

Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989

Von HEIE F. ERCHINGER und BURKHARD TILLMANN

Zusammenfassung

Die sechste Strandaufspülung am Westende der Insel Norderney wurde 1989 als versuchsorientierte Aufspülung im Rahmen eines KFKI-Forschungsvorhabens durchgeführt mit dem Ziel einer Optimierung von Aufspülungen. Der Aufspülkörper erhielt in Quer- und Längsrichtung ein in mehrjährigen Strandvermessungen ermitteltes natürliches Strandprofil, um die Umlagerungen in der Anfangsphase möglichst gering zu halten. Der Einbau von zwei verschiedenkörnigen Sanden sollte Aufschluß darüber bringen, in welchem Maße das von einem Hopper heranzubringende gröbere Material länger am Aufspülort verweilt.

Interessante Erkenntnisse erbrachten die Umlagerungen des Aufspülkörpers. Oberhalb MTnw nahm die Strandhöhe bereits nach wenigen Monaten deutlich ab, während der Vorstrand zwischen MTnw und NN -4 m aus diesem Material aufgefüllt wurde. Die Veränderungen des Vorstrandes im Laufe des ersten Jahres nach der Aufspülung ließen erkennen, daß auch der Vorstrand bei künftigen Aufspülungen erhöht werden sollte, um seine natürliche Hangneigung bei Aufspülungen in etwa zu erhalten. Hieraus erwuchs der Plan, bei der Wiederholungsaufspülung Sandhöfte auf den Vorstrand vorzutreiben, um nach deren Umformung eine flächenhafte Aufhöhung des Vorstrandes zu erzielen.

Eine zeitlich enge Vermessung des 350 m langen Sandentnahmetrichters ermöglichte einen Einblick in die sehr schnelle Wiederverfüllung des Trichters durch einen beträchtlichen strömungs- und brandungsbedingten Sandtrieb auf der Plate. Auch die Einrichtung einer stationären Spüleleitung für jährliche Sandzugaben konnte im Rahmen der Untersuchungen in spültechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht mit der bisherigen Aufspülmethode in Einzelmaßnahmen verglichen werden. Dabei erwies sich die bisherige Methode einer Wiederholungsaufspülung im Westen Norderney's nach 2 bis 6 Jahren in Abhängigkeit vom sturmflutbedingten Energieeintrag als deutlich überlegen.

Summary

The sixth Norderney Island sand replenishment was undertaken in 1989 as an experimentally oriented program in connection with a KFKI research project for optimizing such procedures. The sand was initially distributed as close as possible to natural profiles determined from long term measurements, in order to minimize initial redistribution. Two different sands were used in order to get indications as to whether coarser material was more resistant to erosion.

The redistribution of the deposited sand produced interesting results. The beach level above Mtlw sank significantly within a few months. This material was redeposited in the near shore area between Mtlw and NN -4. Changes in the near shore zone during the first year indicated that this area should also be replenished in future operations in order to retain the natural slopes. This led to the plan that sand masses should be placed in the near shore area during the next replenishment in order to generate large scale elevation increases in this reach.

Frequent measurements in a 350 m long sediment trench gave insight into its very fast filling resulting from significant flow and wave induced sand motion. An economical and technical comparison could be made between the present replenishment method and that with a permanent stationary pipeline. A repeat of the replenishment procedure every 2-6 years, depending on the storm induced energy input, was found to be significantly better.

Inhalt

1. Einführung	144
2. Das Teilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“	144
3. Bisherige Aufspülungen 1951 bis 1984	146
4. Durchführung der Strandaufspülung 1989	148
4.1 Das natürliche Strandprofil für Aufspülkörper	148
4.2 Die Gewinnung des feinen und gröberen Aufspülmateri- als	150
4.3 Der Aufspülkörper	153
5. Entwicklung der Strandhöhen und -neigungen nach der Aufspülung	154
5.1 Die Strandentwicklung im Seegatbereich	154
5.2 Die Strandentwicklung am Nordweststrand	155
6. Wiederverfüllung der Sandentnahmestelle auf der Robbenplate	158
7. Häufige Sandzugaben durch eine stationäre Spüleleitung	161
7.1 Die Grundidee und mögliche Sandentnahmegebiete	161
7.2 Aufspülkörper und Aufspülintervall	163
7.3 Kostenvergleich	164
8. Der äolische Sandtransport	165
9. Ein Ergebnis der Untersuchungen: Strandaufspülung 1992 einschl. Vorstrandaufhöhung durch Sandhöfte	165
10. Schriftenverzeichnis	167

1. Einführung

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatte sich das Norderneyer Seegat soweit 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. hundert Jahren wurde dieses Schutzsystem auf rd. 6 km Länge als Strandmauer oder Deckwerk mit 32 Buhnen ausgebaut. Vor allem die 1933/34 gebauten, bis zur Sohle des etwa 25 m tiefen Seegats reichenden Unterwasserbuhnen haben den Inselsockel am Westkopf gesichert und vor weiterem Heranrücken des Seegats bewahrt. Diese Baumaßnahmen haben dem weiteren Abbruch des Westendes Einhalt geboten; die weitere Erosion des Strandes konnte jedoch damit nicht verhindert werden.

Bis 1950 hatte der Strand im Westen der Insel eine derart niedrige Lage erreicht, daß Deckwerksfußsicherungen und Buhneneinfassungen akut gefährdet und die z. T. fast hundert Jahre alten Bauwerke der infolge der Strandabnahme ständig steigenden Seegangsbelastung nicht mehr gewachsen waren. Der Empfehlung der Arbeitsgruppe Norderney des Küstenausschusses Nord- und Ostsee folgend wurde 1951/52 der Norderneyer Strand mit 1,25 Mio. m³ Sand auf rd. 6 km Länge aufgespült. 1989 spülte ein Saugbagger den Strand zum sechsten Mal auf. Diese Aufspülung konnte im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ mit gezielten, vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) finanzierten Untersuchungen begleitet werden (KUNZ, 1992). Dieses Vorhaben beinhaltet mehrere Teilprojekte. Das Teilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“ wird in diesem Beitrag behandelt.

2. Das Teilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“

Im Rahmen dieses Teilprojekts sollten Fragen
– der praktischen Durchführung von Strandaufspülungen,

- der Profilgebung,
- des Einflusses unterschiedlicher Korngrößen des Aufspülmaterials,
- der Gewinnungsmöglichkeiten gröberen Materials und
- der Kostenoptimierung langfristig geplanter Aufspülungen mit Standleitung vom Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz Norden untersucht werden.

