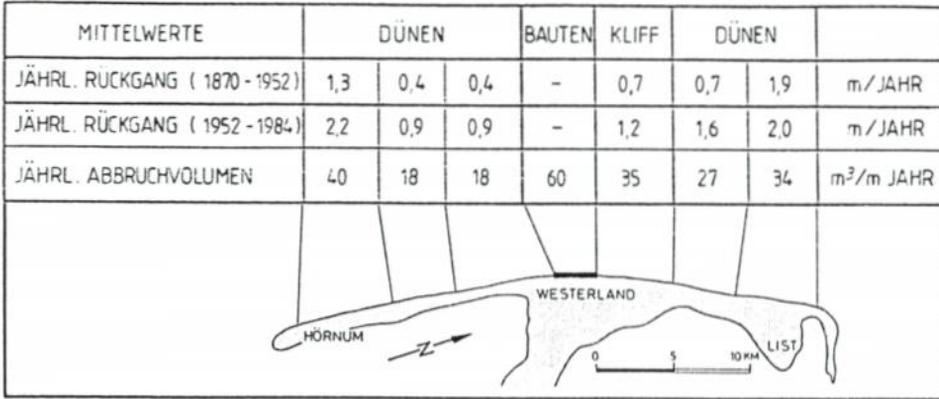


Abb. D 9. Mittlere Rückgänge der Westküste Sylts vor und nach 1952 [2]

deutlich zu erkennen, daß die Abbrüche nördlich von Westerland (Kliffabschnitt und Dünen mit Strand ohne Buhnen) immer größer sind als in dem vergleichbaren Bereich südlich von Westerland (Dünen mit Strand ohne Buhnen). Das wichtigste Ergebnis aber ist, daß sich insbesondere in den Mittelabschnitten nördlich und südlich von Westerland das Abbruchgeschehen in den Jahren nach 1952 gegenüber denen vor 1952 verdoppelt hat. Damit belegt diese Auswertung zugleich, in welchem Ausmaß sich das verstärkte Sturmflutgeschehen auch in verstärkten Abbruchraten bemerkbar gemacht hat.

Bei Sturmfluten gelangt das Abbruchmaterial in den Strand- und Vorstrandbereich und wird danach bei normalen Bedingungen durch die Brandungs- und Tideströmungen nach Norden und Süden verfrachtet, in den Flachwassergebieten vor dem Lister Tief am Nordende

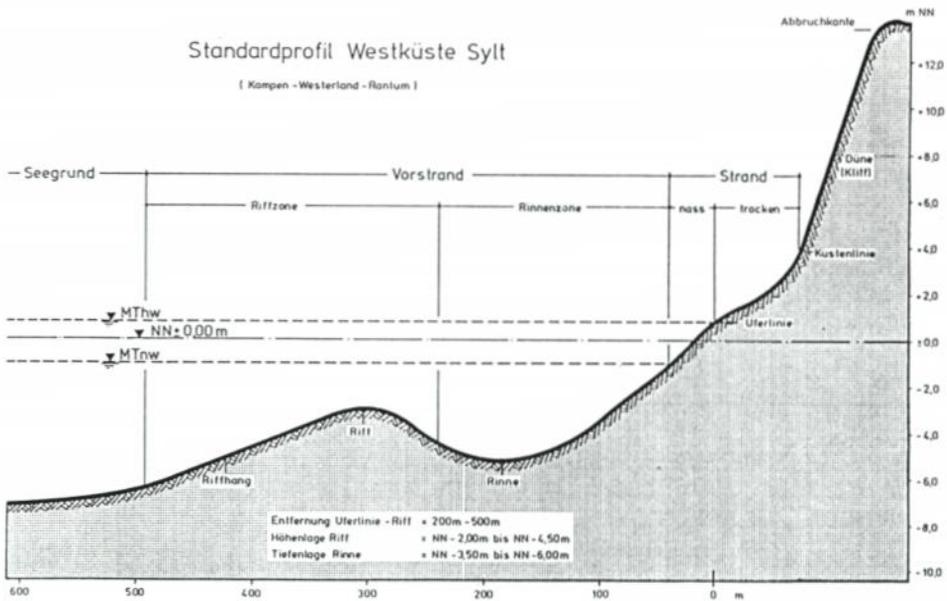


Abb. D 10. Standardprofil Westküste Sylt mit Strand, Rinne, Riff [41]

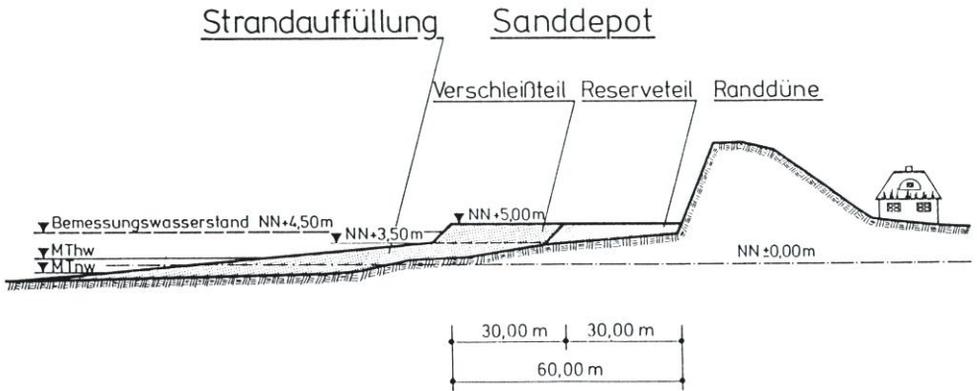


Abb. D 11. Regelprofil der Vorspülkörper zur Sicherung der abbruchgefährdeten Dünen und Kliffs an der Westküste der Insel Sylt [41]

und in dem Vortrappief am Süden der Insel abgelagert bzw. in die Seegaten transportiert, womit der Sand dann dem Sedimenthaushalt der Insel endgültig verlorengeht [64]. Aus den mittleren Abbruchraten 1952–1984 der Abb. D 9 kann eine mittlere jährliche Abbruchmenge von etwa 1,4 Mio. m³/Jahr errechnet werden [41].

Im Mittelabschnitt der Westküste ist ein dynamisches Profil aus Strand, Rinne und Riff vorhanden (Abb. D 10). Das Riff dämpft die Strandbrandung. Riffücken, die über längere Zeit bestehen, verstärken die Strand- und Vorstrandausräumung (s. a. Abb. D 46).

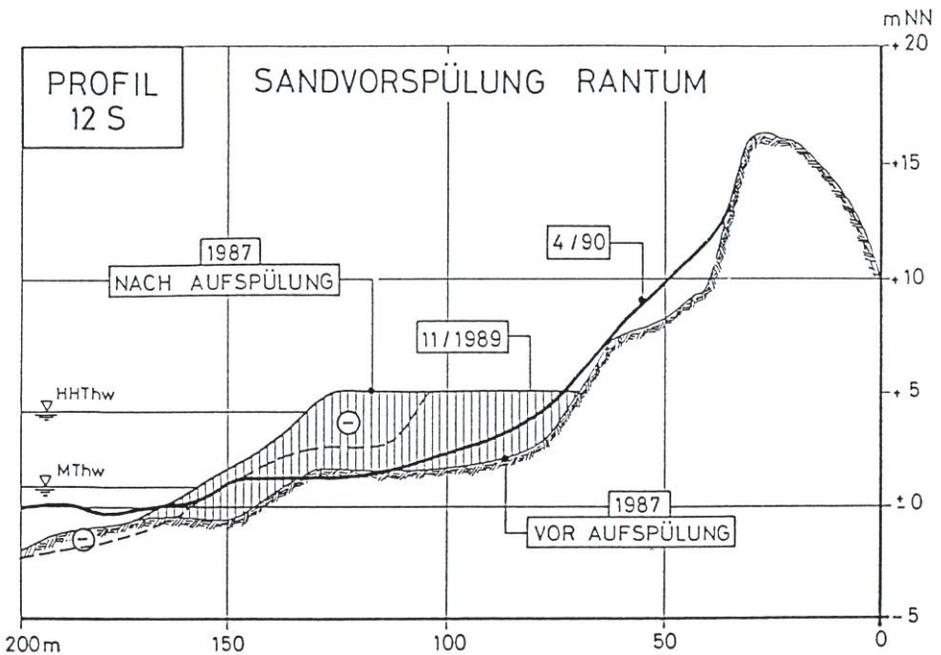


Abb. D 12. Ausräumung des Aufspülprofils Rantum zwischen 1987 und April 1990

3.2.2 Vorspülung zur Sicherung von Dünen, Kliffs und Schutzwerken

Nach dem Fachplan „Küstenschutz Sylt“ soll dem Abbruch der Westküste Einhalt geboten werden durch ausreichend dimensionierte Sandvorspülungen. Nach ersten Erfahrungen wurde die Vorspülgeometrie gem. Abb. D 11 gewählt [41]. Wie weit dieses Profil im Zeitraum 1987 bis Ende 1989 während einer relativ sturmflutarmen Zeit ausgeräumt wurde, zeigt Abb. D 12 ebenso wie die starken Sandverluste durch die außergewöhnliche Sturmflutserie im Januar/Februar 1990. Selbst das Reserveteil des Depots wurde nahezu vollständig ausgeräumt. Der Sandverlust übertraf die Vorausschätzungen, aber das Ziel „Vermeidung weiteren Randdünenabbruchs“ war weitgehend erfüllt. Eine Optimierung der Vorspülkörper ist Inhalt eines umfassenden Forschungsvorhabens. Als Kriterium für weitere Vorspülungen gilt die jeweilige Erhaltung eines ausreichenden Sanddepots.

3.2.3 Tidefreie Küste von Mecklenburg-Vorpommern

3.2.3.1 Örtliche Gegebenheiten

Die 340 km lange Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern besteht aus 206 km Flachküste und 134 km Steilküste. Lage und Gliederung der Küstenabschnitte sowie deren Exposition zur Belastung führen zu negativem Sedimenthaushalt und Küstenrückgang auf 70 % der Gesamtlänge (240 km), davon ist die Flachküste mit 160 km betroffen. Abb. D 13 zeigt die Haupttransportrichtungen und die durchschnittlichen Rückgangsgeschwindigkeiten. Die Hochwasserschutzanlagen an den Flachküsten, die aus Dünen oder aus Kombinationen von Dünen und Deichen mit dazwischenliegendem Busch- und Waldstreifen bestehen, erfahren auf Grund des Sandmangels und des Rückgangs eine ständige Schwächung, wobei immer wieder das erforderliche Sicherheitsmaß unterschritten wird. Die in Abb. D 13

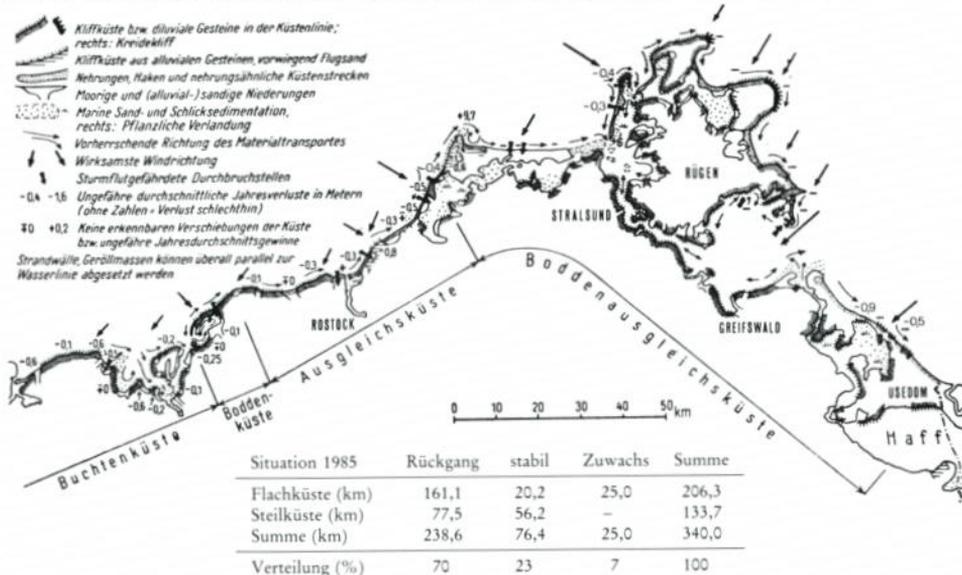


Abb. D 13. Karte zur Dynamik der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern [77]

eingetragenen Durchbruchstellen, die in der Vergangenheit bei schweren und sehr schweren Sturmfluten auftraten, belegen die Gefahrensituation.

Zur Sicherung der Küste mit ihrer derzeitigen Nutzung ist die künstliche Sandzufuhr unerlässlich. Insgesamt sind in den 24 Jahren von 1967 bis 1991 rund 6,5 Mio. m³ Sand von See her aufgespült worden, d.h. i.M. rund 270 000 m³ jährlich, das sind eine oder zwei Aufspülungen pro Jahr (Abb. D 14). Als mittlere Einbaumenge wurde bisher 125 m³/lfd.m Küste verwendet; bei insgesamt 6,5 Mio. m³ Spülsand sind dies 52 km Einbaulänge. Die Aufspülungen sind nahezu ausnahmslos durch Buhnen in ihrer Lagestabilität und Wirkungsdauer unterstützt worden. Als mittleres Zeitintervall für Wiederholungsaufspülungen gilt 6 oder 7 Jahre. Durch die notwendigen Wiederholungen beträgt die bespülte Küstenlänge weniger als 40 km. Die Flachküste von Mecklenburg-Vorpommern wird auf 167 km durch Dünen geschützt; die Aufspülungen sind Grundlage der Dünenwiederherstellung in den Abschnitten mit derzeitig erkennbarer Durchbruchgefährdung bei schweren und sehr schweren Sturmfluten.

3.2.3.2 Aufspülung und Dünenwiederherstellung

Bei beiden Schutzsystemen – alleinige Düne (Abb. D 15) oder Kombination von Düne und Deich mit dazwischenliegendem Busch- und Waldstreifen (Abb. D 16) – spielt der Sedimenthaushalt die entscheidende Rolle, um den Belastungen bei Sturmfluten zu widerstehen. Auf Grund der verbreiteten negativen Sedimentbilanz auf 70 % der Küstenstrecke ist ein mächtiges natürliches Dünenmassiv kaum anzutreffen. Vielmehr wird mit technischen Mitteln der vorhandene Sand zu einem Dünenkörper geformt (regulierte Düne), bei dem eine

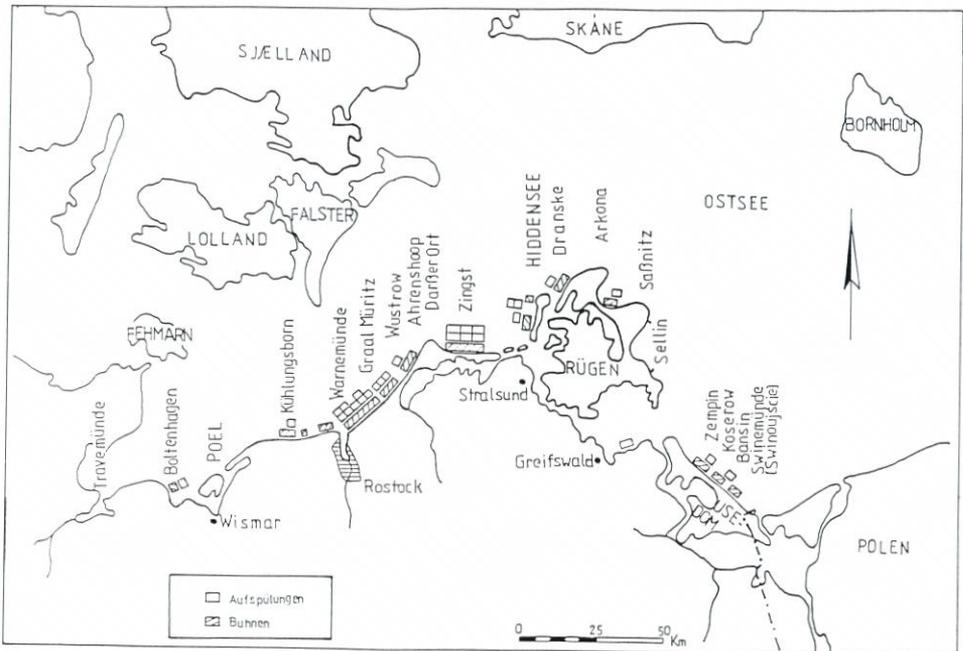


Abb. D 14. Aufspülungen an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern (Lageplan)

Kronenhöhe von 3,5 m und Kronenbreiten von ca. 45 m angestrebt werden, um bei sehr schweren Sturmfluten Sicherheit zu gewähren. Leichte Sturmfluten und Küstenrückgang schwächen den Dünenkörper, abschnittsweise werden Kronenbreiten von nur 50 % der Ausgangswerte angetroffen. Aufspülungen zur Sandanreicherung des Vorlandes und zur seawärtigen (teils auch landwärtigen) Verstärkung der Düne bis über das Ausgangsmaß hinaus (mit Verschleißteil) werden ausgeführt (Abb. D 15/1 bis D 15/3). Läßt es die Hinterlandsituation zu (keine Bebauung), verlagert sich langfristig die Düne mit dem Rückgang der Uferlinie landwärts bei etwa gleichbleibenden morphologischen Verhältnissen. Das Schutzsystem kann mit Hilfe der Aufspülungen dauerhaft betrieben werden, jedoch sind die stabilisierenden Einbauten in See den durch Uferlinienrückgang veränderten Verhältnissen anzupassen, sollen sie ihre Wirkung erbringen.

Anders bei dem kombinierten System Düne-Wald-Deich. Strand, Düne und Wald müssen im Falle einer schweren Sturmflut die Energie dämpfen, da der Deich nur eine Grasdecke und niedrige Kronenhöhe besitzt. Hier sind Dünenkronenbreiten von 20 bis 25 m und Waldbreiten von 100 m angestrebt. Der Küstenrückgang bei negativem Sedimenthaushalt reduziert diese Breiten, so daß im Belastungsfall der Grasdeich überlastet würde und die Gefahr des Durchbruchs bestünde. Die Aufspülung verstärkt die Düne seawärts (einschließ-

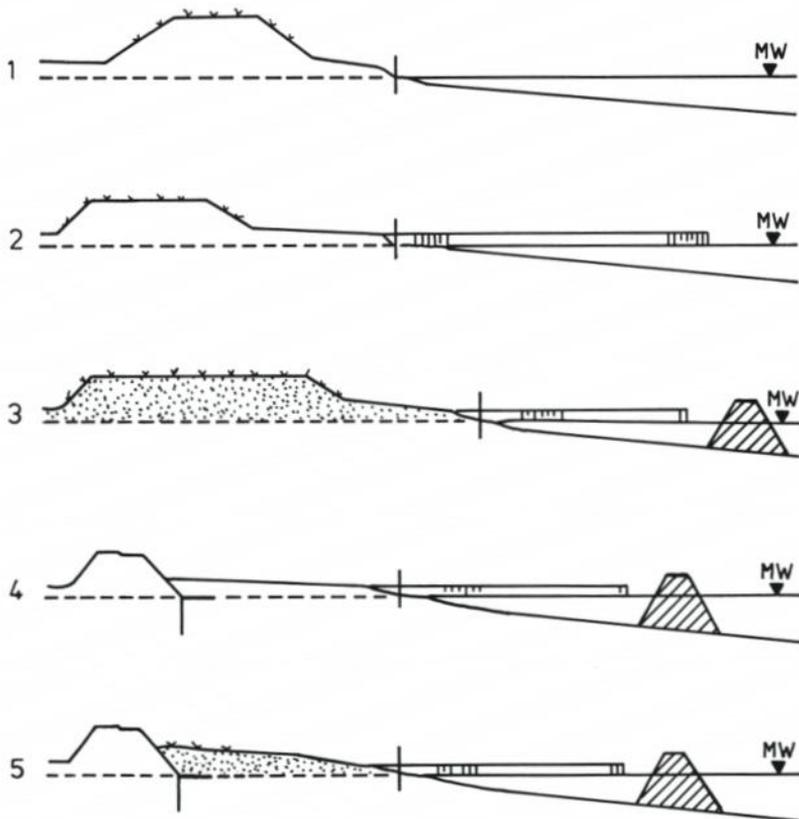


Abb. D 15. Schutzsysteme an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern – Küsten- und Hochwasserschutz an Flachküsten auf der Grundlage von Dünen verbunden mit Einbauten auf der Schorre

lich Verschleißteil), kann aber die Waldbreite nicht wieder erwirken (Abb. D 16/1 bis D 16/3). Erreicht der Wald eine wirkungslose Breite (etwa kleiner als 25 m), so werden Düne und Deich durch Auffüllung zu einem gemeinsamen Sandkörper verbunden oder, falls die Hinterlandsituation dies erlaubt, wird das kombinierte System landwärts neu aufgebaut (Abb. D 16/5).

3.2.3.3 Aufspülung vor Längswerken von Dünendeichen

Bei beiden unter Abschn. 3.2.3.2 dargestellten Schutzsystemen gibt es in Siedlungsgebieten Küstenabschnitte, wo Bebauung die Rückverlegung der Anlagen unterbindet. Sowohl die Düne als auch der Deich müssen dann Fuß-, Böschungs- und Kronenbefestigungen (Längswerke, Deckwerke, s. Empfehlungen E) erhalten (Abb. D 15/4 und Abb. D 16/4). Besonders bei den Dünendeckwerken in Abschnitten mit Küstenrückgang kommt es zu einer Steigerung der Belastungsgrößen und zu der Gefahr der Zerstörung. Aufspülungen müssen die Vertiefung am Bauwerksfuß ausgleichen und gegen Lee-Erosionen in den unverbauten Nachbarabschnitten einwirken (Abschn. 8, Beisp. 6).

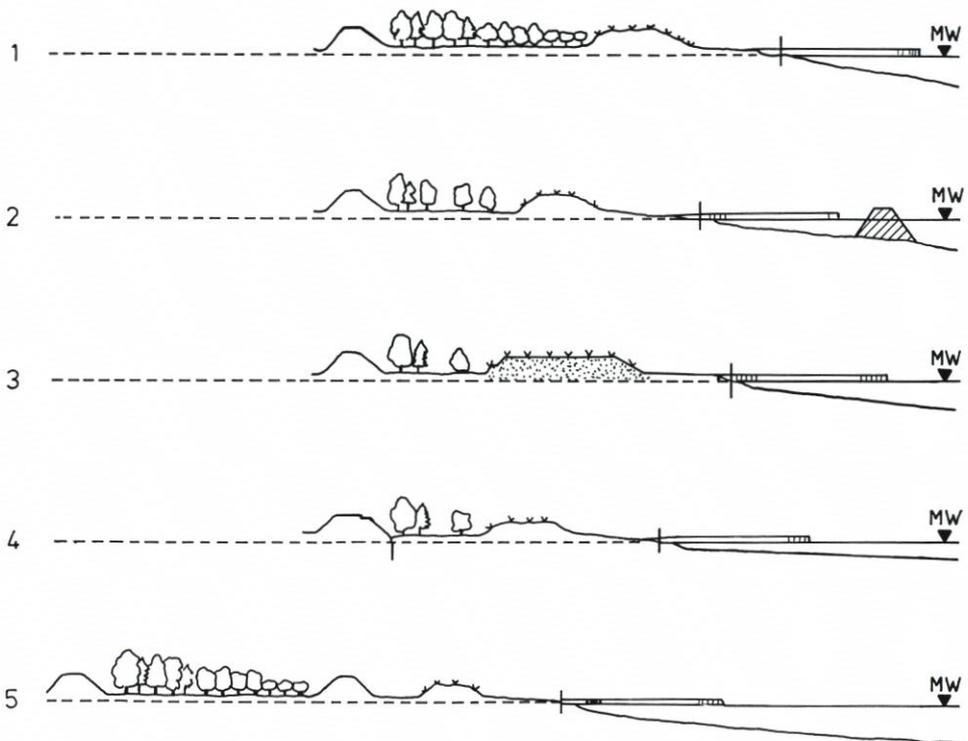


Abb. D 16. Schutzsysteme an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern – Küsten- und Hochwasserschutz an Flachküsten nach dem System Düne-Schutzwald-Deich verbunden mit Einbauten auf der Schorre

4. Voruntersuchungen

4.1 Hydromorphologische Gegebenheiten, Wiederholungsintervall

Wie bei jeder Planung von Küstenschutzmaßnahmen, so müssen auch für die Strandauffüllung die Daten über die hydrodynamische Beanspruchung bekannt sein bzw. ermittelt werden. Im Unterschied zu Bauwerkskonstruktionen erfährt aber der aufgefüllte Strand durch Brandungsbeanspruchung Veränderungen durch Umlagerungen quer und längs zur Küste. Andererseits wirkt der erhöhte und verbreiterte Strand im Sinne des „aktiven Küstenschutzes“ und vermindert die Beanspruchung des dahinter liegenden Ufers.

Die natürliche langfristige Sandbilanz des zu schützenden Strandabschnittes ist von grundlegender Bedeutung (s. Empf. A, Abschn. 6). Zu unterscheiden ist nach Stränden

- mit zeitweilig, ggf. periodisch auftretenden Phasen mit Sandmangel oder
- mit ständiger negativer Sandbilanz.

Phasen mit Sandmangel werden auf Teilabschnitten einiger Ostfriesischer Inseln jeweils beendet mit Platananlandungen. Häufig drängt die sich auf den Strand schiebende Plate einen Strandpriel oder eine Strandbalje vor sich her, die kurzfristig zu stärkerer Strandabnahme führen [21].

Die kurz- und langfristigen Strandveränderungen werden erfaßt durch regelmäßige, bei starken Veränderungen zweimal jährliche Profilmessungen des Strandes und Vorstrandes. Dabei sind die angrenzenden Randdünen in mehrjährigem Abstand und bei den Vorstrandpeilungen ein etwa vorhandenes Riff-System mitzuerfassen. Auch flächenhafte Geländeaufnahmen sind geeignet. Die Langzeitentwicklung verdeutlichen Zeit-Weg-Diagramme gemäß Abb. D 4.

Tideströmungen und vor allem Brandungsströmungen bedingen den Küstenlängstransport des Sandes. Zur Beurteilung der Vorgänge sind von Bedeutung:

- Tidewasserstände einschl. der Ermittlung von Sturmflutverweildauer- und Sturmfluthäufigkeits-Analysen
- Seegangsdaten einschl. Wellenrichtung
- Windwerte zur Ermittlung der vorherrschenden Richtung und der Häufigkeit von Starkwinden und Stürmen sowie ggf. für die Abschätzung eines äolischen Sandtransportes
- Untersuchung von Tideströmungen
- Ermittlung des Energieflusses am Strand und des Sandtransportes nach Menge und Richtung (s. Empf. A Abschn. 6)

Die hydromorphologischen Gegebenheiten sind auch bedeutsam für die Abschätzung der Wiederholungsintervalle von Strandauffüllungen. Diese zu bestimmen, dienen die theoretischen Überlegungen über den Massenbedarf und das nicht zu unterschreitende Mindeststrandprofil für Strände mit ständiger Erosion sowie bei zeitweiligem Sandmangel die Erosionsraten aus früheren Erosionsphasen nach dem Zeit-Weg-Diagramm (s. Abb. D 4 und Abschn. 5.2.2.2).

4.2 Kriterien für die Auswahl des Auffüllmaterials

- Für die Auswahl des zu verwendenden Materials sind folgende Kriterien maßgebend:
- Kornverteilung und Kornform des vorhandenen Strandmaterials,
 - die Verfügbarkeit von Material in ausreichender Menge und in günstig gelegenen Lagerstätten,

– die Wirtschaftlichkeit der Gewinnung und des Transportes.

