

Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney

Von Hans KUNZ und Hans-Joachim STEPHAN

Zusammenfassung

Zur Sicherung des Westkopfes der ostfriesischen Düneninsel Norderney ist seit Mitte des vorigen Jahrhunderts ein ausgedehntes Schutzwerk aus Strandmauern, Dünendeckwerken und Buhnen errichtet worden. Seit 1951/52 werden Strandvorspülungen ausgeführt, um die natürlichen Sandverluste auszugleichen. Hierdurch ist zu gewährleisten, daß die Strände in den Bühnenfeldern so hoch liegen, daß die Küstenbauwerke vor Zerstörungen während Sturmfluten ausreichend geschützt sind. Die Strandvorspülung des Jahres 1989 wurde in das KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ eingebunden. Dadurch waren die Voraussetzungen gegeben, daß morphologischen Fragestellungen in Verbindung mit hydrographischen und sedimentologischen Naturuntersuchungen nachgegangen werden konnte. Mit dieser Arbeit werden Ergebnisse vorgestellt zu Volumen-Zeitfunktionen, zu Verlustraten, zur strandstabilisierenden Wirkung von Buhnen und zu Grundsätzen für die Minimierung von Sandverlusten und Kosten von Strandvorspülungen.

Summary

Norderney Island is one of the East Frisian Islands in Germany. After 1800, a health resort developed on Norderney. Subsequently, the number of buildings on the west end rapidly increased. Severe dune erosion jeopardized the settlement and necessitated the use of coastal protection structures after 1850. Since then, these structures have been extended, strengthened, and altered to the point that one hundred years later they have reached, a length of approximately six kilometers. Even though these structures were successful in preventing further dune erosion, they were not able to stabilize the beaches. Thus, the first artificial beach nourishment project in Germany was initiated for Norderney in 1951/52. Since then, six further beach fills were necessary to afford protection by shifting the zone of wave attack seawards. The scouring of the replenished groyne fields and adjacent areas has been investigated. The 1989 beach restoration was accompanied with the interdisciplinary KFKI-research project "Interaction between Coastal Protection Structures and the marine Environment". Thus it was possible to combine the morphological investigations with hydrographical and sedimentological aspects thus improving knowledge of these processes substantially. It has been proven, that on Norderney beach nourishment is an appropriate solution to protect the existing structures from failure during severe storm-surges. To lower the amount of losses, beach nourishment should not be higher than necessary to achieve the protection goals. Above a "critical beach profile" the losses of replenished material out of the groyne-fields increase considerably with height. A "low-cost-technique" for a "lowrate-beach-nourishment" should be developed.

Inhalt

1. Inselchutz für den Westkopf von Norderney	24
2. Strandaufspülungen auf Norderney zwischen 1951 und 1989	25
3. Interdisziplinäre Einbindung der morphologischen Untersuchung auf Norderney	28
4. Zielvorgaben für Strandaufspülungen	30
5. Definition der Grenzen von Bilanzräumen für die Ermittlung von Strandvolumen	31
6. Berechnung der Volumen-Größe aus Strandprofilen	33
7. Definition des Startzeitpunktes für Untersuchungen zur Änderung von Aufspülvolumen mit der Zeit	34

8. Volumenberechnungen für Norderney	36
9. Volumen-Zeit-Funktionen	40
10. Längstransport von Sandverlusten aus dem Divergenzbereich in benachbarte Strandabschnitte	47
11. Erkenntnisse zur Optimierung von Strandvorspülungen, Zusammenfassung, Ausblick	48
12. Schriftenverzeichnis	50

1. Inselschutz für den Westkopf von Norderney

Die Insel Norderney ist als Düneninsel durch das Zusammenwirken der Kräfte des Meeres und des Windes aus den Sanden der Nordsee geformt. Für die zurückliegenden drei Jahrhunderte ist die morphologische Entwicklung der Insel gut bekannt (FORSCHUNGSSTELLE, 1964). Gegen Mitte des 17. Jahrhunderts befand sich zwischen den Inseln Juist und Norderney noch die kleine Düneninsel Buise; beidseitig verliefen zwei Seegattinnen mit etwa gleichwertigen hydraulischen Querschnitten. In der Folgezeit verschwand Buise, und es bildete sich eine starke Rinne im östlichen Teil des Seegats aus, die im vorigen Jahrhundert den Sockel der Insel Norderney wegzuspülen begann und dazu beitrug, daß Strände und Dünen abbrachen, der Riffbogen weiter seewärts ausgelenkt wurde und sich dadurch der Anlandungsbereich der Sandplaten nach Osten verlagerte mit der Folge, daß der Westteil der Insel nicht mehr ausreichend mit Sand aus dem resultierenden Küstenlängstransport versorgt wurde (THILO/KURZACK, 1952; HOMEIER, 1964).

Im Jahre 1857 begann man mit dem Bau eines massiven Schutzsystems, bestehend aus Strandmauern, Dünendeckwerken und daran angebundenen Buhnen. Der Ostwärtsverlagerung des Seegats konnte aber erst Einhalt geboten werden, als um die Jahrhundertwende die Buhnen bis zu einer Tiefe von etwa zwanzig Metern in das Seegat hinein verlängert wurden. Seitdem ist das Schutzsystem auf insgesamt 6 km ausgedehnt worden. Das kombinierte Längswerk-Buhnensystem war in der Lage, weitere Dünenabbrüche und Verluste des Inselsockels zu verhindern; die Rückgänge des Strandes als Folge der Unterversorgung konnte es aber nicht aufhalten. Man sah sich daher mehrfach gezwungen, dem sich vertiefenden Strand mit weiteren Verbreiterungen und Verstärkungen der Fußbefestigungen zu folgen.

Während des zweiten Weltkrieges konnten die Unterhaltungsarbeiten nicht in erforderlichem Umfang ausgeführt werden. Der Zustand des Schutzsystems war daher so schlecht, daß nach Kriegsende eine Arbeitsgruppe eingerichtet wurde, die sich mit Möglichkeiten einer Sanierung befaßte. Als eine Alternative wurde auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen der FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY (1950) von der ARBEITSGRUPPE NORDERNEY (1952) des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (Vorgänger des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen, KFKI) vorgeschlagen, anstelle einer erneuten Anpassungsverstärkung der massiven Küstenbauwerke nunmehr ausreichend hohe Strandprofile herzustellen, und zwar durch die Methode der künstlichen Strandauffüllung mit eingespültem Sand. Diesem Vorschlag folgend ist auf Norderney in den Jahren 1951/52 eine umfangreiche Strandauffüllung ausgeführt worden, erstmals in Europa.

Strandauffüllungen (Aufspülungen) auf Norderney sind als technische Maßnahmen zu werten, mit denen das Buhnen- und Deckwerkssystem gegen Zerstörungen während schwerer Sturmfluten gesichert wird. Sie gleichen Verluste aus, können diese aber nicht verhindern. Die ARBEITSGRUPPE bezeichnete die Strandauffüllung daher als „Unterhaltungsmaßnahme“, die von Zeit zu Zeit wiederholt werden muß, und schätzte bereits damals die dafür im langjährigen Mittel benötigten Sandmengen zutreffend ab. Seit der ersten Aufspülung sind bisher weitere sechs erforderlich geworden, die letzte im Frühsommer 1992.

Diese Arbeit befaßt sich mit der Frage, wie sich die in Buhnenfeldern auf Norderney seit 1951 eingespülten Sandmassen räumlich und zeitlich veränderten. Sie beschränkt sich im wesentlichen auf Ergebnisse, die aus der Analyse von volumetrischen Berechnungen gewonnen werden konnten; zur Deutung der Ergebnisse wird aber auch auf Erkenntnisse der Hydrographie, der Sedimentologie und der anfänglichen Umformung des Strandes nach Aufspülung zurückgegriffen. Ausgehend von den Ergebnissen werden grundsätzliche Empfehlungen für weitere Aufspülungen begründet.

2. Strandaufspülungen auf Norderney zwischen 1951 und 1989

Die Lage Norderneys in der Kette der Ostfriesischen Inseln zeigt Abb. 1. Die morphologische und hydrographische Situation des westlichen Teiles der Insel ist auf Abb. 2 skizziert. Das linke Bild weist den Verlauf der Tiefenlinien im Bereich des Seegats bis hin zum Riffbogen

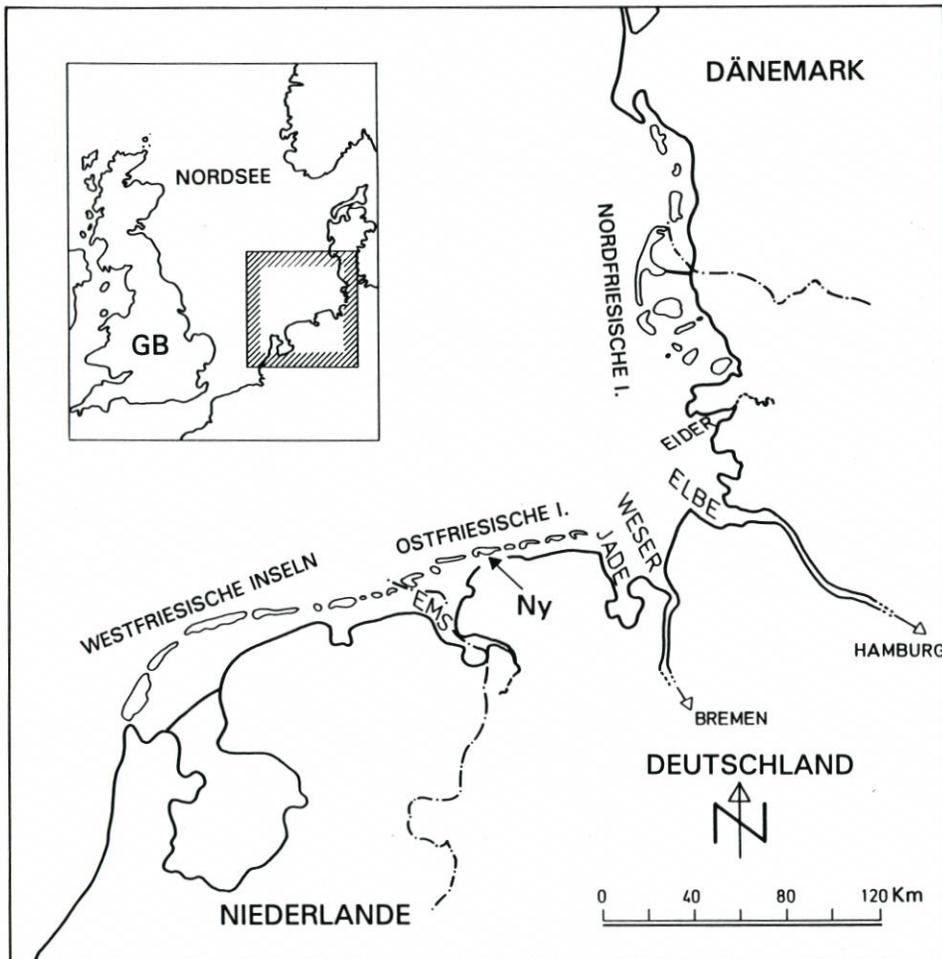


Abb. 1. Lageplan Ostfriesische Inseln und Norderney

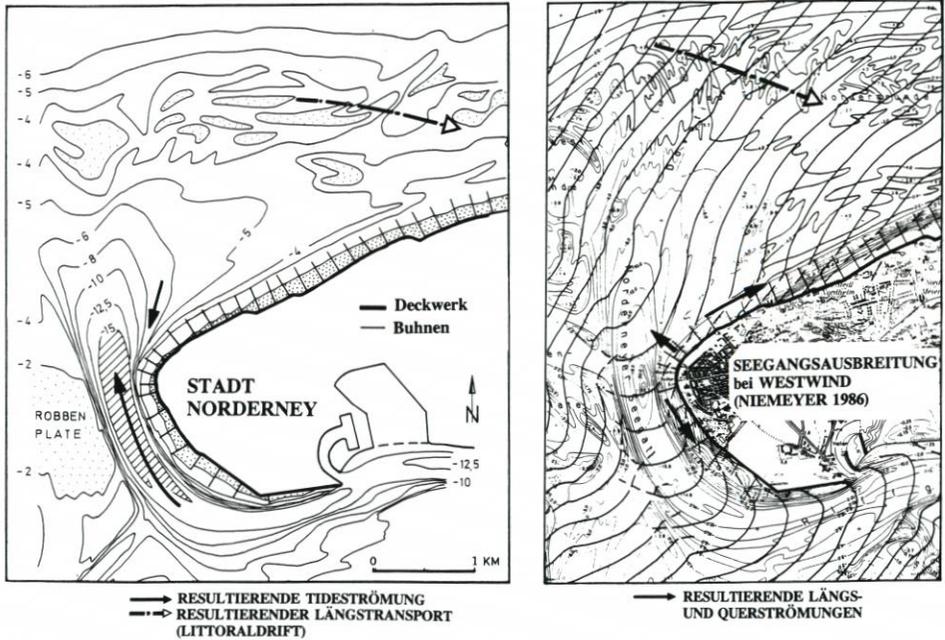


Abb. 2. Skizzen zur hydrographischen und morphologischen Situation Norderneys

aus. Die im Riffbogen eingelagerten Platen und die küstenparallel gerichtete resultierende Sandbewegung (litoral drift) sind dort gekennzeichnet. Beide sind entscheidend für die Sandversorgung der Insel Norderney (HOMEIER u. KRAMER, 1957). Der Platananlandungsbe- reich befindet sich östlich des befestigten Inselteiles; ausgehend von diesem, sich örtlich ständig verändernden Bereich erfolgt der Sandtransport überwiegend in östlicher Richtung; nur bei andauernden Ostwind-Wetterlagen kehrt sich die Transportrichtung um, und es gelangen auch Sandmengen bis in die Buhnenbereiche.

Resultierende Tideströmungen sind für den Westkopf der Insel in vereinfachter Form mit angegeben. Die halbtägigen Tiden schreiten von West nach Ost fort, der mittlere Tidehub beträgt etwa 2,4 m (mittleres Tideniedrigwasser: NN = -1,27 m, mittleres Tidehochwasser: NN = + 1,12 m). Die Strömungsverhältnisse und die Morphologie der tiefen Rinne (Norderneyer Seegat) werden durch die Dominanz des Ebbstroms geprägt. Die mittleren Stromgeschwindigkeiten für beide Halbzeiten betragen etwa 0,7 m/s mit Maximalwerten von etwa 1,2 m/s (Normaltiden). Spitzenwerte erreichen 1,4 m/s (Flutstrom) bzw. 2,0 m/s (Ebbstrom - KOCH/NIEMEYER, 1978).