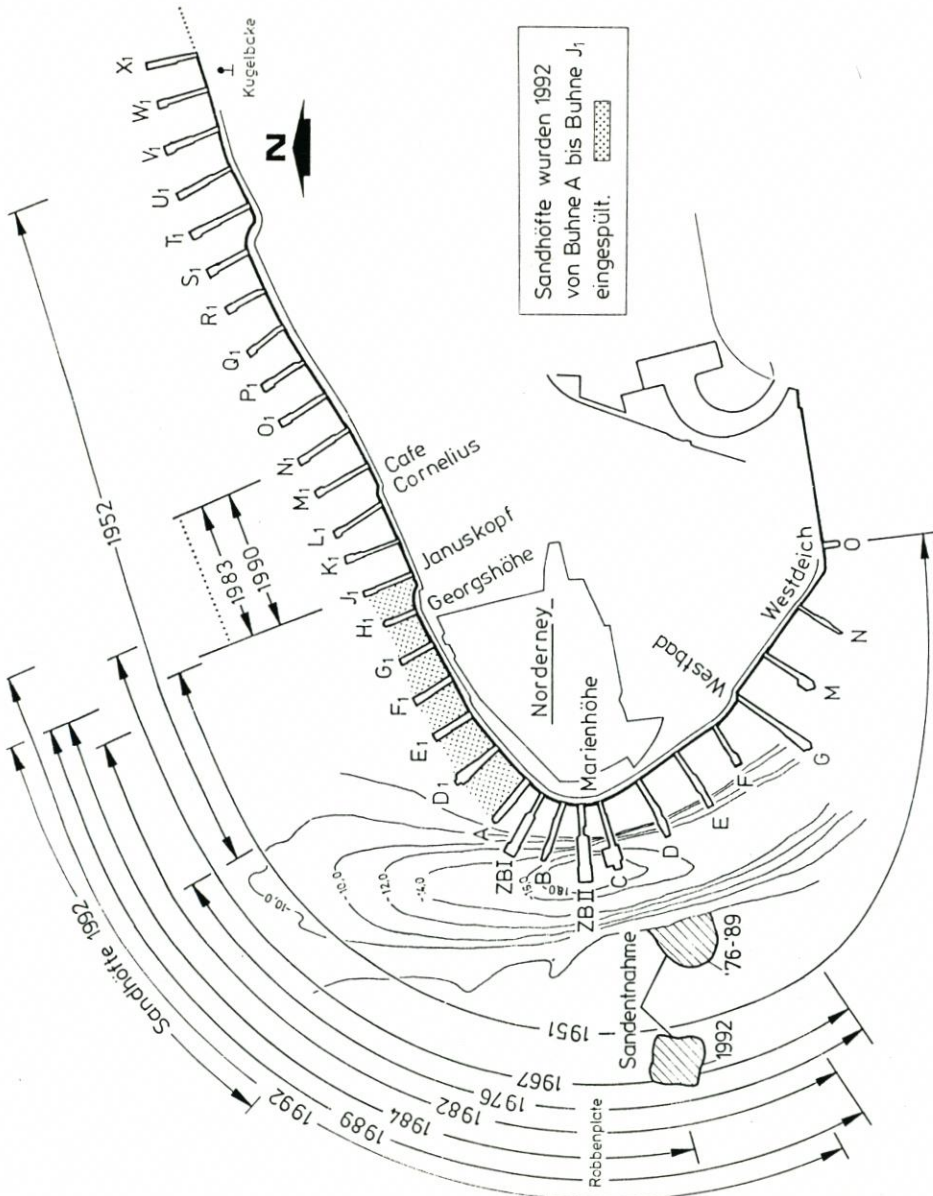


Abb. 1: Westende der Insel Norderney mit Kennzeichnung der Aufspülstrecken und Sandentnahmen der Strandaufspülungen 1951 bis 1992

Tabelle 1. Hauptmerkmale der Strandauffüllungen auf Norderney von 1951-1992

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	

Die Vorbereitung der Aufspülung begann 1987 mit Erstellung einer Lagerstättenstudie mit Unterstützung des Landesamtes für Bodenforschung, Hannover. Der Strand wurde 1989 aufgespült. Die Untersuchungen im Rahmen des Teilprojektes endeten Ende 1991.

3. Bisherige Aufspülungen 1951 bis 1984

Die fünf Strandaufspülungen von 1951 bis 1984 sind in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentiert (KRAMER, 1958/59; ERCHINGER, 1986). Letzterer hat die Profile dieser Aufspülungen im Bühnenfeld D1-E1 zusammengestellt. Die aufgespülten Strandstrecken und die Einbaumengen sind in Abb. 1 und Tab. 1 wiedergegeben. Mit der ersten Aufspülung 1951/52 ist der 6 km lange unterversorgte Strand mit 1,25 Mio. m³ Wattsand erhöht und verbreitert worden. Nach der Aufspülung gab es erhebliche Umlagerungen, vor allem nordöstlich des Westkopfes in den Bühnenfeldern A bis F1 im Divergenzbereich des Brandungsstromes mit dem Schwerpunkt im Bühnenfeld D1-E1, wo der Strand nach wenigen Jahren bereits wieder abgetragen war. Der Brandungsstrom hat den Sand in beide Richtungen den Strand entlang transportiert. Er ergänzt auf dem Transportweg jeweils die unterversorgten Strandabschnitte und bleibt insgesamt lange Zeit zum Schutze der Insel wirksam. Der Küstenlängstransport zugunsten der angrenzenden Strandstrecken hat es ermöglicht, die weiteren Aufspülungen auf den engeren Westkopfbereich mit einer Strandstrecke von ein bis zwei Kilometer Länge zu beschränken. Für das Bühnenfeld D1-E1 ist die Sandmassenbilanz im Profil 74 (Bühnenfeldmitte) auf Abb. 2 dargestellt. Erfasst sind die Sandmassen im Strandkeil oberhalb MTnw und seewärts des Deckwerksfußes. Unterlegt ist diese Massenbilanz mit einem Säulendiagramm über die Häufigkeit von Sturmzeiten über 2 m NN für Norderney, um dadurch auch die Zusammenhänge zwischen dem Energieeintrag durch Sturmfluten und der Stranderosion zu veranschaulichen.