Je nach der Zielsetzung der geplanten Auffüllung und den besonderen örtlichen Verhältnissen sind unter Beachtung dieser Kriterien Entscheidungen nach Optimierungsprinzipien zu treffen. Hierbei gilt folgendes allgemein:

- Stark schluffhaltige Sande sind für Strandauffüllungen an Brandungsküsten ungeeignet, da sie hohe Spülverluste aufweisen, sehr flache Strandprofile und hohe Verlustraten ergeben.
- Mittelsandhaltige Feinsande eignen sich zwar hervorragend für hydraulische Förderung und Transport, ergeben jedoch ebenfalls noch ein flaches und damit im allgemeinen ungünstiges Strandprofil. Sie bilden jedoch vielfach das einzige mit vertretbarem Aufwand gewinnbare Material.
- Körnungen im Bereich der Mittelsandfraktion sind für Auffüllungen gut geeignet. Es handelt sich hierbei außerdem um ein Material, das in den pleistozänen Ablagerungen des deutschen Küstengebietes verbreitet in großen Mengen zur Verfügung steht.
- Grobsande und Kiese können nur in besonderen Fällen für Strandauffüllungen verwendet werden. Sie bilden ein verhältnismäßig steiles Strandprofil aus, stehen an den deutschen Küsten nur begrenzt in natürlichen Lagerstätten zur Verfügung und eignen sich auch weniger gut für die Förderung in Rohrleitungen.
- Das für die Auffüllung verwendete Material sollte, soweit keine anderen Kriterien maßgebend sind, geringfügig grobkörniger sein als das vorhandene Strandmaterial; es sollte aber nicht allzu sehr vom natürlichen Kornaufbau des betreffenden Küstenabschnittes abweichen.

4.3 Erkundung von Lagerstätten

Die Wirtschaftlichkeit einer Strandauffüllung hängt entscheidend von der Verfügbarkeit geeigneten Materials ab. Lagerstätten sind daher bereits in einem frühen Stadium der Voruntersuchung zu erkunden.

Unabhängig von der erst später zu treffenden Entscheidung über das Einbauverfahren sollten Verbreitung, Mächtigkeit und Überdeckung des geeigneten Bodenmaterials (s. Abschn. 4.2) in der weiteren Umgebung des betreffenden Küstenabschnitts erfaßt werden. Die Untersuchung sollte mögliche Lagerstätten an Land als auch im angrenzenden Seegebiet einschließen (s. Abschn. 4.4).

Grundlagen dieser „Lagerstättenstudie“ bilden geologische Karten, Bohrungen oder Kartierungen. In der Regel sind zusätzliche Erkundungsbohrungen erforderlich. Sie werden zunächst in einem weitmaschigen Raster angesetzt. Um den Untersuchungsaufwand zu begrenzen, müssen vor der Planung eines engmaschigen Bohrprogramms zur Festlegung und Begrenzung des Entnahmebereichs zunächst Entscheidungen über das zu wählende Gewinnungs-, Transport- und Eingabeverfahren getroffen werden (s. Abschn. 6.1).

Bei Entnahmen im Watt- und Seegebiet sind neben ökologischen Aspekten die möglichen Beeinflussungen auf die morphologische Entwicklung sowie auf die Schifffahrt abzuschätzen. Bei einer Sandentnahme in einem bei Normaltiden oder nur bei Sturmzeiten überflutbaren Randbereich einer Insel oder Küstenstrecke bedarf die künftige Entwicklung insofern einer besonderen Untersuchung, als das Ein- und Ausströmen des Wassers zur Ausräumung von sich ständig vergrößernden Prielen führen kann (s. Abschn. 8, Beisp. 2).

Bei der Festlegung der Sandentnahme sind die ökologischen Gegebenheiten in möglichen Entnahmegebieten vergleichend zu bewerten (s. Abschn. 4.4). Auch sind die Festlegungen der Naturschutzgesetze und der für das Wattgebiet ggf. geltenden Nationalparkverordnung zu beachten. Ferner ist die künftige Entwicklung der Entnahmestelle abzuschätzen.

Bei einer Entnahme im Binnenland sind ggf. ergänzende Maßnahmen nach einem landschaftspflegerischen Begleitplan durchzuführen. Dieser ist im Rahmen der erforderlichen Bodenabbaugenehmigung nach dem Naturschutzgesetz aufzustellen.

4.4 Ökologische Randbedingungen

Natur und Umwelt sollten bei Sandvorspülungen möglichst weitgehend geschont werden. Wie bei allen größeren Erdbewegungen lassen sich Eingriffe aber nicht völlig vermeiden. Ökologische Beeinträchtigungen können entstehen

- auf den Entnahme- und Aufspülflächen
- an Übergabestellen
- in Rohrleitungstrassen
- durch die Nebenarbeiten (Einrichten, Spülfeldarbeiten)
- durch Geräte-Emission.

Entsprechend dem Gebot der Vermeidung von Eingriffen sind für die o.g. Bereiche Variantenuntersuchungen auch im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit durchzuführen.

Diese Untersuchungen müssen in geeigneter Weise die Bewertung von Eingriffen, soweit sie sich nicht vermeiden lassen, ermöglichen. Eingriffsminimierungen können nach Auswertung dieser Untersuchungen durchgeführt werden bei der Wahl des Entnahmegebietes, bei der Wahl der Fördertechnik und durch möglichst schonende Durchführung der Spülfeldarbeiten auf dem Strand. Auch die Baustellentransporte an Land und die Einrichtung und Vorhaltung von Lagerplätzen sind unter dem Gesichtspunkt der Eingriffsminimierung durchzuführen. Bei Sandentnahmen aus Wattgebieten ist deren besonderer Schutz (z. B. Nationalpark) zu berücksichtigen.

Wo es sich anbietet, sollte auch die Verwertung von anfallendem Baggergut aus anderen Maßnahmen, wie z. B. Hafen- oder Hafenzufahrtsbaggerungen, in Erwägung gezogen werden, selbst wenn sich dadurch längere Transportwege ergeben sollten.

5. Planung von Strandaufspülungen

5.1 Materialeigenschaften und Strandprofil

5.1.1 Beziehung zwischen Strandneigung und Korngröße

Das Profil eines Brandungsstrandes wird durch die hydrodynamischen Kräfte und die Eigenschaften des Strandmaterials geprägt (s. Empf. A, Abschn. 6). Die Strandneigung ändert sich mit dem mittleren Korndurchmesser des Sandes. Ein straffer Zusammenhang besteht jedoch nicht, so daß nur Größenordnungsangaben gemacht werden können (Tab. D1). Zu berücksichtigen sind besonders die Profillumformungen bei starkem Wellenangriff und höheren Wasserständen (Sturmfluten). Sie führen zur Abflachung des Strandprofils, wobei Material aus dem oberen Strandbereich – auch aus Dünen- und Klifferosion – abgetragen und im unteren Strandbereich oder auf dem Vorstrand abgelagert wird. Unter Schönwetterbedingungen, d. h. bei normalen Wasserständen und vorwiegend brandenden flachen Dünungswellen, bilden die bei Sturmfluten abgeflachten Strände in der Regel wieder steilere Profile aus (s. Empf. A, Abschn. 6).

Diese für den Entwurf einer Strandaufspülung wichtigen Zusammenhänge sind möglichst

an Hand der Ergebnisse der örtlichen Untersuchungen (s. Abschn. 4.2) abzuleiten oder zu überprüfen. Falls dafür keine ausreichenden Grundlagen zur Verfügung stehen, können die Daten der Tabelle D 1 verwendet werden.

Tabelle D 1. Mittlere Neigung von Brandungsstränden (Tidebereich)

Mittlerer Korndurchmesser (mm)	Geringer Wellenangriff (Sommerprofil)	Starker Wellenangriff erhöhte Wasserstände (Sturmflutprofil)
0,2	1:50 bis 1:100	1:50 bis 1:100
0,3	1:25 bis 1: 50	1:45 bis 1: 55
0,4	1:15 bis 1: 25	1:40 bis 1: 45
0,5	1:10 bis 1: 15	1:35 bis 1: 40

(Oberhalb MThw kann die Neigung für diesen Korngrößenbereich etwa mit 1:30 bis 1:40 angenommen werden.)

5.1.2 Beziehung zwischen Spülfeldneigung und Korngröße

Bei Sandaufspülungen mit hydraulischen Fördersystemen stellen sich im Spülfeld Neigungen ein, die im wesentlichen von der Kornverteilung und der Gemischkonzentration des Spülguts abhängen. Daneben sind Förderleistung und hydraulische Bedingungen am Rohrauslauf von Einfluß.

Sobald das Gemisch aus dem Spülrohr austritt, verringert sich die Geschwindigkeit wesentlich, und mit fallender Geschwindigkeit auf dem Spülfeld entmischt sich das Material bis auf sehr feine Anteile, die als Suspension unabhängig vom Gefälle in Schwebelage bleiben. Die Böschungsneigung vor dem Rohrauslauf hängt erfahrungsgemäß ab

- von der Geschwindigkeit, mit der das Gemisch austritt,
- von der Art des Rohrauslaufs (voller Rohrauslauf, vorgehängte Prallstücke, geschlitzte Rohre),
- von der Bodenart. (Kiese und Sande lagern sich mit fallender Spülfeldgeschwindigkeit ab),
- vom Spülen über oder unter Wasser,
- vom Gemischverhältnis (Wasserzusatz kann die Böschungsneigung verflachen).

Die steilste Böschung, die Kiese oder Sande in natürlicher Schüttung annehmen können, wird als natürlicher Böschungswinkel bezeichnet, der etwa dem Reibungswinkel ϱ der Bodenmechanik in lockerster Lagerung entspricht. Bei Wasserzusatz verringert sich der Böschungswinkel auf mind. $\varrho/2$, wenn der Boden wassergesättigt ist und der innere Wasserstrom parallel zur Böschung läuft [6].

Für einen Spüldurchmesser von etwa 0,5 m kann als Anhalt von den Daten der Tabelle D 2 ausgegangen werden.

Tabelle D 2. Durchschnittliche Spülfeldneigung in Abhängigkeit von der Korngröße

Über Wasser:	Feinsand	1:100 und mehr
	Mittelsand	1: 50
	Grobsand	1: 25
	Kies	1: 6 bis 1:10
Unter Wasser: (still)	Fein-/Mittels.	1: 5 bis 1: 8
	Grobsand	1: 3 bis 1: 4
	Kies	1: 2
Unter Wasser: (bewegt bis starker Strom bzw. Seegang)	Fein-/Mittels.	1: 10 bis 1:28
	Grobsand	1: 4 bis 1:10
	Kies	1: 3 bis 1: 6

Spülgutausläufe über Wasser ergeben bei gleichem Material sehr viel flachere Neigungen als die in Tab. D 1 angegebenen natürlichen Strandneigungen. Beim Spülfeldauslauf unter Wasser sind sie steiler. Diese Zusammenhänge sind bei der Planung zu berücksichtigen. Die in der natürlichen Spülfeldneigung entstandenen Profile werden sich innerhalb verhältnismäßig kurzer Fristen entsprechend den Strandneigungen in Tabelle D 1 umformen.

5.2 Ausbildung von Aufspülkörpern

5.2.1 Zum Verhalten einer Strandaufspülung

Mit einer Strandaufspülung als einer flächenhaften Maßnahme soll einer erodierenden Strandstrecke ein Sandvorrat zugeführt werden, der für eine bestimmte Zeit diese Küstenstrecke stabil erhält. Wie lange die Wirkung der Strandaufspülung anhält, ist außer von dem Aufspülmaterial vor allem von dem Wellenklima abhängig. Das Wellenklima wiederum ist nicht allein durch die Wasserstände und die damit verbundenen Wellenhöhen und -perioden sowie deren Verweilzeiten bedingt, sondern vor allem durch die Wellenangriffsrichtungen; die größten Sandverluste an Aufspülstrecken werden durch diejenigen Wellenangriffsrichtungen verursacht, die mit ihren Brandungsströmungen den größten küstenparallelen Sandtransport erzeugen [12]. Hierzu wird auf die theoretischen Betrachtungen zur Sandbewegung in Empf. A, Abschn. 6, verwiesen.

Der normale Querschnitt einer flächenhaften Strandaufspülung unmittelbar nach dem Spülvorgang entspricht vielfach der schematischen Darstellung auf Abb. D 17. Darin wird angedeutet, daß die natürlich vorhandenen Strandneigungen sowohl oberhalb als auch unterhalb der Uferlinie (Schnittpunkt des Strandes mit der MW- oder MTnw-Linie) meist steiler als die des freien Spülstrandes sind. Der relativ steile Unterwasserhang unterhalb der Uferlinie wird durch Wellen und Strömungen allmählich umgeformt bzw. abgetragen.

Die Veränderung des vorhandenen Strandprofils durch eine Strandaufspülung entsprechend Abb. D 17 bedeutet immer eine Störung, die um so größer ist, je größer die Vorspülmasse je lfdm. Strandbreite wird; entsprechend der Größe der Störung wird auch der Abtrag durch Wellen und Strömungen verstärkt. Nach FÜHRBÖTER [29] führt dies in Analogie

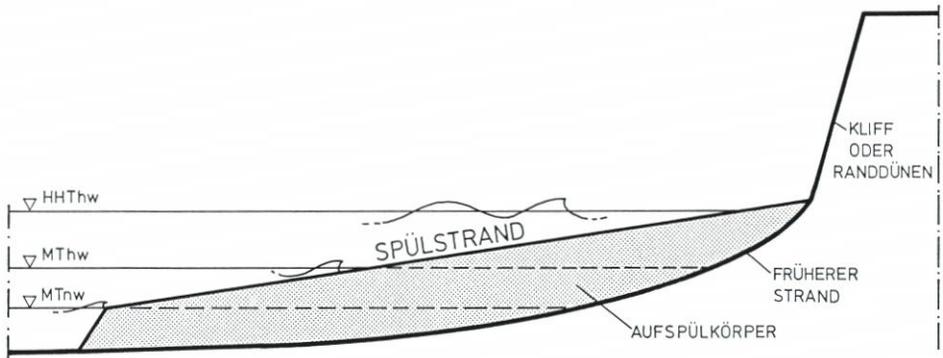


Abb. D 17. Schematische Darstellung des Querschnittes einer Flächenvorspülung (überhöht)

zu dem Gesetz des radioaktiven Zerfalles zu einer Abnahme der Spülmenge nach der Beziehung

$$V = V_0 \cdot 2^{-t/t_H} \quad (2)$$

mit V = der Spülmenge als Funktion der Zeit, V_0 = der ursprünglichen Spülmenge und t_H = der Halbwertszeit als der Zeit, nach der noch gerade die Hälfte der ursprünglichen Spülmenge V_0 vorhanden ist (Abb. D 18).

Es wird hierbei vorausgesetzt, daß die Strömungen oder die Wellenenergien sich gleichmäßig auf die Zeit verteilen. Da dies aber erfahrungsgemäß nicht der Fall ist, muß die Zeit durch geeignete Summenfunktionen der Wellenenergien oder der Verweilzeiten von Sturmfluten in bestimmten Höhenbereichen [30] ersetzt werden; auch die Zahl der Sturmfluten oberhalb bestimmter Höhen (Indikatorhorizonte) kann als Maß für die Wellen- und Strömungsbelastung herangezogen werden.

Diese Zusammenhänge zwischen Aufspül- und Verlustvolumina können durch eine log-lineare Funktion beschrieben werden [29, 32]. An Beispielen der wiederholten Strandaufspülungen Norderney bzw. Sylt haben KUNZ [48] bzw. RAUDKIVI [66] aufgezeigt, daß nur der anfängliche Verlust durch eine log-lineare Funktion beschrieben werden kann. Bei der Betrachtung längerfristiger Zeiträume weicht der Abbau des Aufspülvolumens dV/dt jedoch erheblich von dieser Funktion ab.

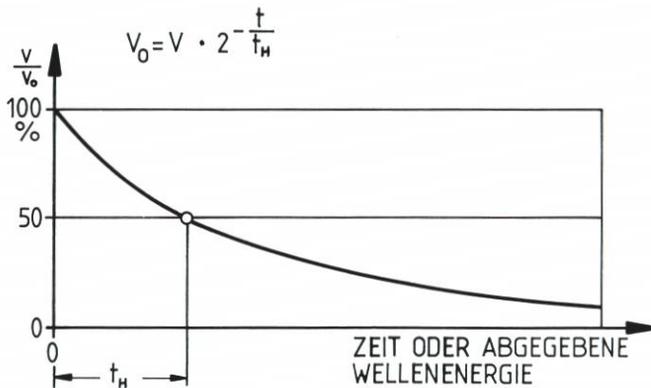


Abb. D 18. Normalverhalten einer Vorspülung (schematisch)

Im Vergleich zu einer flächenhaften Strandaufspülung (Abb. D 17) wird bei einer lokalen Aufspülung in Form eines Depots ein Sandkörper an einer bestimmten Stelle des Strandes in einer bestimmten Form so eingespült, daß die vorherrschenden Wellen- und Strömungseinflüsse den Sand an die zu schützenden Uferstrecken fördern. Dies hat den Vorteil, daß der Sand dort von vornherein in einem strandgerechten Profil abgelagert wird, die Störwirkung eines flächenhaft angelegten Aufspülkörpers also vermieden wird. Außerdem kann ein solcher Depotkörper derart angelegt werden, daß u. U. sogar noch Zusatzsand aus der natürlichen Sandbewegung eingefangen wird. Dies setzt allerdings eingehende wissenschaftliche Untersuchungen voraus (s. Abschn. 5.2.2.3 und Abb. D 27 oben und D 28).

Eine Untersuchung der Massenbilanz zu den Strandaufspülungen am Westkopf von Norderney (Abb. D 38) verdeutlicht die schnelle Abnahme des Spülkörpers unmittelbar nach den Aufspülungen. Bei vorgegebenem Spülmaterial ist eine Minimierung des langzeitigen Massenbedarfs möglich, wenn die Sandvorspülung jeweils erst erfolgt,

- wenn das gerade noch vertretbare Mindestprofil erreicht worden ist oder im kommenden Winter unterschritten zu werden droht und
- wenn die jeweiligen Vorspülmengen möglichst klein gehalten werden.

Eine jährliche Aufspülung einer geringen Aufspülmenge aber ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar, wie [26] für Norderney zeigt. Bei den wirtschaftlichen Vergleichen ist die baubetriebliche Regel zu beachten, daß der Einheitspreis um so höher wird, je geringer die Aufspülmenge ist. Dies hängt von den Kosten der Baustelleneinrichtung und -räumung und des Rohrleitungsbaus ab, die wiederum eng mit dem Einbauverfahren zusammenhängen. Bei geringen Vorspülmengen sind daher relativ kleine Geräte wirtschaftlich, soweit sie für die im Entnahmegebiet herrschenden Seegangsverhältnisse geeignet sind. Aber auch die Kosten des Auftraggebers für Entwurf, Bauleitung und Abrechnung sind hierbei zu veranschlagen. Zu guter Letzt sind auch die durch jede Aufspülmaßnahme verursachten Störungen am Strand für Erholung und Fremdenverkehr mitzuwerten, so daß i. d. R. eine Wiederholung frühestens nach drei Jahren angestrebt werden sollte.

Von Bedeutung für die Lagestabilität des aufgespülten Sandes ist auch die Profilform. Je mehr sie einem natürlichen Strandprofil entspricht, desto geringer sind die Umlagerungen in der Anfangsphase (s. Abschn. 5.2.2.1 u. 5.2.2.2) [26]. Bei Anordnung eines Sanddepots auf dem oberen Strand ist zu beachten, daß die Höhe der Depotvorderkante begrenzt wird, damit es hier in Sturmfluten möglichst nicht zur Kliffbildung kommt.

5.2.2 Gestaltung des Aufspülkörpers im Tidegebiet

5.2.2.1 Profilneigung nach dem natürlichen Strandprofil

Nach DEAN kann das Gleichgewichtsprofil eines Strandes beschrieben werden durch die Potenzfunktion

$$h(y) = a y^{2/3} + b \quad (7)$$

Darin sind: h = Strandhöhe, auf NN bezogen; y = Strandbreite, vom Nullpunkt bei $h = MThw$ gemessen; a und b = Konstanten, von örtlichen Gegebenheiten abhängig (Abb. D 19) [43]. Für das Strandprofil in Bühnenfeld E_1-F_1 Norderney haben sich z. B. a zu $-0,097$ und b zu $1,15$ ergeben. Aus diesem Ansatz können natürliche Neigungen berechnet werden.

Ein Vergleich der sich nach der Strandaufspülung Norderney 1989 entwickelnden Profilneigungen bestätigte die Anwendbarkeit des DEAN-Ansatzes. Für die Ausführung von

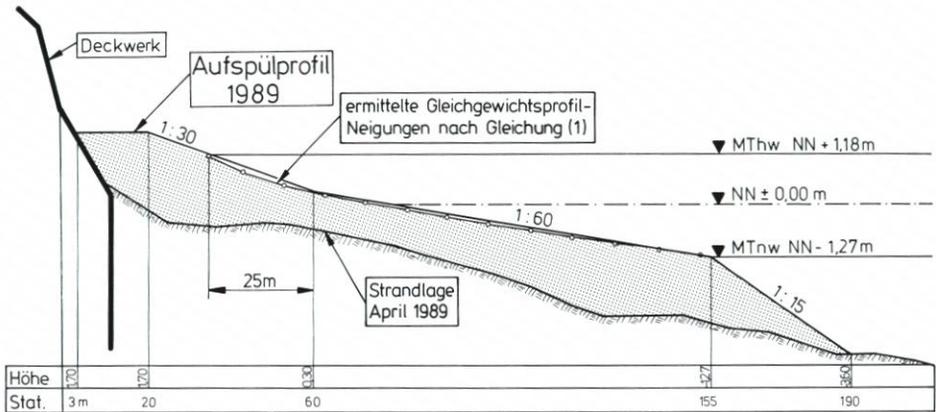


Abb. D 19. Natürliches Strandprofil nach der DEAN-Formel am Beispiel Norderney [43, 26]

Strandaufspülungen wird diese Profillinie durch angenäherte Geraden beschrieben. Diese natürliche Profilform führt in der Anfangsphase nach der Aufspülung zu den geringsten Umlagerungen. Bei Sturmfluten erfolgt die Umformung in niedrigere Profile.

5.2.2.2 Aufspülprofile ostfriesische Küste, Sylt, Ostseeküste

Auf der *ostfriesischen Insel Norderney* wird die Strandaufspülung wiederholt, wenn das Mindeststrandprofil unterschritten zu werden droht. Um bei der Strandauffüllung 1992 die natürlichen Strandneigungen möglichst weit in den Bereich des Vorstrandes hinaus erreichen zu können, wurde ein Profil entwickelt, das unterhalb NN -2,0 m eine Vorstrandaufhöhung nach dem Naturprofil mit der flachen Neigung von 1:45 vorsah. Da sich derart flache Neigungen unter Wasser wegen der sich einstellenden Spülfeldneigung (s. Tab. D2) nicht in üblicher Aufspülmethode herstellen lassen, wurde der Sand auf dem Vorstrand unter MTnw in Form von Sandhöften eingespült (s. Abb. D 20, D 21), die Seegang und Strömung flächenhaft verteilen. Die Wirkung dieser Vorstrandaufhöhung auf den späteren Strandabtrag wird zu untersuchen sein.

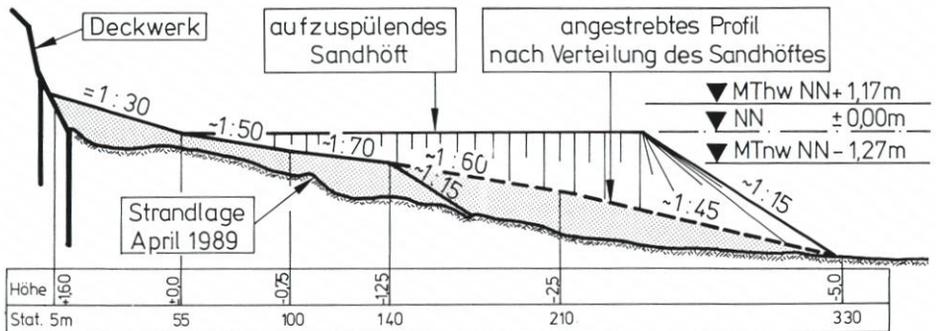


Abb. D 20. Regelprofil für die Strandaufspülung 1992 Norderney mit flach geneigtem Vorstrand nach natürlicher Umlagerung von auf den Vorstrand aufgespülten Sandhöften [26]

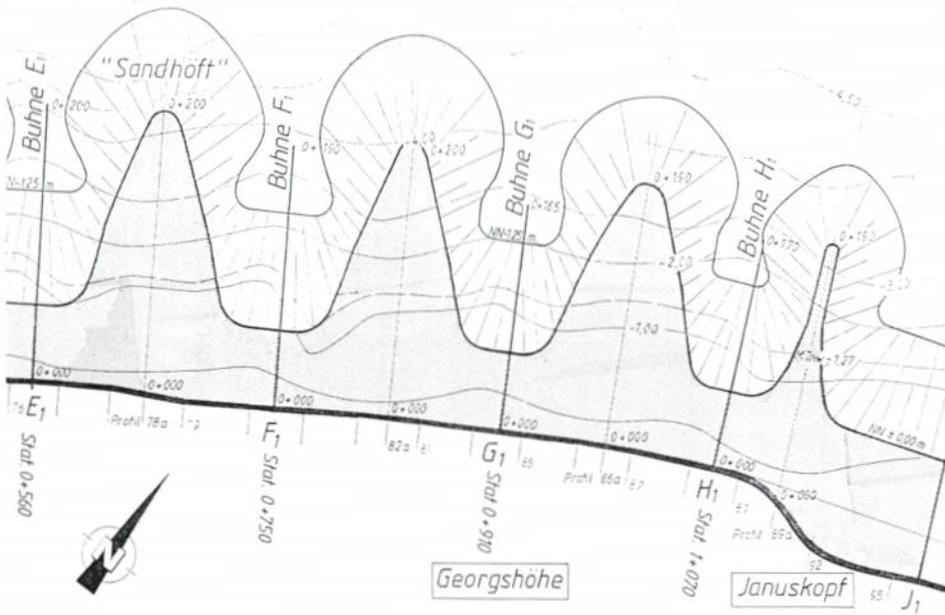


Abb. D 21. Aufgespülte Sandhöfte Norderney 1992 in der Draufsicht [26]

Die in Abschn. 3.2.1.3 für die *Ostfriesischen Inseln*, bei denen Erosionsphasen zwischen Platananlandungen auftreten, entwickelte Methode geht von der regelmäßig vermessenen Strandbreite aus. Das entwickelte Mindeststrandprofil der kritischen Strandbreite b_{krit} ist erforderlich, um stärkere und bleibende Randdünenerosion zu verhindern. Als Ausgleich der bis zur nächsten Platananlandung zu erwartenden Erosion ist dieses Profil um ein Vorsorgemaß zu erhöhen (Abb. D 22). Aus dem Zeit-Weg-Diagramm (Abb. D 4) kann dieses Vorsorgemaß an Hand der aufgetretenen Erosionsraten ermittelt werden. Diese betragen in dem dargestellten Beispiel zwischen 1934 und 1938 nahezu 0,5 m/Jahr [21].