Das rechte Bild zeigt als Beispiel für den Seegang ein Refraktionsdiagramm für westliche Winde beim Wasserstand von MThw+3,0 m (nach NIEMEYER, 1986). Energiereicher Seegang tritt im Bereich der Ostfriesischen Inseln bei auflandigen Starkwind- und Sturmweatherlagen aus dem Sektor West bis Nordost auf; dieser wird durch Refraktion bis hin zum Inselvorstrand verengt und in westliche Richtung gedreht. Der das Westende von Norderney umspannende Riffbogen schattet dieses wirksam gegen den energiereichen Seegang aus dem Küstenvorfeld ab (Umwandlung der Energie durch Brechen auf den Platen - NIEMEYER, 1987).

Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern (längs und quer zur Küste gerichtet) werden ganz überwiegend durch brechenden Seegang verursacht (NIEMEYER, 1991)

und bestimmen somit die Sandbewegungen in den Bühnenfeldern. Durch Pfeile ist in vereinfachter Weise angedeutet, wie, ausgehend vom „Divergenzbereich“, die resultierenden längs- und quergerichteten Strömungen und die dadurch bedingten Sandtransporte verlaufen.

Das Küstenschutzsystem zur Befestigung des Norderneyer Westkopfes ist auf Abb. 3 skizziert. Es besteht aus den folgenden Einheiten:

1. Deckwerke und Strandmauern (Längswerke), die die Dünenabschnitte gegen Erosion bei Sturmfluten schützen.
2. Senkrecht zu den Längswerken verlaufende Bühnen.
 - 2.1 Bühnen, die verhindern, daß die Tideströmung des Seegats den Inselsockel angreift und
 - 2.2 Bühnen zur Stabilisierung von Strandabschnitten.
3. Strandauffüllungen in Bühnenfeldern, die sich beidseits des „Divergenzbereichs“ erstrecken.

Die Bereiche, in denen auf Norderney die sechs Strandvorspülungen (Strandauffüllungen) zwischen 1951 und 1989 ausgeführt wurden, sind aus der Abb. 3 mit dargestellt; die Strandauffüllung von 1992 erstreckte sich auf den Abschnitt D bis L₁.

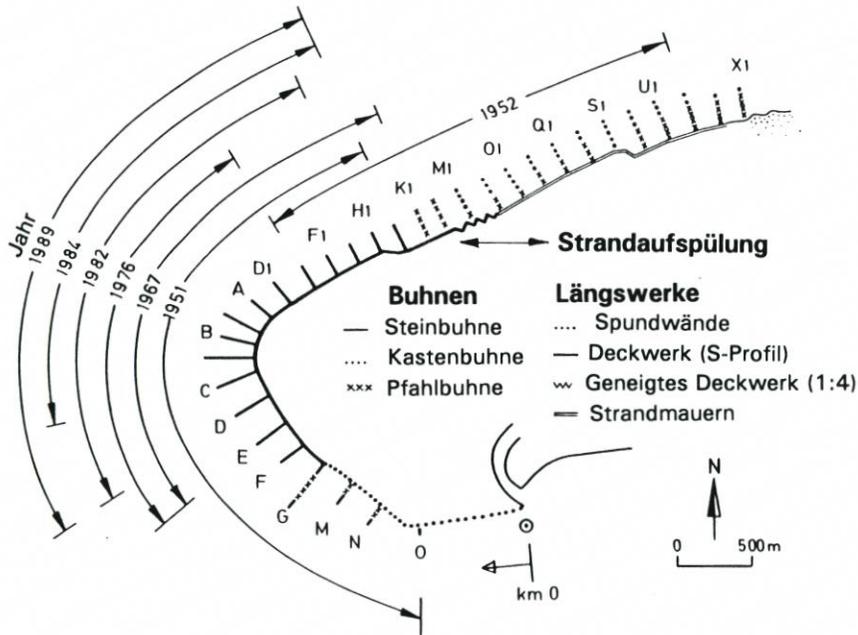


Abb. 3. Bauwerke und Strandauffüllungen (1951 bis 1989) zum Schutz des Westkopfes der Insel Norderney

Abb. 4 weist aus, wo das Material für die Strandauffüllungen zwischen 1951 und 1989 entnommen wurde; sie enthält zudem Informationen zu den jeweils aufgespülten Sandmengen und deren mittlere Korndurchmesser (d_{50}) sowie Hinweise zur Literatur. (Auf die Auffüllung 1992 wird hier nicht eingegangen, denn sie war noch nicht Gegenstand der Untersuchungen.)

Die mittlere jährliche Aufspülmenge während des Zeitraumes von 1951 bis 1989 betrug etwa 85 000 m³.

Für die erste Strandauffüllung wurde der Sand wattseitig entnommen; hierdurch erklärt

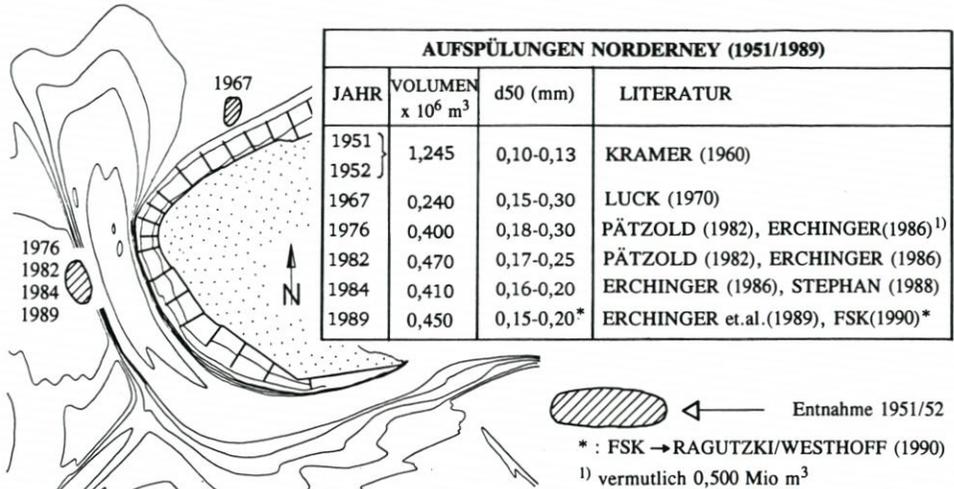


Abb. 4. Angaben zur Entnahme, zu den Aufspülungen und den Korngrößen für die Norderneyer Strandaufspülungen zwischen 1951 und 1989

sich das sehr feine Material mit einem mittleren Durchmesser (d_{50}) von nur etwa 0,1 mm (KRAMER, 1960). Das relativ grobe Material mit einem mittleren Durchmesser von 0,25 mm wurde 1967 in Bereichen vor dem Kopf der Buhne G₁ gewonnen (LUCK, 1970). Für die Aufspülungen seit 1976 erfolgt die Entnahme von der Robbenplate, einem Akkumulationsgebiet westlich des Norderneyer Seegats (ERCHINGER, 1986); die als d_{50} -Werte ausgewiesenen Korndurchmesser belegen, daß auch in diesem Bereich nicht so grobes Material ansteht, wie man es gerne in die Bühnenfelder einspülen würde (KUNZ, 1987).

Nach einer Aufspülung verändern sich die Korngrößenverteilungen des aufgespülten Sandes in den Bühnenfeldern in charakteristischer Weise: Zunächst wird diese bestimmt durch die Art der Aufspülung und durch das Material selbst. Damals fanden, insbesondere durch Seegangseinwirkungen, Umsortierungen statt, die Gesetzmäßigkeiten aufwiesen (WESTHOFF, 1990).

Die Abb. 5 und 6 zeigen Ergebnisse sedimentologischer Untersuchungen zum quer- und längsgerichteten Sandtransport, die der Aufspülung des Jahres 1989 zugeordnet wurden. Aus Abb. 5 ist zu erkennen, wie sich innerhalb des Hauptmeßfeldes (Bühnenfeld D₁-E₁) in Querrichtung die Korngrößenverteilungen (d_{50}) in der Zeit vor und nach der Aufspülung vom April 1988 in unterschiedlichen Höhenlagen des Strandes (Niedrig-, Mittel-, Hochwasserbereich) veränderte. Abb. 6 weist demgegenüber aus, wie sich in Längsrichtung die d_{50} -Werte für das Hauptmeßfeld den benachbarten Bereichen des Westkopfes zuordnen. Dargestellt ist eine „Momentaufnahme“ für den September 1987, also gut drei Jahre nach der Aufspülung vom Februar 1984. Den mittleren Korndurchmessern sind mit dem oberen Bild die Calcium-Carbonat-Gehalte als Indikator für den Muschelbruchanteil (Schill) zugeordnet.

3. Interdisziplinäre Einbindung der morphologischen Untersuchungen auf Norderney

Das KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ (KUNZ, 1992) erbrachte durch interdisziplinäre Verbundforschungen ein

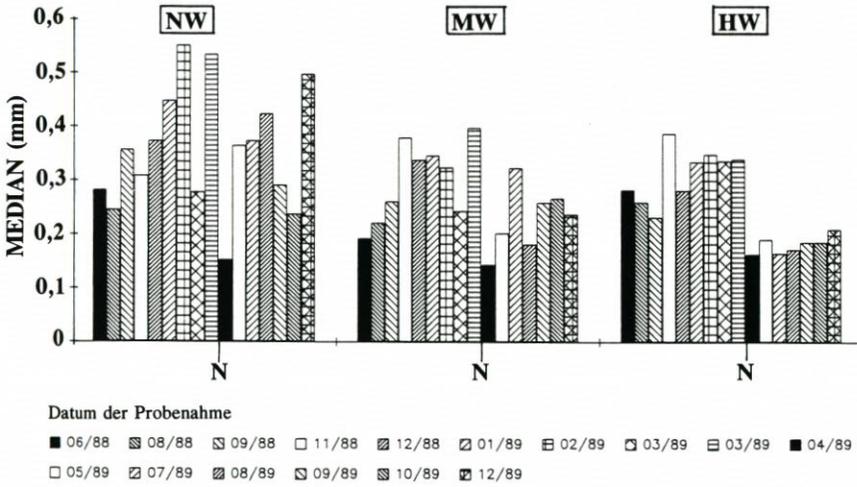


Abb. 5. Korngrößen des Materials (Sand, Schill) im Bühnenfeld (D1-E1) für die Niedrig-, Mittel- und Hochwasser-Linie vor und nach der Aufspülung (N) vom April 1989 – nach WESTHOFF (1990)

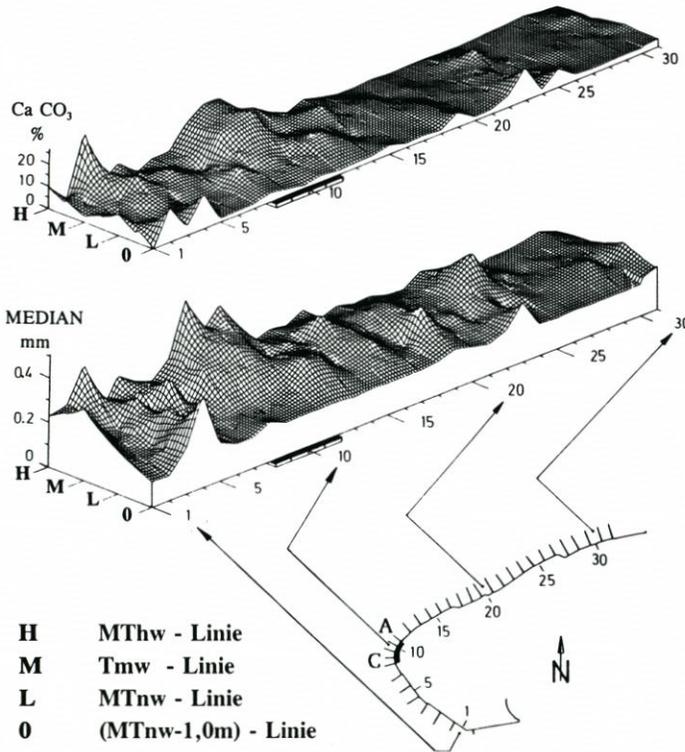


Abb. 6. Korngröße (d₅₀) und Kalkgehalte (CaCO₃) in den Bühnenfeldern des Norderneyer Westkopfes zwischen NN -1,0 m und Mitteldehochwasser; Beprobung vom Sept. 1987 – nach WESTHOFF (1990)

verbessertes Verständnis zu den Sandbewegungen, insbesondere auch solchen in Wechselwirkung mit Bauwerken (Buhnen, Strandmauer). Teil des Vorhabens waren hydrographische Untersuchungen in Buhnenfeldern des Divergenzbereichs, in denen eine Vielzahl von Messungen zu Seegang und Geschwindigkeit (Richtung, Größe) ausgeführt wurden (NIEMEYER, 1991, 1992). Durch eine in das Vorhaben mit eingebundene deutsch-niederländische Kooperation konnten auch Messungen des Sandtransportes in den obersten Schichten des Strandes (Sheet-flow) gemacht werden (YU, NIEMEYER u. BAKKER, 1991), die nachfolgend dann durch Schubspannungs- und sohlnahe Geschwindigkeitsmessungen (GUST, 1992) ergänzt wurden. Die sedimentologischen Untersuchungen zu dem in den Buhnenfeldern befindlichen Sand- und Muschelbruchmaterial (WESTHOFF, 1990 und EITNER/RAGUTZKI/WESTHOFF, 1992) ergaben Gesetzmäßigkeiten, die durch eine Verknüpfung mit den hydrographischen und den morphologischen Untersuchungen im Hinblick auf Sandbewegungen ursächlich zu deuten sind.

Die ausgeführten morphologischen Untersuchungen lassen sich generell zwei Zeitabschnitten zuordnen: Der erste Abschnitt erfaßt den Aufspülkörper und dessen anfängliche Umformungen, bis der eingebrachte „Störkörper“ durch die angreifenden Naturkräfte im wesentlichen so umgeformt wurde, daß seine Gestalt zu den hydrodynamisch-morphologischen Standortgegebenheiten paßt (wird fortan als „Ausgangszustand“ bezeichnet). Je nach Wetterlage kann dieser Umformungsvorgang auf Norderney bereits innerhalb weniger Monate überwiegend zum Abschluß gekommen sein. Der zweite Untersuchungsabschnitt setzt ab dem Zeitpunkt ein, zu dem sich der „Ausgangszustand“ im wesentlichen ausgebildet hat, und verfolgt dann die morphologischen Veränderungen bis hin zur nächsten Strandauffüllung.

Die erstgenannten Untersuchungen zielen darauf ab, die Ausbildung des Aufspülkörpers so zu optimieren, daß die Anfangsverluste aus dem aufzufüllenden Strandabschnitt möglichst gering werden (KOTZBAUER, 1990). Die zweitgenannten Untersuchungen sollen Einblicke in den quer- und längsgerichteten Prozeß des Sandtransportes in den Buhnenfeldern selbst und in den benachbarten Bereichen geben. Ein Teil dieser Untersuchungen ist dabei ausgerichtet auf das Ziel, zeitlich räumliche Abhängigkeiten der Volumina in definierten Bilanzräumen zu analysieren und zu deuten (KUNZ, 1991a). Mit dieser Frage befaßt sich diese Arbeit im wesentlichen.