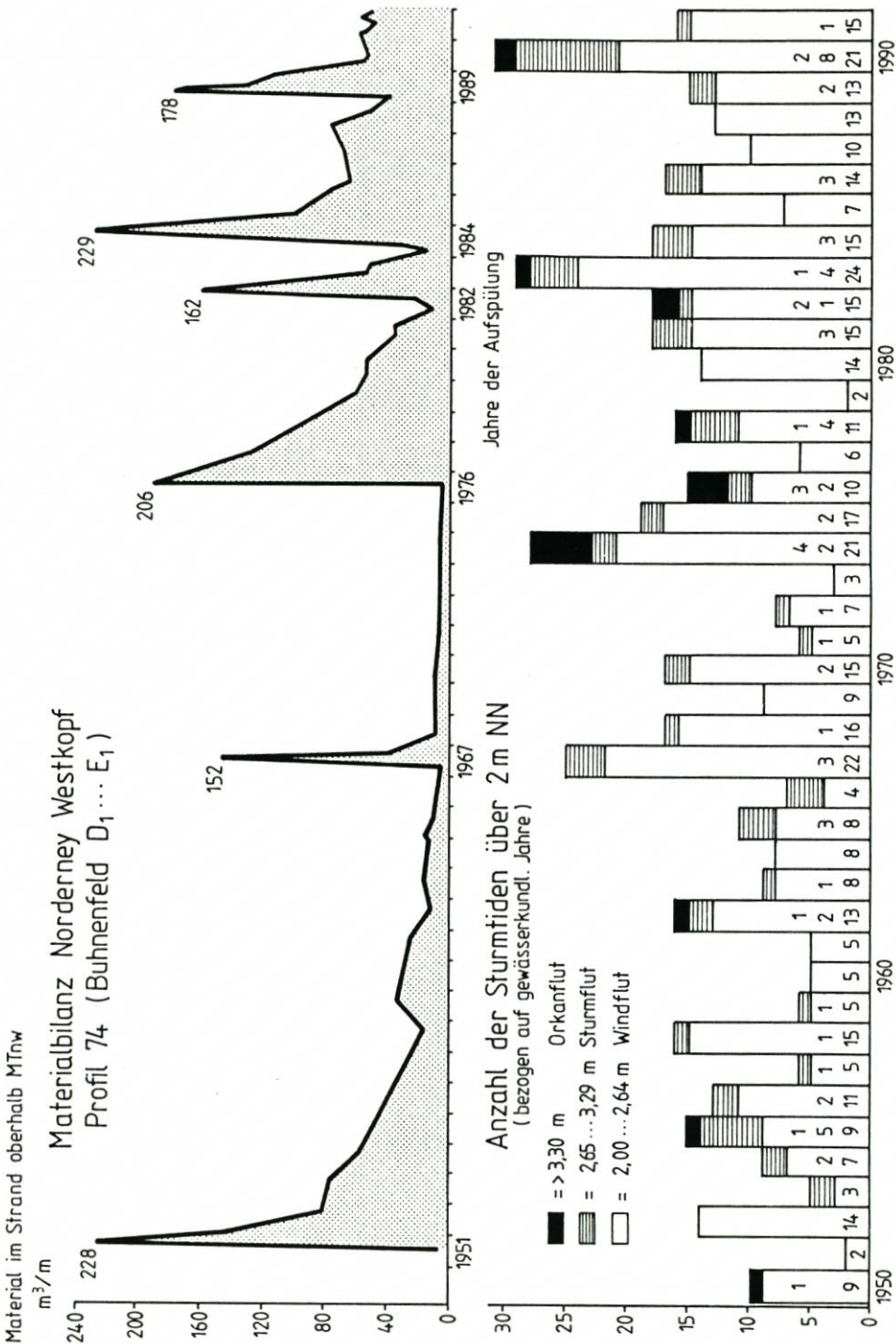


Abb. 2: Massenbilanz im Buhnenfeld D₁-E₁ und Sturmfluthäufigkeit von 1951 bis 1991

4. Durchführung der Strandaufspülung 1989

4.1 Das natürliche Strandprofil für Aufspülkörper

Bei der Untersuchung der Profilentwicklung nach der Strandaufspülung 1984 wurde festgestellt, daß sich das durch Brandungs- und Strömungskräfte erzeugte Küstenquerprofil unter Beibehaltung seiner Form allmählich nach unten verlagert hatte. Diese Profilform stellt den angreifenden Kräften offenbar den größten Widerstand entgegen. Daraus konnte geschlossen werden, daß die Gestaltung des Aufspülprofils 1989 entsprechend dem natürlichen Querprofil zu den geringsten Sandverlusten unmittelbar nach Aufbringen des Aufspülkörpers führen würde (Abb. 3). Profilaufnahmen aus dem Bereich des Vorstrandes lagen nicht in ausreichendem Maße vor, so daß die Betrachtung des natürlichen Querprofils an der MTnw-Linie enden mußte.

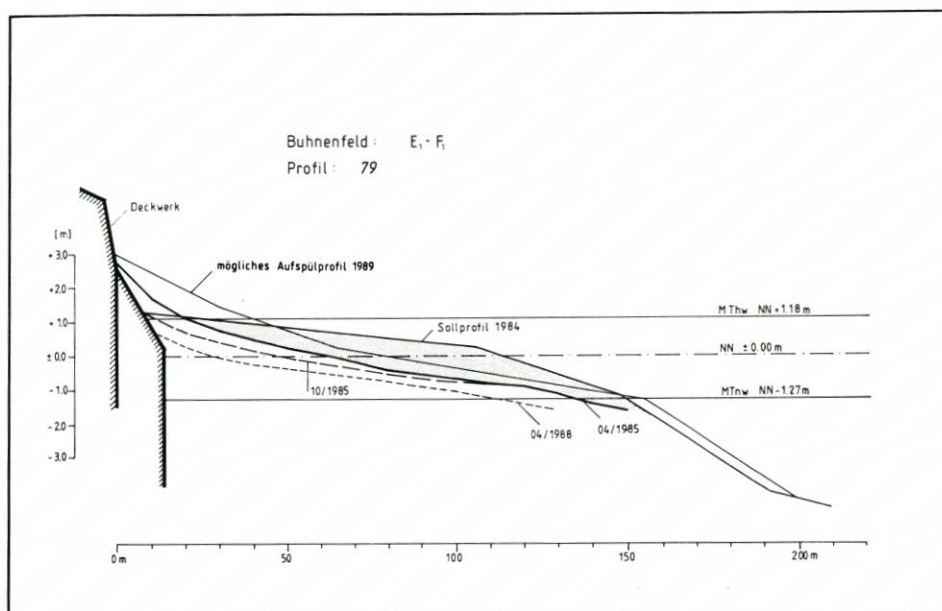


Abb. 3: Entwicklung des Strandprofils 79 am Nordweststrand von 1984 bis 1989

Das natürliche Strand-Querprofil ist am exaktesten durch eine Potenzfunktion zu beschreiben. Die Basis für die Profilentwicklung liefert die von DEAN aus Naturmessungen entwickelte Formel:

$$h = a \cdot y^{2/3}$$

Der Wert h entspricht der Strandhöhe in der Entfernung y vom Profilnullpunkt, und a ist abhängig vom vorgefundenen Korndurchmesser.

Um eine bessere Anpassung an die Norderneyer Verhältnisse zu erzielen, wurde die Exponentialfunktion modifiziert zu:

$$h = a \cdot y^{2/3} + b$$

Die Funktionswerte a und b wurden mit einer Ausgleichsrechnung nach der Methode der

kleinsten Quadrate bestimmt. Die Ermittlung dieser Funktionswerte und die Festlegung des Profil-Nullpunktes hat KOTZBAUER (1990) eingehend dargelegt. Danach ergibt sich für das Strandprofil 79 im Bühnenfeld E1-F1 ein natürliches Strandprofil, das beschrieben werden kann

$$h = -0,097 \cdot y^{2/3} + 1,15 \quad (1)$$

mit MThw-Durchgang = 0 m

Für die praktische Ausführung der Aufspülung wurde das so ermittelte Profil in Teilstrecken mit jeweils gleicher Neigung gegliedert und zwischen MThw und MTnw nur einmal abgestuft von der Neigung 1:30 im oberen Strandbereich zur Neigung 1:60 im mittleren und unteren Strandbereich (s. Abb. 4).