Der Zeitpunkt etwaiger Platananlandung kann mit Hilfe regelmäßiger Luftbildaufnah-

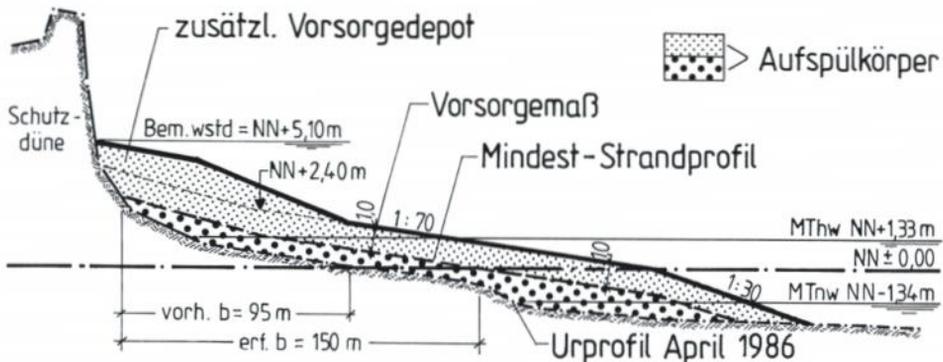
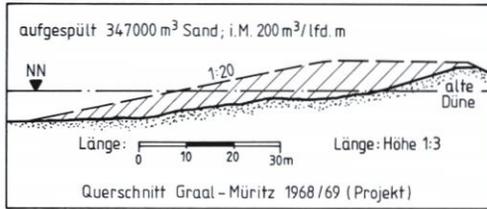


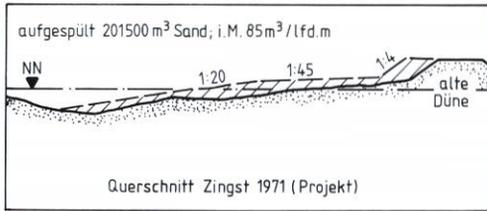
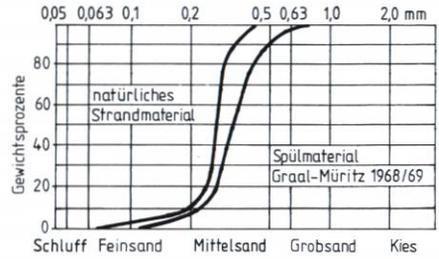
Abb. D 22. Bemessung des Aufspülprofils Langeoog 1987 aus Mindeststrandprofil, 1 m Vorsorgemaß und zusätzlichem Depot auf dem trockenen Strand [21]

men grob vorherbestimmt werden. Damit kann die Dauer der zu überbrückenden Unterversorgung abgeschätzt werden. Aus der ermittelten jährlichen Erosionsrate und der Zeitdauer der zu überbrückenden Unterversorgung läßt sich das Vorsorgemaß für die Überhöhung des Aufspülprofils ermitteln (s. a. Abschn. 8, Beisp. 2).

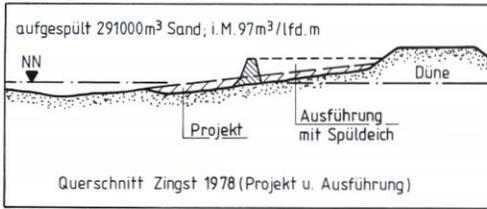
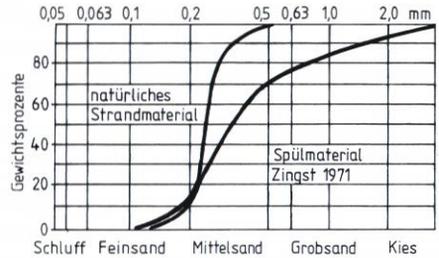
Das für die Insel Sylt entwickelte Profil besteht aus Strandauffüllung und Sanddepot. Es gliedert sich in Verschleißteil und Reserveteil von zunächst je 20 m Breite. Strand und Vorstrand unterliegen auch nach der Erhöhung und Verbreiterung dem Einfluß der normalen Tiden und Strömungen. Bei Sturmfluten wird der Verschleißteil des Sanddepots angegriffen und allmählich abgetragen. Dieser Abbruch kommt dabei dem Strand- und Vorstrandbereich zugute. Das Volumen des Verschleißteils ergibt sich aus der mittleren Erosionsrate des



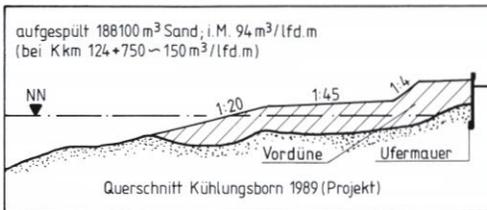
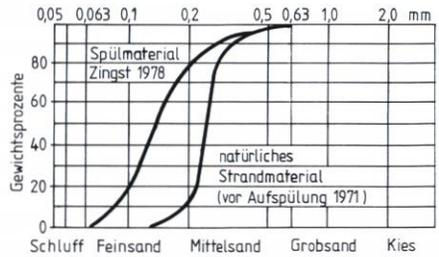
a)



b)



c)



d)

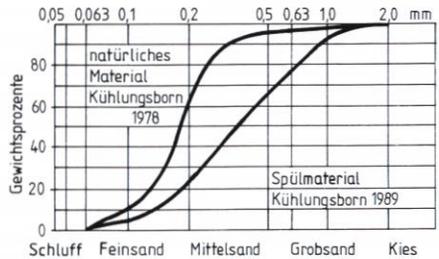


Abb. D 23. Geplante Querschnitte von Strandauffüllungen in Mecklenburg-Vorpommern nach dem Spülvorgang und der Profilierung durch Raupentechnik

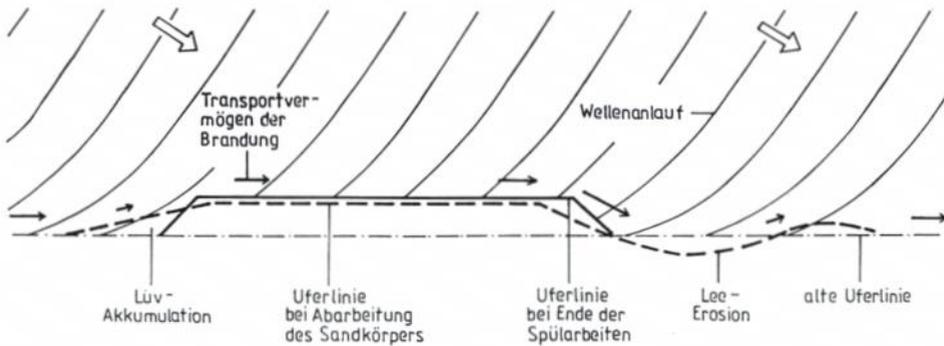


Abb. D 24. Uferlinienveränderungen bei Aufspülungen an der Ostseeküste (schematisch)

Küstenabschnittes und dem Intervall der Wiederholungsaufspülungen (Empf. A, Abschn. 6). Es sollte mindestens das Dreifache der Jahres-Erosionsmenge beinhalten.

Bei außergewöhnlich hoher Sturmflutintensität nach Höhe und Häufigkeit oder Verweildauer hoher Wasserstände kann wesentlich mehr als der Verschleißteil abgetragen werden. Um auch dann einen Abtrag von Randdüne oder Kliff zu vermeiden, ist ein Reserveteil vorgesehen. Eine größere Breite und geringere Bermenhöhe des Sanddepots bei gleichbleibendem Volumen führte zu geringeren Abbruchmengen. Der bei Sturmfluten unvermeidliche Kliffabbruch am Sanddepot nimmt nämlich mit der Kliffhöhe zu. Ihn zu minimieren und dabei die Brandung noch von der Randdüne oder dem natürlichen Kliff fernzuhalten, ergab als Weiterentwicklung des ursprünglichen Depotprofils von 1985 mit 40 m breitem Depot, dessen Oberfläche von NN +7,0 auf +8,0 m ansteigt, das breitere, aber weniger hohe Depotprofil nach Abb. D 11. Bei einer Bermenbreite von 60 m wurde die Bermenhöhe des Sanddepots mit 0,5 m über dem Bemessungswasserstand auf NN +5,0 m festgelegt.

An der tidefreien Ostseeküste erhalten die Strandauffüllungen in der Regel steilere Neigungen, wie die Beispiele der Abb. D 23 verdeutlichen. Die örtlichen Bedingungen und der fehlende Tidehub können sich auf die Profilentwicklung des Aufspülkörpers und seiner Nachbarbereiche besonders auswirken. Von Bedeutung ist in bestimmten Fällen (Hochwasserschutz durch Dünen) das Verhalten der unverbauten Nachbarstrecken von aufgespülten Küstenabschnitten. Der auf der ursprünglichen Strand- und Schorremorphologie aufgebaute Sandkörper wirkt trotz seiner „Natürlichkeit“ wie ein Bauwerk. Besonders in der Anfangsphase seiner Wirkungszeit führt die in See vorragende Aufspülung zu Lee-Erosionen, die Hunderte von Metern ausgedehnt sein können (Abb. D 24). Mit der belastungsbedingten Ausbreitung des Sandmaterials verschwindet die Leewirkung.

5.2.2.3 Grundrißform

Eine lineare Vorspülung entsteht bei Herstellung des Regelprofils über die gesamte Vorspüllänge. Der im Grundriß als etwa rechteckig zu bezeichnende aufgespülte Sandkörper weist strandparallele Höhenlinien auf. Der durch die Aufspülung erhöhte und verbreiterte Strand wird wie zuvor von den Seegängkräften belastet und dabei erneut erodiert.

Um als zusätzliche Wirkung mit dem Vorspülkörper auch den Küstenlängstransport zu beeinflussen, kann die Grundrißform verändert werden (Abb. D 25) in die Form einer Bühne bzw. eines Höftes, also eines senkrecht zum Strand verlaufenden Spülkörpers. Dieser

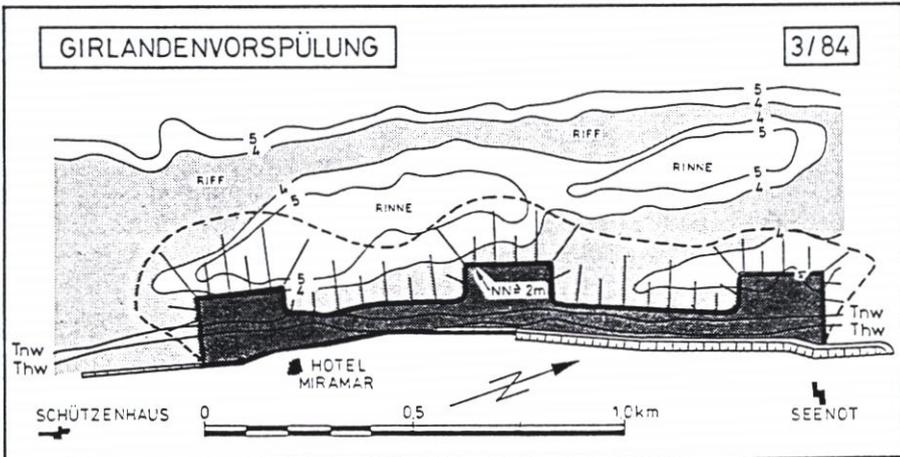
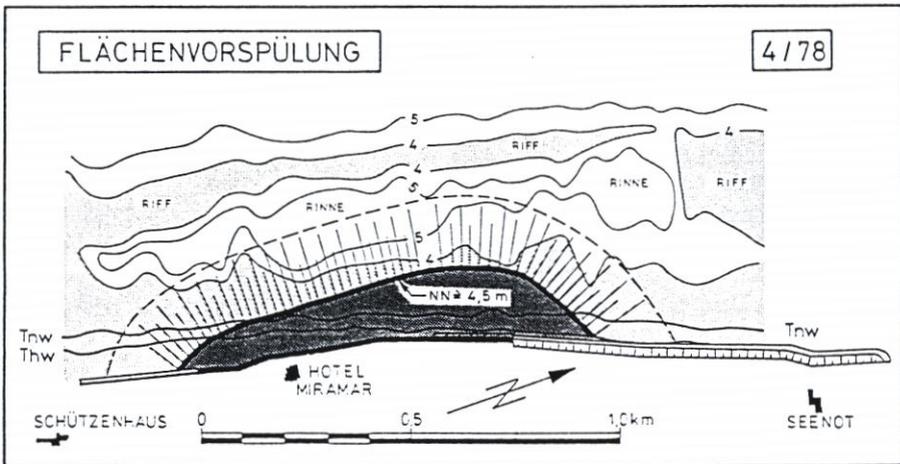
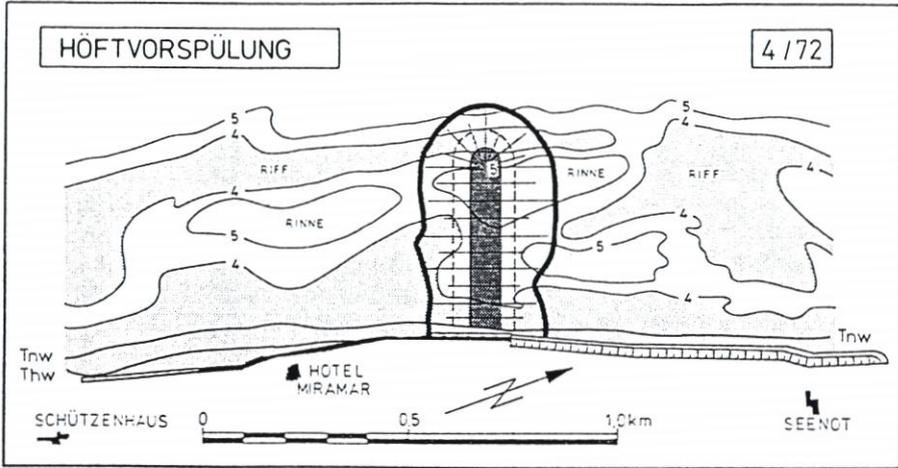


Abb. D 25. Grundrißformen für die Vorspülung vor Westerland/Sylt in den Jahren 1972, 1978 und 1984 [2]

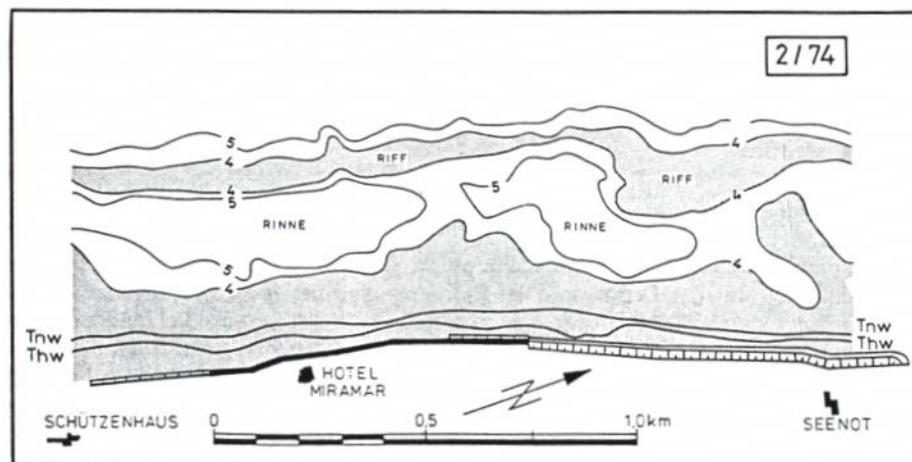
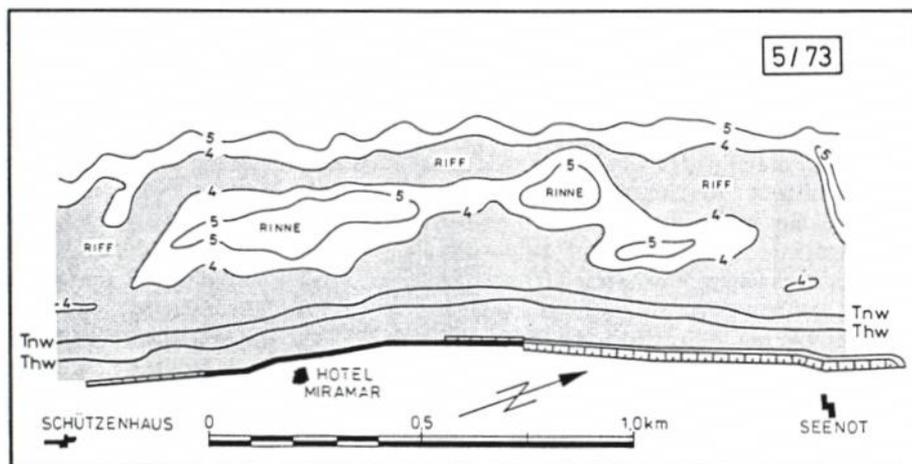
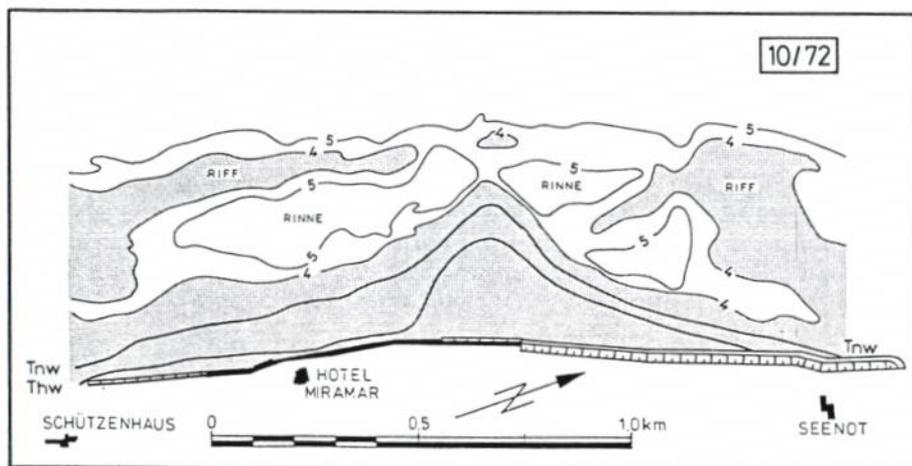


Abb. D 26. Umformung der Depotvorspülung Westerland/Sylt 1972 in den Folgejahren bis 1974 [2]

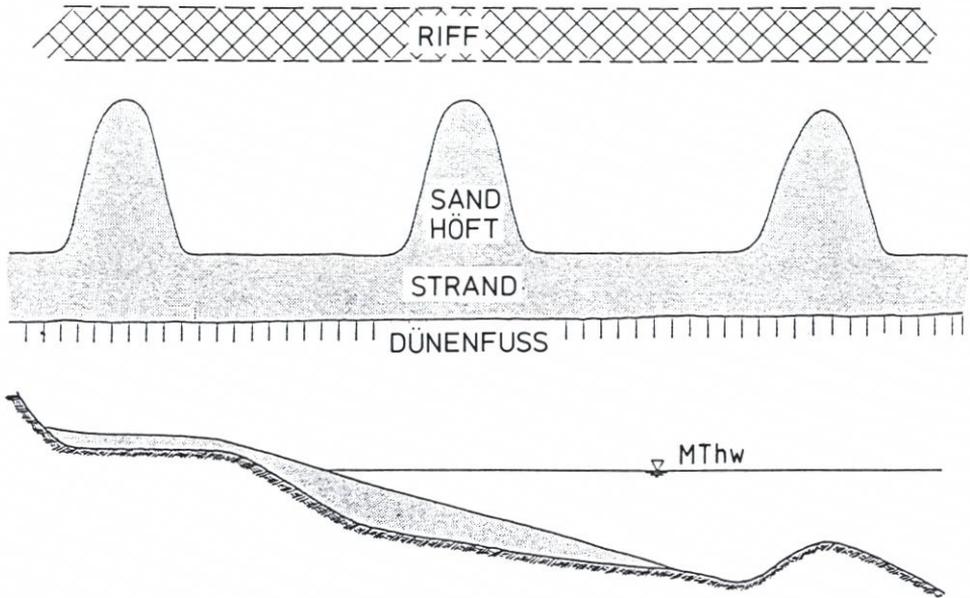


Abb. D 27. Anordnung von vorgespülten Höften zur Erhöhung der effektiven Sohlrauheit im Unterwasserstrandbereich (schematisch) [64]

beeinflusst den Seegang und unterbricht die küstenparallele Strömung auf dem Vorstrand. Diese Form war für die erste Sandvorspülung vor Westerland/Sylt 1972 geplant. Da der Spülkörper bereits während der Aufspülung durch den Küstenlängstransport umgelagert wurde, entstand die Form eines Sandhöftes (Abb. D 26). Ein Höft beeinflusst hauptsächlich den Seegang. Untersuchungen mit Hilfe eines Rechenprogrammes [28, 29] haben ergeben, daß durch Refraktion vor dem Höft der seegangserzeugte Längstransport unterbrochen wird. Lediglich an der Höftspitze entsteht durch die Konzentration der Wellenenergie eine erhöhte Transportrate. Das Höft bewirkt folglich, daß aus dem Ferntransport eine örtliche Umlagerung des Sandes wird und so die Verweilzeit des Materials im Bereich des Höftes sich verlängert. Da hierbei die Höftform mit ihren sinusförmigen Höhenlinien abgeflacht und in die linienhafte Form mit uferparallelen Höhenlinien umgewandelt wird, ist die Transportbeeinflussung durch das Höft zeitlich begrenzt (Abb. D 26). Die Anordnung von mehreren Höften mit dazwischen angeordneten linearen Aufspülungen (Abb. D 27) hat zum Ziel, durch eine Überlagerung von Diffraktions- und Refraktionserscheinungen eine Verminderung des Wellenangriffs zu erreichen und den Küstenlängstransport eine Zeitlang zu reduzieren. Eine vergleichende Beurteilung dieser Effekte bei den durchgeführten Maßnahmen ist noch nicht abgeschlossen, weil diese von den unterschiedlichen Seegangsverhältnissen und örtlichen Lagen der Sandvorspülungen überlagert werden.

Auf Norderney wird 1992 außerhalb des tiefen Seegatbereiches eine Höftaufspülung durchgeführt, um eine Erhöhung des Vorstrandes bis zur Vorstrandhöhe von etwa NN $-5,0$ m zu erreichen (s. 5.2.2.2 u. Abb. D 20). Auf diese Weise ist es möglich, auch den Vorstrand mit zu erhöhen und den steilen vorderen Hang der Aufspülung unmittelbar unterhalb von MThw zu vermeiden. Die Wiederherstellung der natürlichen Vorstrandneigung führt sonst nach Abschluß der Aufspülung zum Quertransport des Sandes durch den Seegang und damit zum kurzfristigen Abtrag der oberen Strandpartien.

Ein weiterer positiver Effekt dieser als punktuelle Vorspülung bezeichneten Höftaufspülung ist die Versorgung benachbarter Küstenabschnitte mit Sand durch den Küstenlängstransport. Wenn dadurch kürzere Transportwege und Rohrleitungsstrecken entstehen, kann es sich positiv auf die Baukosten auswirken.

5.3 Verfahren zur Materialeingabe

5.3.1 Allgemeines

Eine wichtige Entscheidung bei der Planung einer Sandauffüllung ist die Wahl des Verfahrens. Sie ist im wesentlichen nach den örtlichen Verhältnissen, den Ergebnissen der in Abschnitt 4 genannten Voruntersuchungen, dem verfügbaren Material und der Lage des Gewinnungsgebietes zu treffen. Ferner ist das nach der Örtlichkeit und anderen Kriterien zu wählende Gerätesystem von Bedeutung, das im Abschnitt 6.1 behandelt wird.

5.3.2 Eingabe im Vorstrandbereich

Eine Materialeingabe im Vorstrandbereich kommt beim Einsatz von Laderaumsaugbaggern (Hopper) in Betracht. Diese können ihre Ladungen – je nach Schiffstyp – in Wassertiefen ab 6 bis 8 m verklappen. Bei kleinen Hoppern und Klappschuten reichen bereits Wassertiefen ab 4 bis 5 m.

Bei Verklappungen im Vorstrandbereich (vor dem Strandriff) wird ein unmittelbarer Effekt der Verbesserung oder Wiederherstellung der Strandfunktion gemäß Abschnitt 2.1 im allgemeinen nicht erzielt. Diese kann nur mittelbar durch eine Verfrachtung des Materials (zumindest eines Teils) in Richtung auf den Strand durch die seegangsbedingten Orbitalströmungen erreicht werden. Versuche im Ausland haben gezeigt, daß Maßnahmen dieser Art zumeist wirkungslos waren oder doch nur einen geringen Erfolg hatten [33].

Materialeingaben im Vorstrandbereich durch Verklappung sind nur zu empfehlen, wenn

- nach den Ergebnissen der Voruntersuchungen auf Grund der vorhandenen Litoraldynamik eine Materialverfrachtung in Richtung auf die Küste bzw. das Strandriff erwartet werden kann und
- das Verklappen der Ladung von Hopperbaggern besonders wirtschaftlich ist, z. B. weil in nahegelegenen Küstengebieten bei Ausbau- oder Unterhaltungsbaggerungen geeignetes Material praktisch kostenlos zur Verfügung steht oder wenn sich günstige Möglichkeiten für ein kombiniertes System ergeben (s. Abschn. 6.1.3).

5.3.3 Flächenhafte Eingabe am Strand

Wird mit hydraulischer Förderung gearbeitet, so ergibt sich die flächenhafte Materialverteilung unmittelbar durch den Ablauf des Spülwasserstromes. Durch geeignete Materialauswahl läßt sich unter Umständen erreichen, daß auf Spülfelddämme verzichtet werden kann (*offenes Spülfeld*), daß sich also die Spülfeldoberfläche in gewünschter Höhe mit einer küstennormalen, strandähnlichen Neigung einstellt (Abb. D 28). Dieses Verfahren ist besonders wirtschaftlich und auch dann häufig noch zu empfehlen, wenn begrenzte Materialverluste

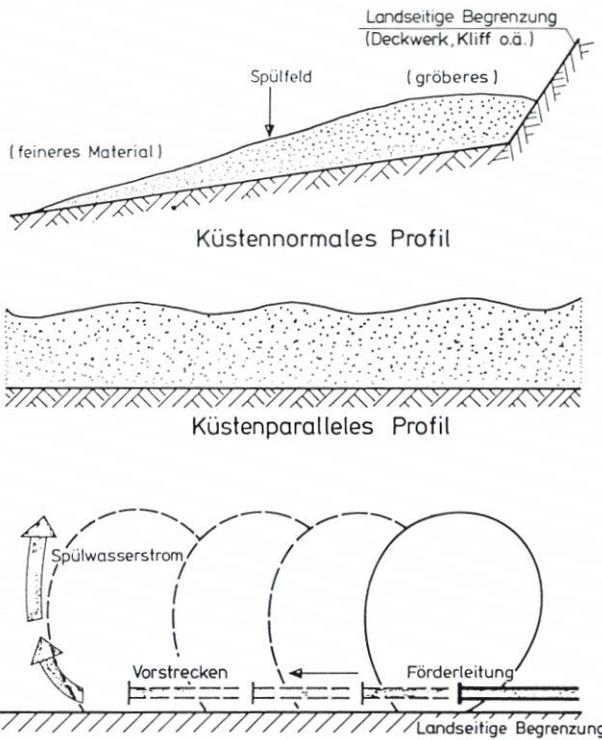


Abb. D 28. Flächenhafte Strandaufspülung mit freiem Spülstromablauf (schematisch)

in Kauf genommen werden müssen. Im Tidegebiet läßt sich die strandnormale Neigung durch Anpassung der Spülzeiten an die Tide beeinflussen. Je nachdem, ob das Material über Wasser – bei Tnw – oder überwiegend unter Wasser – bei Thw – eingebracht wird, ergeben sich nach Tabelle D 2 unterschiedliche Neigungen. Das optimale Verfahren kann jedoch kaum vorausgerechnet werden, sondern ist aus den ersten Probespülungen zu ermitteln. Voraussetzung ist auf alle Fälle, daß in der Umgebung des Spülfeldes nur geringe Strömungen auftreten.