4. Zielvorgaben für Strandaufspülungen

Mit Strandaufspülungen werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Sie bestimmen Art und Umfang einer Vorspülung. Ist beispielsweise eine zu schwache Randdüne gegen Sturmfluten zu schützen, dann wird man vor dieser hinreichend große Volumenanteile als „Sanddepot“ aufbringen und eine Strandauffüllung zuordnen, die zu der Ausbildung des Verschleiß- und Reserveteils paßt (KAMP, 1991). Will man hingegen durch eine Aufspülung einen Strand für die Aufstellung von Strandkörben schaffen, dann wird möglichst viel Sand in einem schmalen Höhenbereich oberhalb der im Sommer häufiger zu erwartenden Hochwasserstände gewünscht. Wieder anders sieht es aus, wenn lediglich zur Überbrückung einer Gefahrensituation für relativ kurze Zeit eine Aufspülung vorzunehmen ist, wie beispielsweise an Strandabschnitten von Norderney und Langeoog geschehen (ERCHINGER, 1986).

Auf Norderney dient die Strandaufspülung in erster Linie der Sicherung gegen Unterspülungen von Schutzwerken (Strandmauern, Dünendeckwerken, Buhnen). Dadurch richtet sich das Interesse auf Strandvolumen oberhalb der NN -5,0-m-Tiefenbegrenzung, wobei dann gleichzeitig die Auffüllung von ebenfalls unterversorgten Strandabschnitten in der Nachbar-

schaft durch einander überlagernde Längs- und Quertransporte der „Verlustmengen aus dem Bilanzvolumen“ mit zu bewerten ist.

Der Erfolg einer ausgeführten Aufspülung wird danach beurteilt, wie lange und in welchem Ausmaß sich aufgespülter Sand dort hält, so man ihn für das jeweils verfolgte Ziel benötigt. Dies klingt banal, ist es aber nicht, denn recht oft werden Erfolg oder Mißerfolg aufgrund des sichtbaren Strandbereiches bewertet. So befassen sich zum einen viele veröffentlichte Beiträge zu Strandvorspülungen (Strandaufspülungen) mit der zeitlichen Änderung von Volumen des über Niedrigwasser gelegenen Strandes, ohne die festgesetzten Randbedingungen für die volumetrischen Untersuchungen im Zusammenhang mit den Zielen der Strandvorspülung zu begründen. Zum anderen macht es aber auch verständlich, warum man sich überwiegend auf die Zuordnung des Aufwandes (Aufspülmengen) und des sichtbaren Erfolges (Standzeiten) konzentriert, ohne die jeweils vorgenommene „Abgrenzung des Bilanzraumes“ und deren Einfluß auf die verwendeten Ergebnisse der Volumenberechnungen zu überprüfen und bei vergleichenden Auswertungen zu berücksichtigen (VAN DE GRAAFF, 1991). Werden aber die „Bilanzräume“ in Kenntnis der jeweiligen hydrodynamisch-morphologischen Einflußgrößen orts- und zeitspezifisch festgelegt und wird zudem der anfängliche Umformungsvorgang in den „Ausgangszustand“ abgetrennt, dann können aus den geometrischen Untersuchungen (Volumenbestimmungen) durchaus weiterführende Erkenntnisse zum Sandtransport gewonnen werden. Diese lassen zudem Rückschlüsse auf die „Physik der Prozesse“ immer dann erwarten, wenn man den Massenermittlungen geeignete Parameter zur Beschreibung der hydrographischen, morphologischen und sedimentologischen Gegebenheiten zuzuordnen vermag.

5. Definition der Grenzen von Bilanzräumen für die Ermittlung von Strandvolumen

Das Strandvolumen kann in unterschiedlicher Weise berechnet werden: entweder oberhalb einer horizontal verlaufenden Tiefenbegrenzung (V nach Abb. 7.1) oder oberhalb eines „Referenzprofils“ in Verbindung mit einer horizontalen Tiefen-Grenzlinie (ΔV nach Abb. 7.2). Es bietet sich an, als Referenzprofil das sogenannte „Gleichgewichtsprofil“ zu verwenden, falls dieses hinreichend genau festzulegen ist.

Nach einer Aufspülung wird sich das Strandvolumen (die aufgespülte Menge ist in Abb. 7 gestreift dargestellt) durch Sandverluste (Quer- und Längstransport) so lange verringern, bis das Gleichgewichtsprofil erreicht ist.

Bezieht man sich auf das Volumen oberhalb einer horizontalen Grenzlinie (V), dann würde sich die im Bilanzraum verbliebene Aufspülmenge mit der Zeit bis zu dem Volumenwert verringern, der durch das „Referenzprofil“ und die Tiefen-Grenzlinie (h) festgelegt ist (siehe weiß dargestellte Fläche oberhalb der h -Grenzlinie in Abb. 7.2). Entsprechend würden ΔV -Werte mit der Annäherung des Strandes an das Referenzprofil gegen Null gehen.

Für Untersuchungen zur Verlagerung von Sand in tiefere Schichten bietet es sich an, das Gesamtvolumen in Teilvolumina zwischen horizontalen Höhen-Grenzlinien aufzuteilen. Dies ist auf der Abb. 7.1 beispielhaft skizziert (gepunktete Fläche mit der Lamellen-Höhe Δh). Eine entsprechende Aufteilung ist ebenfalls für die ΔV -Volumenwerte möglich.

Es ist gebräuchlich, die Abnahme des Volumens eines Bilanzraumes als „Verlust“ von aufgespültem Strandmaterial auszuweisen. Dieses ist nur zutreffend, wenn die Grenzen des Bilanzraumes so festgelegt wurden, daß außerhalb von diesem das aufgespülte Material für das jeweilige Ziel keinen Nutzen mehr bringt.

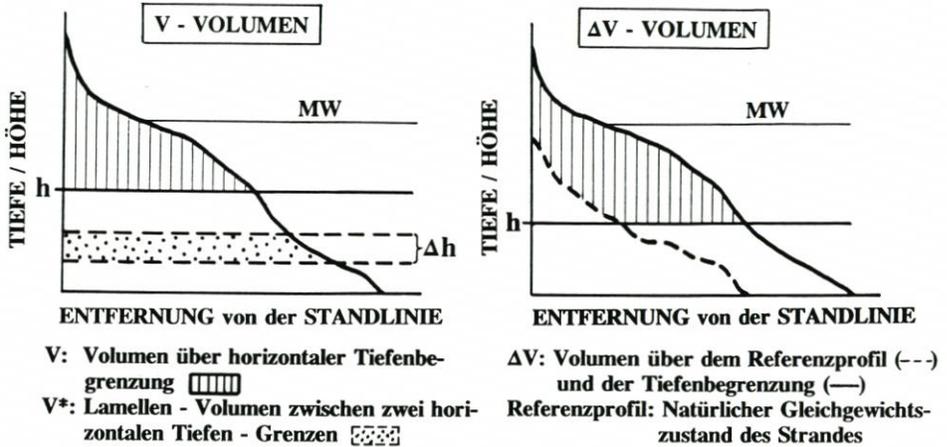


Abb. 7. Skizzen zur Abgrenzung des „Bilanzraumes“ für Volumenberechnungen
 Abb. 7.1. Volumen oberhalb einer horizontalen Begrenzung (V) und zwischen zwei horizontalen Tiefen-Grenzlinien (V*)

Abb. 7.2. Volumen oberhalb eines Referenzprofils und einer horizontalen Tiefenbegrenzung (ΔV)

Als Tiefengrenzlinie (h) wird häufig ein Wert wenig unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) verwendet, weil dieser es ermöglicht, auf Peilungen zu verzichten und lediglich die mit wesentlich geringerem technischen Aufwand zu erhebenden Daten der terrestrischen Vermessung zu nutzen. In vielen Fällen ist aber davon auszugehen, daß auch tiefere Strandabschnitte in die Betrachtungen mit einzubeziehen sind, weil die dorthin gelangenden Sandmengen ebenfalls eine positive Wirkung hinsichtlich des mit der Aufspülung verfolgten Zieles haben, somit nicht als „Verluste“ zu werten sind. Prinzipiell ist es so, daß die einer Strandauffüllung als Verlust zuzuweisenden Mengen um so geringer sind, je tiefer man die Tiefen-Grenzlinie (h) für die Volumenberechnungen (V oder ΔV) vorgibt (VAN DE GRAAFF, 1991, KUNZ, 1991b). Im Falle Norderneys, wo die Strandauffüllung eine Maßnahme zur Sicherung der Schutzwerke gegen Auskolkungen infolge von Seegang (insbesondere während Sturmfluten) ist, wäre die untere Grenze (Horizontale h) bei etwa SKN -3,50 m (entspricht etwa NN -5,00 m) festzulegen (THILO/KURZACK, 1952).

Die Abb. 8, linkes Bild, zeigt am Beispiel Norderneys, wie sich in dem ersten Jahr nach einer Strandaufspülung die Volumen (V) von Bilanzräumen mit unterschiedlich tiefen Begrenzungshorizontalen (h zwischen NN und NN -5,0 m – siehe Abb. 7.1) veränderten. Das Bild läßt unmittelbar erkennen, daß die relativen Änderungen des Volumens, bezogen auf den Anfangswert, stark von der Festlegung der Tiefen-Grenzlinie (h) abhängen. Betrachtet man beispielsweise den Zeitpunkt, zu dem die Hälfte des Anfangsvolumens aus dem Bilanzraum herausgelangte (Halbwertszeit), so ist dies für den Bereich oberhalb der Tiefen-Grenzlinie NN = 0,0 m nach etwa 100 Tagen und für den oberhalb der NN -2,0-m-Grenzlinie erst nach etwa 300 Tagen der Fall. Die Änderung der Halbwertszeit mit der Tiefenbegrenzung des Bilanzvolumens wurde zur Veranschaulichung als t_h -Kurve in die Abb. 8, linkes Bild, eingetragen.

Das rechte Bild der Abb. 8 weist Teilvolumen (V*) zwischen den jeweils einen Meter auseinanderliegenden Grenzhorizontalen (siehe Δh in Abb. 7.1) als Funktion der Zeit nach der Aufspülung aus. Die höchstgelegene Lamelle (NN ± 0,0 m bis NN -1,0 m) läßt erkennen, daß von Anbeginn an Verluste, also Sandabgaben in tiefere Lamellen, eintraten. Die tiefste der dargestellten Lamellen (NN -4,0 m bis NN -5,0 m) hingegen erhält zunächst mehr

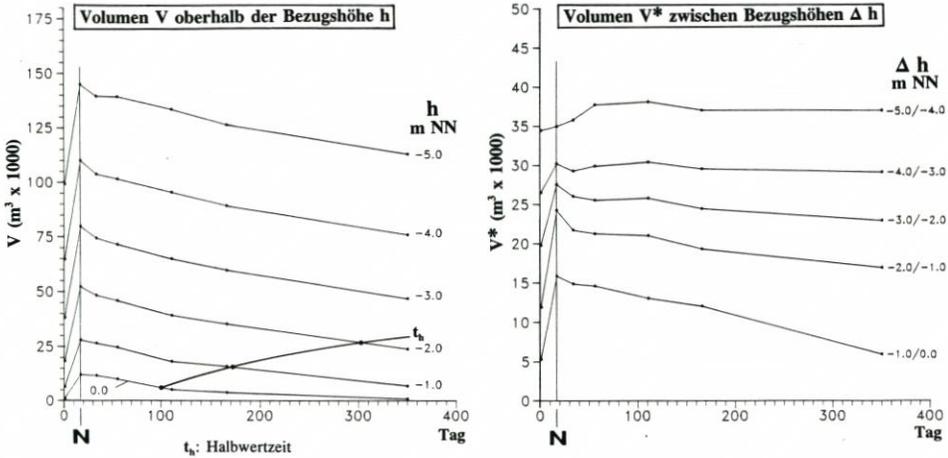


Abb. 8. Zeitliche Veränderung der Volumen-Größen (V , V^* nach Abb. 7) in den ersten 400 Tagen nach der Aufspülung (N) des Feldes (D1-E1) im April 1989 – Vermessungsdaten aus ERCHINGER/LAUE (1990)

Sand aus höherliegenden Abschnitten, als aus ihr selbst in tiefere Bereiche abwandern. Nachfolgend gleichen sich diese Mengen in etwa aus, so daß sich ein nahezu horizontaler Verlauf einstellt.

6. Berechnung der Volumen-Größe aus Strandprofilen

Bei den Bilanzierungen der Sandmengen für die Strände auf Norderney sind bisher unterschiedliche Verfahren benutzt worden. Grundlage waren immer Profilaufnahmen. Allen bisherigen Strandaufspülungen waren Strand- und Seevermessungen zugeordnet worden. Sie ergänzten die Routinestrandaufnahmen, von denen bis in das letzte Jahrhundert zurückreichende Ergebnisse vorliegen. Gestützt auf die bisher gewonnenen Erfahrungen wurden bei der Versuchsstrandaufspülung von 1989 die terrestrischen Vermessungen und Peilungen räumlich und zeitlich verdichtet. Sie erstreckten sich auf den Aufspülbereich sowie auf beidseitig angrenzende Strand- und Vorstrandabschnitte.

Bei der ersten Strandauffüllung (KRAMER, 1958; 1958/59; 1973) wurden die Sandmengen berechnet, indem man die Differenzfläche zwischen den Profilen nach und vor der Aufspülung (ΔF) mit der zugehörigen mittleren Strandbreite (b_m) multiplizierte. Die Summierung ergibt die Volumengröße (ΔV) je Bühnenfeld. Als Bezugshorizonte wurden die MTnw- und die Tiefenlinie NN $-5,0$ m verwendet – siehe Abb. 9.1.

Die Bilanzierung der zweiten Strandauffüllung (LUCK, 1970) erfolgte, indem man die Höhenschichtflächen (F_i) mit den zugeordneten Tiefenwerten (h_i) multiplizierte (Planimetrierungen). Die Berechnungen wurden auf die MTnw-Linie bezogen; sie ergaben durch Aufsummierung das Gesamtvolumen (V) – siehe Abb. 9.2.

Die Berechnungen für die dritte und vierte Strandaufspülung (PÄTZOLD, 1982 sowie STEPHAN, 1988) entsprachen der Methode nach Bild 9.1, jedoch EDV-gestützt und ohne Differenzbildung, sondern mit Bezug auf die Tiefenbegrenzung NN $-1,5$ m (siehe Bild 8.3). Die unterschiedliche Geometrie der Bühnenbauwerke und des Deckwerksfußes wurde dabei nicht besonders berücksichtigt.