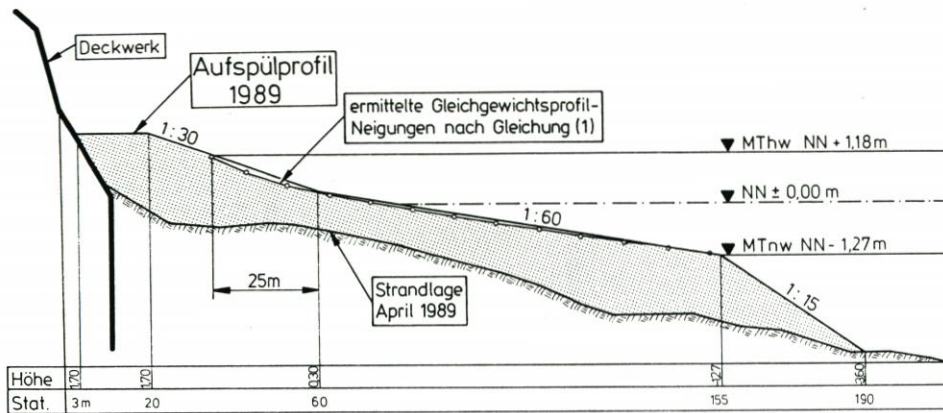


Abb. 4: Natürliches Strandprofil nach der DEAN-Formel am Beispiel Norderney

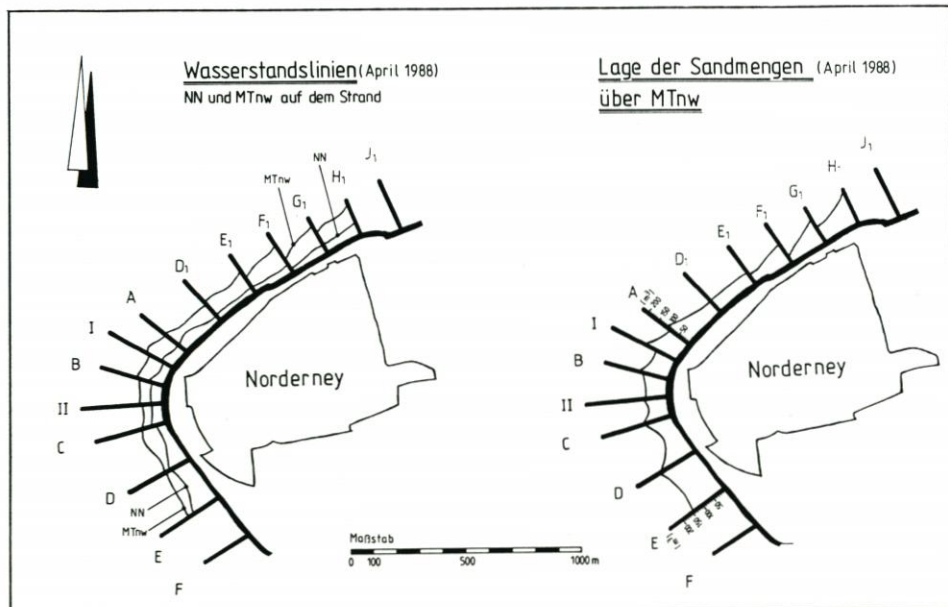


Abb. 5: Strandkonturen und Sandmengen in den Bühnenfeldern im April 1988

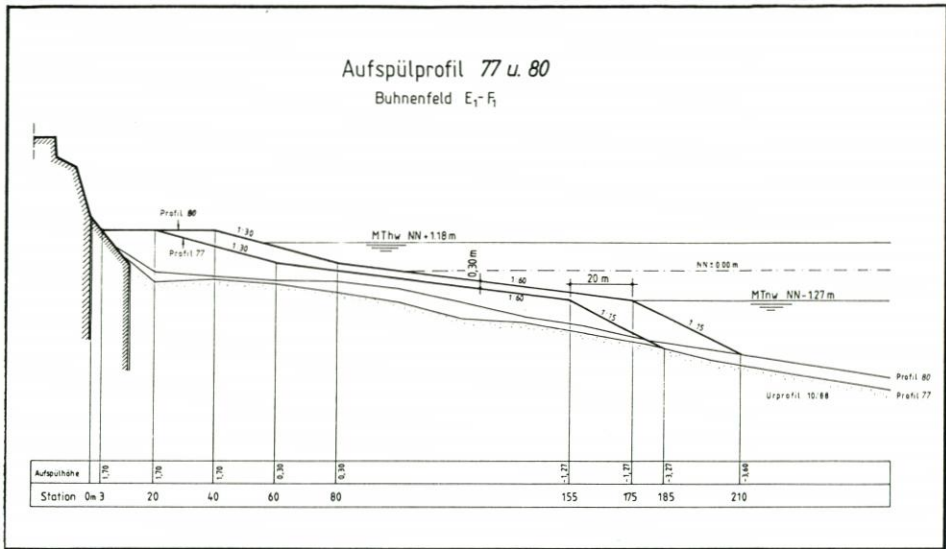


Tabelle 2. Seit 1976 eingesetzte Naßbagger, deren Merkmale und Bauzeiten

Jahr der Ausführung	1976	1982	1984	1989
Naßbagger	„Jokra“ Cutter	„Pirat VI“ Cutter	„Triton“ Cutter	„Pirat VI“ Sauger*)
Verdrängung	~ 2200 m ³	~ 440 m ³	~ 1350 m ³	~ 440 m ³
Tiefgang	2,80 m	1,40 m	2,40 m	1,40 m
Cuttertiefe	26,00 m	16,00 m	20,00 m	16,00 m
Saugleitung	Ø 800 mm	Ø 550 mm	Ø 850 mm	Ø 550 mm
Druckleitung	Ø 750 mm	Ø 500 mm	Ø 800 mm	Ø 500 mm
Pumpenleistung	~ 3200 kW	~ 850 kW	~ 2500 kW	~ 850 kW
Schneidkopfantrieb	~ 590 kW	~ 132 kW	~ 365 kW	nicht benötigt
Spülmenge	500 000 m ³	470 000 m ³	410 000 m ³	447 000 m ^{3**})
Bauzeit gesamt	60 Tage	65 Tage	37 Tage	52 Tage
Spüldauer	20 Tage	31 Tage	13 Tage	21 Tage
Spülleistung pro Tag	~ 25 000 m ³	~ 15 000 m ³	~ 31 000 m ³	~ 20 500 m ³

*) mit Druckwassereinrichtung
 **) einschl. 17 000 m³ gröberen Sand mit Hopper

Um den Einfluß unterschiedlicher Korngrößen des Aufspülmaterials zu erforschen, war der Einbau von Sand mit zwei verschiedenen Korngrößen geplant. Das Bühnfeld C-II sollte mit gröberem Material aufgefüllt werden, während im übrigen ein Feinsand mit $d_{50} \approx 0,2$ mm eingebracht werden sollte.

Während der holozäne Feinsand mit Korndurchmesser von etwa 0,2 mm oberhalb der Geschiebemergelschicht aus der Robbenplate entnommen werden konnte, gab es für die Gewinnung des gröberen Materials zwei Alternativen, und zwar die Entnahme

- aus den tieferen Schichten der Robbenplate im Tiefsaugeverfahren,
- vom Seegrund aus etwa 10 m Tiefe nördlich von Juist-Ost mit einem Hopper mit Schleppkopf.

Die Entnahme des feinsandigen Mittelsandes aus 30 bis 40 m Tiefe aus der Robbenplate im Tiefsaugeverfahren wäre grundsätzlich möglich gewesen. Um das Einbrechen der durchstoßenden Mergelschicht zu verhindern, hätte allerdings mit einer zweiten Pumpe Druckwasser unter die Mergelschicht gepumpt werden müssen. Natürlich ist ein solcher Betrieb wegen des möglichen Verlustes des Saug- bzw. Druckrohres durch Einbrechen der Mergelschicht mit erheblichem Risiko behaftet. Bei einer ausgeschriebenen Menge von 20 000 m³ betrug daher der Einheitspreis mit 25 DM/m³ für diesen gröberen Sand etwa das 10fache der normalen Feinsandaufspülung aus oberflächennahen Schichten.

Im Vergleich dazu konnte das vom Hopper per Schleppkopf aufgenommene und herantransportierte Material für einen Einheitspreis von etwa 7 DM/m³ eingebaut werden. Der eingebrachte gröbere Sand wies allerdings auch lediglich Korngrößen zwischen 0,25 und 0,3 mm und einen erheblichen Muschelbruchanteil auf. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde diese Lösung gewählt. Beim Antransport dieses gröberen Sandes von der Entnahmestelle nördlich Juist-Ost muß der Hopper den Norderneyer Riffbogen mit beschränkter Wassertiefe im Schluchter-Fahrwasser kreuzen. Dieses Fahrwasser weist eine maximale Wassertiefe von 5,5 m bei Tidehochwasser auf. Daher kann nur ein kleiner Hopper mit einem Tiefgang von 3,5 m im beladenen Zustand mit einer Ladekapazität von 815 m³ eingesetzt werden.