Wird feineres Material verwendet oder sind besondere örtliche Gegebenheiten zu berücksichtigen, so können auch Spülfelddämme erforderlich werden (*geschlossenes Spülfeld*). Im allgemeinen wird man mit einem seeseitigen, strandparallelen Damm auskommen, der entsprechend dem Spülfeld-Vorbau vorgestreckt und bei Bedarf aufgehöhht wird (Abb. D 29). Er kann mit Planierraupen aus dem vorhandenen Sandmaterial aufgeschoben werden. Abdichtungsfolien sind möglichst nicht zu verwenden, da sie bei späteren Erosionen freigelegt, beschädigt und abgetrieben werden können und in zersetzter Form das Landschaftsbild stören.

Aufspülungen über Wasser führen in gewissem Umfang zu einer Kornsortierung, die jedoch im allgemeinen nicht nachteilig ist.

- Die freie Aufspülung (ohne Spüldämme) führt durch den vorwiegend küstennormalen Spülwasserablauf zu einer Konzentration der gröbereren Sedimente auf der oberen Böschung, während sich feineres Material im unteren Böschungsbereich abgelagert. Dies entspricht einer häufig vorhandenen natürlichen, brandungsbedingten Kornsortierung im Strandprofil.
- Die Aufspülung mit küstenparallelem, seeseitigem Spüldamm unter ständigem Vorstrecken

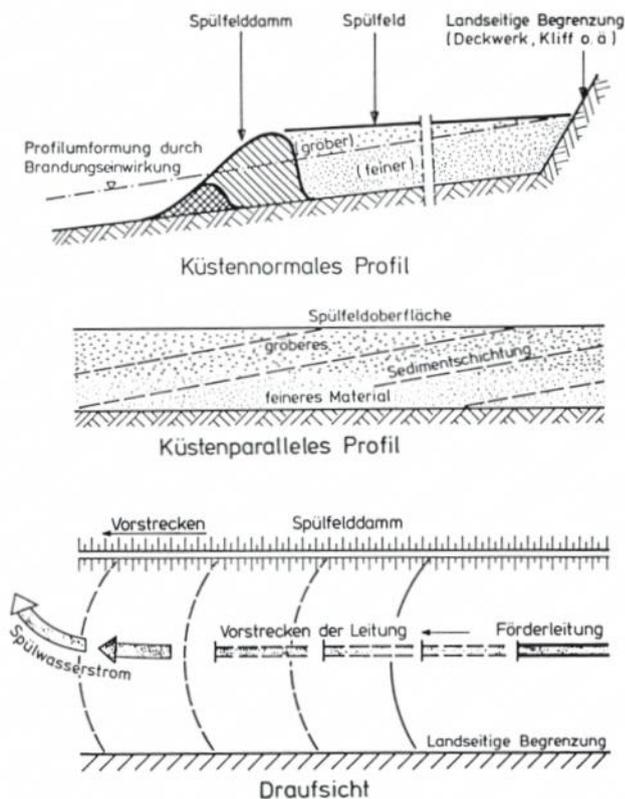


Abb. D 29. Flächenhafte Strandaufspülung mit uferparallelem Spülfelddamm (schematisch)

der Spülrohrleitung ergibt eine vertikale Sortierung der Art, daß feineres Material von größerem überdeckt wird.

Wird der Strand im *trockenen Materialeinbau* aufgefüllt, so wird das Material mit Transportfahrzeugen (LKW, Schürfkübelwagen o. a.) auf den Strand gefahren und entsprechend der gewünschten Schichtdicke partienweise abgeladen. Auf die Herstellung eines Planums (mit Raupen) kann unter Umständen verzichtet werden; das Material wird durch Brandungsströmungen und äolischen Sandtransport auch auf natürliche Weise verteilt und erhält bei Überflutung eine hohe Lagerungsdichte.

Nur wenn der künstliche Strand relativ hoch aufgeschüttet und als Erholungsgebiet genutzt wird, empfiehlt sich die Herstellung eines Planums mit zusätzlicher Verdichtung. Auch dabei ist die spätere Profilentwicklung gemäß Tabelle D 1 zu beachten.

5.3.4 Punktuelle Eingabe des Sandes

Sie geht von dem Grundsatz aus, den Sand konzentriert einzubringen und seine Verteilung den natürlichen Litoralprozessen zu überlassen, und hat insbesondere wirtschaftliche Vorteile, da die zusätzlichen Arbeiten der Materialverteilung oder der Herstellung eines Planums entfallen.

Das Verfahren der konzentrierten Materialeingabe setzt eine besonders sorgfältige Untersuchung der maßgebenden hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge voraus. Als Eingabestellen empfehlen sich die Strandabschnitte der maximalen Erosion, welche in der Regel Divergenzpunkte oder Unstetigkeitsstellen des küstenparallelen Brandungstransportes darstellen. Außerdem kommen Abschnitte in Frage in Bereichen mit geringerer Abbruchrate oder solche, bei denen wegen eines geringwertigen Schutzzieles eine höhere Abbruchwahrscheinlichkeit in Kauf genommen werden kann.

Die vorherrschende Richtung des küstenparallelen Transportes muß bekannt sein, weil sich das eingebrachte Material hauptsächlich in diese Richtung verteilen wird. Die für die Versorgung eines längeren Strandabschnittes bemessenen Auffüllmengen bedingen ein Überangebot an Material an der Eingabestelle, welches zu einem höftartigen Strandvorbau führt. Durch den Effekt der Seegangsrefraktion treten im Bereich der konvex vorspringenden Strandlinie verstärkte Brandungsströmungen auf, die hier zur Erosion führen und das erodierte Material auf den angrenzenden Strand verteilen.

Die Materialversorgung der angrenzenden Strandabschnitte kann mit der Entfernung von der Eingabestelle abnehmen. Sie hängt vom Litoraltransport ab und von der Geschwindigkeit der Umlagerung. Auf Norderney konnte für die Aufspülung 1976 eine Umlagerungsgeschwindigkeit des ostwärts gerichteten Längstransportes von 1 km/Jahr ermittelt werden [21]. Dabei bietet der Sand auf seinem Weg über den Erosionsstrand vom Typ 3 der Abb. D 3 auf 5 km Länge einen Schutz durch Stranderhöhung und -verbreiterung. In dieser Hinsicht wirkt die flächenhafte Aufspülung am Westende auch als Schutzmaßnahme für den leeseitig angrenzenden Strandabschnitt. Zur Erzielung einer sofortigen Schutzwirkung empfiehlt es sich daher, bei der Auffüllung eines längeren Küstenabschnittes mehrere Eingabestellen vorzusehen, deren optimaler Abstand nur aufgrund der Ergebnisse von Voruntersuchungen ermittelt werden kann.

Die Strandvorspülung Sylt für 1992 sieht eine Kombination einer linearen Sandvorspülung mit zwei punktuellen Vorspülungen in Form von Sandhöften vor (Abb. D 30). Die

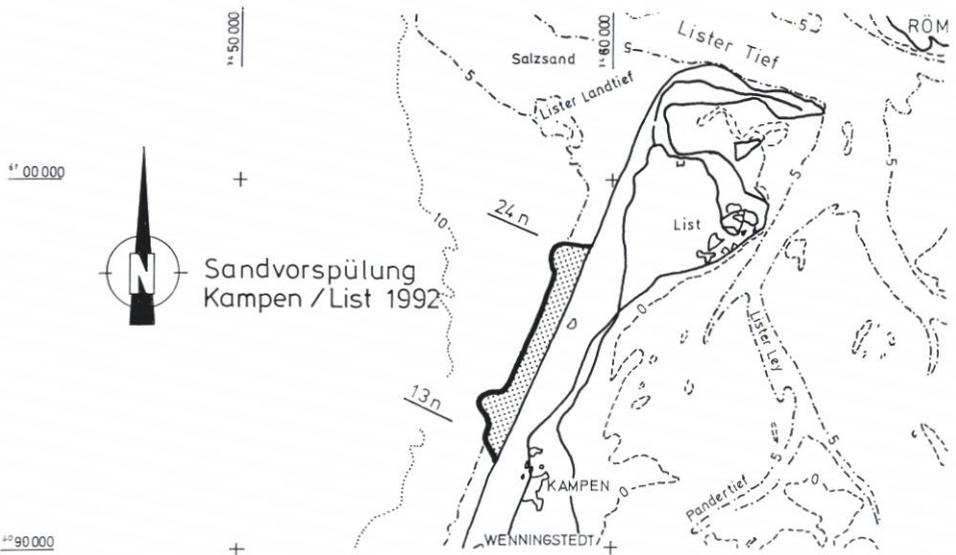


Abb. D 30. Sandvorspülung zwischen Kampen und List auf Sylt 1992

Strände nördlich vom Kliffende sind über längere Abschnitte breit, aber niedrig. Zum Schutz vor Dünenabbruch wird eine lineare Strandaufspülung durchgeführt. Die beiden Höfte sollen der Verbesserung der Vorstrandverhältnisse dienen.

Das südliche Höft soll die Rinne durchdämmen und bis zum Riff reichen. Der nordwärts gerichtete Längstransport kann dadurch verzögert werden, so daß an seiner Südseite Sand zur Ablagerung kommen kann. Andererseits werden die zu erwartenden Umlagerungsvorgänge leewärts den Vorstrand aufhöhen und dadurch eine Verbreiterung der Brandungszonen bewirken. Durch die punktuelle Sandeingabe in das nördliche Höft sollen der Vorstrand und der nördlich angrenzende Strandabschnitt versorgt und aufgehöhht werden.

5.4 Ergänzende bauliche Maßnahmen

5.4.1 Bauwerke zur Verringerung der Längstransportraten

Sandige Brandungsküsten mit beträchtlicher Erosion erfordern vielfach nach kurzen Wiederholungsintervallen erneute Sandvorspülungen. Durch ergänzende Bauwerke können jedoch bei bestimmten Voraussetzungen Seegang und/oder Strömungen so beeinflusst werden, daß der mobile Sand länger im System gehalten werden kann. Auf diese Weise können die mittlere Transportrate und damit die Wiederholungsintervalle von Sandvorspülungen verändert werden.

Buhnen bewirken i. d. R. eine Verringerung der Küstenlängstransportraten. In Mecklenburg-Vorpommern werden sie häufig im Zusammenhang mit Strandaufspülungen gebaut, um die Aufspülintervalle dadurch zu verlängern (s. Empf. F, Abschn. 3.1.7). Auch ufernahe Wellenbrecher werden dort als Ergänzung von Strandaufspülungen errichtet, da deren Beeinflussung der Brandung zur Veränderung des Sandtransportes führt (s. Empf. E, Abschn. 4.5).

Im Zusammenhang mit Überlegungen zur Verlängerung von Wiederholungsintervallen bei Strandaufspülungen auf Sylt ist u. a. vorgeschlagen worden, den Sand transportierenden Küstenlängsstrom durch die Erhöhung der Rauheit in Fließrichtung durch senkrecht zur Küste gebaute künstliche Sohlschwellen zu reduzieren. Zur Verringerung von Sandverlusten während schwerer Sturmfluten aus dem aufgespülten Sanddepot könnte eine geotextile Armierung dienen. Auf die Veröffentlichung dieser Vorschläge in [64] wird verwiesen.

5.4.2 Maßnahmen gegen Sandverwehungen

Sandverwehungen können durch Aufstellung von Sandfangzäunen verhindert oder vermindert werden. Als provisorische Maßnahmen haben sich Zäune aus eingegrabenen Buschfaschinen, Pfahlreihen mit zwischengespannten, teildurchlässigen Kunststoffplanen oder geotextilen Schneezäunen sowie Holz-Flechtmatten bewährt. Auch eignet sich die Beregnung eines Strandstreifens im Bedarfsfalle.

Der vor die Randdüne wehende Sand verstärkt diese. Sandfangzäune fördern die Sandablagerung. Durch Strandhaferpflanzungen wird der aufgewehrte Sand gesichert, die weitere Erhöhung gefördert und eine biotechnische Dünenbildung unterstützt.

6. Durchführung von Strandaufspülungen

6.1 Geräte

6.1.1 Allgemeines

Die Auswahl geeigneter Geräte für die Durchführung von Strandauffüllungen hängt im wesentlichen von den örtlichen Bedingungen ab, wie

- von der gewünschten Transportleistung,
- von der Lage und Entfernung des Gewinnungsgebietes,
- bei Naßbaggereinsatz von den maßgebenden Seegangs- und Strömungsverhältnissen im Gewinnungsgebiet, auf der Transportstrecke und am Strand,
- bei trockenem Materialeinbau von der verkehrsmäßigen Erschließung zwischen Gewinnungs- und Einbaustelle.

In den nachfolgenden Abschnitten können daher nur einige grundsätzliche Hinweise gegeben werden.

6.1.2 Stationäre Naßbagger

Der Einsatz stationär arbeitender Schwimmbagger mit Grundsauge- oder Schneidkopf- bzw. Schaufelrad einrichtung empfiehlt sich, wenn geeignetes Material im Bereich wirtschaftlicher Entfernung gewonnen werden kann und die örtlichen Seegangsverhältnisse den Einsatz der Schwimmbagger und schwimmenden Rohrleitungen oder Dükerleitungen zulassen (Abb. D 31).

Sande sind im allgemeinen bei entsprechender Abtragshöhe grundsaugefähig und gut förderfähig. Die Spülentfernung wird jedoch begrenzt durch die Pumpenleistung. Erforderliche größere Entfernungen überbrücken Zwischenstationen.

Schneidkopf-, Schaufelrad- oder Grundsaugegeräte gibt es in sehr unterschiedlichen Größen und Leistungen zwischen 150 und 20 000 kW gesamte installierte Leistung. Grundsaugebagger erreichen durch Unterwasserpumpen in der Baggerleiter Entnahmetiefen von 60 m (im Extremfall 85 m). Die max. Baggertiefe liegt für Schneidkopf- bzw. Schaufelradbagger bei ca. 31,5 m (Extremfall 33,0 m). Die Förderleistung eines Grundsaugebetriebes wird erhöht durch die Zugabe von Druckwasser am Saugkopf, wobei die Zusatzmenge 20 % des Förderstroms bei einem Druck von 5 bis 20 bar ausmachen soll.

Die Durchmesser der Spülrohrleitungen liegen je nach Förderleistung zwischen 150 und 900 mm. Als Bemessungskriterien für einen Naßbaggerbetrieb gelten allgemein - die Bodenart, - die Spülentfernung, - die physikalischen Bedingungen im Baggergebiet, - die gewünschte Leistung.

6.1.3 Laderaumsaugbagger

Laderaumsaugbagger (Hopperbagger) sind für Strandauffüllungen von See aus geeignet, sofern die erforderliche Fahrwassertiefe zwischen Entnahmeort und Löschplatz durchgängig vorhanden ist. Größe und Maschinenleistung dieser Geräte sind je nach Erfordernis in einem breiten Bereich wählbar. Die größeren Geräte haben Laderauminhalte bis zu 11 000 m³ und bis zu 15 000 kW gesamtinstallierte Leistung. Die Entnahme ist entweder im Schleppkopfverfahren möglich, bei dem der Sand an der Baggersohle aufgenommen wird, oder im Stechkopfverfahren. Dieses Verfahren kann sich empfehlen, wenn die geeigneten Bodenarten in

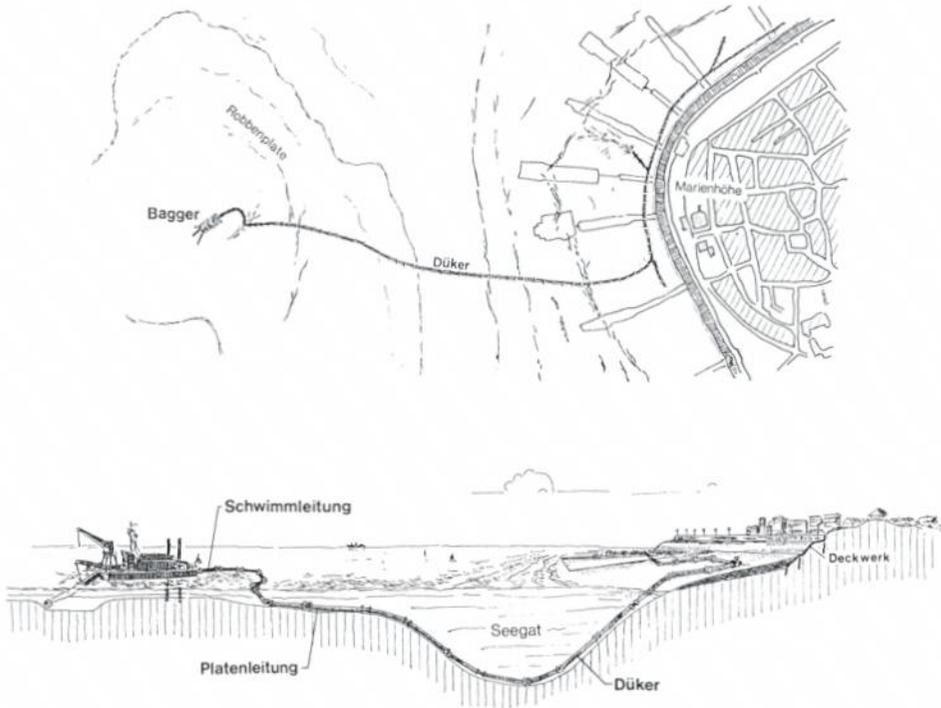


Abb. D 31. Strandaufspülung mit stationär arbeitendem Schwimmbagger am Beispiel Norderney 1992

größerer Tiefe unter Schichten von ungeeigneten Böden anstehen (Abb. D 32). Bei beiden Entnahmeverfahren wird der Lösevorgang durch Druckwasserzugabe unterstützt.

Abhängig vom Schiffstiefgang können Hopperbagger in Strandnähe fahren. Für den Weitertransport des Sandes kommen mehrere Verfahren in Frage (Abb. D 33):

- a. direktes Verklappen in Strandnähe
- b. Verklappen in eine Grube und Wiederaufnehmen durch einen stationär arbeitenden Bagger (kombiniertes System)
- c. Direkteingabe auf den Strand (Regenbogen-System)

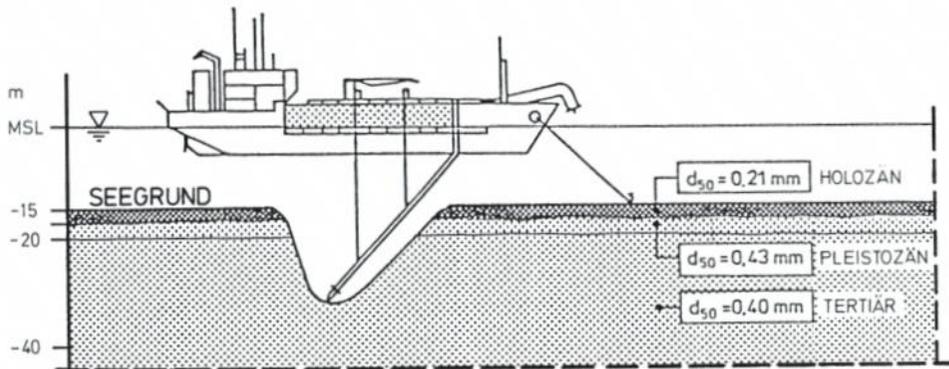
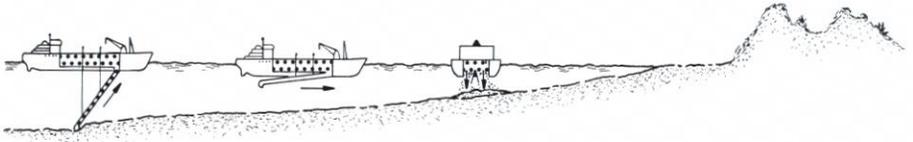
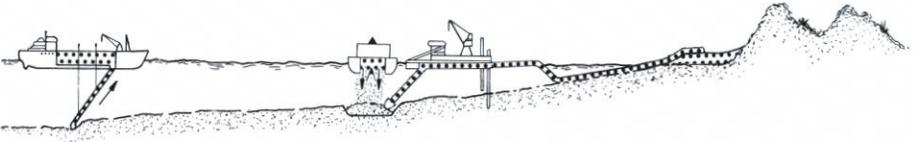


Abb. D 32. Hopperbagger mit Stechkopf zur Entnahme des von Feinsand überdeckten groben Sandes

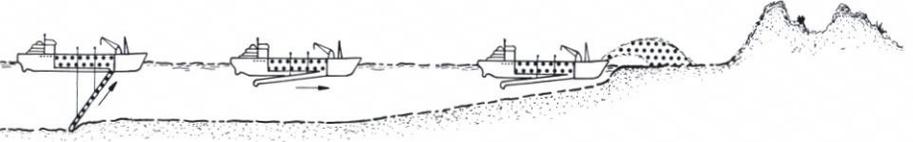
a. direktes Verklappen in Strandnähe



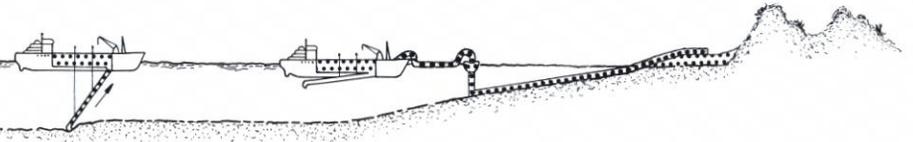
b. Verklappen und mit Saugbagger wiederaufnehmen



c. Direkteingabe auf den Strand (Regenbogenspülung)



d. direktes Verspülen



e. Verspülen über Zwischenpumpstation

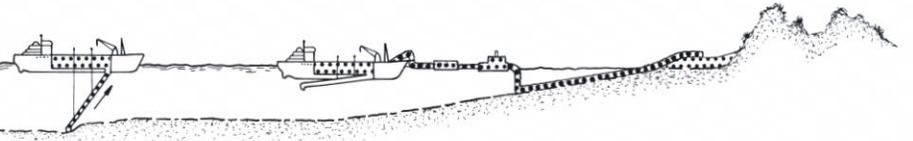


Abb. D 33. Strandaufpülung mit Laderaumsaugbagger (Hopperbagger) und Weitertransport zum Strand nach verschiedenen Verfahren (schematisch)

d. direktes Verspülen

e. Verspülen über eine Zwischenpumpstation.

Zu den einzelnen Verfahren ist anzumerken:

- zu a. Dieses Verfahren ist nur sinnvoll, wenn die beabsichtigte Wirkung der Strandauffüllung von dieser Stelle aus eintritt und erwartet werden kann, daß der verklappte Sand durch die Naturkräfte in Richtung Strand transportiert wird.

- zu b. Bei diesem Verfahren arbeiten Gewinnungs- und Aufspülbetrieb unabhängig voneinander. Der stationär arbeitende Bagger entnimmt den verklappten Boden aus der Klappgrube. Bei der Anlage der Klappgrube ist darauf zu achten, daß keine Gefährdung des Strandes eintritt.
- zu c. Die Direkteingabe auf den Strand oder in den Vorstrand ist nur möglich, wenn der Hopper einen geeigneten Tiefgang besitzt, so daß er nahe an den Strand gelangen kann. Dabei pumpt er das Gemisch durch eine Düse in der Druckrohrleitung am Bug des Schiffes im hohen Bogen auf den Strand. Diese wirtschaftliche Methode erspart eine aufwendige Übergabe und das Rohrsystem.
- zu d. Beim Direkteinspülen fördert eine ausreichend stark bemessene Baggerpumpe das Bodengemisch bis an den Strand und weiter in den Aufspülbereich. Naturgemäß fordern dabei größere Hopper wegen ihres Tiefgangs eine Wassertiefe, die erst in größerer Entfernung vom Strand zur Verfügung steht. Die Spülleitung kann als schwimmende Leitung oder als Kombination von schwimmender Leitung und Dükerleitung ausgebildet werden. Eine Dükerleitung empfiehlt sich insbesondere zur Querung der Brandungszone.
- Zum Festmachen des Hoppers an der Übergabestation können ein Ponton, eine Boje oder ein Pfahl dienen (Abb. D 34). Ein Anlegeponton ermöglicht ein schnelles Ankoppeln an die Leitung, ist jedoch im angekoppelten Zustand empfindlich gegen Seegang.

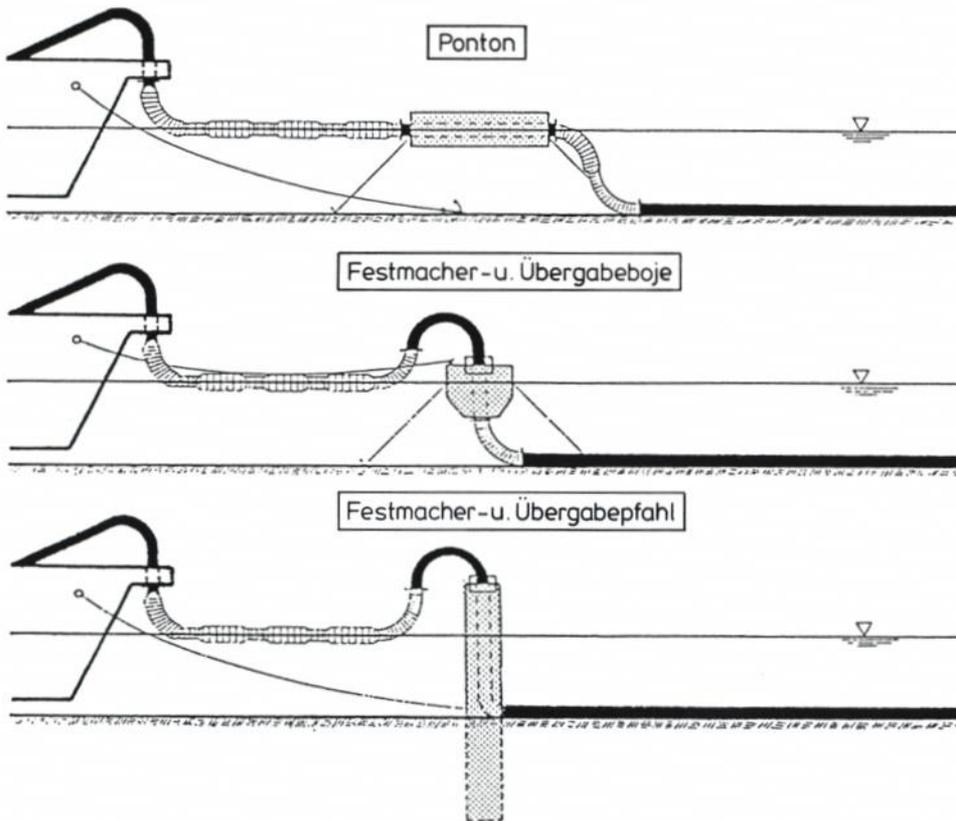


Abb. D 34. Möglichkeiten einer Übergabestation vom Hopperbagger an die Dükerleitung

Eine Übergabe an einer Boje ermöglicht eine zur Wellen- bzw. Windangriffsrichtung optimale Lage des Hoppers (Abb. D 35). Ein Pfahl ist ein guter Übergabepunkt, aber für einen Einsatz von wenigen Wochen zu aufwendig.

zu e. Bei der Spülgutübergabe an eine Zwischenpumpstation ist die Pumpenleistung des Hoppers unkritisch. Deshalb können bei dieser Kombination auch Hopper mit geringer Pumpenleistung eingesetzt werden. Schwimmende Zwischenpumpstationen sind jedoch den Seegangsverhältnissen ausgesetzt und daher gefährdet. Hier bietet sich ein Hubinseleinsatz an, der zwar aufwendig, aber unabhängig ist.