Das von der Forschungsstelle Küste in FORTRAN-77 entwickelte Programm zur Massen-

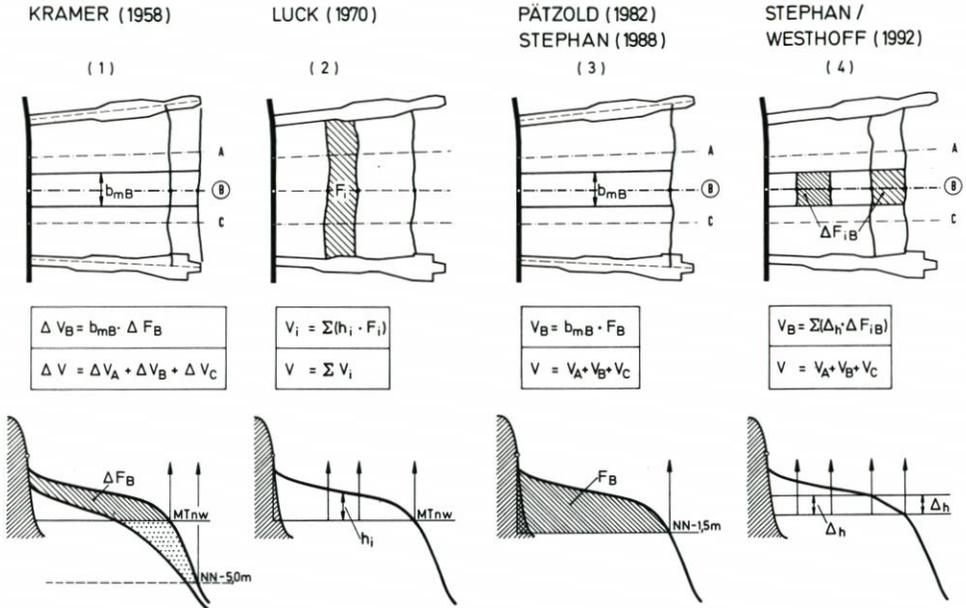


Abb. 9. Skizze zu den bisher verwendeten Berechnungsmethoden für die Strandvolumen der Bühnenfelder Norderneys

bilanzierung (STEPHAN/WESTHOFF, 1992) beruht auf einer EDV-gestützten Berechnung von Teilflächen nach der Gauss'schen Flächenformel. Die Sandmassenermittlung erfolgt oberhalb von bis zu zehn frei wählbaren Höhenniveaus. Die jeweiligen Deckwerkskonfigurationen sowie die unterschiedlichen Bühnenkörper sind berücksichtigt. Die Querschnittsflächen oberhalb der gewählten Bezugshorizonte (F_i) werden für jedes einzelne Profil innerhalb eines Bühnenfeldes aus Teilflächen berechnet und mit der zugeordneten Strandbreite (b_i) multipliziert. Die Aufsummierung der berechneten Sandmassen oberhalb des jeweiligen Bezugsniveaus in den verschiedenen Strandabschnitten pro Bühnenfeld ergibt das Gesamtvolumen (V) (siehe Abb. 9.4).

Liegt pro Bühnenfeld nur das Mittelprofil vor, so erfolgt die Berechnung in allen Fällen in der beschriebenen Weise über die gesamte Bühnenfeldbreite.

Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurde das Verfahren nach Bild 9.4 angewendet, indem man die Volumendifferenz-Größe (ΔV) aus den entsprechend Abb. 7.2 einander zugeordneten Volumengrößen (V) berechnete.

7. Definition des Startzeitpunktes für Untersuchungen zur Änderung von Aufspülvolumen mit der Zeit

Stränden mit ausgeglichener Sandbilanz lassen sich sogenannte „Gleichgewichtsprofile“ zuordnen, die definierte mittlere Zustände repräsentieren – beispielsweise FENNEMAN (1902), BRUUN (1954), DEAN (1977). Würde ein derartiger Strand durch künstliche Sandauffüllung über das Gleichgewichtsprofil erhöht, dann wiese er nachfolgend so lange Sandverluste auf, bis er den Gleichgewichtszustand wieder erreicht hat. Bezieht man eine Volumenberechnung entsprechend Abb. 7.1 auf dieses Gleichgewichtsprofil, dann läßt sich die zeitliche Volumen-

änderung durch eine e-Funktion annähern (AUSSCHUSS KÜSTENWERKE, 1977/1981; FÜHRBÖTER et al., 1976; PÄTZOLD, 1982).

Strandaufspülungen werden durchweg in Küstenabschnitten mit negativer Sandbilanz ausgeführt, und man will damit dauerhafte Strandlagen gewährleisten, die oberhalb des Zustandes liegen, dem der Strand natürlicherweise zustrebt. Für derartige Fälle ist nicht von vornherein zu unterstellen, daß die Änderung des aufgespülten Volumens mit der Zeit von Gesetzmäßigkeiten bestimmt wird, die man jeweils durch eine e-Funktion darzustellen vermag. Prinzipiell sind für eine Beschreibung zeitlicher Volumenänderungen zwei Zeitabschnitte zu unterscheiden:

Phase A: Ende der Aufspülung bis zum Abschluß der Umformung des Aufspülkörpers (Bilanzkörper) in den „Ausgangszustand“, der etwa den natürlichen Bedingungen entspricht – beispielsweise für Norderney (ERCHINGER/TILLMANN, 1992).

Phase B: Die sich an die Anfangs-Phase A anschließende Zeitspanne.

Während der Phase A wird innerhalb relativ kurzer Zeit der Aufspülkörper von den Naturkräften so umgeformt, daß er nur noch wenig als „Störung“ wirkt. Bei sehr großer Seegangseinwirkung können die Umformungen im flacheren Teil des Strandes (oberhalb MTnw abzüglich einiger Meter) bereits nach Tagen, spätestens aber nach wenigen Wochen zu einem großen Teil erfolgt sein. Für die Umformungen des aufgespülten „Störkörpers“ sind e-Funktionen um so weniger sinnvoll darzustellen bzw. aussagefähige „Halbwertzeiten“ zu ermitteln, als die aufgespülten Gebilde von natürlichen Formgebungen für den jeweiligen Standort abweichen. Hinzu kommen Gesichtspunkte der relativen Höhe des Aufspülkörpers zu eintretenden Wasserständen, weil von den aufgespülten Volumenanteilen (V oder ΔV nach Abb. 7) nur die vom Wasser erreichten Anteile umgelagert werden können. In solchen Fällen sind die in Kap. 5 beschriebenen Gesichtspunkte zur Abgrenzung des Bilanzkörpers von besonderer Bedeutung.

Auf Abb. 10 ist für prinzipiell unterschiedliche Fälle von Strandauffüllungen skizziert,

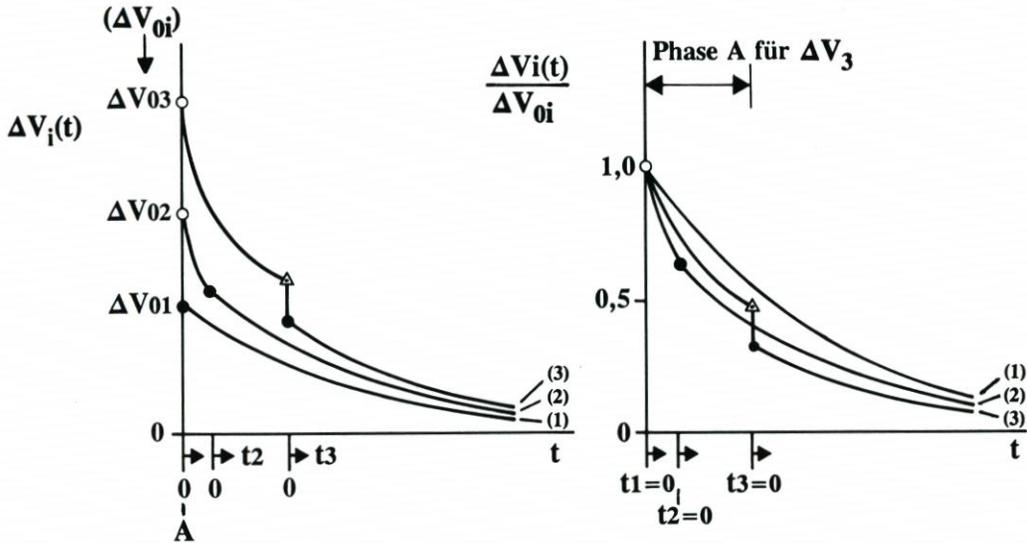


Abb. 10. Skizzen zur Festlegung des Beginns der Phase B ($t = 0$) zur Ermittlung von Volumen-Zeit-Funktionen für unterschiedliche Aufspülkörper (Nr. (1) bis Nr. (3)); links: Volumenwerte ($\Delta V_i(t)$); rechts: Relativwerte ($\Delta V_i(t)/\Delta V_{0i}$)

wie sich Volumen mit der Zeit ändern, und wie der Nullpunkt für die Zeitskala der Phase B festgelegt werden sollte.

Das linke Bild weist die Volumen als ΔV nach Abb. 7.2 aus für:

1. eine Strandaufspülung, bei der sofort die natürliche Profilgestalt geformt wird (Phase A entfällt);
2. eine Strandaufspülung mit einer von natürlichen Profilen abweichenden Formgebung (fülliger im oberen Bereich), die nicht wesentlich höher reicht als die Tidehochwasserstände;
3. eine Strandaufspülung mit einem Sanddepot, das wesentlich über dem Niveau des mittleren Hochwassers liegt.

Beim erstgenannten Fall (1) kann sofort nach der Aufspülung, beginnend mit ΔV_{01} , ein exponentieller Verlauf erwartet werden. Bei (2) sind die Verluste aus dem Bilanzkörper infolge der natürlichen Umformungen in den „Ausgangszustand“ groß; erst ab $t_2 = 0$ (schwarzer Kreis) kann ein repräsentatives Ergebnis über die ΔV -t-Funktion erwartet werden. Bei (3) wird das Sanddepot während einer Sturmflut zu einem mit dem Dreieck gekennzeichneten Zeitpunkt vollständig umgeformt; erst danach ($t_3 = 0$) ist eine den anderen Fällen vergleichbare Untersuchung der Phase B möglich.

Das rechte Bild zeigt die entsprechenden Gegebenheiten in einer Darstellung, bei der alle Volumen auf den jeweiligen Betrag am Ende der Aufspülung (ΔV_{oi}) bezogen sind. Aufgrund der unterschiedlichen Verluste aus dem Bilanzkörper durch Umformungen während der Phase A weichen die Kurven systematisch voneinander ab.

8. Volumenberechnungen für Norderney

Die Volumenberechnungen für die Norderney-Situation erfolgte getrennt für Bühnenfelder auf der Grundlage von Profilmessungen. Eine Verwendung von Profilen setzt voraus, daß diese die Oberflächengestalt des jeweils zugeordneten Strandbereichs repräsentieren. Es wurden Voruntersuchungen zu der Frage ausgeführt, wie sich das Ergebnis der Volumenberechnung mit der Anzahl der dafür verwendeten Profile ändert. Ein Ergebnis ist auf Abb. 11 wiedergegeben. Die insgesamt erreichte Zuverlässigkeit der Daten für die hier mitgeteilten volumetrischen Angaben bewegt sich zwischen $\pm 7,5\%$.

Für Norderney gibt es Zeitreihen von Strandprofilmessungen, die bis in das zurückliegende Jahrhundert reichen. Darauf gestützt wurde der Zustand vor der ersten Strandaufspülung als „Referenzprofil“ nach Abb. 7.2 eingeführt; es wird hier als „1950“ bezeichnet und ist beispielsweise in der Abb. 12 mit dargestellt. Dieses „Referenzprofil“ kann als Näherung für das „Gleichgewichtsprofil“ gelten, auch wenn langfristig der Strand ohne künstliche Sandzufuhr wegen der negativen Sandbilanzen noch tiefere Lagen erreichen dürfte.

Die für Untersuchungen zur Standfestigkeit der Bühnen auf Norderney zu berücksichtigende Tiefe wird von THILO/KURZACK (1952) mit SKN $-3,50$ m (etwa NN $-5,0$ m) angegeben. Dieser Wert würde sich als „Tiefenbegrenzung“ anbieten. Für die gesamte Zeit aller Strandaufspülungen (seit 1951) liegen aber nicht ausreichend viele Strandprofilmessungen vor, die bis in diese Tiefe reichen (STEPHAN, 1988). Die Zielsetzungen des Forschungsvorhabens (Wechselwirkungen zwischen dem Küstenschutzsystem, dem Strand und den marinen Wirkgrößen) gestatten es, die Tiefenbegrenzung auf NN $-1,50$ m (etwa $0,25$ m unter MTnw) anzuheben.

Die Abb. 12 zeigt Beispiele für Strandprofile. Dargestellt sind für das Bühnenfeld (A-D1) die gemessenen Profile „vor“ und „nach“ den sechs Aufspülungen von 1951 bis 1989. Das

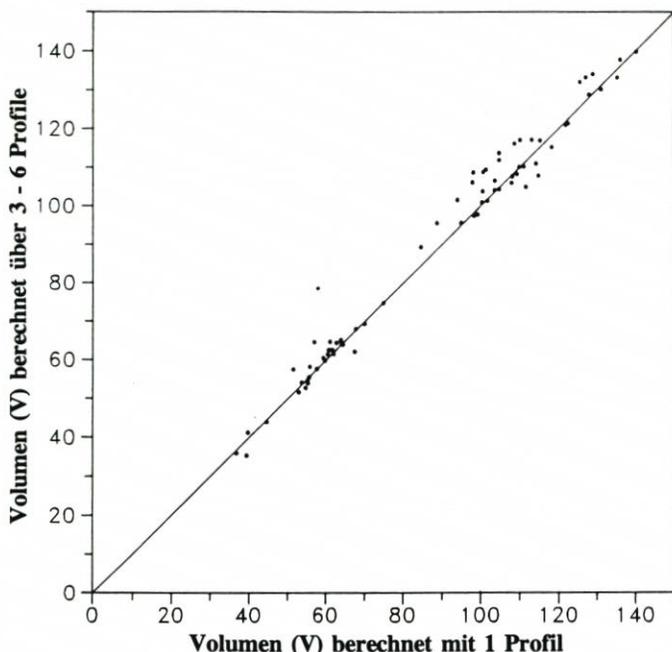


Abb. 11. Gegenüberstellung von Strandvolumenwerten (V) für Bühnenfelder auf Norderney, die mit allen verfügbaren Profilen (3 bis 6 Profile) oder nur dem Mittelprofil (1 Profil) berechnet wurden; horizontale Tiefenbegrenzung ist NN -4,0 m

„Referenzprofil (1951)“ ist auf dem unteren Bild mit ausgewiesen. Auch wenn einige Profile nur bis zu NN -1,50 m reichen, so wird doch erkennbar, daß die Aufspülungen, ausgehend von recht verschiedenen Strandlagen, vorgenommen und jeweils unterschiedliche Profile hergestellt wurden (Schrifttum: siehe Angaben auf der Abb. 4).