Für die Gewinnung des oberflächennahen Feinsandes aus der Robbenplate wurde der stationäre Sauger mit Druckwassereinrichtung gemäß Tab. 2 eingesetzt. Er förderte durch eine

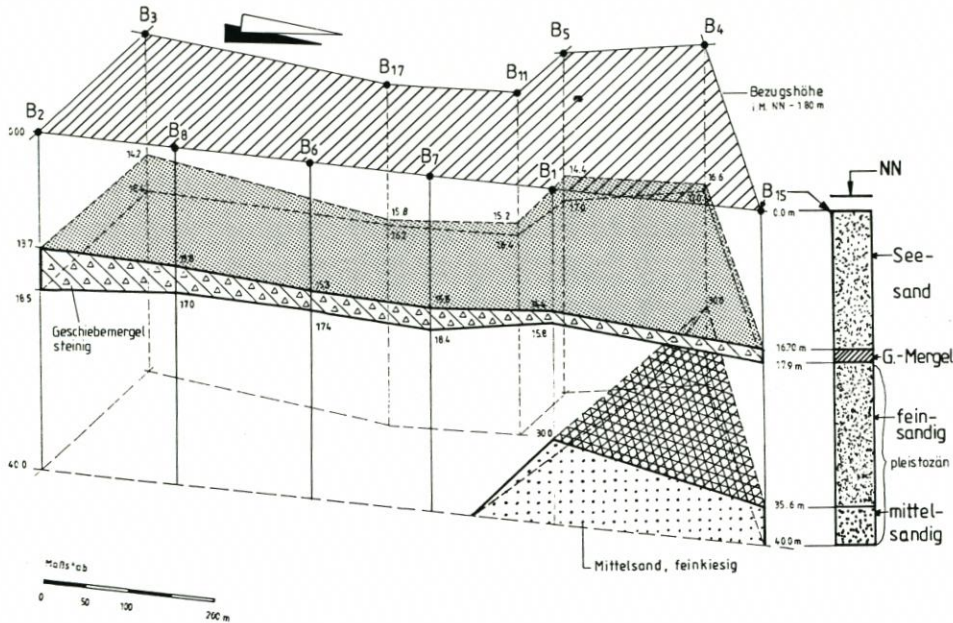


Abb. 8: Schematische Darstellung der Geschiebemergelschicht u. des feinkiesigen Mittelsandvorkommens in der Robbenplate

Spüldruckleitung von 500 mm bei einer tatsächlichen Spüldauer von 21 Tagen $430\,000\text{ m}^3$ Feinsand zur Einbaustelle am Strand. Der mittlere Korndurchmesser des eingespülten Sandes ergab sich zu $d_{50} = 0,17\text{ mm}$.

4.3 Der Aufspülkörper

Im Aufspülbereich ist zwischen zwei sehr unterschiedlichen Strand- und Vorstrandprofilen am Westkopf und am Nordweststrand zu unterscheiden (Abb. 9):

- Am Westkopf fällt der nur etwa 190 m breite Strand mit steiler Böschung zum über 20 m tiefen Seegat ab. Der Inselsockel ist durch die bis zur Seegatsohle bei NN –25 m herunterreichenden Unterwasserbuhnen, wie beispielsweise die Buhne II, gesichert.
- Im Nordweststrandbereich mit dem Bühnenfeld D1-E1, dem Divergenzbereich des Brandungsstroms, fällt der Vorstrand wesentlich flacher ab als unmittelbar am Seegat. Er erreicht aber doch bereits 250 m vor dem Deckwerk die Tiefe von NN –5,0 m und wird nach Nordosten noch flacher.

Der Aufspülkörper wurde mit den in Abschnitt 3 beschriebenen Profilen auf der 1,8 km langen Strandstrecke zwischen den Bühnen D und J1 aufgespült. Von der am Deckwerk verlaufenden Hauptspüleleitung wurden die Bühnenfelder über abzweigende Stichleitungen bis auf das vorgegebene Profil aufgehöhrt und durch Planierraupen profilgemäß mit einer Toleranz von +10 cm für Einzelwerte und von 20 cm bei gleichmäßiger Überschreitung aller Höhenmarken eines Bühnenfeldes hergerichtet. Die vorgegebenen Profile waren bis zur Höhenmarke MTnw festgelegt. Darunter lagerte sich der Sand nach seinem natürlichen Böschungsprofil unter Wasser (EAK'81, Empfehlungen D) mit zunächst etwa 1:15, also mit einem recht steilen Unterwasserprofil, ab.

Lediglich das Bühnenfeld C-II wurde mit $17\,000\text{ m}^3$ größerem Material vom Seegrund

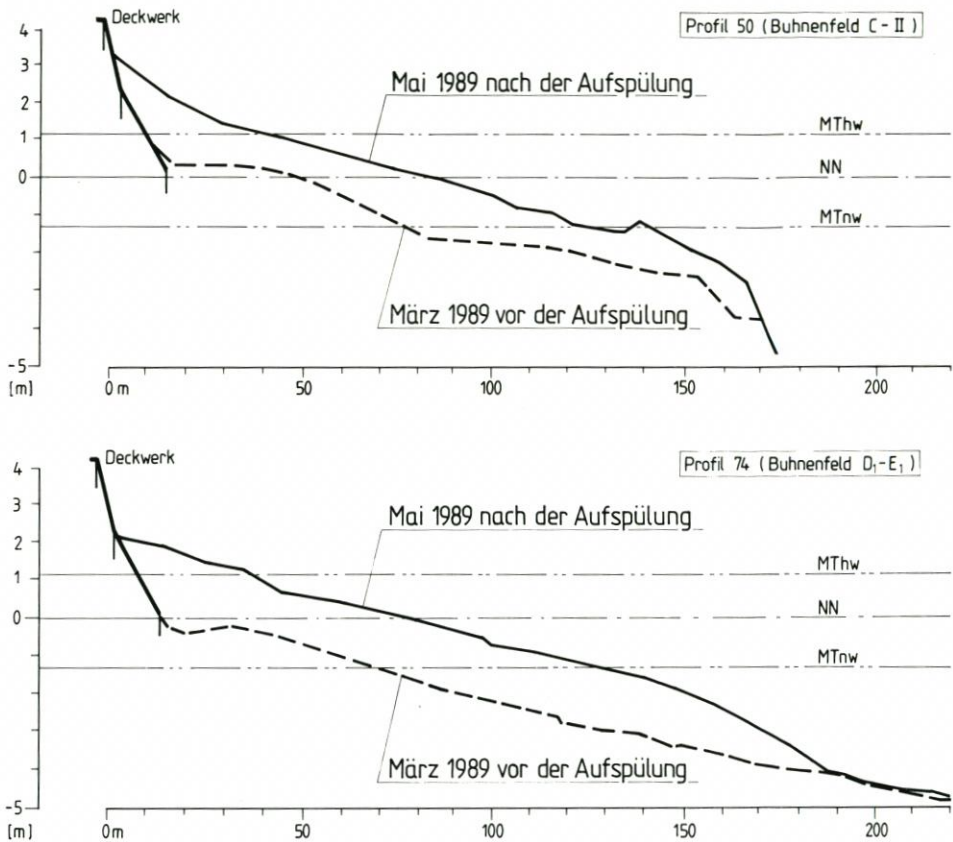


Abb. 9: Norderneyer Strandprofile am Westkopf mit tiefem Seegat und am Nordweststrand vor und nach der Aufspülung 1989

nördlich Juist-Ost aufgefüllt. Dank des risikofreudigen, geschickten Hopperkapitäns konnte der Hopper nach dem Regenbogensystem direkt in das Bühnenfeld entladen werden (Abb. 10). Der Sand wurde durch einen Rohrstutzen mit düsenartiger Öffnung, der nach vorn über den Bug hinausragte, bei Hochwasser auf den trockenfallenden Strand gespült und bei dem jeweils folgenden Tideniedrigwasser mit Raupen strandaufwärts geschoben und profilgemäß eingebaut.