6.2 Sonstige Hinweise

6.2.1 Ausführungszeiten und -fristen

Strandauffüllungen sind möglichst während der ruhigen (windarmen) Jahreszeit durchzuführen und abzuschließen. An der deutschen Küste gelten allgemein die Monate April bis September unter diesen Gesichtspunkten als geeignet. Beim Einsatz von Naßbaggern im Seegebiet besteht diese Forderung ohnehin; es ist aber auch grundsätzlich anzustreben, den neuen Strand in möglichst geschlossener Formation herzustellen, ehe stärkere Umlagerungen und Erosionen einsetzen. Starker Seegang und höhere Wasserstände während der laufenden Baumaßnahmen behindern nicht nur die Arbeiten, sondern können auch zu höheren Materialverlusten in den Bauabschnitten führen.

Für die Auffüllung von Badestränden sind Arbeiten während der Urlaubsmonate Juli und August möglichst zu vermeiden. Außerdem ist zu beachten, daß nach Abschluß der Auffül-

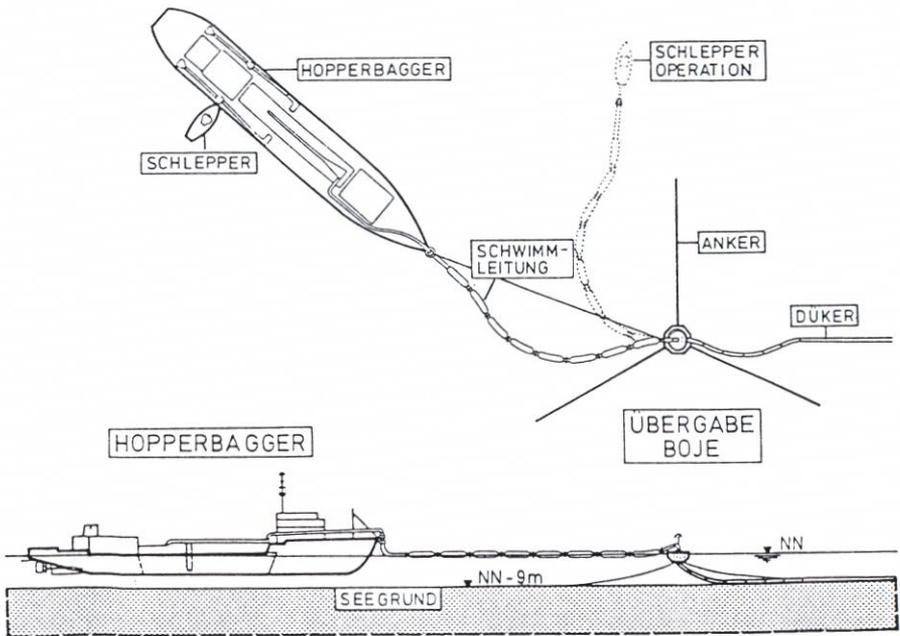


Abb. D 35. Verbesserte Übergabe im Seegebiet durch Ankoppelung des Hopperbaggers mit eigener Spülpumpe an eine Festmacher- und Übergabeboje [2]

lung über längere Zeit noch stärkere Sandverwehungen auftreten können, wenn das Spülgut Feinsand und Schluff enthält. Sie können den Badebetrieb erheblich beeinträchtigen.

6.2.2 Materialverluste

In den Materialbedarf aus einer Volumenberechnung nach Ist- und Sollprofil sind Auflockerung und Materialverluste einzubeziehen.

Einbau mit Erdbaugeräten im Trockenen ohne gleichzeitiges Befahren der Aufschüttung gibt eine Lagerungsdichte D von 0,2 bis 0,3. Die Herstellung eines Planums mit Planierdrauen führt zu einer mäßigen Verdichtung (Lagerungsdichte D 0,3 bis 0,4). Erst durch Seegang- und Brandungseinwirkungen wird eine höhere Verdichtung (Lagerungsdichte D von 0,5 und darüber) erreicht. Dabei ist die Lagerungsdichte D nach DIN 4015

$$D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \text{ mit } n = \text{Poren-Anteil} \quad (8)$$

Bei Aufspülungen müssen Materialverluste infolge Auswaschens feineren Materials mit dem Spülwasserstrom berücksichtigt werden. Ihr Umfang richtet sich nach der Kornzusammensetzung des Spülgutes sowie nach dem Spülverfahren und muß nach Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Verluste von 10 bis 30 %, in ungünstigen Fällen über 50 %, liegen durchaus im Bereich des Möglichen. Die Tiefenbegrenzung des Aufmaßes beeinflusst die Verlustrate erheblich.

6.2.3 Aufmaß und Abrechnung

Bei den üblichen Erdarbeiten entstehen klar abgegrenzte geometrische Körper. Die Massen können in der Entnahme- oder an der Einbaustelle eindeutig aufgemessen werden. Bei Strandauffüllungen ist ein solches Aufmaß häufig nicht möglich. Vielfach können diese Aufmaß-Verfahren nicht angewandt werden, denn Entnahme- und Aufspülbereich unterliegen während der Maßnahme ständig Formänderungen, die nicht nur durch den Materialtransport, sondern auch durch Seegang und Strömungen bedingt sind. Die DIN 18 311 – Naßbaggarbeiten 1988 – ist zu beachten.

Für den Leistungsnachweis bei Strandaufspülungen sind nur einige Verfahren brauchbar:

1. Aufmaß im Transportgefäß:

Es bleibt von den Möglichkeiten eines Aufmaßes von rolligen Böden nach Volumen oder nach Gewicht nur das Volumenaufmaß, da das Aufmaß nach Gewicht ruhige See voraussetzt.

Für das Volumenaufmaß benötigt man eine geeichte Raumvermessung, abhängig von der Höhe in Tabellen- oder Kurvenform.

Das Aufmaß geht so vor sich, daß an 10 Stellen, je zur Hälfte an Steuerbord oder Backbord, mit Hilfe einer Meßstange oder eines Lotes die Oberfläche der Ladung festgestellt wird, wobei alle Stichmaße gemittelt werden. Mit Hilfe dieses Mittelwertes kann dann aus der Eich-tabelle die Ladung bestimmt werden. Der Peilstab sollte am Fuß eine Platte mit 10 cm Durchmesser erhalten, das Lot bei 2 kg Gewicht mit einer Scheibe mit 13 cm Durchmesser ausgerüstet werden. Die Meßgenauigkeit liegt bei 5 cm [8].

2. Aufmaß im Auftrag- bzw. im Spülfeld unter günstigen Bedingungen anwendbar. Das Verfahren wird auf den Ostfriesischen Inseln praktiziert. Die Tiefenbegrenzung des zu

erfassenden Aufmaßes wird in der Ausschreibung festgelegt, da sie für den sogenannten Spülverlust entscheidend ist (s. Abschn. 6.2.2).

3. Aufmaß in der Rohrleitung:

Für die Leistungskontrolle während des Baggervorganges haben sich elektromagnetische Geschwindigkeitsmessungen und die radioaktive Dichtemessung bewährt. Über die Probleme, die durch diese Methode für die Leistungsabrechnung entstehen, siehe Seite 29, Abschnitt 3.4 des Ceda Report 91/01/991 [8]. Unter 3.3.2.b des Reports wird auf die Gewichtsmessung eines Rohrabschnittes hingewiesen, wobei die Messung durch Gewichtssensoren an den Auflagerpunkten oder durch eine Spannungsmessung der Rohrleitung zwischen den Auflagen erfolgt. Dieses Verfahren war bisher im Modellversuch brauchbar und ist als Ersatz für eine radioaktive Dichtemessung geplant.

6.2.4 Vorschriften und Sicherheitsvorkehrungen

Es sind allgemein die Vorschriften der VOB und der DIN 18 300, 18 310, 18 311, evtl. besondere örtliche Vorschriften des Landschaftsschutzes, Naturschutzes, Fischereischutzes usw. sowie bei Baggerarbeiten und Seetransport die Seeschiffahrtsstraßen-Ordnung zu beachten.

Bei Aufspülarbeiten in Erholungsgebieten oder an Badestränden ist die Baustelle besonders sorgfältig abzusichern. Das Betreten von Spülfeldern ist zu verbieten. Bei möglichen Gefährdungen für Watt- und Strandwanderer ist eine deutlich sichtbare Markierung vorzunehmen und bis zur völligen Wiederverfüllung der Entnahmestelle zu überwachen. Aufgespülte Flächen sind erst dann freizugeben, wenn sich die Verantwortlichen von einer ausreichenden Konsolidierung des Bodens überzeugt haben. Baggerstellen in der Nähe von Badegebieten sind durch Bojen und Hinweisschilder abzusichern, erforderlichenfalls abzusperren. Die Resedimentation in den Baggerstellen ist zu beobachten, bis eine Wiederauffüllung bzw. ein gefahrloser Zustand erreicht ist.

7. Profilkontrolle und Materialbilanz

Strandauffüllungen erfordern eine längerfristige und sorgfältige Beobachtung der weiteren Entwicklung, um die Richtigkeit und Zweckmäßigkeit des angewandten Verfahrens zu überprüfen und Wiederholungen zum richtigen Zeitpunkt einleiten zu können.

Während der Bauarbeiten sind bereits laufende Kontrollen der Profilausbildung und der Materialbilanz erforderlich, um entsprechend Abschnitt 5.1 und 6.2.2 optimale Ergebnisse zu erzielen. Darüber hinaus sind die in Abschn. 4.1 aufgeführten hydrologischen Untersuchungen nach Abschluß der Arbeiten weiterhin vorzusehen. Ferner ist das Auffüllmaterial zu untersuchen durch

- Entnahme von Oberflächenproben im Bereich der Strandauffüllung unmittelbar nach Abschluß der Bauarbeiten mit Wiederholungen in halbjährlichem Abstand sowie kornanalytische Auswertung und Feststellung der Veränderungen des Kornspektrums,
- Untersuchungen über die Ausbreitung des Eingabematerials, falls dieses nach charakteristischen Korneigenschaften vom vorhandenen Strandmaterial abweicht und daher als natürlicher Leitstoff (Tracer) verwendet werden kann.

In den festgelegten Strandprofilen (Abschn. 4.1) sind auch nach Abschluß der Aufspülung in regelmäßigen Abständen die Höhen aufzunehmen. Zusätzliche Aufmäße nach schwe-

ren Stürmen sind zu empfehlen. Aus den Differenzen der aufeinanderfolgenden Profilaufnahmen sind die Volumenänderungen zu errechnen und über die Zeitachse aufzutragen. Dabei sind getrennt darzustellen der unmittelbare Auffüllungsbereich und die benachbarten Strandabschnitte, in denen noch ein Einfluß erwartet werden kann.

Nach den vorliegenden Erfahrungen muß zunächst mit relativ hohen Erosionsraten gerechnet werden, die Folge einer Anpassung an ein neues dynamisches Gleichgewicht sind und die daher allmählich abklingen.

8. Erfahrungen aus ausgeführten Beispielen

Beispiel 1: Strandaufspülungen vor Schutzwerken auf Norderney

1. Sieben Aufspülungen von 1951/52 bis 1992

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatte sich das Norderneyer Seegat so weit an den Westen Norderneys herangeschoben und Strand und Dünen abgetragen, daß 1857/58 mit dem Bau von massiven Schutzwerken zum Schutz von Ort und Kuranlagen begonnen werden mußte. Innerhalb von rd. 100 Jahren wurde dieses Schutzsystem auf rd. 6 km Länge als Strandmauer oder Deckwerk mit 32 Bühnen ausgebaut (Abb. D 36). Dem weiteren Abbruch des Westendes konnte damit Einhalt geboten werden, der Erosion des Strandes jedoch nicht.

Nach dem 2. Weltkrieg war der Zustand der Schutzwerke äußerst besorgniserregend. Die ständig weitergehende Strandabnahme führte dazu, daß Deckwerksfußsicherungen und Bühneneinfassungen freigespült und unterspült wurden. Die Arbeitsgruppe Norderney des Küstenausschusses Nord- und Ostsee stellte in ihrer gutachterlichen Stellungnahme vom

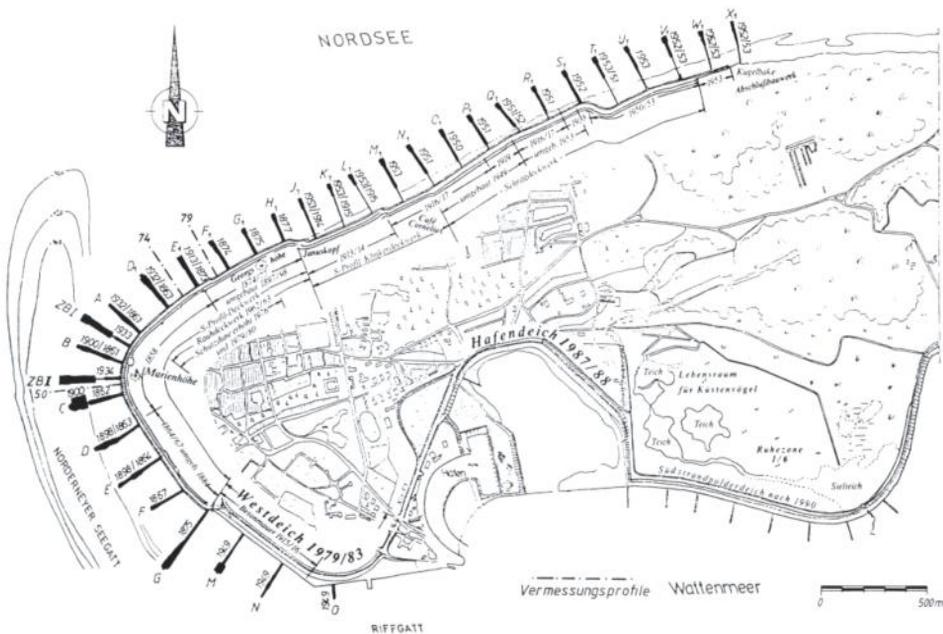


Abb. D 36. Westteil der Insel Norderney mit Deckwerk und Bühnen und deren Bauzeit sowie mit Vermessungsprofilen (Lageplan)

24. 8. 1950 das richtungweisende Ergebnis fest: „Ein über Tidehochwasser hinaufreichender Sandstrand bildet die beste Sicherung der Uferschutzwerke. Es ist daher in erster Linie anzustreben, einen solchen Strand wiederherzustellen und zu erhalten.“ Die Arbeitsgruppe hat empfohlen, 1,25 Mio. m³ Sand auf rd. 6 km Strandstrecke aufzuspülen. Sie hat weiter ermittelt, daß jährlich etwa 90 000 m³ Sand ergänzt werden müßten, die zweckmäßig in 5- bis 10jährigem Abstand als größere Ergänzungsspülung aufgebracht werden sollten.

Damit wurde 1951/52 erstmals in Deutschland eine Abkehr vom konstruktiven Wasserbau für den passiven Schutz der Inseln praktiziert und die Wende zum aktiven Schutz durch Schaffung und Erhaltung eines ausreichend hohen und breiten Strandes durch Aufspülung vollzogen. 41 Jahre später mußte die siebente Aufspülung im Westen Norderneys durchgeführt werden (Abb. D 7, Tab. D 3). Die beiden letzten Aufspülungen 1989 und 1992 konnten von einem KFKI-Forschungsvorhaben mit BMFT-Finanzierung im Interesse weiterer Optimierung begleitet werden.

Tabelle D3. Hauptmerkmale der Strandauffüllungen von 1951–1992 [26]

Jahr	Aufgespülte Länge km	Strandstrecke Buhnen	Einbaumenge (m ³)	Entnahmeort
1951/52	6,0	O–V1	1 250 000	südl. Inselwatt
1967	2,0	E–K1	240 000	vor Bühnenkopf G1
1976	1,1	E–E1	500 000	Robbenplate
1982	1,5	D–H1	470 000	Robbenplate
1984	1,7	C–J1	410 000	Robbenplate
1989	1,8	D–J1	447 000	Robbenplate
1992	2,1	D–L1	500 000	Robbenplate West
Trockeneinbau				
1983	0,6	J1–N1	64 000	Strand östl. Weiße Düne
1990	0,5	J1–N1	45 000	Strand östl. Weiße Düne
Wiederherstellung und Sicherung der Schutzdüne östl. der Kugelbake:				
1981	0,65		82 000	Strand östl. Weiße Düne
1983	0,43		99 000	Strand östl. Weiße Düne
Gesamtmenge des eingebauten Sandes:			4 107 000	

Natürlich gab es in den ersten Jahren nach der Aufspülung 1951/52 erhebliche Umlagerungen. Vor allem nordöstlich des Westkopfes in den Bühnenfeldern A bis F1, dem Divergenzbereich des Brandungsstromes, wurde der Strand in wenigen Jahren wieder stark abgetragen. Von dort wird der Sand überwiegend durch Brandungsstrom den Strand entlang nach Süden bzw. nach Nordosten, später nach Osten transportiert. Er ergänzt auf dem Transportweg jeweils die unterversorgten Strandabschnitte und bleibt insgesamt für lange Zeit zum Schutze der Insel wirksam. Dieser Küstenlängstransport zugunsten der angrenzenden Strandstrecken hat es ermöglicht, die weiteren Aufspülungen auf den engeren Westkopfbereich zu beschränken (s. Abb. D 7).

2. Auffüllungen durch Trockeneinbau

Eine ausgeprägte Sturmfluthäufung hat 1983 östlich der Aufspülstrecke zu starker Stranderosion geführt, so daß die Bühnenfelder J₁ bis N₁ im Trockeneinbau aufgefüllt werden

mußten (s. Tab. D 3). Der Sand wurde am Strand über 6 km mit LKW und Dumper befördert und Ladung neben Ladung abgekippt.

Ferner hat der Strand am Ostende der Schutzwerke im Bereich der Kugelbake nach 1975 ständig an Höhe verloren. Bis 1981 ist er um 2,5 m abgetragen worden. Der dadurch bedingte starke Randdünenabbruch führte am Neujahrstage 1981 zum Randdünenbruch. Zur Wiederherstellung der Randdüne und ihrer Sicherung wurden 1981 und 1983 östlich der Buhne X₁ zusammen 181 000 m³ Sand trocken eingebaut.

Ab 1983 begann dann wieder die Auflandung dieses Strandabschnittes, zu dem auch das inzwischen durch Längstransport bis hier verfrachtete Material der Strandaufspülung von 1976 beigetragen haben dürfte [21]. Der strandparallele Sandnachschub blieb aus, weil der zeitliche Abstand der Aufspülungen am Westkopf zwischen 1952 und 1976 zu groß war und zu Lücken in der Sandversorgung des in Lee der Aufspülstrecke gelegenen Nordstrandes führte. Die Auswirkungen mangelnder Sandversorgung waren in diesem Strandabschnitt an der Kugelbake besonders schwerwiegend, da neben dem fehlenden strandparallelen Sandnachschub auch die in diesem Bereich häufige Anlandung von Platanen ausblieb und andererseits der Seegang durch eine breite Rinne im Riffbogen stärker auf den Strand treffen konnte.

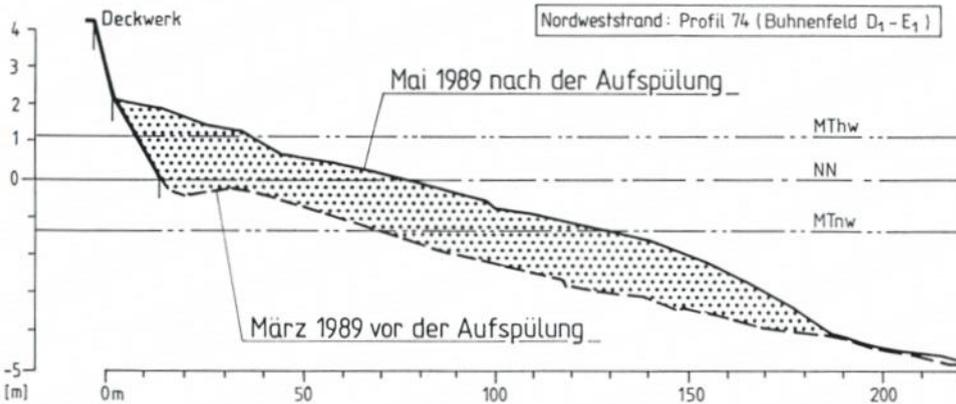
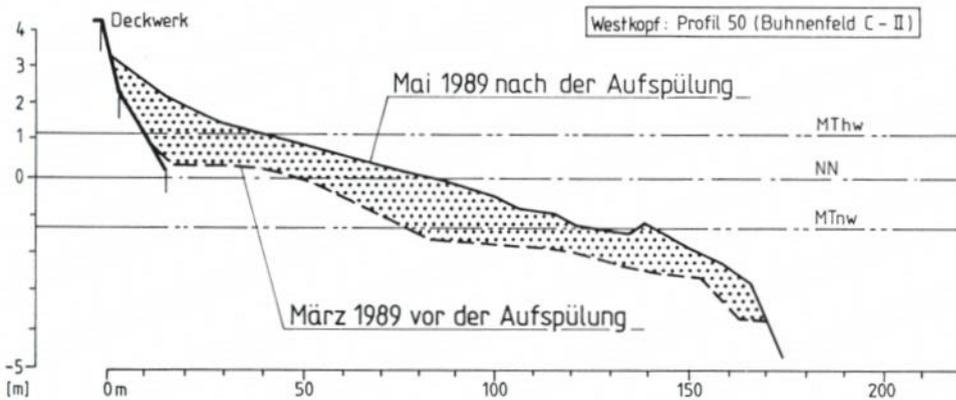


Abb. D 37. Norderneyer Strandprofile am Westkopf mit tiefem Seegat und am Nordweststrand vor und nach der Aufspülung 1989 [26]

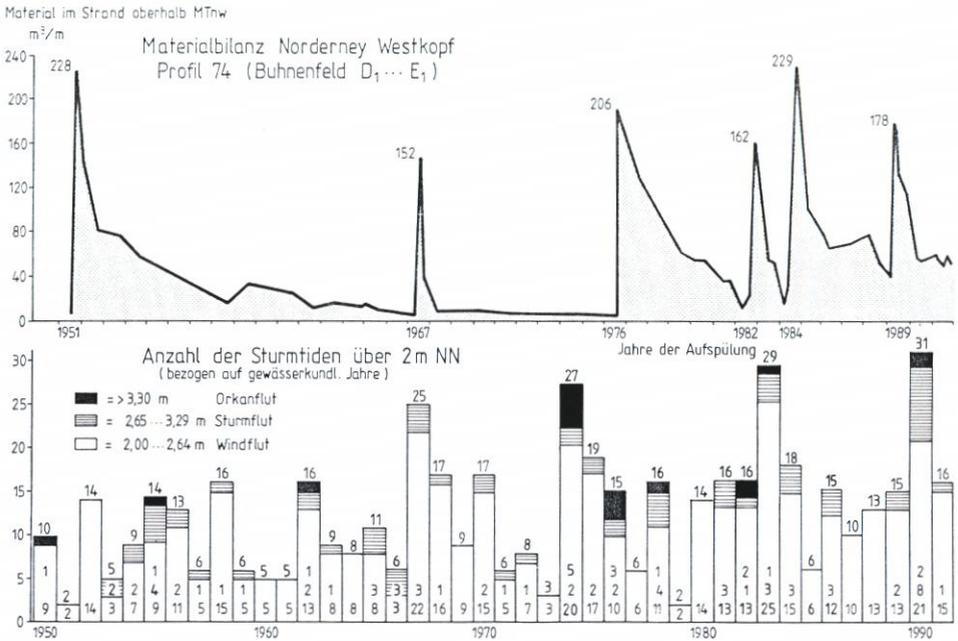


Abb. D 38. Massenbilanz im Bühnenfeld D₁-E₁ und Sturmfluthäufigkeit von 1951 bis 1991 [26]

3. Aufspülprofile

Von zwei sehr unterschiedlichen Strandbereichen werden Strandprofile dargestellt. Zunächst das Profil 50 im Bühnenfeld C-II unmittelbar am Westkopf. Dort fällt der nur etwa 170 m breite Strand mit steiler Böschung zum 25 m tiefen Seegat ab. Der Inselsockel ist durch die bis in die Sohle reichenden Unterwasserbühnen wie Bühne II gesichert (Empf. F, Beisp. 13). Außerdem wird das Profil 74 im Bühnenfeld D₁-E₁ am Nordweststrand im Divergenzbereich des Brandungsstromes betrachtet. Hier fällt der Vorstrand wesentlich flacher ab als unmittelbar am Seegat, erreicht aber doch bereits 250 m vor dem Deckwerksfuß die Tiefe NN -5,0 m (Abb. D 37). Nach Nordosten nimmt die Neigung des Vorstrandes weiter ab. Die Sollprofile der Sandaufspülungen 1951/52 bis 1984 sind bei [21] auf Abb. 4 dargestellt. Die Massenbilanz im Bühnenfeld D₁-E₁ seit 1951 gibt Abb. D 38 im Zusammenhang mit der Sturmfluthäufigkeit wieder.

1989 wurde der aufgespülte Strand zwischen MThw und MTnw nach dem natürlichen Strandprofil der DEAN-Formel profiliert (Abb. D 18). Unterhalb von MTnw fiel der Vorstrand dann zunächst mit natürlicher Spülfeldneigung von etwa 1:15 (s. Abschn. 5.1, Tab. D 2) ab. Dabei sind im Profil 74 rd. 250 m³/lfdm Strand aufgespült worden. Mit Hilfe der Vorstrandpeilungen konnte ermittelt werden, daß sich die Vorstrandneigung zwischen NN -2,0 m und -4,0 m bereits kurz nach der Aufspülung auf 1:25 und innerhalb eines Jahres wieder auf die Ausgangsneigung von 1:45 abgeflacht hatte. Die Auffüllung des Vorstrandes war einhergegangen mit dem Abtrag des nassen Strandes (Abb. D 39).

Für die Aufspülung 1992 wurde daher angestrebt, auch den Vorstrand bis etwa NN -5 m mit aufzuheben. Dieses natürliche Strandprofil vermied den steilen Unterwasserhang und dürfte dann auch den Abtrag des nassen Strandes verzögern. Durch eine Aufspülung von Sandhöften auf den Vorstrand sollte dessen Aufhöhung erreicht werden (Abb. D 20 und

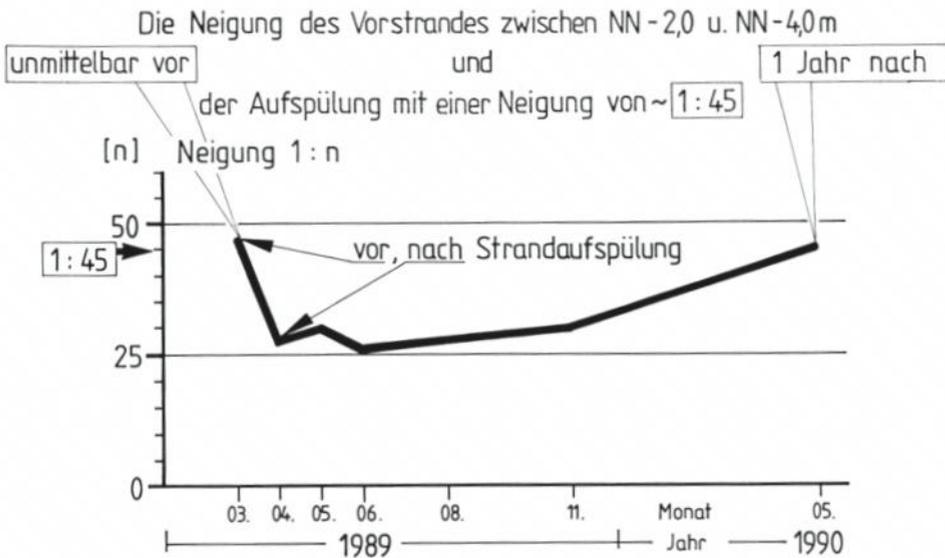


Abb. D 39. Entwicklung der Neigung des Vorstrand es im Norderneyer Profil 79 im Bühnenfeld E₁-F₁ zwischen NN -2,0 m und -4,0 m nach der Aufspülung 1989

D 21). Der obere Strand erhielt eine geringe Höhe. Das Ergebnis der Höftumformung und der weiteren Profilentwicklung wird nach Abschluß des Forschungsvorhabens in „Die Küste“ veröffentlicht werden.