Bedingt durch die Gestalt und die Lage des Westkopfes der Insel Norderney sind die Küstenschutzwerke (Bühnenfelder) den Einwirkungen der natürlichen Umwelt in unterschiedlicher Weise ausgesetzt (Kap. 2, Abb. 2). Will man die Ergebnisse volumetrischer Berechnungen ursächlich deuten, verschiedene Standorte miteinander vergleichen und zu allgemeinen Erkenntnissen gelangen, so muß eine räumliche Zuordnung des Untersuchungsgebietes zu den großräumig sich entfaltenden Gestaltungsprozessen erfolgen. Dies war möglich, weil die dafür maßgebenden hydrographischen und morphologischen Gegebenheiten aufgrund vorliegender Untersuchungen weitgehend bekannt sind.

Wie auf Abb. 2 skizziert, gibt es einen Bereich, von dem aus die durch Seegang verursachten Bewegungsvorgänge in entgegengesetzte Richtungen gehen (Divergenzbereich). Ausgeführte Untersuchungen bestätigen, daß das seegangsinduzierte Geschehen für die hier zu betrachtenden Bühnenfeldbereiche maßgebend ist und die bereits von THILO/KURZACK (1951) begründete Festlegung des „Divergenzbereichs“ auf den westlichsten Teil des Inselkopfes (etwa zwischen den Bühnen A und C) auch heute noch zutrifft (NIEMEYER, 1991; DEN ADEL, 1991; WESTHOFF, 1990).

Der Divergenzbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß die Transporte in den Bühnenfeldern ganz überwiegend in Querrichtung verlaufen und keine größeren Materialzuführungen aus benachbarten Feldern vorhanden sind. Das erklärt, warum sich der Divergenzbereich in

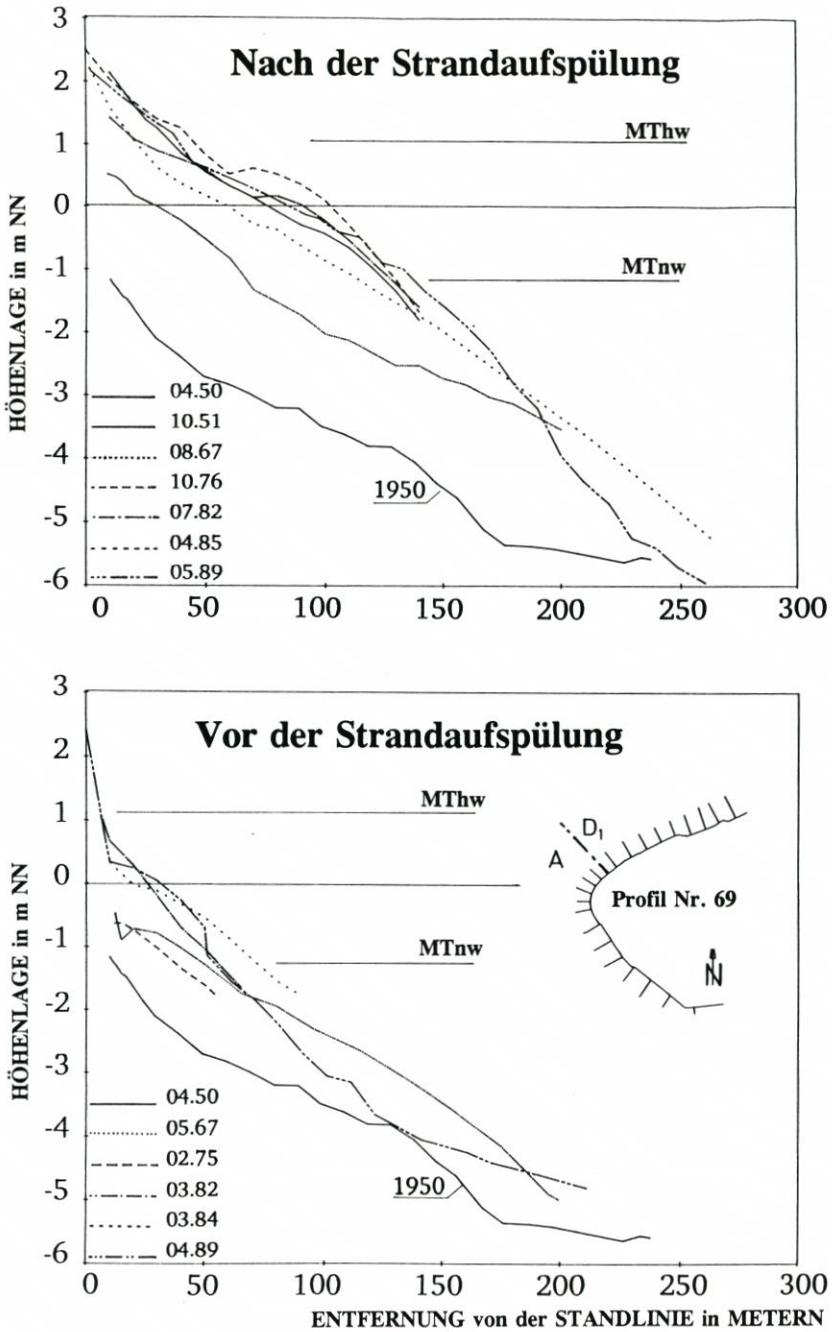


Abb. 12. Strandprofile im Bühnenfeld (A-D₁) für den Zustand vor und nach den Aufspülungen

den Kornverteilungen der Abb.6 deutlich heraushebt. Da es im Schrifttum voneinander abweichende Aussagen zur Lage des Divergenzbereiches auf Norderney gibt, wird angemerkt, daß dieser nicht durch die größten relativen Verluste aufgespülter Sandmengen oder tiefste Strandlagen gekennzeichnet ist (siehe auch FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY, 1950).

Wegen der beschriebenen Eigenschaften wurde für die im Rahmen des Forschungsvorhabens vorgesehenen speziellen volumetrischen Untersuchungen der Bereich zwischen den Bühnen A und C (siehe Abb. 3) gewählt.

Um beidseitig des Divergenzbereichs weitere „Bereichseinheiten“ festlegen zu können, wurden die Volumeneinheiten (ΔV) für sämtliche Bühnenfelder ab 1951 berechnet und ausgewertet. Die Abb. 13 zeigt ein Ergebnis; die Strandvorspülungen sind durch die senkrechten Linien gekennzeichnet. Mit Verweis auf KUNZ (1991a) braucht hier nicht auf Einzelheiten eingegangen zu werden; der unterschiedliche Verlauf der Volumen-Zeitkurven, insbesondere auch die Auswirkungen der Aufspülungen, sind unmittelbar erkennbar. Gestützt auf das Ergebnis der Untersuchungen für einzelne Bühnenfelder wurden die sich beidseits des „Divergenzbereichs“

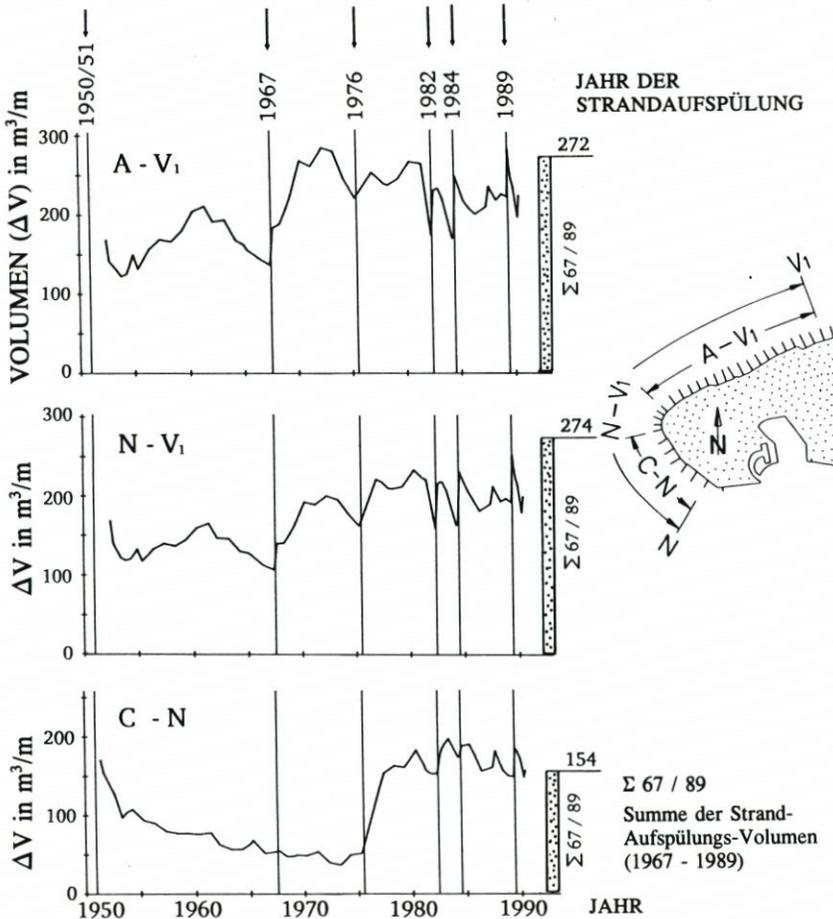


Abb.13. Ganglinien von 1951 bis 1990 für Volumen (ΔV) von fünf Bühnenfeldern auf Norderney; oberhalb des Referenzprofils (1950) und der horizontalen Tiefenbegrenzung von NN -1,50 m

anschließenden Strandabschnitte in vergleichende Betrachtungen mit einbezogen. Ein Beispiel für die Bereiche C-N und A-V₁ ist auf Abb. 20 dargestellt.

9. Volumen-Zeit-Funktionen

Art und Korngröße des Strandmaterials beeinflussen das Transportverhalten und sind mitbestimmend für die Gestalt der Strandprofile. Im Bereich Norderney war kein größerer Sand zu gewinnen, so daß keine aussagefähigen Untersuchungen zur Abhängigkeit der Volumenänderungen (Strandverluste) vom Korndurchmesser ausgeführt werden konnten. Die auf den Abb. 5 und 6 enthaltenen Angaben geben Hinweise auf den Schwankungsbereich der d_{50} -Werte; bei den Angaben zum eingespülten Material ist zu berücksichtigen, daß während der anfänglichen Umformung des Aufspülkörpers ein überproportionaler Austrag von feinerem Material stattfindet. Aus veröffentlichten Ergebnissen läßt sich rückschließen, daß die Korndurchmesser des Strandmaterials in den aufgespülten Strandabschnitten von Norderney nicht so unterschiedlich sind, als daß man bei der Analyse der zeitlichen Volumenänderungen materialspezifische Korrekturen vornehmen müßte (SWART, 1992). Dies trifft grundsätzlich auch zu, wenn man die umlagerungs-bedingten Korngrößen-Sortierungseffekte in die Betrachtungen mit einbezieht. Die Umlagerungen des frisch aufgespülten Materials (Phase A nach Kap. 7) werden zunächst noch von den durch die Aufspülung erzeugten sedimentologischen Anfangsbedingungen mit beeinflußt. Bei allen Angaben zum Korndurchmesser ist zu vergegenwärtigen, daß das untersuchte Material unterschiedliche Schillanteile (Muschelbruch) enthält, was aber auf das Ergebnis der volumetrischen Untersuchungen keinen signifikanten Einfluß zu haben scheint (WESTHOFF, 1990).

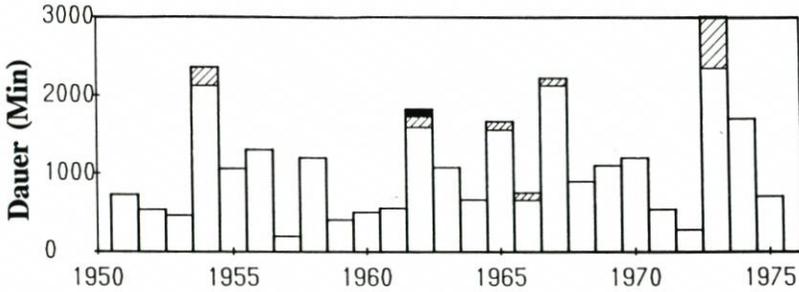
Auf Norderney wurden nach 1976 die Strandaufspülungen in so kurzen Zeitabständen wiederholt, daß lediglich für die davorliegende Zeitspanne die Beziehung zwischen Volumen und Zeit über mehr als fünf Jahre zu untersuchen ist. Auf den Untersuchungsbereich (A-C) wirkte sich die kleinvolumige Aufspülung des Jahres 1967 nur wenig aus, so daß die Zeitspanne zwischen 1951 und 1967 (16 Jahre) insgesamt ausgewertet werden kann.

Für Untersuchungen zum Verhalten während der ersten fünf Jahre nach Aufspülung können Daten aller Aufspülungen verwendet werden. Voruntersuchungen ergaben, daß dabei die Aufspülung des Jahres 1967 wegen zu geringer Mengen und diejenige des Jahres 1982 wegen unzureichenden Datenumfangs (1984 war bereits die nächste Aufspülung) nicht mit einzubeziehen sind.

Alle Volumenermittlungen erfolgten als ΔV nach Abb. 7.2 in dem „Bilanzraum“, der durch das „Referenzprofil von 1950“ und durch die „Tiefenbegrenzung NN -1,50 m“ festgelegt ist.