5. Entwicklung der Strandhöhen und -neigungen nach der Aufspülung

5.1 Die Strandentwicklung im Seegatbereich

Der Umlagerungsprozeß verlief mit Ausnahme des mit größerem Sand gefüllten Bühnenfeldes C-II in allen Bühnenfeldern ähnlich. Einer anfänglichen gleichmäßigen Abnahme unter Beibehaltung der Profilform folgte in den von einer außergewöhnlichen Sturmzeitenhäufigkeit geprägten Wintermonaten Januar und Februar 1990 die weitere Ausräumung des Strandkeiles oberhalb der NN-Linie. Das bis November 1989 sehr stabil erscheinende „Grobsandfeld“

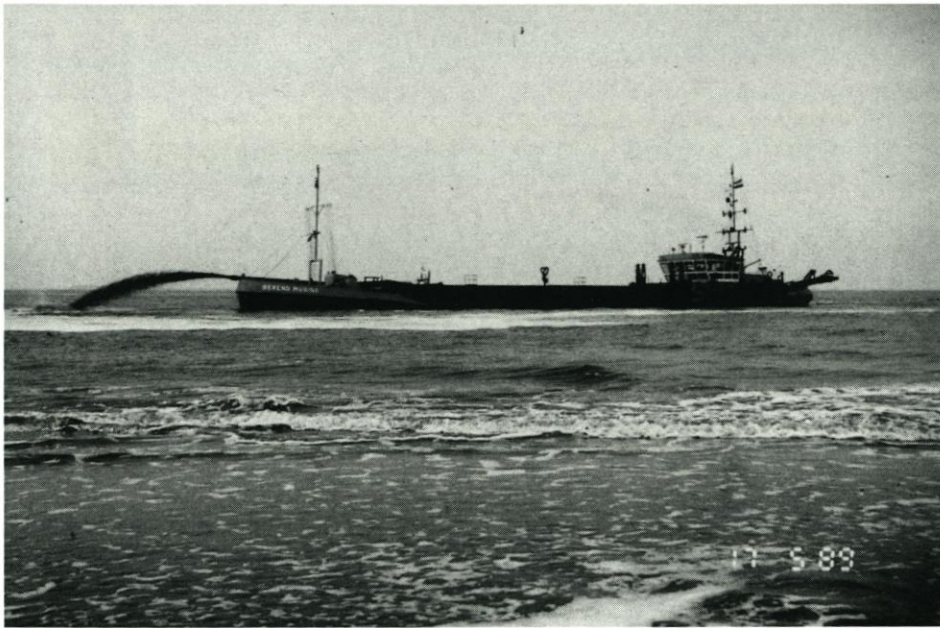


Abb. 10: Hopperbagger im Einsatz mit Entladung nach dem Regenbogensystem

unterlag während der Wintermonate einem dramatischen Massenverlust und präsentierte sich im Mai 1990 in etwa dem gleichen Zustand wie vor der Aufspülung. Dieses Verhalten kann nicht erklärt werden; ggf. ist der hohe Muschelanteil in dem gröberen Material Ursache für die starke Sturmfluterosion. In der Strandhöhenentwicklung des Seegatbereiches zeichnete sich bis zum Dezember 1991 eine zunehmend kleiner werdende Schwankungsbreite der saisonalen Massenzu- und -abnahmen ab. In der Massenbilanz sind von Mai 1990 bis Dezember 1991 nur geringfügige Änderungen festzustellen.

5.2 Die Strandentwicklung am Nordweststrand

Auf diesem Strandabschnitt hielt die Ausräumung des Strandes über den gesamten Beobachtungszeitraum hin an. In den Feldern zwischen Buhne D1 und Buhne H1 war im Dezember 1991 ein so niedriges Strandniveau erreicht, daß eine Wiederholungsaufspülung für das Frühjahr 1992 geplant wurde, um eine akute Bedrohung des Deckwerkes abzuwenden.

Die Abbildungen 11 und 12, die die Strandhöhenentwicklung anhand der Höhenlinien MThw, NN, MTnw, NN -4 m zeigen, lassen deutlich erkennen, daß die Hauptmassenverluste des oberen Strandbereiches eindeutig am Nordweststrand festzustellen sind. Die Linie NN -4 m wandert dagegen zunächst seewärts, was auf eine Aufhöhung des Vorstrandes in dieser Höhenlage hinweist. Bis Ende 1991 liegt sie dann wieder etwa in der alten Position.

Die Massenbilanzen auf Abb.13 zeigen die Massenentwicklung in dem Strandkeil oberhalb der MThw-Linie bzw. oberhalb der NN -5 m-Linie in den drei Bühnenfeldern A-D₁, E₁-F₁ und F₁-G₁ am Nordweststrand. Sie machen deutlich, daß der Strand oberhalb MTnw vom Mai 1989 bis Dezember 1991 stark ausgeräumt wurde, am stärksten im Bühnenfeld F₁-G₁, das am Nordostende dieses Abschnitts liegt und einen flacheren Vorstrand als das