4. Sandgewinnung

1951/52 wurde der aufzuspülende Sand mit zwei Eimerkettenbaggern aus dem südlichen Inselwatt gewonnen und mit einem, später mit zwei Spülern aus den Schuten zum Strand gespült. Der Wattsand erwies sich als zu fein. Die Entnahme 1967 vor dem Kopf der Bühne G1 im Sandmangelgebiet kam auf Grund eines besonders günstigen Angebotes zustande und bedarf als nicht wiederholbare Sonderlösung keiner näheren Betrachtung. 1976 gelang es erstmals, das über 20 m tiefe Seegat mit einer Dükerleitung zu kreuzen. So konnte der Sand auf der westlich des Seegats gelegenen Robbenplate gewonnen und mit stationärem Schneidkopfsaugbagger durch die Rohrleitung zum aufzuspülenden Strandabschnitt gespült werden. Dieser Entnahmebereich am Ostrand der Robbenplate ist bis einschl. 1989 beibehalten worden. Der 1989 aufgespülte Sand wies einen Korndurchmesser zwischen 0,15 und 0,18, i. M. 0,17 mm auf. Im Interesse einer etwas längeren Verweildauer des Sandes wäre ein Korndurchmesser von etwa 0,20 mm wünschenswert gewesen. Die Lagerstättenstudie hatte 1987 ergeben, daß unter dem feinsandigen Seesand bei 14 bis 19 m Tiefe eine etwa 5 m dicke Mergelschicht liegt und darunter zunächst pleistozäner Feinsand, ab 30 bis 35 m Tiefe dann feinsandiger Mittelsand ansteht. Die Entnahme dieses feinsandigen Mittelsandes aus 30 bis 40 m Tiefe im Tiefsaugverfahren hätte etwa das 10fache [26] der gewählten Entnahme bis 15 m Tiefe gekostet und erschien damit nicht wirtschaftlich. Der Entnahmetrichter in der östlichen Robbenplate ist innerhalb eines Jahres wieder aufgefüllt worden. Der Sand hat sich von der Seeseite her schichtweise abgelagert [26]. Im Sommerhalbjahr 1989 sind 170 000 m³ in den 350 m langen Entnahmetrichter transportiert worden; das zeigt die starke Sedimentbewegung auf der Plate [26].

Im Rahmen der von einem Forschungsvorhaben begleiteten Aufspülung 1989 wurde ferner 17 000 m³ gröberes Aufspülmaterial aus etwa 10 m Tiefe vom Meeresgrund nördlich von Juist-Ost mit einem kleinen Hopper herangebracht und das Bühnenfeld C-II nach dem Regenbogensystem (Abb. D 33) damit aufgefüllt. Ein günstigeres Verhalten konnte nicht festgestellt werden. Der Hopperbetrieb aber erwies sich wegen der geringen Fahrwassertiefen im Bereich des Riffbogens als tideabhängig und ungünstig.

1992 wurde die Entnahme nach umfangreichen Erkundungsbohrungen in den 500 m weiter westlich gelegenen Westrand der Robbenplate verlegt (Abb. D 31), da hier ein größerer Feinsand festgestellt worden war. Die Kornanalyse des aufgespülten Materials ergab ein d₅₀ = 0,18 mm bei d₁₀/d₉₀ = 0,16/0,6 mm (Abb. D 40) [26]. Der d₉₀-Wert weist auf einen beträchtlichen Muschelanteil hin.

5. *Naßbaggergeräte*

Für die Aufspülungen sind seit 1976 stationäre Naßbaggergeräte verwendet worden, bis 1984 jeweils mit Schneidkopf und 1989 sowie 1992 mit Saugkopf mit Druckwasserlöseeinrichtung. Gemäß Tab. D 4 ist in drei der fünf Spülmaßnahmen von 1976 bis 1992 ein mittelgroßes Gerät „Pirat VI“ bzw. „Pirat IX“ mit 500 mm Spülrohrdurchmesser und 850 kW Pumpenleistung eingesetzt worden. Für die relativ geringe Aufspülmenge zwischen 0,4 und 0,5 Mio. m³ und unter den gegebenen Seegangsbedingungen, Tiefenverhältnissen und Spülentfernungen bietet dieses Gerät eine wirtschaftliche Lösung für die Aufspülung.

6. *Erosionsraten und Mindeststrandhöhe*

Gem. Tabelle D 3 sind von 1951 bis 1992 (einschl.) rd. 4,1 Mio. m³ Sand eingebaut worden. Der zeitliche Ablauf (Abb. D 7 und Tab. D 3) zeigt, daß die Vorgaben der Arbeitsgruppe Norderney, in 5- bis 10jährigem Abstand jeweils die jährliche Ergänzung von etwa 90 000 m³ vorzunehmen, zunächst nicht befolgt worden ist. In den ersten 24 Jahren wurde nur 1967 die sehr geringe Aufspülmenge von 240 000 m³ ergänzt. Nach 1976 setzte dann eine Rückbesinnung auf die Empfehlungen der Arbeitsgruppe und deren Philosophie

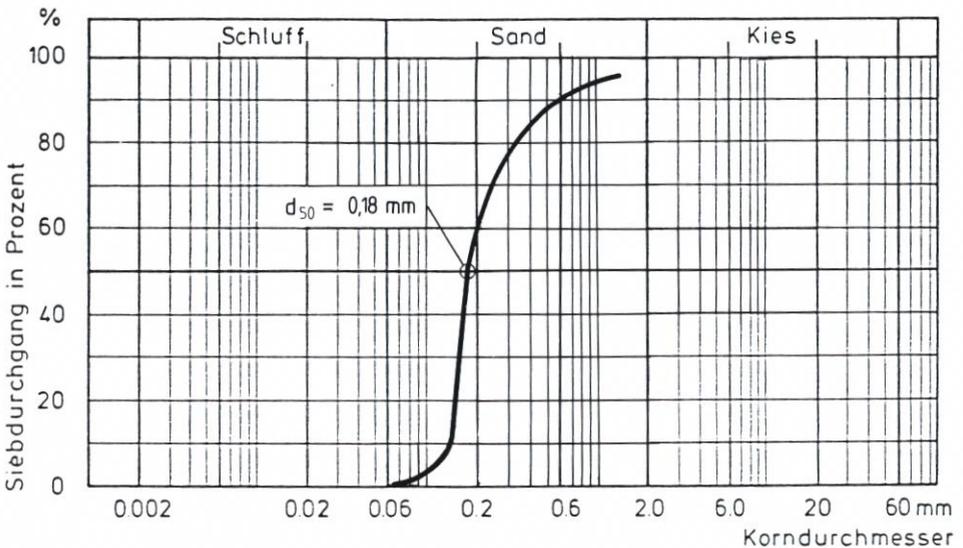


Abb. D 40. Korngrößenverteilung des in Norderney 1992 aufgespülten Sandes

Tabelle D4. Seit 1976 eingesetzte Naßbagger, deren Merkmale und Bauzeiten [26]

Jahr der Ausführung	1976	1982	1984	1989	1992
Naßbagger	„Jokra“ Cutter	„Pirat VI“ Cutter	„Triton“ Cutter	„Pirat VI“ Grundsauger ^{*)}	„Pirat IX“ Grundsauger ^{*)}
Verdrängung	~ 2200 m ³	~ 440 m ³	~ 1350 m ³	~ 440 m ³	~ 440 m ³
Tiefgang	2,80 m	1,40 m	2,40 m	1,40 m	2,00 m
Baggertiefe	bis 26 m	16 m	20 m	16 m	16 m
Saugleitung	Ø 800 mm	Ø 550 mm	Ø 850 mm	Ø 550 mm	Ø 550 mm
Druckleitung	Ø 750 mm	Ø 500 mm	Ø 800 mm	Ø 500 mm	Ø 500 mm
Pumpenleistung	~ 3200 kW	~ 850 kW	~ 2500 kW	~ 850 kW	~ 850 kW
Schneidkopf- antrieb	~ 590 kW	~ 132 kW	~ 365 kW	entfällt	entfällt
Spülmenge	500 000 m ³	470 000 m ³	410 000 m ³	447 000 m ³ ^{**)}	500 000 m ³
Bauzeit gesamt	60 Tage	65 Tage	37 Tage	52 Tage	48 Tage
Spüldauer	20 Tage	31 Tage	13 Tage	21 Tage	35 Tage
Spülentfernung	bis 1800 m	2200 m	2300 m	2250 m	2750 m
Spüleistung pro Tag	~ 25 000 m ³	~ 15 000 m ³	~ 31 000 m ³	~ 20 500 m ³	~ 14 300 m ³

^{*)} mit Druckwassereinrichtung; ^{**)} einschl. 17 000 m³ größeren Sand

ein, nachdem die Orkanfluten 1962, 1973 und 1976 zu erheblichen Schäden an den alten Schutzwerken geführt hatten.

Nicht nur eine Verhinderung der Bauwerksunterspülung, sondern auch eine Begrenzung der Seegangbelastung durch den höheren Strand wurde wieder angestrebt. Als Mindeststrandhöhe am Nordweststrand (Bühnenfeld D₁-E₁) wurde ein Strandkeil von 50 m³/m über MTnw angehalten, was einer Strandhöhe in Deckwerksnähe von etwa NN -0,5 m entspricht. Das Unterschreiten dieser Strandhöhe macht dann eine erneute Aufspülung notwendig. Die jährliche Erosionsrate von rd. 132 000 m³ seit 1976 (Tab. D 5) liegt deutlich über dem von der Arbeitsgruppe geschätzten Wert und dürfte vor allem auf die seit 1970 erheblich gestiegene Sturmfluthäufigkeit zurückzuführen sein.

Tabelle D5. Mittlere Erosionsraten des aufgespülten Norderneyer Strandes

Aufspülungen ^{*)}	Sandmenge (Mio m ³)	Jahre der Erosion	mittl. Erosions- rate (m ³ /Jahr)
1951/52-1989	3,607	41 J. ^{**)}	88 000
1976-1989	2,117	16 J. ^{**)}	132 000

^{*)} einschl. Trockeneinbau 1981, 1983, 1990; ^{**)} bis zur Aufspülung im Mai 1992

Beispiel 2: Strandaufspülungen in Phasen unzureichender Sandversorgung und Plattensteuerung auf Langeoog

1. Strandaufspülung 1971/72 mit stabilisierendem geotextilen Schlauchwerk

Im Unterschied zu Norderney sorgt auf Langeoog der natürliche Sandnachschub durch die regelmäßige Anlandung von Platen für eine ausgeglichene Sandbilanz am Nord- wie am

Nordwest- und Weststrand. Die Lage der tiefen Rinne im Westen der Accumer Ee am steilen Ostufer des Baltrumer Osterhoek und ihre nördlich gerichtete Stoßrichtung bewirken diese gleichbleibend günstige Platananlandung (Abb. D 2). Ursache für diese Rinnenführung im Seegat ist die Form des Wateinzugsgebietes, von dem rd. 85 % östlich des Seegats zwischen der Insel Langeoog und der Festlandsküste liegen und nur 15 % zum Baltrumer Watt gehören [55].

Aber diese Sandversorgung aus anlandenden Platen kann naturgemäß nicht mit einer solchen Perfektion den brandungsabhängigen Sandabtrag am Strand ergänzen, daß es nicht auch zu gewissen Schwankungen und Störungen in der Sandversorgung einzelner Strandabschnitte kommen könnte und Phasen mit Sandmangel zu überbrücken wären. Am Nordstrand fehlte z. B. zwischen 1960 und 1970 die Sandanlandung, so daß nördlich des Pirolatales ein starker Randdünenabbruch mit bis zu 21,5 m/Jahr im Profil 25 eintrat [55].

Daher wurde 1971/72 eine Strandaufspülung des Nord- und Nordweststrandes notwendig (Abb. D 41). Auf der 2,5 km langen Strandstrecke wurden 550 000 m³ Sand aufgespült und mit einem zuvor verlegten Schlauchwerk stabilisiert. 50 bis 70 m vor dem Dünenfuß wurde ein Längswerk aus geotextilen Zwillingschläuchen mit je 1 m Durchmesser verlegt und in Abständen von 60 m durch Riegel an den Dünenfuß angeschlossen [27]. Die natürliche Platananlandung hat seit 1972 das Schlauchwerk allmählich eingesandet und anschließend den Strand erhöht und die Rückgewinnung der Randdüne begünstigt. Bei der starken Strandabnahme Anfang der 80er Jahre trat das Schlauchwerk teilweise wieder zutage. Es zeigte sich, daß das vordere Längswerk offenbar nach Verflüssigung des Strandes unter schwerem Brandungsschlag auf Teilstrecken erheblich abgesackt war und streckenweise bis zu einem Meter tiefer als nach dem Einbau lag. Aus diesem Grunde konnte es für eine erneute Aufspülung nicht aktiviert werden.

Für die Strandaufspülung 1971/72 wurde der Sand aus dem südlich der Randdünenkette gelegenen Sommerpolder entnommen und dadurch der Schloppersee geschaffen. Seit 1983 wurden immer wieder Sicherungsmaßnahmen am Seeufer notwendig. Die sich bei Überflu-

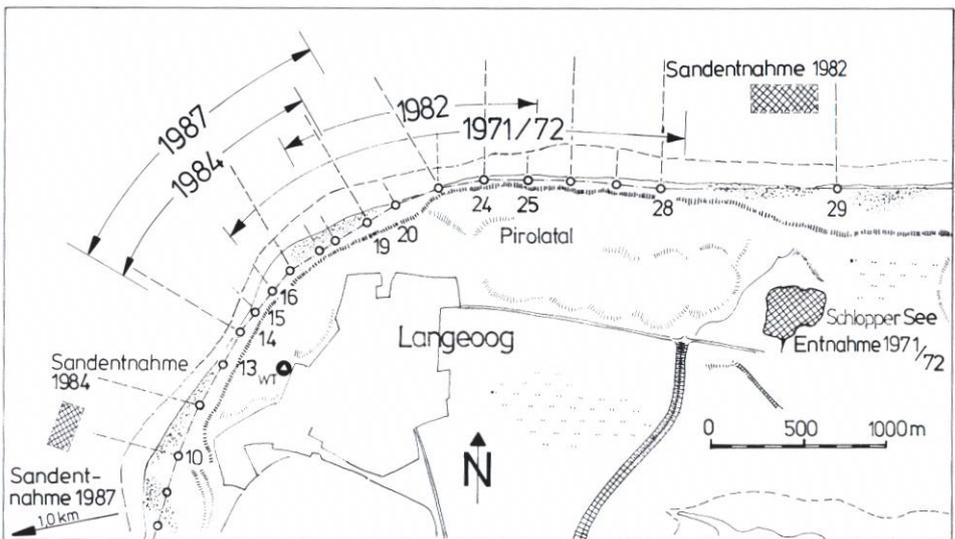


Abb. D 41. Westteil der Insel Langeoog mit Vermessungsprofilen und Kennzeichnung der Aufspülstrecken und Sandentnahmen der Strandaufspülungen 1971/72 bis 1987 [21]

tungen des Sommerpolders durch rückschreitende Erosion vergrößerten Zulaufrienen waren mehrfach zu sichern oder abzugrenzen. Ein tiefausgekolter Durchbruch des öffentlichen Weges und die Unterspülung mehrerer Ver- und Entsorgungs-Hauptleitungen im Winter 1991/92 machten schließlich eine Umwallung des Schloppsees mit Bewirtschaftung über ein Rohrsiel notwendig.

2. Stranderhöhung durch Steuerung der Platenanlandung 1982

Auf Langeoog verursachten die Orkanfluten des Winters 1981/82 eine starke Abnahme des Nordstrandes und schwere Dünenabbrüche mit der Gefahr des Dünendurchbruchs zum Pirolatal. Vor der geschwächten Randdüne am Profil 24 lag eine Sandplate etwa 350 m vor dem Strand und näherte sich diesem im spitzen Winkel weiter in östlicher Richtung. Die Gefahr könnte gebannt werden, wenn es gelingen würde, die Richtung dieser Plate zu ändern und sie direkt an den Strand zu steuern (Abb. D 42). Dieser Versuch wurde 1982 unternommen, nachdem folgende Überlegungen dazu ermutigt hatten:

Der Sand einer Plate am Nordstrand Langeoogs bewegt sich bei dem aus Nordwesten anlaufenden Seegang zunächst auf der Außenböschung der Plate in östliche Richtung und lagert sich am Ende der Plate ab. Bei steigendem Wasserspiegel wird ein Teil des Sandes außerdem über die Plate gespült und kommt auf der steilen inselseitigen Böschung zur Ablagerung. Durch den Brandungsstrom wird davon ein Teil in der Strandbalje weiter nach Osten transportiert und ebenfalls am Ende der Plate abgelagert [21]. Ein durch die Strandbalje aufgespülter Sanddamm könnte die Längsströmung und damit den Längstransport in der Strandbalje unterbinden und die unmittelbare Platananlandung ermöglichen.

Dafür wurde ein 350 m langer Sanddamm mit 130 000 m³ Sand geschaffen [20, 21]. Für die äußere Verstärkung der Randdüne wurden auf den oberen Strand auf 1300 m Länge noch einmal 130 000 m³ Sand aufgespült. Der Sand dieser Aufspülmaßnahme wurde 2 km östlich aus dem gutversorgten Vorstrandbereich entnommen; er entsprach damit der üblichen Strandkörnung von $d_{50} \cong 0,2$ mm.

Die beabsichtigte Wirkung des Sanddammes trat in vollem Umfange ein. Auf Abb. D 43

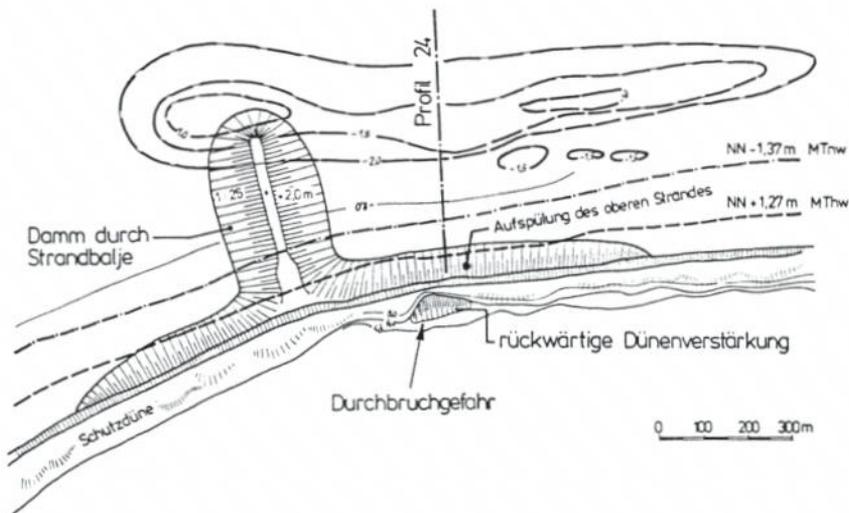


Abb. D 42. Aufzuspülender Damm durch die Strandbalje auf Langeoog zur Plate und geplante Aufspülung des oberen Strandes 1982 (Lageplan) [20, 21]

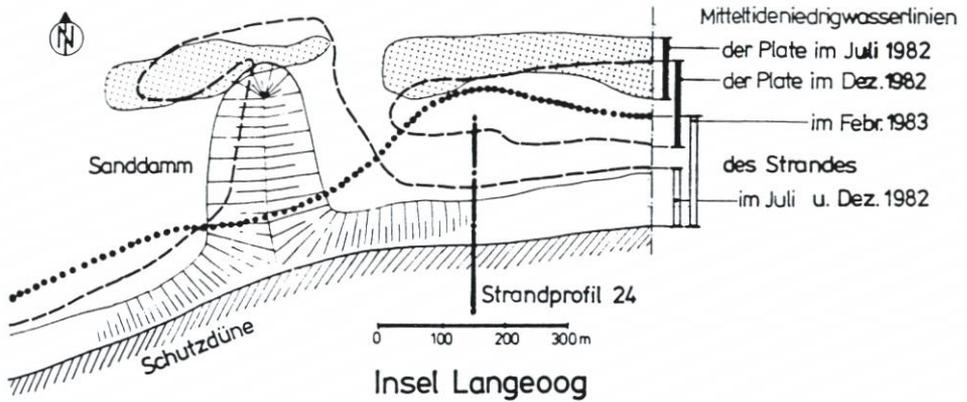


Abb. D 43. Anlandung der Plate und Auflandung des Strandes nach Vermessungen im Juli 82, Dez. 82 und Febr. 83 [21]

sind die Umriss der Plate und des aufgespülten Dammes im Juli 1982 sowie ihre Bewegung bis Dezember und ihre völlige Anlagerung an den Strand bis Februar 1983 dargestellt. Die Massenbilanz am Strand zeigt Abb. D 44.

Unter Ausnutzung der natürlichen Transportkräfte konnte mit dem relativ geringen Einsatz von 1,0 Mio. DM die Erosionsphase überbrückt und die Sicherheit für Langeoog wiederhergestellt werden. Die Anlandung weiterer Platen hat danach den Strand weiter aufgehöhht und den Wiederaufbau der Randdüne ermöglicht.

3. Überbrückung ausbleibender Platananlandung durch Strandaufspülungen und deren Bemessung

In den beiden Winterhalbjahren 1982–1984 ereigneten sich zahlreiche Sturmfluten mit Verweilzeiten von Sturmflut-Wasserständen über NN +2,0 m am Pegel Norderney von insgesamt 138 Stunden. Am Nordweststrand Langeoogs führte dieses bei ausbleibender Platananlandung nach 1982 zu einer Erosionsphase (s. Zeit-Weg-Diagramm Abb. D 4) mit erheblichen Dünenabbrüchen und machten 1984 eine Sicherung der unmittelbar vor dem Ort mit Hauptbad und Kurzentrum gelegenen Randdüne notwendig. Auf 1 km Strandstrecke

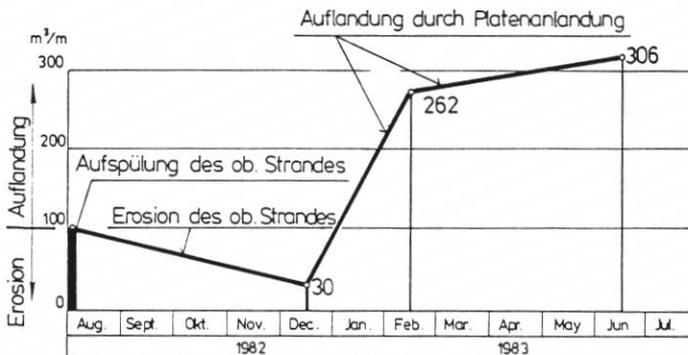


Abb. D 44. Bilanz in Profil 24 – Erosion der Aufspülung des oberen Strandes bis Dez. 82 und anschließende Auflandung durch Anlandung der Plate [21]

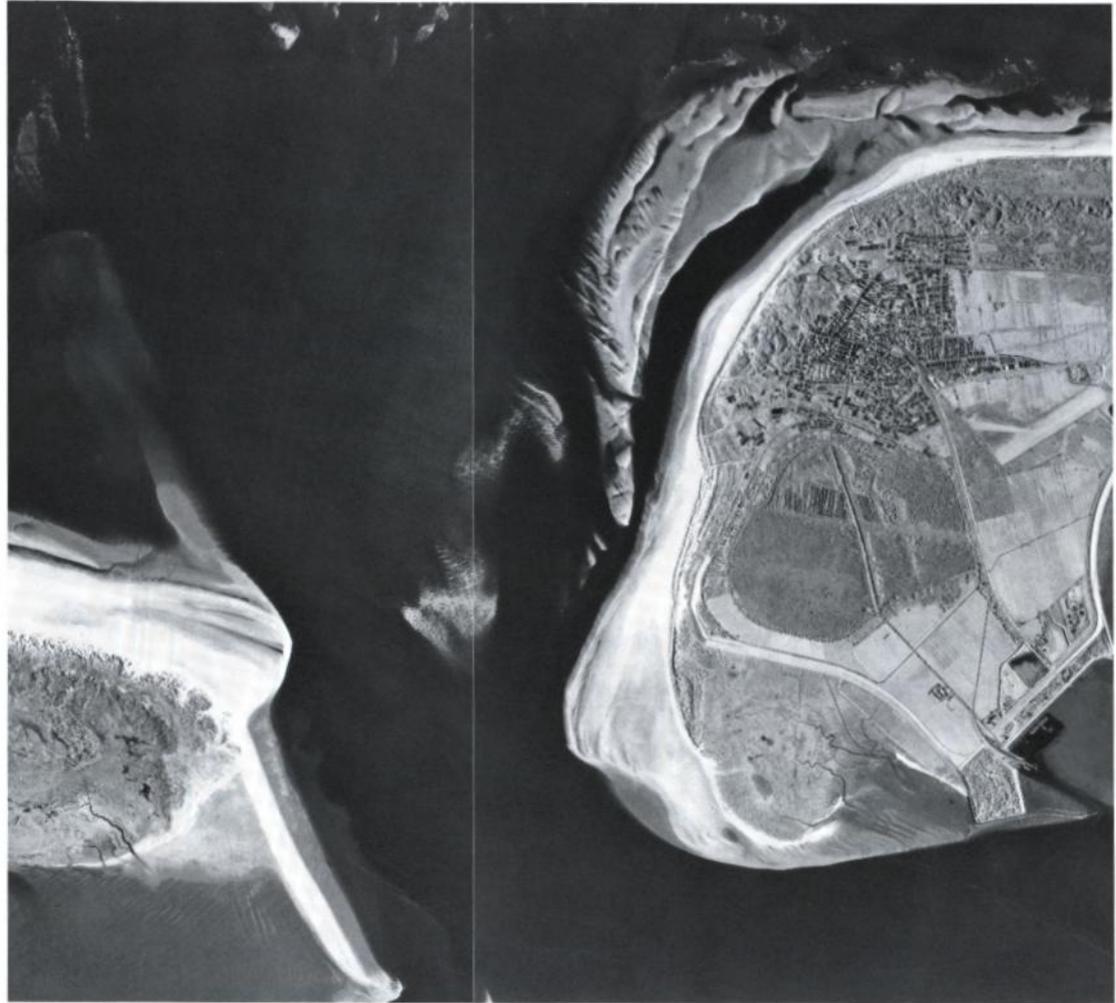


Abb. D 45. Luftbild vom Westteil der Insel Langeoog mit anlandenden Platen des Riffbogens, links im Bild Ostende von Baltrum (Luftbild vom 19.5. 1992) bei einem Wasserstand von NN $-1,75$ m (MTnw $-0,48$ m)

wurden $290\,000\text{ m}^3$ Sand aufgespült. Aber die Stranderosion wirkte fort und da die Riffbogenbefliegung 1985 auch in naher Zukunft keine anlandenden Platen vor dem Nordweststrand erkennen ließ, erwies sich zur Abwendung weiterer Dünenabbrüche unmittelbar vor dem Ortskern die Planung einer weiteren Aufspülung als notwendig. Diese Strandaufspülung wurde 1987 durchgeführt, indem $570\,000\text{ m}^3$ Sand aus dem südlichen Randbereich des Seegats Accumer Ee mit stationärem Saugbagger über eine Spülrohrleitung eingespült wurden.