Das Ergebnis für die Zeitspanne 1951 bis 1976 ist auf dem unteren Bild der Abb. 14 dargestellt. Die Meßpunkte wurden geradlinig zu einem Kurvenzug verbunden, dessen Gestalt auch von den Zufälligkeiten der zugrundeliegenden „Momentaufnahmen“ bestimmt wird. Die dargestellte Zuordnung von Jahreswerten für Verweilzeiten und Eintrittshäufigkeiten von Sturmflutwasserständen (Klassifikation nach NIEMEYER, 1986) ermöglichte keine Rückschlüsse; erst Untersuchungen in kleinskaligem Zeitmaßstab, wie sie für Norderney von HOMEIER (1975) veröffentlicht wurden, lassen die Abnahme und die nachfolgende erneute Zunahme der ΔV -Werte infolge sturmflutzeugter Profulumformungen erkennen. Entsprechendes gilt allgemein für die saisonalen Anpassungen an das jeweilige Seegangsklima, das vereinfacht durch die Begriffe „Sommer- und Winterprofile“ beschrieben wird (BASCUM, 1954). Die Einbeziehung integrierter Wellenenergiegrößen ermöglicht auch mit den Nor-

ÜBERSCHREITUNGSDAUER VON GRENZWASSERSTÄNDEN



STUMRFLUTEN je JAHR

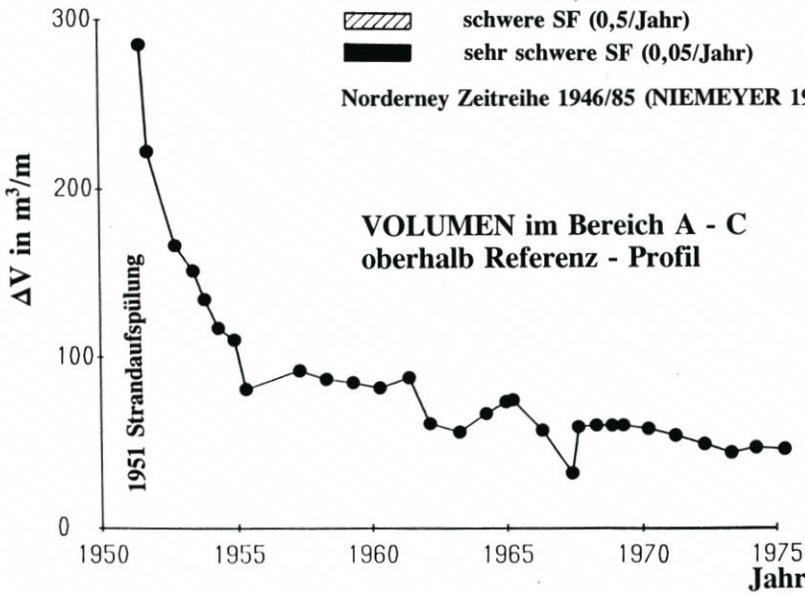
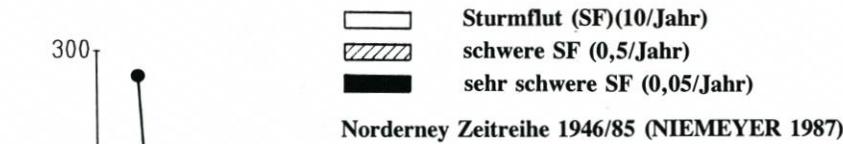
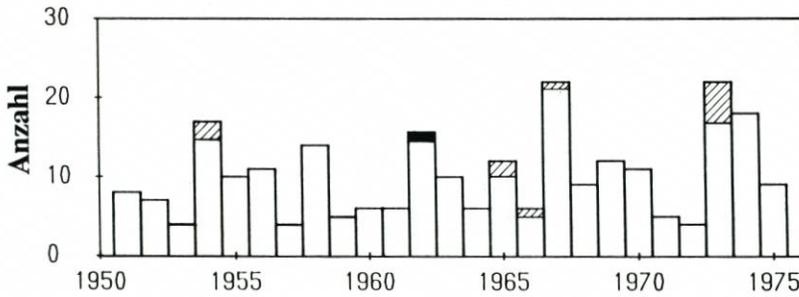


Abb.14. Zuordnung der Überschreitungsdauern von Grenzwasserständen nach DIN 4049 sowie der Anzahl von Sturmfluten pro Jahr (Pegel Norderney, 1946/85) zur Veränderung der Volumengröße ΔV für den Bühnenbereich (A-C) in der Zeit von 1951 bis 1976

derney-Daten einen empirischen Nachweis von Beziehungen zu Verlust-Volumen (PÄTZOLD, 1882). Im KFKI-Forschungsvorhaben „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ konnten dazu Ergebnisse auf der Grundlage umfangreicherer Daten gewonnen werden (DETTE, 1991).

Für Strandabschnitte ohne eingebaute Querwerke (Buhnen) wird davon ausgegangen, daß sich die „Verlustmengen aus einem an die jeweiligen Verhältnisse angepaßten Bilanzgebiet“ und die „verstrichene Zeit bezogen auf den Nullpunkt der zuzuordnenden Zeitskala“ – siehe (t_0) für die Phase B nach Abb. 10 – annähernd einer e-Funktion zuordnen lassen (AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE, 1977, 1981; FÜHRBÖTER et al., 1976). Die Abb. 15, linkes Bild, weist im semilogarithmischen Maßstab aus, daß dieses nicht für die bereits mit der Abb. 14 vorgestellten Daten von Norderney möglich ist. Es sind wenigstens zwei Zeitabschnitte zu unterscheiden; in der Abbildung wurden dafür I (1951–1955) und II (1956–1976) gewählt. Die angepaßten e-Funktionen sind ausgewiesen; die zugeordneten „Halbwertzeiten“ betragen für I etwa 29 Monate und für II etwa 210 Monate. Hätte man bereits 1956 eine erneute Aufspülung erwogen, so hätte man sich dabei auf die Funktion ΔV_I mit der viel zu kleinen Halbwertzeit gestützt, wäre somit von zu großen Verlusten ausgegangen.

Um für die Zeitspanne von fünf Jahren alle vier dafür verwertbaren Aufspülungen in eine Beziehung einordnen zu können, wurden die ΔV -Werte auf eine einheitliche Zeitachse transformiert. Die iterativ durchgeführte Transformation berücksichtigte die unterschiedliche Größe der Auffüllung des Bühnenfeldes durch die jeweilige Aufspülung über speziell darauf abgestimmte Zeitzuordnungen (KUNZ, 1991a). Das linke Bild der Abb. 15 zeigt das Ergebnis. Der ausgewiesenen e-Funktion (ΔV_{60}) ordnet sich eine Halbwertzeit von 37 Monaten zu. Diese Exponential-Funktion würde als maßgebend zugrunde gelegt worden sein, wenn für Norderney nicht die auswertbare lange Datenserie von 1951 bis 1976 verfügbar wäre. Bei einer Extrapolation über die belegten fünf Jahre hinaus überschätzte man dadurch die Größe der Verluste etwa um den Faktor sieben. Werden diese mit Δ bezeichnet und verwendet man die in der Abb. 15 eingetragenen Funktionen in einer die Halbwertzeit als Konstante im Exponenten ausweisenden Form, so ergäbe sich die Verlustüberschätzung in Abhängigkeit von der Zeit $\Delta(t)$ zu:

$$\Delta(t) = \Delta V_{60} - \Delta V_I = 110 (2^{-t/210}) - 233 (2^{-t/37})$$

$$\Delta(t) \text{ in m}^3/\text{m}; \quad t \text{ in Monaten mit } t > 60$$

Die Größe Δ ist in Zusammenhang mit der Wirkung der Buhnen zu bringen; hierauf und auf die Frage einer Verallgemeinerung wird weiter unten zurückgekommen.

Die mit der Abb. 15, linkes Bild, vorgestellte Anpassung durch zwei Funktionen ist unbefriedigend; sie ergibt eine Unstetigkeitsstelle (Knick im Schnittpunkt). Es wurde daher eine stetige Exponential-Funktion angepaßt, die aber im Exponenten nicht mehr eine Konstante, sondern eine von der Zeit abhängige Variable aufweist. Die Abb. 16 zeigt das Ergebnis nach KUNZ (1991a). Der unteren Darstellung der Halbwertzeit-Funktion $t_h(\Delta V_{III})$ sind die konstanten Halbwertzeiten für die mit den Abb. 15 vorgestellten e-Funktionen zugeordnet. Ein ursächlicher Zusammenhang der dargestellten systematischen Abweichungen von konstanten Exponenten (Halbwertzeiten) mit einer strandstabilisierenden Wirkung der Buhnen läßt sich durch die Verknüpfung mit Erkenntnissen aus den zuzuordnenden hydrographischen und sedimentologischen Teilprojekten belegen (NIEMEYER, 1991; WESTHOFF, 1990).

Für praktische Fragestellungen ist die Änderung der „Halbwertzeit“ und der „Verlustrate aus dem Bilanzgebiet“ in Abhängigkeit vom Strandvolumen (ΔV) von Interesse. Die Abb. 17 zeigt hierzu das Ergebnis für die in der Abb. 16 dargestellten Größen. Für den Divergenzbereich (A–C) läßt sich aus der Kurve (2) der Abb. 17 unmittelbar ablesen, daß sich die Verluste enorm vergrößern, sobald man das Volumen des „Bilanzkörpers“, also des Strand

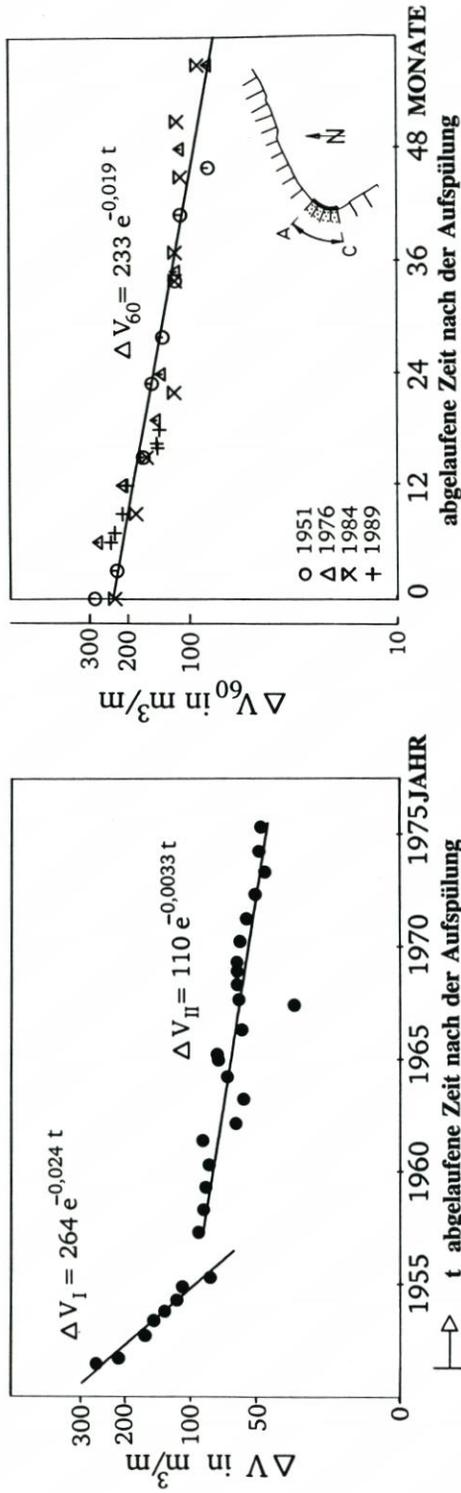


Abb. 15. Semi-logarithmische Darstellung für die Abhängigkeit der Volumengröße ΔV des Bühnenbereichs (A-C) von der Zeit; links: 1951 bis 1976 (Strandaufspülung 1951/52); rechts: bis zu 60 Monate, bezogen auf eine normierte Zeitskala für die Aufspülungen der Jahre 1951, 1976, 1984, 1989

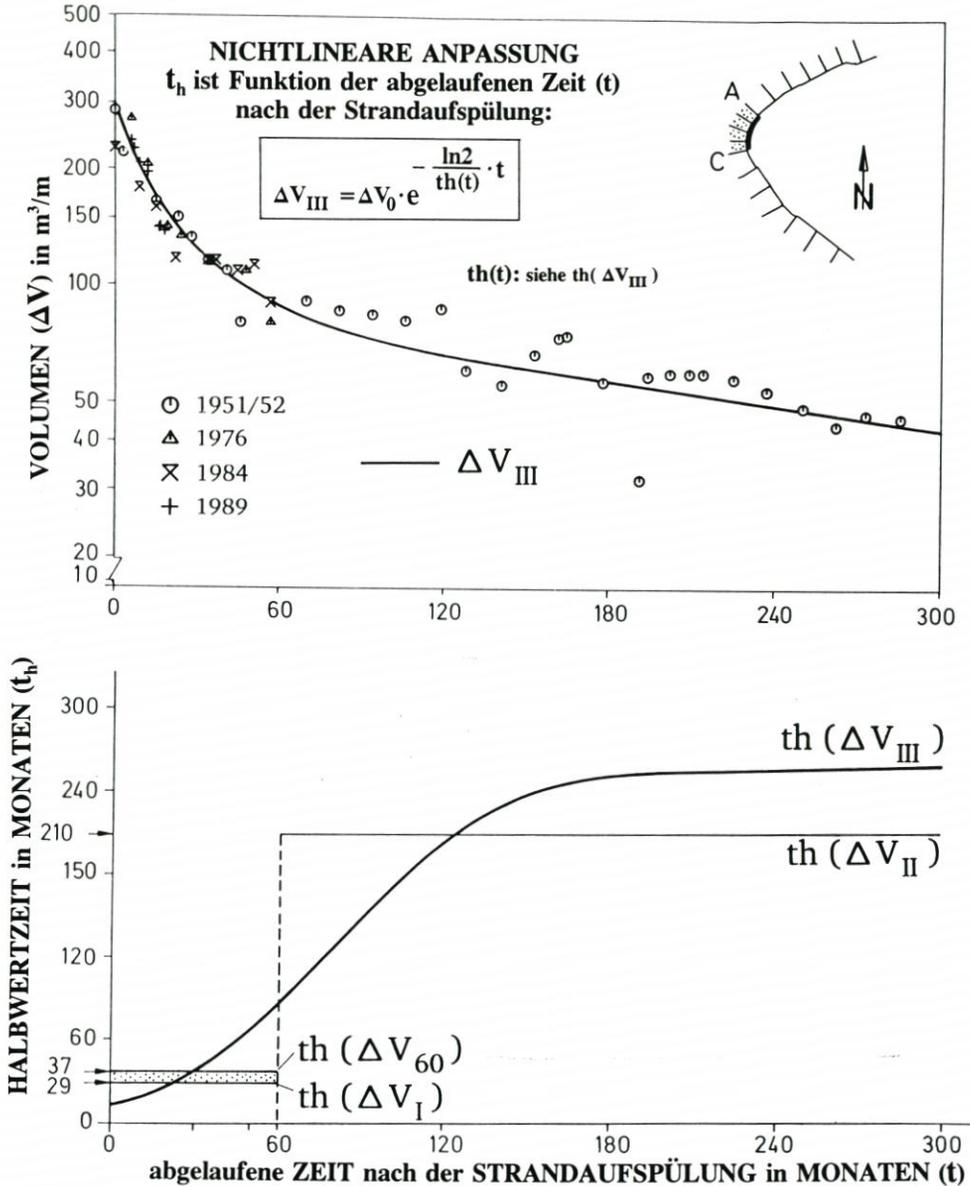


Abb. 16. Semi-logarithmische Darstellung für die Änderung der Volumengröße $\Delta V(III)$ mit der Zeit für alle auswertbaren Strandaufspülungen von 1951 bis 1989 sowie Ausgleichsfunktion mit $th(t)$ im Exponenten (oberes Bild); Halbwertzeit als Funktion der Zeit ($t_h(t) = th(\Delta V_{III})$) und Konstanten nach Abb. 15 (unteres Bild)

bereichs oberhalb des Referenz-Profiles (1951) und der NN -1,50-m-Begrenzung, über den Wert von etwa $70 m^3/m$ erhöht. Oberhalb dieses Volumenwertes, also mit höheren Strandlagen, verringert sich der strandstabilisierende Einfluß der Bühnen zunächst sehr schnell. Daher ist für eine Minimierung der Sandverluste besonders entscheidend, daß der Strand nicht

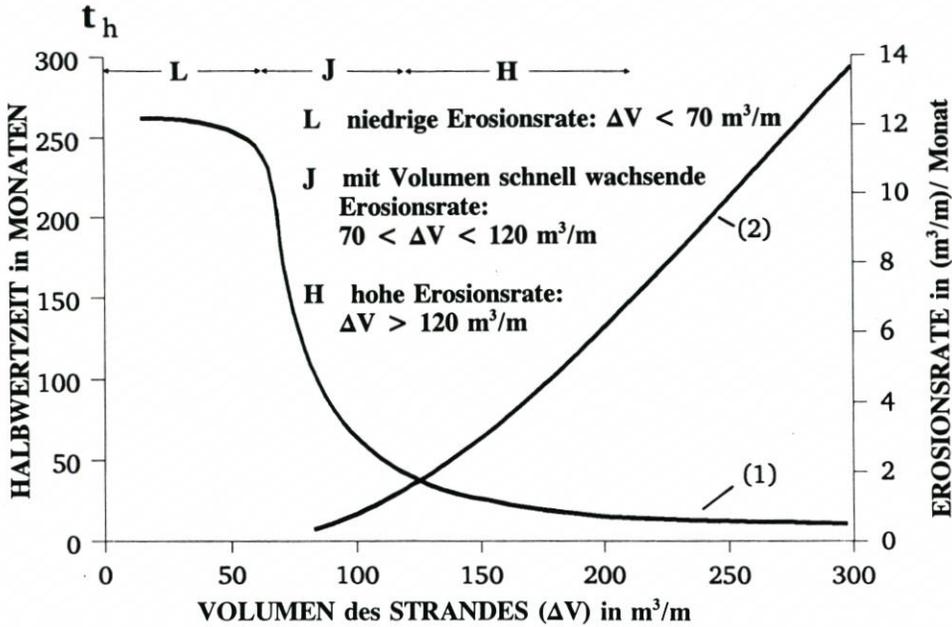


Abb. 17. Halbwertszeit (1) und Erosionsraten/Verlustraten (2) als Funktion des Strandvolumens (ΔV); Bühnenbereich (A-C)

in einer höheren Profillage gehalten wird, als dies für die Sicherung der Küstenschutzwerke gegen Sturmfluteinwirkungen notwendig ist (Minimalvolumen ΔV_{\min}).