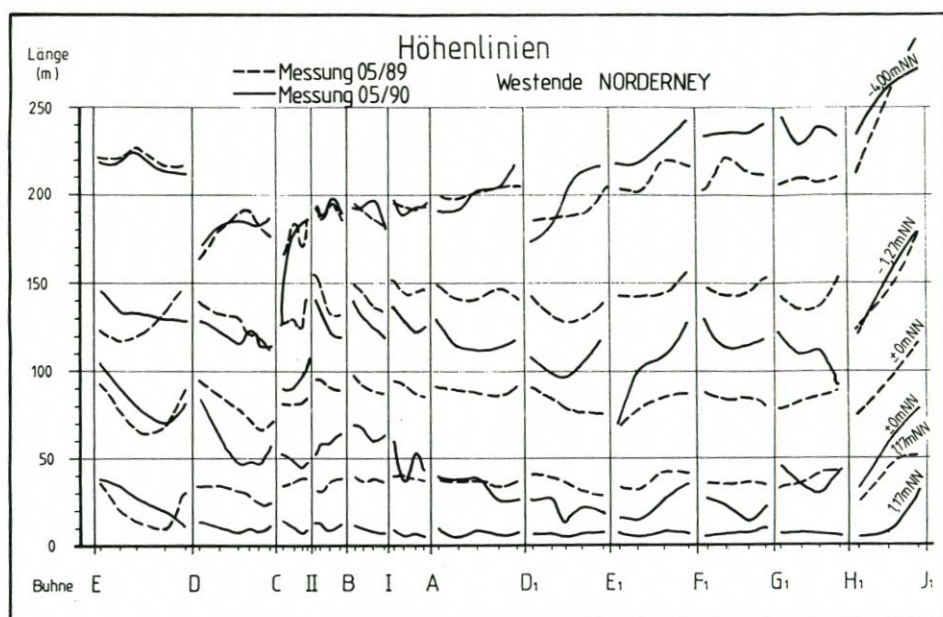


Abb. 11: Strandhöhenentwicklung von Mai 1989 bis Mai 1990

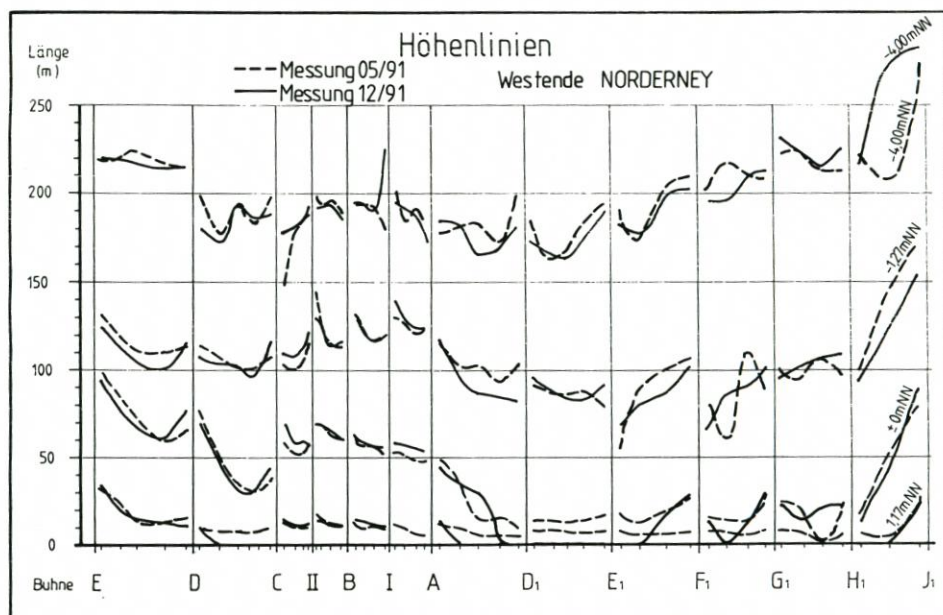


Abb. 12: Strandhöhenentwicklung bis Dezember 1991

Feld A-D₁ aufweist. Die Darstellung des gesamten Strandkeiles bis zur Tiefe von NN -5 m läßt den stärkeren Abfall am steileren Vorstrand im Bühnenfeld A-D₁ deutlich werden.

In diesem Strandabschnitt muß ein gegenüber den benachbarten Strandbereichen erheblich höherer Energieeintrag herrschen. Es ist nicht auszuschließen, daß diese Entwicklung mit

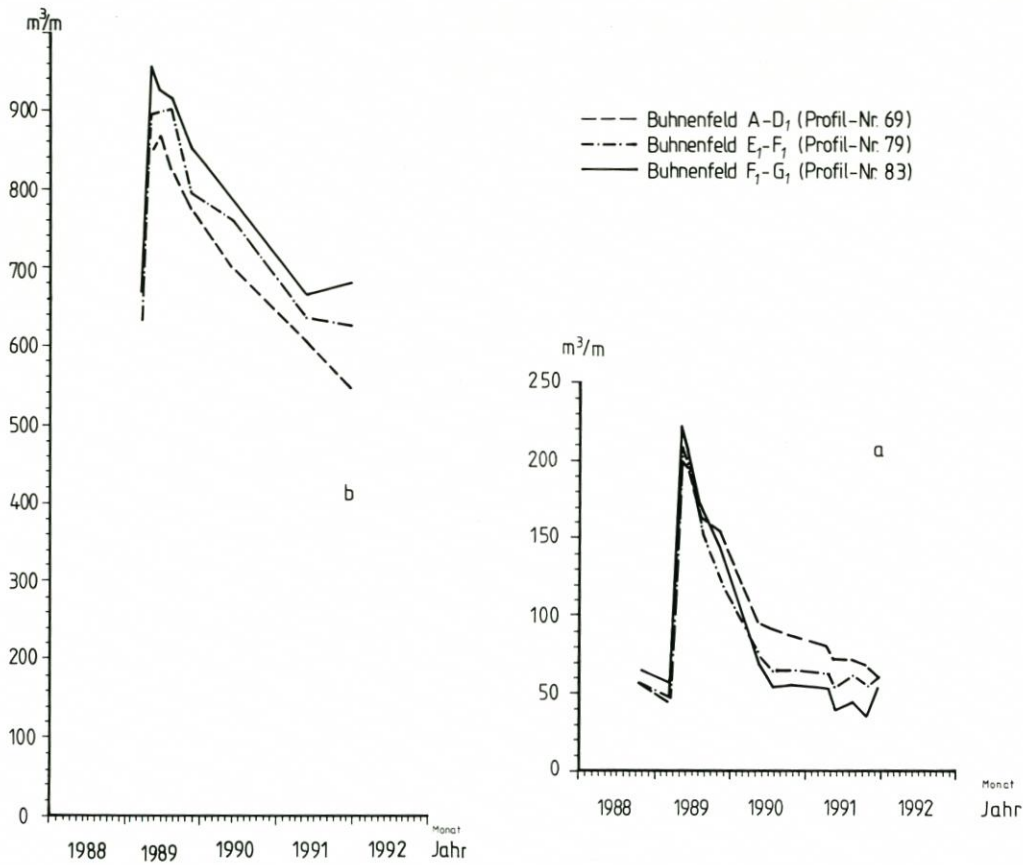


Abb. 13: Sandmassenbilanz im Strandkeil oberhalb MTnw (a) bzw. bis NN -5,00 m (b)

Veränderungen im Riffbogen und mit der beobachteten Nordwestverlagerung der Robbenplate zusammenhängt.

Diese auch in Abb. 14 dargestellte Entwicklung der Vorstrandneigung macht deutlich, daß die Aufspülung des nassen Strandes oberhalb MTnw dazu führt, daß sich unterhalb MTnw zunächst die natürliche Aufspülneigung gemäß EAK 1981, Empfehlungen D, Abschn. 3.1.2 einstellt und durch Strömung und Seegang in kurzer Zeit abgeflacht wird auf etwa 1:25. Bereits ein Jahr nach der Aufspülung 1989 hatte der Vorstrand sich wieder abgeflacht auf das ursprüngliche Maß von etwa 1:45. Im Verlaufe dieses Umformungsprozesses waren zunächst in größerem Maße Massen aus dem Strand oberhalb MTnw in diese Vorstrandzone verfrachtet worden und hatten diesen aufgehöhht und abgeflacht.

Dieses Resultat führt zu der Konsequenz, daß der Norderneyer Nordweststrand bei künftigen Aufspülungen im Vorstrandbereich mit aufgespült werden sollte, um in diesem Bereich in etwa die natürliche Hangneigung zu behalten. Dadurch dürfte dann die starke Strandabnahme im oberen Strandbereich unmittelbar nach einer Aufspülung auch verringert werden können. Daraus ist zu folgern, daß die in Abschn. 4 beschriebene Herstellung eines natürlichen Strandprofils oberhalb MTnw auch auf den Vorstrandbereich ausgedehnt werden sollte. Die bautechnischen Möglichkeiten zur Erzielung eines flachen Vorstrandes werden in Abschn. 9 dargelegt.