Die Aufspülstrecke wurde hierbei erstmals nach dem „Mindeststrandprofil“ mit der kritischen Strandbreite $b_{\text{krit}} = 150$ m zwischen NN ± 0 und dem Dünenfuß NN $+3,0$ m ermittelt (s. Abschn. 3.2.1.3). Das Aufspülprofil ergab sich, indem das Mindeststrandprofil um das Vorsorgemaß von 1 m (s. Abschn. 5.2.2.2 u. Abb. D 21) erhöht wurde und eine zusätzliche Depotaufspülung im Bereich des trockenen Strandes erhielt [21]. Damit ließ sich

eine Lücke bis zur Platananlandung von mindestens drei Jahren überbrücken. Tatsächlich lag die Plate 1992 noch 300 m von der Strandlinie bei MThw entfernt (s. Abb. D 45), so daß eine erneute Aufspülung notwendig wurde.

Zusammengefaßt kann festgestellt werden, daß die Insel Langeoog als Beispiel für Inseln gilt, auf denen Phasen mit Sandmangel auf bestimmten Strandabschnitten infolge ausbleibender Platananlandung auftreten. Die Planung von Strandaufspülungen erfordert eine ständige Beobachtung der Platen- und Strandentwicklung durch Luftbilder und Strandprofilmessungen. Die Beurteilung der Dringlichkeit von Strandaufspülungen nach dem „Mindeststrandprofil“ hat sich für die ostfriesischen schutzwerkfreien Strände bewährt. Auch die Bemessung unter Berücksichtigung des Vorsorgemaßes gibt einen guten Anhalt. Dabei bilden das Zeit-Weg-Diagramm und die Abschätzung der Platenbewegung aus den Luftbildern eine wesentliche Grundlage.

Beispiel 3: Aufspülungen Westerland/Sylt seit 1972

1. Maßnahmen vor Westerland/Sylt in den Jahren 1972, 1978, 1984 und 1990

Bis etwa 1970 standen bei Überlegungen zum Uferschutz vor Westerland feste Bauwerke im Vordergrund, was in erster Linie einen passiven Schutz gegen die angreifenden Kräfte bedeutet. Die Entwicklung der Uferschutzmauer ist aus Empf. E, Beisp. 15 zu ersehen. Im Jahre 1972 wurde dann erstmals der Versuch einer Sandvorspülung verbunden mit einem eingehenden Untersuchungsprogramm unternommen. Bei dieser Maßnahme wurde das Konzept einer in den Unterwasserstrandbereich sich ausdehnenden Vorspülung gewählt. In Form einer Sandbuhne wurde ein Sandkörper so vorgespült, daß es den vorherrschenden Wellen- und Strömungseinflüssen überlassen werden konnte, den Sand von selbst an die zu schützenden Uferstrecken zu fördern. Dieses Vorgehen bietet den großen Vorteil [28, 33], daß der Sand dort von vornherein in einem strandgerechten Profil abgelagert wird. Durch den gewählten Grundriß der Vorspülung im Jahre 1972 (s. Abb. D 25 oben) wurde im ersten Jahr nach der Vorspülung sogar noch Zusatzsand aus dem natürlichen Küstenlängstransport im Bereich der Uferschutzmauer „eingefangen“ [29, 31] und dadurch die Verweilzeit des Sandvorrates im zu schützenden Gebiet verlängert.

Im Jahre 1978 wurde die Wiederholung einer Vorspülung erforderlich. Diese Versuchsvorspülung wurde vergleichsweise als flächenhafte Vorspülung (Abb. D 25, Mitte) ausgeführt. Allgemein liegt dieser Methode der Gedanke zugrunde, einem erosionsgefährdeten Uferabschnitt auf ganzer Länge einen Sandvorrat zuzuführen, um diesen Abschnitt für eine bestimmte Zeit stabil zu halten.

Der zu erwartende Querschnitt einer Flächenvorspülung stellt sich bei einem freien Auslauf des Spülsandes auf der Spülfläche etwa nach Abb. D 17 dar. Der steile Unterwasserstrand unterhalb MTnw unterliegt auch bei normalen Seegangsverhältnissen einer ständigen rückschreitenden Erosion, wie es auch nach der 2. Vorspülung beobachtet werden konnte. Darüber hinaus bildete sich bereits in den Sommermonaten 1978 entlang der seeseitigen relativ hohen Aufspülfläche ein bis zu 3 m hohes Kliff aus, an dem durch Kliffbrandung erhebliche Sandmassen zunächst in den Unterwasserstrandbereich und dann aus dem unmittelbar zu schützenden Bereich heraus in Nachbarabschnitte verfrachtet wurden.

Für die 3. Vorspülung vor Westerland im Jahre 1984 hatte FÜHRBÖTER vorgeschlagen, die Vor- und Nachteile der vorausgegangenen punktuellen und Flächenvorspülungen miteinander zu verbinden und bei der anstehenden Wiederholungsaufspülung eine Strandlinie anzustreben, wie sie auf Abb. D 25 (unten) dargestellt ist. Durch die Wahl von drei sog. Sandhöfts,

zwischen denen zwei Strandbögen von etwa 500 m bis 600 m Länge eingeschlossen werden, wurde beabsichtigt, an der Nord- und Südflanke „Zusatzsand“ einzufangen. Die beiden eingeschlossenen Strandbögen sollten durch eine Überlagerung von Diffraktions- und Refraktionseinflüssen eine Verminderung des Wellenangriffs bewirken. Außerdem sollte mit der Form erreicht werden, daß für die erste Zeit durch den Küstenlängstransport statt einer Fernverfrachtung nur innere Umlagerungen innerhalb dieser Bögen auftreten können. Es wurde hierdurch erwartet, daß sich gerade in den ersten Zeitabschnitten nach der Vorspülung eine größere Stabilisierung als bei einer linearen Vorspülung mit einem geradlinigen Verlauf der Strandlinie einstellen würde. Die 4. Vorspülung vor Westerland wurde im Jahre 1990 ebenfalls nach dem Prinzip der Girlandenvorspülung durchgeführt.

2. Durchführung und Bewertung der Höftvorspülung 1972

Bei der Höftvorspülung 1972 war ursprünglich beabsichtigt, die ausgeprägte Rinne zwischen Strand und Riff zu durchdämmen (s. Abb. D 10). Bei der Ausführung zeigte es sich, daß die vorgesehene Vorspülmenge von rd. 1,0 Mio. m³ Sand, von der ein Spülverlust von etwa 30 % abzuziehen ist, nicht ausreichte, um vom Strande her die Sandbuhne in das vorhandene Riff einzubinden. Die Gründe sind darin zu sehen, daß vor Kopf der Sandbuhne vor allem durch erhöhte Tidedrömungen ein stärkerer Abtrag auftrat und die mittlere Spüleistung von 6700 m³/Tag bei der damaligen Gerätekonstellation nicht ausreichte, um die letzte Phase der Durchdämmung innerhalb kürzester Zeit zu bewerkstelligen. In Anbetracht der inzwischen möglichen Vorspülmengen von mehr als 20000 m³/Tag ließe sich diese Aufgabe wahrscheinlich lösen. Den Einfluß des Riffs auf die Strandbrandung verdeutlichen Abb. D 46a u. b.

Bedingt durch die erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten und die nicht vollendete Durchdämmung hat sich unmittelbar nach Beendigung der Vorspülung eine unerwünschte Erscheinung eingestellt, indem der bis dahin durchgehende Riffgürtel durchbrochen wurde und vorübergehend ein seewärtiger Materialtransport auftrat (vgl. Abb. D 25 oben mit dem durchgehenden Riffgürtel und Abb. D 26 oben mit den Vorstrandverhältnissen etwa 2 Monate nach Abschluß der Vorspülung). Daß der Seegang die Sandbuhne innerhalb relativ kurzer Zeit umgeformt und den vorgespülten Sand relativ gleichmäßig entlang der zu schützenden Uferstrecke verteilt hat, geht aus den Vermessungen im Oktober 1972 (Abb. D 24 oben) und Mai 1973 (Abb. D 24 Mitte) hervor. Auffällig ist auch, daß sich in dieser Zeit der Riffgürtel wieder geschlossen hat. Im 2. Winterhalbjahr wurde u. a. auch der Vorspülbereich durch eine Folge von Sturmfluten im November und Dezember 1973 außergewöhnlich stark der Brandung ausgesetzt. Wie das Aufmaß am Ende des Winterhalbjahres (Abb. D 26 unten) veranschaulicht, wurde bestätigt, daß Sandvorspülungen auch bei Extrembeanspruchungen ihre Schutzfunktion – hier gegen Unterspülung der Uferschutzmauer – nicht verlieren. Einem „Zugewinn“ von rd. 10 % der Vorspülmengen aus dem natürlichen Küstenlängstransport (10/72 bis 5/73) im 1. Winterhalbjahr folgte ein Abtrag von 260 000 m³ während des extrem sturmflutreichen Winters 1973/74 [29]. Danach waren die Verluste erheblich geringer, auch im Winter 1975/76 mit den sehr schweren Sturmfluten vom 3. 1. und 21. 1. 1976, wo ebenfalls infolge der Sandvorspülungen keine Schäden an den Uferschutzbauten auftraten.

Zu der Methode der punktuellen Vorspülung kann abschließend gesagt werden, daß sich diese in dem exponierten Küstenvorfeld von Sylt bewährt hat und der dort mit wechselnden Anlaufrichtungen auftretende Seegang in der Lage ist, ein Höft in einen durchgehenden breiten Strandbereich mit dem großen Vorteil von natürlichen Strandneigungen vor den Uferschutzbauten zu verteilen. Die Auswertung der Höftumformung und der Sandverluste



Abb. D 46a. Brandung vor Sylt (Luftbilder vom 25. 11. 1981),
Konzentrierte Brandung am Strand ohne vorgelagertes Riff gem. Abb. D 10

durch den zeitweise nach Norden und ebenfalls nach Süden gerichteten Küstenlängstransport erlaubt in Verbindung mit der Analyse der im langjährigen Mittel zu erwartenden Windhäufigkeiten und Wellenanaufrichtungen die Optimierung der Lage der Bühnenachse hinsichtlich einer möglichst langen Verweilzeit des Sandes im eigentlich zu schützenden Bereich für den Fall einer Wiederholung der Höftvorspülung [33].

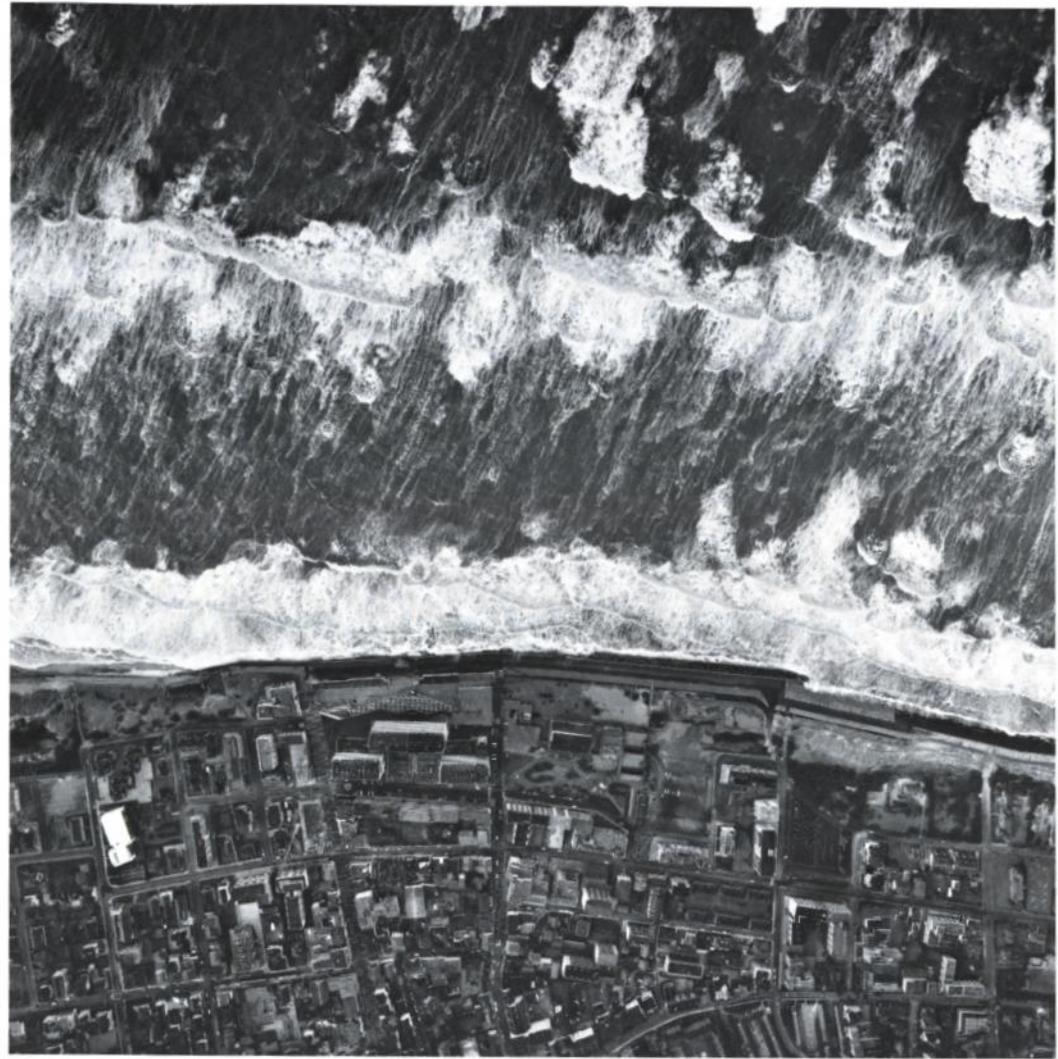


Abb. D 46b. Brandung vor Sylt (Luftbilder vom 25. 11. 1981),
Brandung über dem Riff und am Strand

Beispiel 4: Sandentnahmen und -transporte am Beispiel Sylt

1. Sandentnahmen im Küstenvorfeld und Watt

Für die Versuchssandvorspülungen vor Westerland in den Jahren 1972 und 1978 konnten noch rd. 2 Mio. m³ Kaolinsand aus dem Rantum-Watt entnommen und hydraulisch über eine Transportlänge von 7 km zur Einbaustelle am Strand vor Westerland gefördert werden (Abb. D 8). Danach wurden geeignete Lagerstätten im Küstenvorfeld erkundet [2, 44].

Außer den Empfehlungen der Abschnitte 4.2 und 4.3 waren folgende Aspekte für die Auswahl des Sandentnahmegebietes zu beachten:

- die Transportwege zwischen Entnahme und Einspülbereich müssen wirtschaftlich vertretbar sein,
- die Entnahme darf zu keiner Gefährdung des Inselsockels führen, der in einer Wassertiefe von etwa 10 m definiert ist und
- mögliche Umweltbeeinträchtigungen im Entnahmegebiet sind im Vorfeld des Genehmigungsverfahrens abzuschätzen.

Nach diesen Gesichtspunkten wurde ein Entnahmegebiet von rd. 40 km² Größe in Wassertiefen von 12 m bis 14 m und einer Entfernung zwischen 7 km und 10 km von der Westküste erkundet (Abb. D 5), um einen Sandbedarf von 20 Mio. m³ für die ersten 10 Jahre der Verwirklichung des Fachplanes Sylt [1] sicherzustellen.

Abb. D 47 zeigt beispielhaft die Schichtstärken von Holozän, Pleistozän und Tertiär bis zu einer Bohrtiefe von 40 m und die zugehörigen Korngrößenanteile. Die Feinsandlage an der Oberfläche mit einem Korndurchmesser $d_{50} = 0,21$ mm ist im Vergleich zu der im Vorspülbereich an der Westküste erforderlichen Korngrößenverteilung mit einem $d_{50} = 0,35$ mm ungeeignet. Erst in den tiefer liegenden Schichten des Pleistozäns (Mitte) und des Tertiärs (unten) sind die im Entnahmegebiet erkundeten Korngrößenverteilungsbänder mit Medianwerten $d_{50} = 0,43$ mm und $d_{50} = 0,40$ mm für Sandvorspülungen auf Sylt ausreichend [1]. Wegen der vorliegenden Verhältnisse im Entnahmegebiet und auch angesichts des Wellenklimas vor Sylt [12, 15] bestand Einvernehmen darüber, daß für die Sandentnahme nur seegängige Hopperbagger in Frage kommen. Neben der Sandentnahme mit wenig befriedigendem Schleppkopf wurde 1986 ein Hopperbagger mit Stechkopf für eine Erprobung dieser Methode angemietet, und es konnte nachgewiesen werden, daß ein Hopperbagger mit Stechkopf, der bei der Gewinnung im Sandentnahmegebiet vor dem Buganker liegt, auch bei den vor Sylt herrschenden Seegangsverhältnissen wirtschaftlich eingesetzt werden kann (Abb. D 32). Für die Durchführung einer „höftartigen“ Vorspülung vor Kampen/Kliffende im Übergangsbereich zwischen Kliff und Düne wurde erstmals erfolgreich ein Laderaumsaugbagger mit Stechkopf („Saga“ mit einem Laderrauminhalt von 1500 m³, Tiefgang: 6 m, Leistung: 5500 kW sowie max. Spülentfernung: 1250 m) eingesetzt. In einem Zeitraum von 2 Monaten wurden von April bis Juni insgesamt 300 000 m³ Sand vorgespült. Beim Stechkopf-

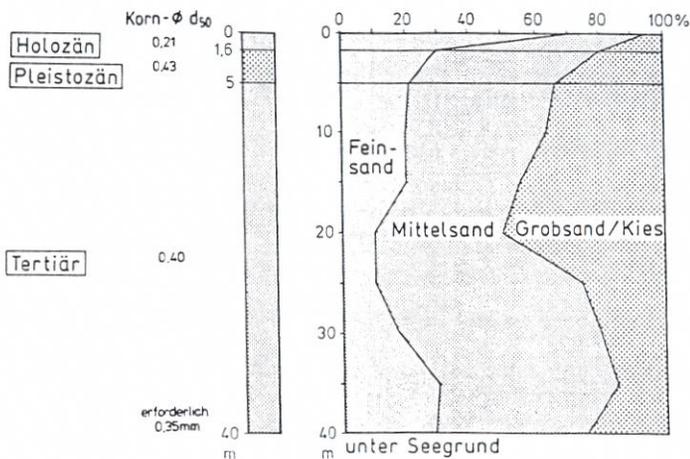
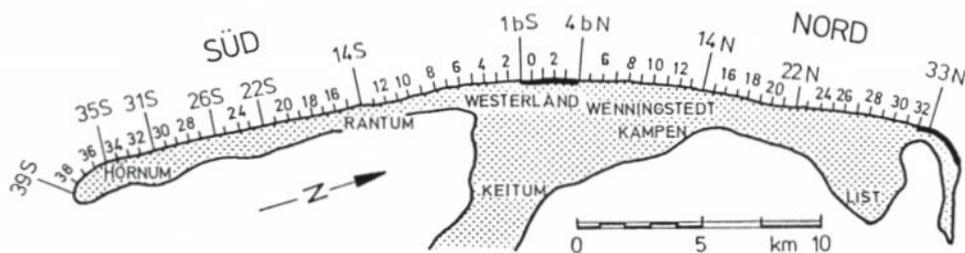


Abb. D 47. Korngrößenverteilung im Sandentnahmegebiet vor Westerland (Abb. D 8) und Schichtstärken von Holozän, Pleistozän und Tertiär [1]

Sandvorspülungen 1972 bis 1992



Station	Länge (km)	39S	36S	31S	26S	22S	14S	1bS	4bN	14N	22N	33N	Vorspülmenge in Mio. m ³
	2,0												
	2,0		32S										1,00
	2,5												1,00
	2,0												0,63
	4,0						11S						1,10
	6,3												0,33
	3,0												1,97
	4,7												1,60
	4,0												1,44
	5,5												0,30
													1,20
													2,00
													3,45
													2,00
													2,00

Jahr	Einbauart	Einbaumenge (m ³)	Strandstrecke (km)	Art der Vorspülung	Kosten (DM)
1972	Westerland - Versuchssandvorspülung	1,00 Mio.	0,3	Sandbühne	5,6 Mio.
1978	Westerland - Versuchssandvorspülung	1,00 Mio.	0,9	Längsvorspülung	5,2 Mio.
1983	Hörnnum - Versuchssandvorspülung	0,63 Mio.	1,0	Längsvorspülung	3,3 Mio.
1984	Westerland und Kampen	1,10 Mio.	1,5	Längsvorspülung mit 3 Höften	5,2 Mio.
1984	Rantum	0,33 Mio.	1,4	Dünenverstärkung	2,1 Mio.
1985	Wenningstedt/Kampen	1,92 Mio.	4,6	Längsvorspülung mit Depot	14,4 Mio.
1986	Hörnnum	1,6 Mio.	3,2	Längsvorspülung mit Depot	7,7 Mio.
1987	Rantum	1,44 Mio.	3,0	Längsvorspülung mit Depot	10,1 Mio.
1987	Kampen Kliffende	0,30 Mio.	0,6	Höft	2,98 Mio.
1988	Westerland - Süd	1,00 Mio.	2,0	Längsvorspülung mit Depot	5,7 Mio.
1988	List	1,20 Mio.	3,0	Längsvorspülung mit Depot	6,5 Mio.
1989	Rantum Süd/Puan Kient	2,00 Mio.	4,0	Längsvorspülung mit Depot	10,6 Mio.
1990	Hörnnum, Westerland, Wenningstedt, Kampen	3,25 Mio.	5,5	Längsvorspülung mit Depot	23,2 Mio.
1991	Wenningstedt, Hörnnum	2,00 Mio.	3,0	Längsvorspülung mit Depot	15,4 Mio.
1992	Kampen-List	2,00 Mio.	5,5	Längsvorspülung mit 2 Höften	19,3 Mio.

Abb. D 48. Lageplan von Sylt mit Auflistung aller Sandvorspülungen von 1972 bis 1992 [41]

verfahren im Entnahmegebiet wurde zum Teil mit zwei Saugrohren gearbeitet. Bei Wellen bis zu $H_s = 2$ m entsprechend Windstärken 6 bis 7 Bft konnten die Sandentnahme und die Beladung des vor dem Buganker liegenden Baggers ohne Unterbrechungen durchgeführt werden.

Die auf Sylt bis 1992 durchgeführten Sandvorspülungen sind in Abb. D 48 zusammengestellt [41].

2. Sandvorspülung Hörnum 1983 mit Sandentnahme aus einer Tiderinne

Als Entnahme für die Vorspülung wurde nach eingehenden Untersuchungen ein Gebiet von 2100 m Länge und 160 m Breite am Osthang des Theeknobsandes zum Vortrapptief hin (Abb. D 49) ausgewählt. Ein Vergleich der Kornverteilung im Vorspülgebiet und im Entnahmegebiet (Abb. D 50) läßt die Entnahme als günstig einstufen.

Für die Ausführung der Sandvorspülung bot es sich wegen der relativ schmalen Inselbreite am südlichen Ortsrand von Hörnum an, die Übergabestation des Hopperbaggers in den Lee-Bereich der Insel vor das Ostufer zu legen (Abb. D 49). Die Spülentfernung von rd. 3,5 km zwischen Übergabeponton und Spülfeld erforderte die Zwischenschaltung einer Pumpstation. Der Durchmesser der Schwimmleitung vom Übergabeponton bis zum Oststrand der Insel und der anschließenden Landleitung betrug 800 mm.

Für die Maßnahme wurde ein Hopperbagger mit einem Ladevolumen von 3000 m³ bei einem Tiefgang von 6,5 m eingesetzt (Pumpenleistung des Hoppers: Gewinnen = 2 × 1100 kW sowie Verspülen = 2700 kW; Pumpstation: 1620 kW). Bei einer mittleren Entfernung zwischen der Sandentnahme in der Theeknobsrinne und der Übergabestelle am Ostufer von rd. 7 km ergab sich ein mittlerer Baggerumlauf von 4 Stunden (Abb. D 49). Mit einer mittleren Leistung von 20 000 m³/Tag (6–7 Hopperfahrten) wurde die Versuchssandvorspülung innerhalb von fünf Wochen im Mai und Juni 1983 durchgeführt. Das Aufspülprofil dieser Vorspülung gem. Abb. D 51 weist seeseitig eine Neigung von 1:15 auf. Diese entspricht in etwa der Strandneigung, die sich unter dem Einfluß von Wellen und Strömungen in der sturmflutarmen Jahreszeit als natürliche Strandneigung (Sommerprofil) am Weststrand vor Sylt einstellt. Die Höhe der Brandungsberme von NN +4,0 m entspricht etwa dem HHThw vom 24. 11. 1981 mit NN +4,05 m. Der Bemessungswasserstand liegt auf NN +4,5 m [16].

Als noch weitgehend ungeklärt mußte bei der Wahl der Böschungsneigung von 1:15 die Frage nach der möglichen Ausbildung von Kliffs – auch bei niedrigeren Sturmflutwasserständen (sogenannten Kantenfluten) – an dem künstlich aufgehöhten Strand unbeantwortet bleiben. Es konnte daher bei der Planung nur darauf hingewiesen werden, im Hinblick auf spätere Maßnahmen diese Erscheinung sorgfältig zu beobachten. Die Breite der Berme von rd. 60 m, die sich durch Wahl ihrer Höhe aus dem vorgesehenen Vorspülvolumen je lfdm Strandlänge ergab, bietet im Vergleich zu einer flacher geneigten bis zur Düne durchgehenden Böschung den Vorteil einer relativ großen Strandbreite auf Höhe der Sturmflutwasserstände und damit ausreichende Reserven im Hinblick auf die Abbruchvorgänge. Die Entwicklung dieses Aufspülkörpers in den Jahren nach der Aufspülung war überlagert von einer plötzlich eintretenden, von der Aufspülung unabhängigen Rinnenbildung im Vorstrand. Die Vorspülmenge betrug insgesamt 640 000 m³ Sand. Diese Störung beeinträchtigte auch die Profilentwicklung des Strandes, so daß dessen Beobachtung und Vermessung keine allgemein gültigen Schlußfolgerungen zuließen.