Für Strände, bei denen man die Änderung der Volumengröße ΔV von der Zeit durch eine e-Funktion mit konstanter Halbwertszeit (t_h) beschreiben kann, steigt die Verlustrate linear mit dem ΔV_{\min} an. FÜHRBÖTER (1991) beschreibt anschaulich die Gesetzmäßigkeiten dieses Sonderfalls, wobei er die Betrachtungen auf Volumen oberhalb einer horizontalen Tiefenbegrenzung (V nach Abb. 7.1) bezieht. Ausgehend von diesen Kenntnissen hat bereits vor über 30 Jahren KRAMER (1958) vorgeschlagen, man solle möglichst geringe Mengen aufbringen, also kontinuierlich aufspülen.

Das in der Abb. 17 ausgewiesene Strandvolumen ΔV darf ein festzulegendes Minimalvolumen (ΔV_{\min}) nicht unterschreiten. Nur oberhalb dieses Wertes kann man daher über die Menge der Strandvorspülung die davon abhängigen Verlustraten (V_R) beeinflussen. Das ΔV_{\min} ergibt sich aus der Zielvorgabe für die jeweilige Sandvorspülung (Nutzung, Schutz). Durch die Menge der Strandvorspülung (V_A) wird bestimmt, um welchen Betrag sich das Bilanzvolumen (ΔV) über das ΔV_{\min} erhöht. Das in der Abb. 17 ausgewiesene Volumen teilt sich damit auf in $\Delta V = \Delta V_{\min} + V_A$.

Das zur Gewährleistung der Schutzwirkung erforderliche Minimalvolumen (ΔV_{\min}) ist auf Norderney für jedes Bühnenfeld aufgrund küstenschutztechnischer Überlegungen festzulegen. Dies führt zu Fragestellungen einer Kostenoptimierung zwischen Aufspülmengen (V_A) und den von der Gestaltung und dem Erhaltungszustand der Küstenschutzbauwerke abhängigen Größen des Minimalvolumens (ΔV_{\min}).

Die Optimierung setzt voraus, daß man weiß, wie sich die Verluste aufgespülter Sandmengen mit den Variablen (ΔV_{\min}) und (V_A) ändern. Dies ist für den Bereich (A-C) auf Abb. 18 dargestellt. Nach KUNZ (1991b) wurde dafür die funktionale Abhängigkeit zwischen

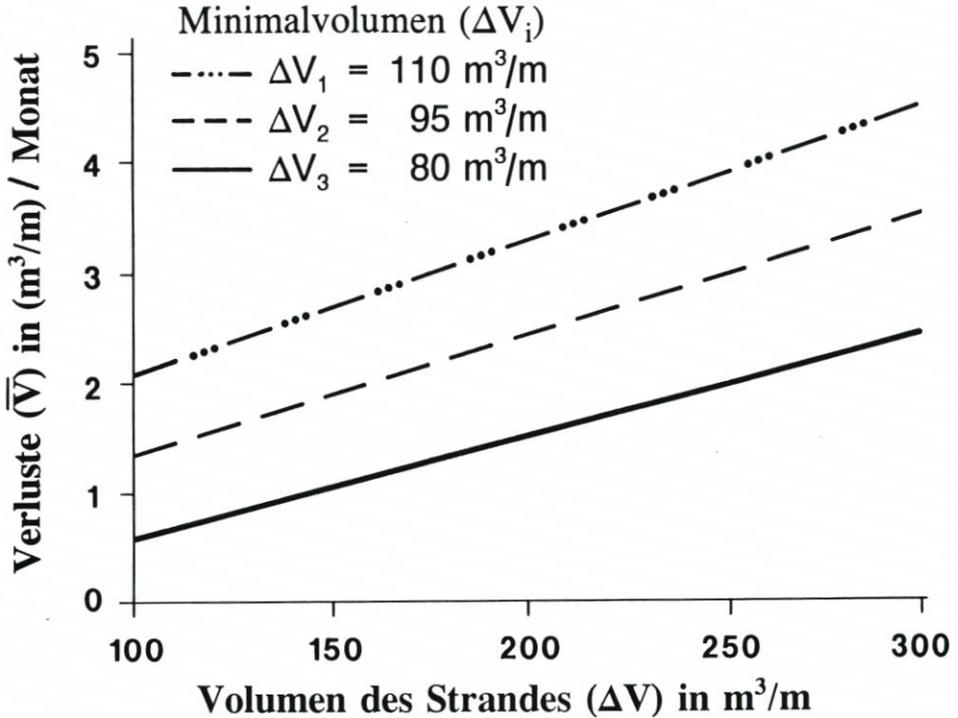


Abb. 18. Größe der Verlustraten (\bar{V}) als Funktion des Strandvolumens (ΔV) oberhalb des Referenzprofils (Gleichgewichtsprofils) und dreier vorgegebener Größen des Minimalvolumens (ΔV_i) für Wiederholungsaufspülungen – Bühnenfelder (A–C), Norderney

der Verlustrate V_R und der Volumengröße ΔV verwendet, die in Abb. 17 ausgewiesen ist. Als $\min \Delta V_i$ sind drei Beträge für das „Minimalvolumen“ (80, 95, 110 m^3/m) vorgegeben worden; die im „Bilanzgebiet“ nach Aufspülung vorhandenen Volumen (ΔV) wurden auf den Bereich bis 300 m^3/m begrenzt. Damit ergeben sich maximale Aufspülmengen (V_A) zwischen 190 und 220 m^3/m .

Die Sandverluste wurden für jeweils vorgegebene ΔV_{\min} - und V_A -Werte über die Zeitspanne berechnet, die zwischen einer Aufspülung und der mit Erreichen des Minimalprofils nachfolgend erneut erforderlichen Aufspülung (Wiederholungsintervall) liegt. Die über das Wiederholungsintervall gemittelten Sandverluste sind auf der Ordinate der Abb. 18 als \bar{V} ausgewiesen. Der Berechnung lagen somit analoge Überlegungen zugrunde, wie sie auch von FÜHRBÖTER (1991) auf Daten von Sylt angewendet wurden, allerdings unter Verwendung der in der Abb. 16 ausgewiesenen Exponentialfunktion für die Norderney-Situation. Die dort mitgeteilten allgemeinen Ansätze gehen von Exponentialfunktionen mit konstanter Halbwertszeit aus, die auf die Norderney-Verhältnisse für größere Wiederholungsintervalle nicht und für kürzere Intervalle nur eingeschränkt anwendbar sind. Bei Vergleichen ist dieser methodische Unterschied zu beachten. So steigt beispielsweise die Verlustrate beim ΔV_{\min} nicht mit dessen Größe linear an, sondern liegt bei den Beispielen der Abb. 18 mit 2,6 (anstelle $110/80 = 1,4$) und 2,0 (anstelle $95/80 = 1,2$) wesentlich höher.

Werden die mit dem Hauptmeßfeld (D_1-E_1) im Rahmen des Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ ermittelten seegangs-

induzierten Strömungen und deren Beeinflussung von den Buhnen, die das Feld begrenzen, auf die Felder (A-C) prinzipiell übertragen, dann läßt sich daraus rückschließen, daß die dargestellte Abhängigkeit der Halbwertzeit wesentlich durch die Buhnen bewirkt ist. Eine der wichtigen Einflußgrößen scheint dabei der Höhenunterschied zwischen mittlerem Wasserstand und Strand zu sein (NIEMEYER, 1991).

Die am Beispiel des Divergenzbereichs der Norderneyer Strandsituation ermittelten Zahlenangaben sind fallspezifisch; dennoch lassen sich Erkenntnisse aus den Untersuchungen ableiten, die verallgemeinert werden können (siehe Abschnitt 11).

10. Längstransport von Sandverlusten aus dem Divergenzbereich in benachbarte Strandabschnitte

Die vorgestellten volumetrischen Untersuchungen für den „Divergenzbereich“ wurden in vergleichende Betrachtungen für die benachbarten Strandabschnitte eingebunden (Kap. 8, Abb. 13). Teile der Untersuchungen befaßten sich mit der Frage, welche Verlustmengen aus dem „Bilanzvolumen“ durch Längstransporte in andere Buhnenfelder gelangen und damit wiederum für den Schutz der Küstenbauwerke verfügbar sind.

Abb. 19 zeigt ein Ergebnis. Einander zugeordnet sind die Volumenentwicklungen von 1951 bis 1991: für die sich in nord-östlicher und süd-östlicher Richtung anschließenden Bereiche (A-V₁ und C-N); für den Gesamtbereich (N-V₁). Auf der rechten Seite der Abbildung sind als vertikale Balken die Mengen ausgewiesen, die nach der ersten Aufspülung (1951/52) dann ab 1967 insgesamt den unterschiedenen Bereichen zugeführt wurden. Ein Vergleich der Volumen-Ganglinien ermöglicht unmittelbar einige Feststellungen:

- Ab 1976 wurden im Gesamtabschnitt (N-V₁) künstlich die Gesamtvolumen auf höherem Niveau (zunehmende Tendenz) gehalten, als das nach der ersten Strandaufspülung von 1951/52 der Fall war.
 - Der Divergenzbereich versorgte beide angrenzenden Bereiche (A-V₁ und C-N) mit Sand (Längstransport).
 - Der süd-östliche Abschnitt (C-N) ist überversorgt. Das Gesamtvolumen wird durch die Aufspülungen ebenfalls auf einem hohen Niveau gehalten.
- Verbindet man diese Feststellungen mit den in den vorherigen Kapiteln dargestellten funktionalen Abhängigkeiten der Sandverluststraten von den Aufspülmengen und den Wiederholungsintervallen, so läßt sich für die Verringerung der Sandverluste folgendes rückschließen:
- Die Sandmengen pro Aufspülung sollten reduziert und der Aufspülbereich sollte noch mehr auf die Buhnenabschnitte des Divergenzbereichs selbst, sowie eines nord-östlich angrenzenden Teilbereichs beschränkt werden (feeder-beach-Funktion).
 - Der Strand in den einzelnen Buhnenfeldern sollte nicht wesentlich höher aufgespült werden als dies jeweils erforderlich ist, um das Ziel der Aufspülung (Sicherung der Inselschutz-Bauwerke gegen Zerstörung durch Sturmfluten) zu gewährleisten.

Ob die dargestellten Grundsätze für die Verringerung der Sandverluststraten zu einer Optimierung auch unter Kostengesichtspunkten führen, das hängt wesentlich mit davon ab, zu welchen Einheitspreisen (DM/m³ Sand) man unterschiedlich große Sandmengen mit den jeweils verfügbaren Spültechniken bereitstellen kann. Dies wird im folgenden Schlußkapitel noch kurz angesprochen.

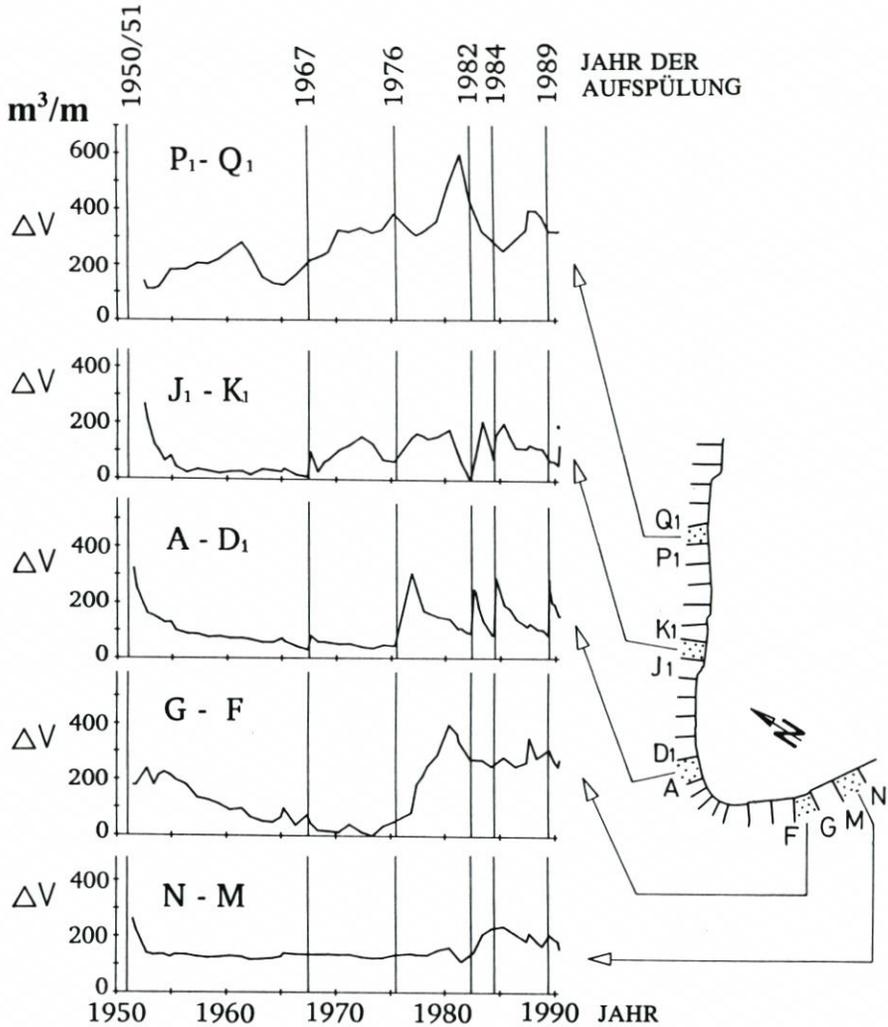


Abb. 19. Strandvolumen im definierten „Bilanzraum“ für die Bühnenstreifen (N-C), (A-V1), (N-V1) auf Norderney von 1951 bis 1990 mit Angaben zu den aufgespülten Volumen-Summen (67/69)

11. Erkenntnisse zur Optimierung von Strandvorspülungen, Zusammenfassung, Ausblick

Volumen(Verlust)-Zeit-Beziehungen für ausgewählte Strandabschnitte können unsere Kenntnisse über die ablaufenden Transportprozesse erweitern und lassen Rückschlüsse auf die Optimierung von Strandvorspülungen (Aufspülungen) natürlicher oder mit Schutzwerken verbauter Küsten zu. Dies gilt insbesondere dann, wenn den volumetrischen Erhebungen die Ergebnisse von Untersuchungen zur Erfassung der Naturkräfte und der davon ausgehenden Wirkungen auf den Massentransport zugeordnet werden können. Voraussetzung ist, daß für die Volumenberechnungen die „Bilanzräume“ so abgegrenzt werden, daß sie den jeweiligen

örtlichen Gegebenheiten und den mit der Strandvorspülung verfolgten Schutz- oder Nutzungskonzepten richtig angepaßt sind.