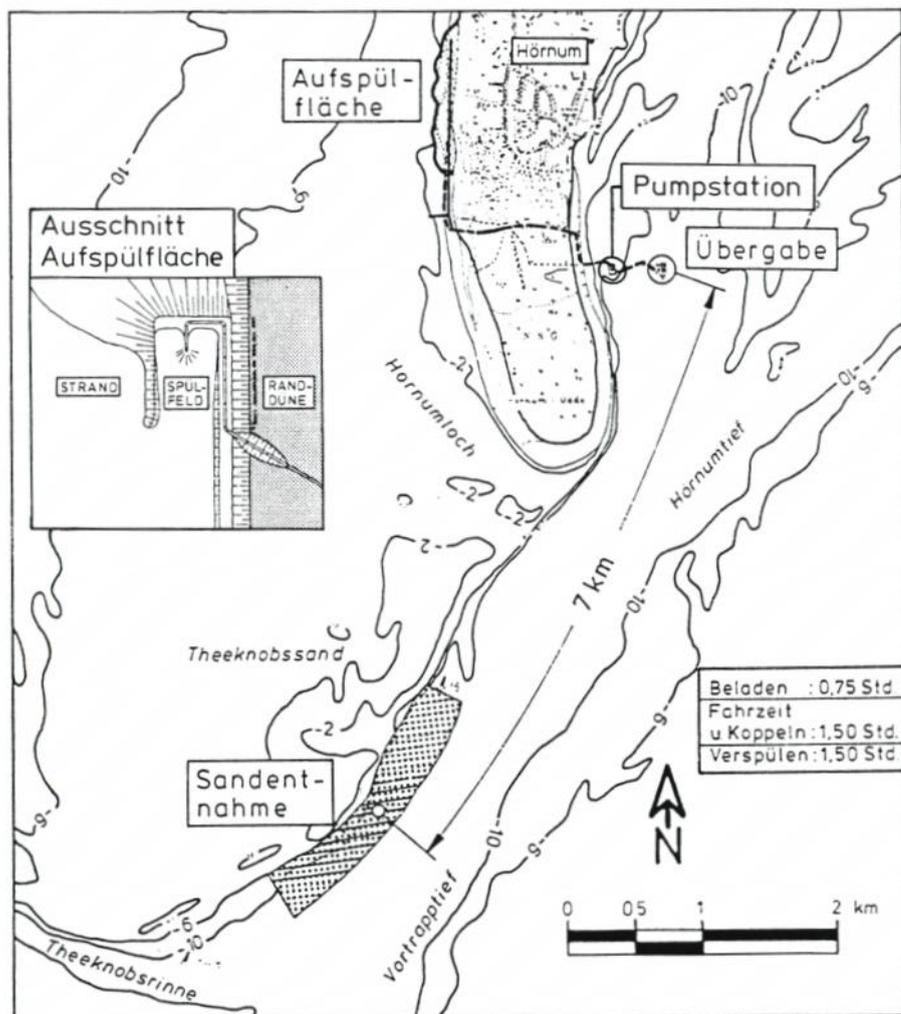


Abb. D 49. Sandvorspülung Hörnum 1983 und Sandentnahme am Theeknobssand (Lageplan) [16]

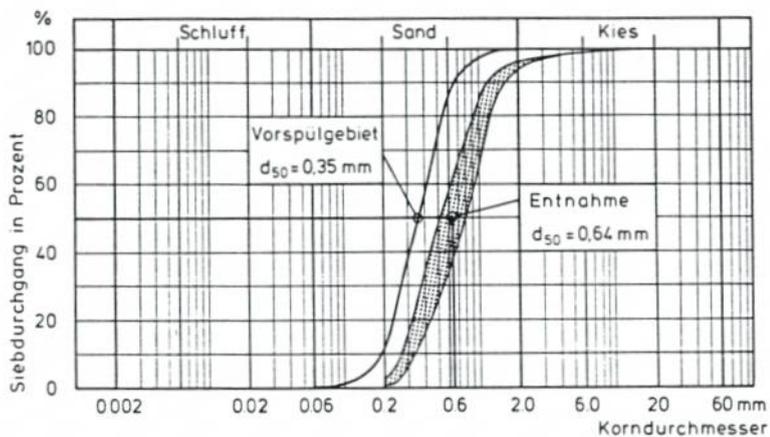


Abb. D 50. Korngrößenverteilung im Entnahmegebiet und Vorspülgebiet bei Hörnum [16]

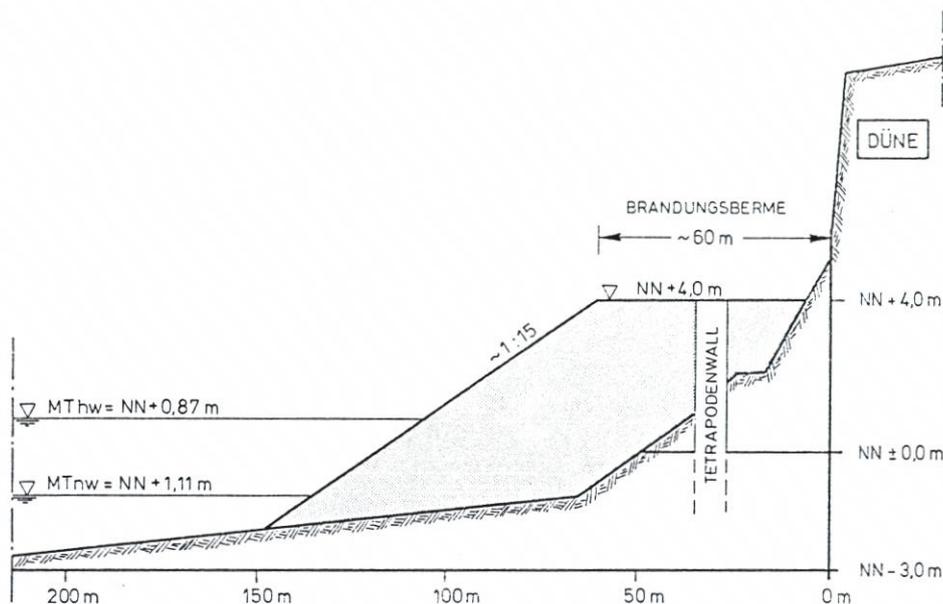


Abb. D 51. Aufspülprofil der Vorspülung Hörnum 1983 [16]

Beispiel 5: Sanddamm im Watt bei Vollerwiek/Eiderstedt

Im Zuge der Eiderabdämmung wurde die zuvor auf großer Breite pendelnde Rinne der Eider 1972 um rd. 24 % eingeschnürt und örtlich festgelegt. Sie reagierte durch verstärktes Mäandrieren sowohl land- als auch seewärts. Die 7 m tiefe Außeneider-Nordrinne verlagerte sich dabei bis 1979 mit zunehmender Geschwindigkeit insgesamt 600 m nordwärts (Abb. D 52), zuletzt um rd. 0,8 m pro Tag. Sie war nur noch rd. 60 m vom Vollerwieker Seedeich entfernt, so daß dieser akut gefährdet war.

Um diese Gefährdung abzuwenden, wurde im Sommer 1979 mit zwei Naßbaggern

- „Bagger Kiel“, 7500 PS, Tandempumpe, Saug- und Druckleitung 800/800 mm Ø, Tiefsaugleistung bis 35 m

- „Spüler VI“, 6500 PS, UW-Pumpe und Baggerpumpe 2000 PS, Saug- und Druckleitung 700/600 mm Ø, Tiefsaugleistung bis 50 m

die Nordrinne durch die „Vollerwieker Plate“ nach Südosten in die Südrinne umgelenkt. Die rd. 2,9 Mio. m³ Feinsand aus der bis NN -18 m gebaggerten Durchstichrinne wurden auf dem östlichen Teil der „Vollerwieker Plate“ eingespült. Ein Schließen des Sperrwerks während der Baggerung senkte die max. Tideströmung im Nordrinnenbogen vor Vollerwiek um 50 %. Dies machte es möglich, die Nordrinne durch Einspülen von rd. 1,3 Mio. m³ grobkörnigen, pleistozänen Materials zu durchdämmen. Der rd. 1,7 km lange Damm erhielt eine von NN +3,0 m an der Wurzel auf NN +1,75 m am Dammkopf abfallende Kronenhöhe. Die seitliche Böschungsneigung betrug etwa 1:50. Der Kopf erhielt einen Vorrat bis NN +3,0 zum Ausgleich von Materialverlust.

Die Nordrinnen-Altarme sandeten nach dem Dammbau rasch auf. Bis 1990 sind in den östlichen Altarm unterhalb NN -1,0 m etwa 4,2 Mio. m³ Sand eingewandert. Tideströmungen und Seegang haben die Dammkrone allmählich abgeflacht. Sturmfluten haben 1981, 1986

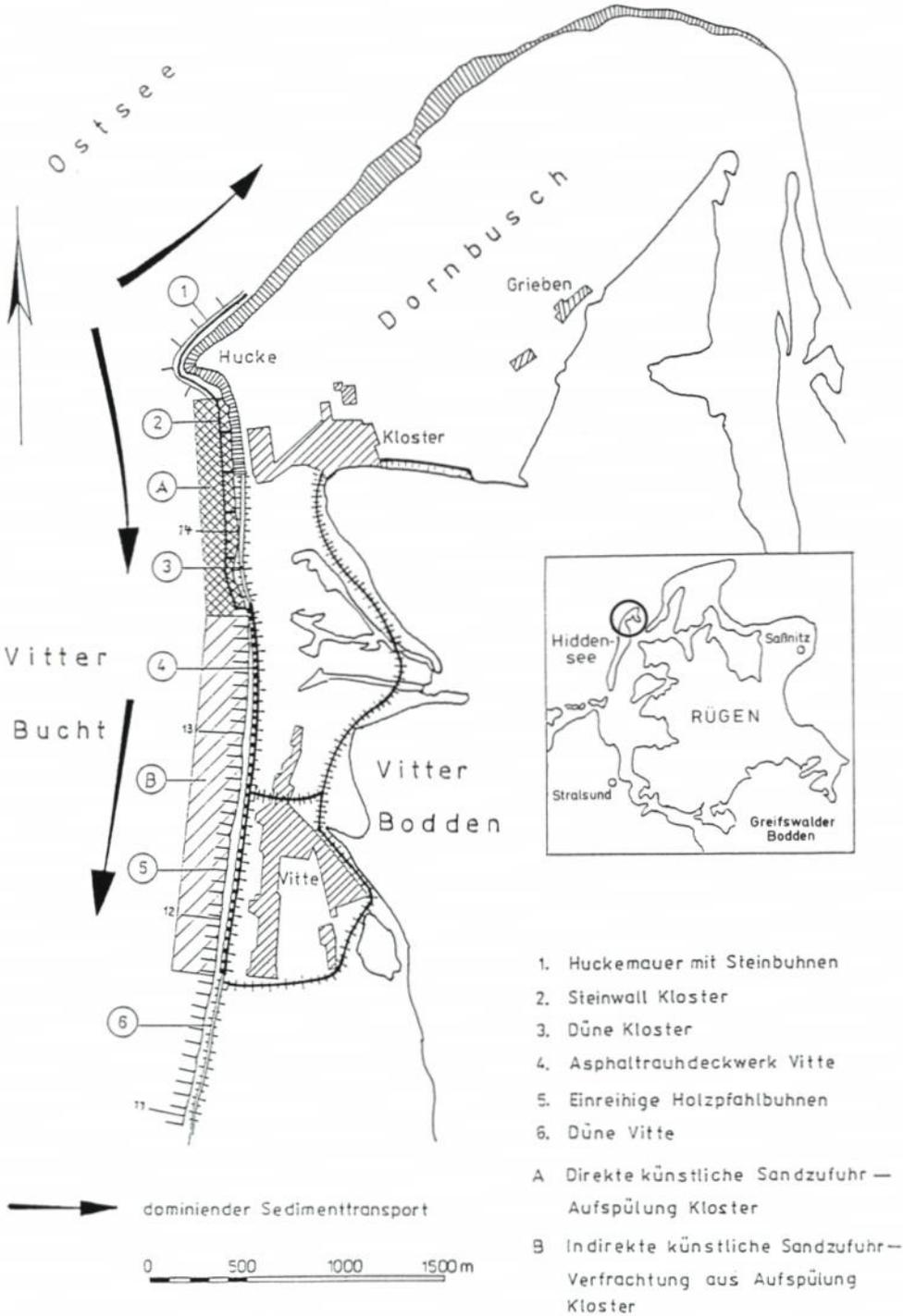


Abb. D 53. Strandaufspülung Kloster/Hiddensee (Lageplan)

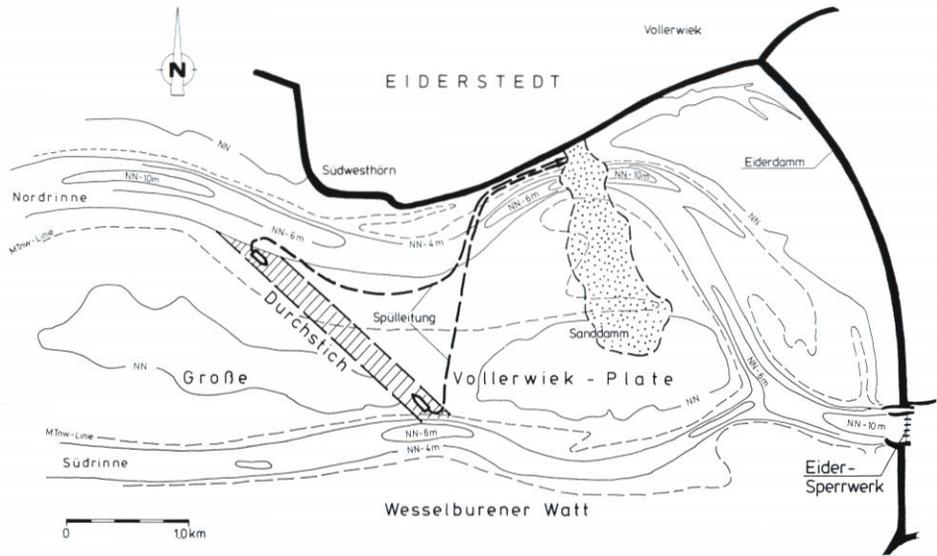


Abb. D 52. Durchdämmung und Umlenkung der Außeneidernordrinne bei Vollerwiek 1979 (Lageplan)

und 1988 rinnenartige Eintiefungen verursacht. Planierarbeiten konnten diese mit dem Vorratsmaterial jeweils wieder auffüllen. Im Mai 1992 lag die Krone des Sanddammes an der Wurzel auf etwa NN +2,5 m, am Kopf auf etwa NN +1,2 m. Dazwischen liegende geringe Eintiefungen sind unbedenklich. Die Durchstichrinne ist bis auf rd. NN +2,5 m aufgesandet. Die Tideströmung hat in der Südrinne den erforderlichen Durchflußquerschnitt freigeräumt. Der geschaffene naturhafte, verformbare Sanddamm erfüllt seine Aufgabe, den Vollerwieker Seedeich zu schützen, bisher mit gutem Erfolg.

Beispiel 6: Aufspülung Kloster/Hiddensee

Das 14 km lange südliche Flachland der Insel Hiddensee ist aus dem Abbruchmaterial des Inselkernes, des Dornbusch, entstanden. Die dominierende Sedimenttransportrichtung führt auf großer Länge nach Süden und bestimmt Sedimenthaushalt und Küstenzustand. Der Bau der Huckemauer (Nr.1 in Abb. D 53) führte zu Leewirkungen im südlich anschließenden Steilufer und zu Durchbruchgefahren an der Nahtstelle zur Flachküste, weshalb später der Steinwall Kloster (Nr.2 in Abb. D 53) zur Reduzierung der seewärtigen Belastung errichtet wurde. Am südlichen Abschluß des Steinwalls konnte die Düne vor Vitte auf Grund der verminderten Mächtigkeit die Sturmflutsicherheit für die unmittelbar dahinter liegende Ortschaft nicht mehr garantieren. Die Düne erhielt ein Asphalttrauhdeckwerk (Nr.4 in Abb. D 53), und somit entstand ein Dünendeich in Scharlage. Alle Längswerke wirkten negativ auf den Sedimenthaushalt auf Strand und Schorre. Sandmangel herrschte land- und seewärts des Steinwalls wie vor dem Deckwerk und gefährdete deren Funktionstüchtigkeit.

Künstliche Sandzufuhr muß den Mangel ausgleichen. Erstmals wurde 1970 auf 1200 m Länge im Bereich des Steinwalls Kloster eine Menge von 270 000 m³ Sand aufgespült. Unter Ausnutzung des dominierenden Transports in Richtung Süden wurde vor Vitte mit Hilfe eines neu errichteten Buhnensystems (Nr. 5 in Abb. D 53) eine Sandakkumulation ausgelöst. Somit

besteht die Aufspülung Kloster/Hiddensee aus 2 Teilen: 1. der direkten Sandzufuhr vor Kloster und 2. der indirekten Sandzufuhr mit Hilfe der natürlichen Verfrachtung vor Vitte. Nach dem Sandbedarf hat sich ein Wiederholungsintervall von etwa 10 Jahren für die nachfolgenden Aufspülungen eingestellt.

9. Schriftenverzeichnis

- [1] AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM: Fachplan Küstenschutz Sylt. Dienstbericht, Husum 1985.
- [2] ANDRESEN, FR. H.; DETTE, H. H.; GÄRTNER, J.: Schutz sandiger Küsten durch Sandvorspülungen am Beispiel der Insel Sylt. Jahrbuch der Hafentechn. Ges., 42. Bd., Springer Verlag Berlin, 1988.
- [3] AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE DER DGEG UND HTG: Empfehlungen D der EAK 1981: Strandauffüllungen als Küstenschutz. Die Küste, H. 36, 1981.
- [4] ANGREMOND, K. D.: Beach Replenishment, Design Elements and Implementation. Terra et Aqua, No. 37, Aug. 1988.
- [5] BAKKER, W. T.: Calculation of Dune Erosion during Storm Conditions. Rijkswaterstaat - Advisory Department at Flushing. 'Gravenhage, 1978.
- [6] BRÖSSKAMP, K.-H. et al.: Seedeichbau - Theorie und Praxis, Vereinigung der Naßbaggerunternehmen e. V., Hamburg, 1976.
- [7] BRUUN, P.: Optimum dredging procedures for the artificial nourishment of beaches. Journ. Dredging + Port Construction, Vol. XVIII, No. 1, Trade Publications Ltd., Redhill, Surrey, U.K., 1991.
- [8] CENTRAL DREDGING ASSOCIATION: The Measurement of Dredged Quantities for the Calculation of Payment. CEDA-Report 91/01 Delft, NL, 1991.
- [9] CENTRE OF CIVIL ENGINEERING RESEARCH CODES AND SPECIFICATIONS (CUR): Manuel on artificial beach nourishment. Delft Hydraulics, Report 130, 1987.
- [10] CHRISTIANSEN, H.: Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten. Hamburger Küstenforschung, H. 35, S. 37-72, 1976.
- [11] DEAN, R. G.: Design Part II, Short Course on Principles and Applications of Beach Nourishment. Conference of Department of Coastal and Oceanographic Engineering, Florida 1988.
- [12] DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS-Zahlen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 41, 1974.
- [13] DETTE, H. H.: Effectiveness of beach deposit nourishment. Coastal Sediments '77. Charleston. USA S. 211-227 (1977).
- [14] DETTE, H. H.: Untersuchungen über Dünenabbrüche und Stranderosion im Großen Wellenkanal. Die Küste, H. 43, 1986.
- [15] DETTE, H. H.: Energetische Betrachtungen zu seegangserzeugten Änderungen der Küstenmorphologie in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar, Kiel 1991.
- [16] DETTE, H. H.; GÄRTNER, J.: Erfahrungen mit der Versuchsstrandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983. Die Küste, H. 45, 1987.
- [17] DIN 18 311 Naßbaggerarbeiten.
- [18] EDELMANN, T.: Dune Erosion during Storm Conditions. Proc. 11th ICCE, ASCE, 1968.
- [19] ERCHINGER, H. F.: Protection of Sandy Coasts in Dependence of the Dune-Beach-Type. Proc. 14th ICCE, ASCE, 1974.
- [19] ERCHINGER, H. F.: Schutz sandiger Küsten in Abhängigkeit vom Schutzdünen-Strand-Profil. Die Küste, H. 27, 1975.
- [20] ERCHINGER, H. F.: Beach Fill by Turning the Course of Sandbars. Proc. 19th ICCE, Vol. II, Ch. 143, SCE, 1984.
- [21] ERCHINGER, H. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43, 1986.
- [22] ERCHINGER, H. F.: Providence Beach Nourishment against Dune Erosion. Proc. COPEDEC; VOL. I. P. 158-165, 1987.

- [23] ERCHINGER, H. F.: Prevention of Seawall Damage and Erosion of German Barrier Islands by Means of Beach Nourishment. Proc. of Beach Preservation Technology 88, p. 231–239, Gainesville/Fa.
- [24] ERCHINGER, H. F.: Beach Replenishment, Consideration of Natural Processes and Profiles. MAFF-Conference of Rivers and Coastal Engineers, Ss. 2.5, Loughborough 1991.
- [25] ERCHINGER, H. F. u. SNUIS, G.: Kunststoffgewebesläuche im Küstenwasserbau. Wasser und Boden, H. 1, 1972.
- [26] ERCHINGER, H. F.; TILLMANN, B.: Versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste, H. 54, 1992.
- [27] FRANZIUS, O.: Küstenschutz auf Langeoog in neuer Bauweise. Ostfriesland, Zeitschrift für Kultur, Wirtschaft und Verkehr, H. 1, 1972.
- [28] FÜHRBÖTER, A.: Eine Refraktionsbuhne aus Sand. Wasser und Boden, H. 12, 1973.
- [29] FÜHRBÖTER, A.: A Refraction Groyne Built by Sand. Proc. 14th ICCE, ASCE, Vol. II, Ch. 85, 1974.
- [30] FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergie. a) Mitt. des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, H. 65, 1979. b) Jb. der Hafenbautechn. Ges., Bd. 38, 1981.
- [31] FÜHRBÖTER, A.: Stabilität von Sandvorspülungen. Berichte der 5. Nationalen Tagung für Ingenieurbilogie, Herausgeber: Dt. Ges. für Erd- und Grundbau e.V. und Dt. Geologische Ges. e.V., Kiel, 1985.
- [32] FÜHRBÖTER, A.: Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen. Die Küste, H. 52, 1991.
- [33] FÜHRBÖTER, A., KÖSTER, R., KRAMER, J., SCHWITTERS, J., SINDERN, J.: Beurteilung der Sandvorspülung und Empfehlungen für die künftige Stranderhaltung am Weststrand der Insel Sylt. Die Küste, H. 29, 1976.
- [34] FÜHRBÖTER, A. u. DETTE, H. H.: Sandvorspülungen vor der Westküste von Sylt. Die Küste, H. 53, 1992.
- [35] GRAAF, J. VAN DE: Dune Erosion during a Storm Tide, Coast. Eng. Vol. 1, No. 2, 1977.
- [36] GRAAF, J. VAN DE, NIEMEYER, H. D., OVEREEM, J. VAN DE (Editors): Artificial Beach Nourishment. Special Issue of Coastal Engineering, Vol. 16, No. 1, Dec. 1991.
- [37] HAAN DE, T.J.: Eine neue Strategie für den niederländischen Küstenschutz. Hansa 120. Jg., Nr. 12, 1992.
- [38] HAGEN, G.: Handbuch der Wasserbaukunst, III. Teil: Das Meer-Seeufer und Hafenanbau; 20, S. 6–7, Verl. Ernst und Sohn, Berlin, 1963.
- [39] HOMEIER, H., LUCK, G.: Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge im Bereich der Accumer Ee als Grundlage für die Beurteilung der Strand- und Dünenentwicklung im Westen und Nordwesten Langeoogs. Jb. 1970, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, 1971.
- [40] JÄGER, B., WEISS, D., WIEMER, R.: Strandaufspülungen an der Ostseeküste der DDR. Wasserwirtschaft – Wassertechnik, Jg. 32, H. 6, S. 211–215, Berlin 1989.
- [41] KAMP, W.-D., AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM: Küstenschutzmaßnahmen des Landes Schleswig-Holstein an der Westküste von Sylt in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar 1991.
- [42] KOHLHASE, S.: The Concept of the Sediment Budget in the Nearshore Area. COPEDEC, 1983.
- [43] KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspülprofilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der T.U. Braunschweig, H. 105, 1989.
- [44] KÖSTER, R.: Dreidimensionale Kartierung des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln in: Sandbewegung im Küstenraum Boppart: Boldt, S. 146–168, 1979.
- [45] KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52. Jber. der Forsch.-Stelle Norderney, Bd. IX, 1958.
- [46] KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951–1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 1958/59.
- [47] KUNZ, H.: History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney. Coastal Sediments '87, Proc. Bd. 1, S. 974–989, 1987.
- [48] KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd ICCE, ASCE, Bd. 3, S. 3254–3267, 1991.
- [49] KUNZ, H.: Protection of the Island of Norderney by Beach Nourishment, Alongshore

- Structures and Groynes. Proc. COPEDEC, Bd. 1, S. 29-42, 1991.
- [50] KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI Verbund-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt. Die Küste, H. 54, 1993.
- [51] KÜSTENAUSSCHUß NORD- UND OSTSEE, ARBEITSGRUPPE NORDERNEY: Gutachtliche Stellungnahme zu den Untersuchungen über die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordstrand der Insel Norderney sowie zu den zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- [52] KÜSTENAUSSCHUß NORD- UND OSTSEE; ARBEITSGRUPPE SCHUTZWERKE AN SANDIGEN KÜSTEN: Schutz sandiger Küsten an Nord- und Ostsee – Bestandsaufnahme und kritische Wertung. Die Küste, H. 36, 1981.
- [53] LAMPRECHT, H. O.: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste vor Sylt. Mitt. des Franzius-Instituts der TU Hannover. H. 8, 1955.
- [54] LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung am Weststrand Norderney. Jb. 1968, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, 1970.
- [55] LÜDERS, K., FÜHRBÖTER, A., RODLOFF, W.: Neuartige Küsten- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog. Die Küste, H. 23, 1972.
- [56] LÜDERS, K., LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon. Verlag August Lax, Hildesheim, 1976.
- [57] NIEMEYER, H. D.: Zur rechnerischen Ermittlung von Sturmprofilen an Randdünen und Stränden. Jb. d. NLW, Forschungsstelle Küste, Norderney, 1985
- [58] NIEMEYER, H. D.: Field Measurements and Analysis of Wave Induced Nearshore Currents; Proc. 22nd ICCE, ASCE, Bd. 1, S. 783-797, 1991.
- [59] OELERICH, J.: Numerische Modellierung des küstenparallelen Sedimenttransportes in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar Kiel 1991.
- [60] PETERSEN, M.: Probleme des Küstenschutzes am Beispiel Sylt. Jahrb. der Hafenbautechn. Ges. Bd. 33, S. 90-92, Springer, Berlin, 1974.
- [61] PIANC: Classification of soils & rocks to be dredged, PT II 14, 1984.
- [62] PIANC: Economic Methods of Channel Maintenance. PT II 14, 1989.
- [63] RAUDKIVI, A. J.: Grundlagen des Sedimenttransportes. Springer Verlag, 1982.
- [64] RAUDKIVI, A. J.: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt im Rück- und Ausblick in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar, Kiel 1991.
- [65] RAUDKIVI, A. J.: Loose Boundary Hydraulics. Third Edition, Pergamon Press, 1990.
- [66] RAUDKIVI, A. J.: Vortrag auf der Beratungsgruppensitzung des KFKI in Husum, 1992.
- [67] RAUDKIVI, A. J.; DETTE, H. H.: Ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Suspensionsfracht außerhalb der Brandung. a) Mitt. des Leichtweiß-Inst. der T.U. Braunschweig, H. 111, 1991. b) HANSA, 128 Jg., Nr. 23/24, 1991.
- [68] SCHADE, D., KOHLHASE, S.: Seegangsklimauntersuchungen für die Insel Sylt unter Einfluß von Richtungsspektren in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar Kiel 1991.
- [69] STAATLICHES AMT FÜR INSEL-KÜSTENSCHUTZ: Versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney. Teilberichte 1-6 und Schlußbericht; Dienstberichte Norden 1989 bis 1992.
- [70] STROTSMANN, T., KOHLHASE, S.: Untersuchungen zur wellendämpfenden Wirkung des Riffs vor der Westküste der Insel Sylt in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar 1991.
- [71] TECHNISCHE ADVIESCOMMISSIE VOOR DE WATERKERINGEN (TAW): Richtlijn voor de Berekening van Duinafslag tengevolge van een Stormvloed. Verslag Onderzoek M 1263 – Deel IV, De Voorst, 1982.
- [72] WALTMAN (Herausg.): Handboek zandsuppleties. Ministerie van verkeer en waterstraatrijks-waterstaat, Den Haag, 1998.
- [73] WEISS, D.: Mögliche Beeinflussung der Küstendynamik durch den Küstenwasserbau. Wasserwirtschaft – Wassertechnik, Jg. 39, H. 6, S. 136-138, Berlin 1989.
- [74] WEISS, D.: Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern. Wasser und Boden, H. 1, S. 17-26, 1991.
- [75] WIEMER, R., GURWELL, B. R.: Die Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern. Wasser und Boden, H. 1, S. 13-16, 1991.
- [76] WITTE, H.-H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. Die Küste, H. 19, 1970.
- [77] BÜLOW, K. v.: Allgemeine Küstendynamik und Küstenschutz an der südlichen Ostsee zwischen Trave und Swine. Beiheft zur Zeitschr. Geologie, Akademie-Verlag Berlin, Nr. 10, 1954.