Zur Abgrenzung des „Bilanzraumes“ ist zusätzlich zu einer horizontalen Tiefenbegrenzung noch ein „Referenzprofil“ (Gleichgewichtsprofil) vorzugeben, sofern man Funktionen erhalten will, bei denen die Größe des Strandvolumens mit fortschreitender Zeit gegen Null geht.

Für Fragestellungen der Praxis sind durchweg zu unterscheiden:

- Bilanzraum, mit dem die anfänglichen Umformungen des Aufspülkörpers in einen an die Naturverhältnisse „angepaßten Ausgangszustand“ zu beschreiben sind.
- Bilanzraum, der geeignet ist, die weitere zeitliche Entwicklung des in den „Ausgangszustand“ bereits umgeformten Aufspülbereichs zu analysieren.

Die Herleitung von Volumen-Zeit-Funktionen hat für die anfängliche Umformung des aufgespülten „Störkörpers“ und die nachfolgende Strandentwicklung getrennt zu erfolgen: Dazu sind unterschiedliche Nullpunkte für die Zeitskalen einzuführen. Dies wird vielfach nicht beachtet. Es werden dann nicht zueinander passende Daten miteinander verglichen und als homogene Datenmenge behandelt, was dazu führt, daß anfängliche Umformungen des als „Störung“ eingebrachten Aufspülkörpers in einen den natürlichen Gegebenheiten angepaßten Zustand (Ausgangszustand) als „Verluste“ mißgedeutet werden. Hiermit begründet man dann die folgende, nicht zutreffende Erwartung: bei vorgegebener Aufspülmenge sei die Größe der Verlustrate (aus dem letztlich für den Erfolg einer Aufspülung maßgebenden „Strand nach Umformung in den angepaßten Ausgangszustand“) durch die anfängliche Formgebung des Aufspülkörpers wesentlich zu beeinflussen. Anmerkung: Die aufgezeigte Fallunterscheidung ist prinzipiell auch von Bedeutung, wenn der Aufspülkörper nicht nur Sand zuführen, sondern auch über längere Zeit als „Bauwerk“ wirken und das hydrodynamisch-morphologische Geschehen großräumig beeinflussen soll (FÜHRBÖTER, 1976; RAUDKIVI, 1991).

Die Annahme, daß das Volumen eines aufgespülten Strandes mit der Zeit entsprechend einer Exponentialfunktion mit konstantem Exponenten (Halbwertszeit) sich verringere, sollte jeweils durch Naturmessungen überprüft werden. Im Falle Norderney konnte durch Untersuchungen des Divergenzbereichs gezeigt werden, daß die Annahme konstanter Halbwertszeiten nicht zutrifft. Wird eine e-Funktion angepaßt, dann weist diese im Exponenten eine Halbwertszeit auf, die sich mit der Zeit vergrößert.

Vergleiche mit hydrographischen und sedimentologischen Untersuchungsergebnissen zeigen, daß die zeitabhängige Zunahme der Halbwertszeit im Zusammenhang zu sehen ist mit einer strandstabilisierenden, sandverlustmindernden Wirkung der Buhnen, die von der relativen Höhe zwischen Strand, Wasserstand und Buhnenkrone abzuhängen scheint (WESTHOFF, 1990; KUNZ, 1991a; NIEMEYER, 1991).

Bei einer Küste, die durch Buhnen stabilisiert ist, können die Verlustraten in wesentlichem Ausmaß nur durch die Größe der strandlängen-normierten Aufspülmenge beeinflusst werden. Im Fall Norderney vergrößern sich die Verlustraten überproportional mit der Sandmenge, die oberhalb des Minimalprofils (ΔV_{\min} , das ist die Sandmenge, die im Bilanzraum mindestens vorhanden sein muß, um das Schutzziel zu gewährleisten) aufgebracht wird (maßgebend ist der Zustand nach Abschluß der anfänglichen Umformung des Aufspülkörpers in den „Ausgangszustand“, der den örtlichen Naturwirkungen entspricht); die ΔV_{\min} -Werte ergeben sich aus dem Ziel „Sicherung der Schutzwerke gegen Zerstörung bei der Bemessungssturmflut“.

Die Aussage, daß eine Minimierung der Sandverluste aus dem „Ausgangszustand“ durch wiederholtes Aufspülen möglichst kleiner Sandmengen (m^3/m) zu erreichen ist, gilt analog auch für Strände ohne Buhneneinbauten, bei denen die zeitliche Entwicklung von Strandvolu-

men (definierter Bilanzraum) durch eine e-Funktion mit konstanter Halbwertzeit beschrieben werden kann. In welchem Maße sich die Verlustraten mit den strandlängen-normierten Volumeninhalten ändern, das hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab. Bei vorgegebenem Minimalprofil (ΔV_{\min}) ist die Halbwertzeit (Konstante oder Funktion der Zeit) die wesentliche Einflußgröße. Die geringsten Verlustraten, mit denen man durch die Strandauffüllung ausreichende Strandprofile gewährleistet, sind zu erreichen, indem gerade eben das „Minimalprofil“ durch eine kontinuierliche künstliche Sandzufuhr erhalten wird. Dies hat bereits KRAMER (1960) für Norderney vorgeschlagen.

Um zu einer Minimierung der Gesamtkosten einer Strandaufspülung zu gelangen, sind „Sandverlustraten (m^3/m Strand)“ und „Vorspülkosten (DM/m^3)“ im Zusammenhang zu betrachten. Verlustraten und volumenspezifische Kosten hängen in unterschiedlicher, zumeist entgegengerichteter Weise von dem strandlängen-normierten „Volumen der Auffüllung ($\Delta V - \Delta V_{\min}$)“ ab. Das Ergebnis dieser Verlustmengen-Kosten-Optimierung wird wesentlich von standortspezifischen Faktoren bestimmt.

Beim Einbringen des Aufspülkörpers unterhalb des Tidehochwassers kann durchweg auf eine Anpassung an natürliche Strandprofile verzichtet werden. Vielmehr gilt es, die benötigten Sandmengen möglichst preisgünstig einzubringen. Der so aufgespülte „Störkörper“ formt sich dann durch die Einwirkungen der Naturkräfte derart um, daß sich die natürlichen Strandneigungen durch Sandverlagerungen ausbilden. Die Größe der dabei umgelagerten Sandmengen hängt von der Form des Aufspülkörpers ab. Die gebräuchliche Methode einer vom trockenen Strand ausgehenden Aufspülung erbringt durchweg Austräge aus dem „Bilanzkörper“, während Auffüllungen tieferer Vorstrandbereiche zu Einträgen führen können. Entscheidend ist, welcher Anteil der verspülten Sandmenge nach der anfänglichen Umformung dann zunächst in den aufzufüllenden Strandquerschnitt (Volumenerhöhung des Bilanzkörpers) gelangt ist und was dieser kostet. Daher wurde bei der „versuchsorientierten Strandvorspülung 1992“ (KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen in Bühnen-Deckwerks-Systemen“) auf Norderney die Versuchsaufspülung in Form von „Sandhöften“ ausgeführt (ERCHINGER, 1991), um deren Eignung als eine preiswerte Methode zur Auffüllung tieferer Strandprofilbereiche zu erkunden.

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des KFKI-Verbundforschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ ausgeführt. Sie waren eingegliedert in das Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“ der Forschungsstelle Küste, Norderney. Das Vorhaben ist vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) unter MTK 0385 gefördert worden.

12. Schriftenverzeichnis

- ARBEITSGRUPPE NORDERNEY: Gutachtliche Stellungnahme des Küstenausschusses Nord- und Ostsee...; Die Küste, Jg. 1. H. 1, 1952.
- AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE der HTG und DGEG: Empfehlungen für Strandauffüllungen als Küstenschutz; Naßbaggerberichte Bd. 5, 1977 und Die Küste, H. 36, 1981.
- BASCOM, W. H.: Characteristics of natural beaches. Proc. 4th Conf. o. Coast. Eng., ASCE, 1954.
- BRUUN, P.: Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. Beach Erosion Board Technical Memorandum No. 44 Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1954.
- DEAN, R. G.: Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Department of Civil Engineering Report No. 12 Newark: University of Delaware, 1977.
- DEN ADEL, J. D. et al.: Wave model application in a Wadden Sea Area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.

- DETTE, H. H.: Energetische Betrachtungen zu seegangserzeugten Änderungen der Küstenmorphologie. Statusseminar Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, BMFT, Bonn, 1991.
- EITNER, V., RAGUTZKI, G. u. WESTHOFF, T.: Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge. Die Küste, H. 54, 1992.
- ERCHINGER, H. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog; Die Küste, H. 43, 1986.
- ERCHINGER, H. F. u. LAUE, M.: Sechste Strandaufspülung mit besonderer Berücksichtigung der Sandentnahme und Transporttechniken. Zwischenbericht zum KFKI-FV „Wechselwirkungen“, Staatl. Amt f. Insel- und Küstenschutz, Norden, 1989.
- ERCHINGER, H. F.: Beach Replenishment in consideration of natural process and profiles. Proc. Conf. o. River a. Coast. Eng., Loughborough University, MAFF., 1991.
- ERCHINGER, H. F. u. KOTZBAUER, U.: Schlußbericht zum KFKI-FV „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“, Teilvorhaben „Versuchsorientierte Strandaufspülung“. StAIK Norden, 1992.
- ERCHINGER, H. F. u. TILLMANN, B.: Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste, H. 54, 1992.
- FENNEMAN, M. M.: Development of the profile of equilibrium of the subaqueous shore terrace. J. Geol. 6(4), 1902.
- FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY: Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney: Jber. 1949, Forsch.-Stelle Norderney, Bd. I u. II, Norderney, 1950.
- FORSCHUNGSSTELLE FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ: Niedersächsische Küste, Historische Karte Nr. 5, 1 : 50 000. Norderney, 1964.
- FÜHRBÖTER, A. et al.: Beurteilungen der Sandaufspülungen 1972 und Empfehlungen für die künftige Stranderhaltung am Weststrand der Insel Sylt. Die Küste, H. 29, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen. Die Küste, H. 52, 1991.
- GRAAF, J. VAN DE: How to analyse beach profile measurements? Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- GUST, G.: Schlußbericht des KFKI-FV „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“, Teilaufgabe „Schubspannungsmessungen“, Hamburg-Harburg, 1992.
- HOMMEIER, H. u. KRAMER, J.: Verlagerung der Platen im Riffbogen vor Norderney und ihre Anlandung an den Strand. Jber. 1956, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 8, Norderney, 1957.
- HOMMEIER, H.: Beiheft zur Historischen Karte Nr. 5. Forsch.-Stelle für Insel- u. Küstenschutz, Norderney, 1964.
- KAMP, W. D.: Küstenschutzmaßnahmen des Landes Schleswig-Holstein an der Westküste Sylt; Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. BMFT-Statusseminar, BMFT, Bonn, 1991.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. Jber. 1977, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 29, Norderney, 1978.
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, H. 105, 1990.
- KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52. Jber. 1957 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 9, Norderney, 1958.
- KRAMER, J.: Beach-Rehabilitation by use of Beach Fills and further Plans for the protection of the Island of Norderney. Proc. 7th ICCE, vol. 2, ASCE, New York, 1960.
- KUNZ, H.: History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney. Coastal Sediments '87, proc. vol. 1, 1987.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd ICCE Delft, ASCE, New York, 1991a.
- KUNZ, H.: Protection of the island of Norderney by Beach Nourishment, Alongshore Structures and Groynes. Proc. 3. Intern. Conf. on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Bd. 1, COPEDEC, Mombasa, 1991b.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung von Norderney. Jber. 1968, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 20, Norderney, 1970.

- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber. 1985, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37, Norderney, 1986.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Klassifikation und Häufigkeit von Sturmzeiten. Jber. 1986, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 38, Norderney, 1987.
- NIEMEYER, H. D.: Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coast. Eng. Taipei, ASCE, New York, 1987a.
- NIEMEYER, H. D.: Field measurements and analysis of wave-induced nearshore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen; Die Küste, H. 54, 1992.
- PÄTZOLD, U.: Bilanz und Verformung aufgespülter Sandstrände. Jber. 1980, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 32, Norderney, 1982.
- RAUDKIVI, A. J.: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt im Rück- und Ausblick. BMFT-Status-Seminar, BMFT, Bonn, 1991.
- STEPHAN, H.-J.: Fünf Strandauffüllungen vor Norderney – Ergebnisse morphologischer Untersuchungen. Bericht Forsch.-Stelle Küste, Norderney, 1988.
- STEPHAN, H.-J. u. WESTHOFF, T.: Zur Ermittlung der Sandmengen vor Norderney. Jber. Forsch.-Stelle Küste (i. Vorbereitg.), Norderney, 1992.
- SWART, D. H.: Beach nourishment and particle size effects. Coastal Engineering, 16, Elsevier, Amsterdam, 1991.
- THILO, R. u. KURZAK, G.: Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney; Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- WESTHOFF, T.: Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. Diss. Universität Münster, 1990.
- YU, Z., NIEMEYER, H. D. u. BAKKER, W. T.: Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.