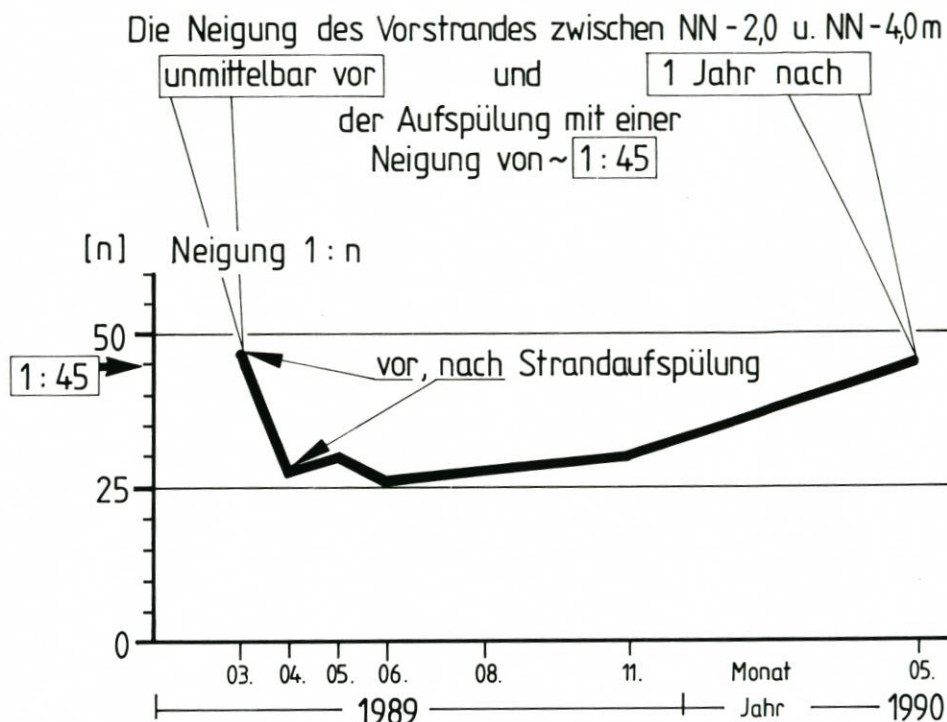


Abb. 14: Entwicklung der Hangneigung im Bereich NN -2 m bis NN -4 m

6. Wiederverfüllung der Sandentnahmestelle auf der Robbenplate

Die Sandentnahme aus der Robbenplate wurde am 3. Mai 1989 beendet. Mitte Mai '89 erfolgte die erste Kontrollpeilung des rd. 350 m langen, 200 m breiten und ca. 10 m tiefen Entnahmeloches. Die geringe Zeitspanne zwischen dem Ende der Baggerungen und der Vermessung genügte bereits, um einen Teil des während der Spülarbeiten noch tiefer reichenden Entnahmetrichters wieder zu verfüllen, so daß kein direkter Zusammenhang zwischen dem entnommenen Sandvolumen und dem Mitte Mai ermittelten Rauminhalt des Baggerloches herstellbar ist. Die tatsächliche Tiefe des Entnahmetrichters kann jedoch nicht mit der maximalen Baggertiefe von rd. 13 m unter Geländeoberkante gleichgesetzt werden, da während des Saugvorganges steilere Hangneigungen vorliegen, auf denen das Sandmaterial zur Spitze des Trichters rutscht und diesen solange wieder zusetzt, bis ein Gleichgewichtszustand mit natürlichen Hangneigungen erreicht ist. Darüber hinaus wurden ständig Sedimente durch Tideströmung und Seegang aus der Oberflächenschicht der Robbenplate in das Loch transportiert, wie die nachfolgenden Abbildungen verdeutlichen.

Die erste Kontrollpeilung gibt somit bereits einen teilgefüllten Zustand der Sandentnahmestelle „Robbenplate“ wieder. Ein Rauminhalt von 250 000 m³ war noch verblieben, bezogen auf das Höhenniveau der Peilung vom Mai 1990 mit bereits vollständiger Verfüllung. Zwei weitere Peilungen von Anfang August und Mitte November 1989 ergaben rd. 130 000 m³ bzw. rd. 80 000 m³ Restvolumen. Die Abb. 15 und 16 geben dieser Entwicklung in den genannten Etappen anhand von Tiefenlinienplänen bzw. Längs- und Querprofil wieder.

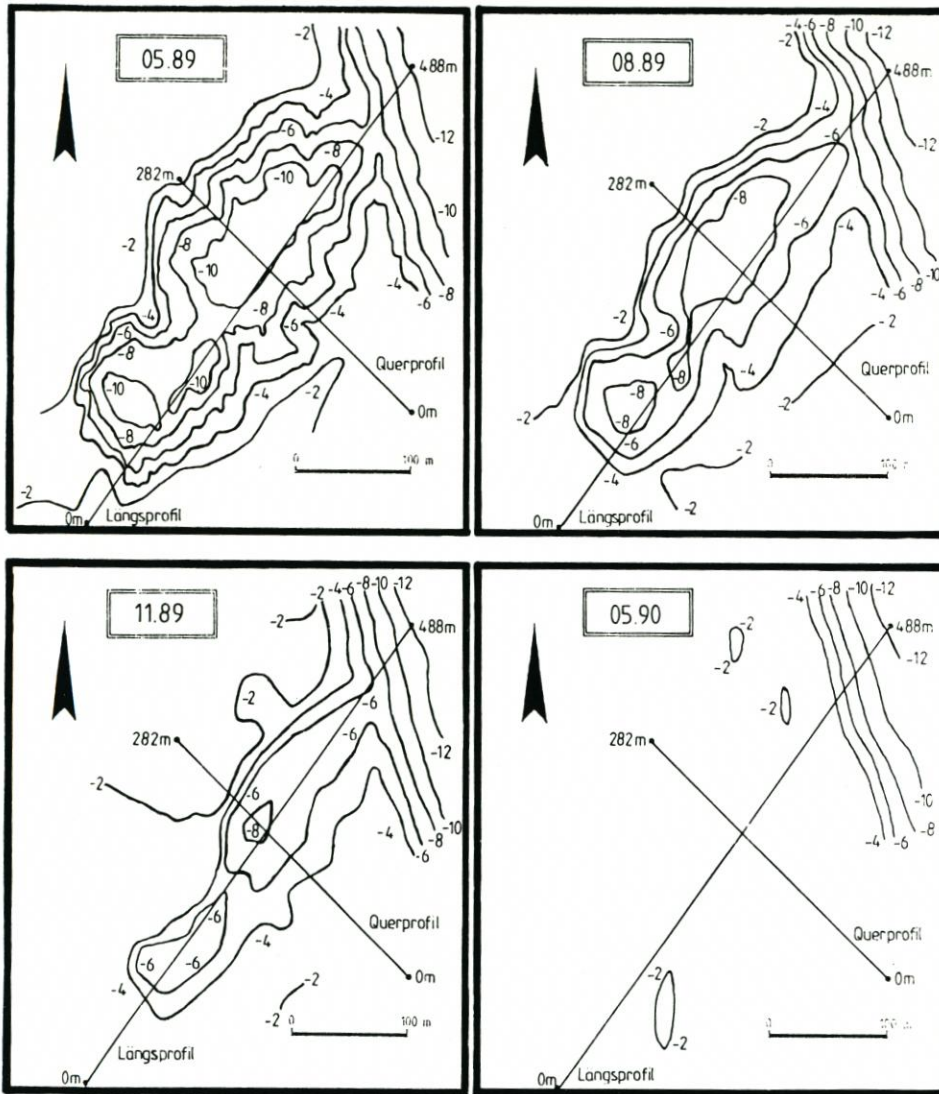


Abb. 15: Tiefenlinienpläne der Sandentnahmestelle Robbenplate zu den 4 Vermessungszeitpunkten mit Profilkennzeichnung

Aus ihnen ist auch zu ersehen, daß der Entnahmetrichter im wesentlichen aus nordwestlicher Richtung verfüllt wurde, also aus der Richtung des überwiegend anlaufenden Seegangs und des einlaufenden Flutstromes.

Der zeitliche Ablauf der Wiederverfüllung in Abb. 17 gibt im linken Diagramm das Restvolumen des Baggerloches über die Zeit vom 350 Tagen wieder und zeigt rechts die Abbildung der Schnittfläche im Längsprofil über die Zeit. Diese Diagramme belegen, daß die Wiederverfüllung nach etwa einem Jahr abgeschlossen ist. Mangels einer weiteren Vermessung im Februar/März 1990 kann nicht nachgewiesen werden, daß das Baggerloch bereits nach den schweren Sturmflutenketten im Januar bzw. im Februar 1990 völlig verfüllt war und daß die

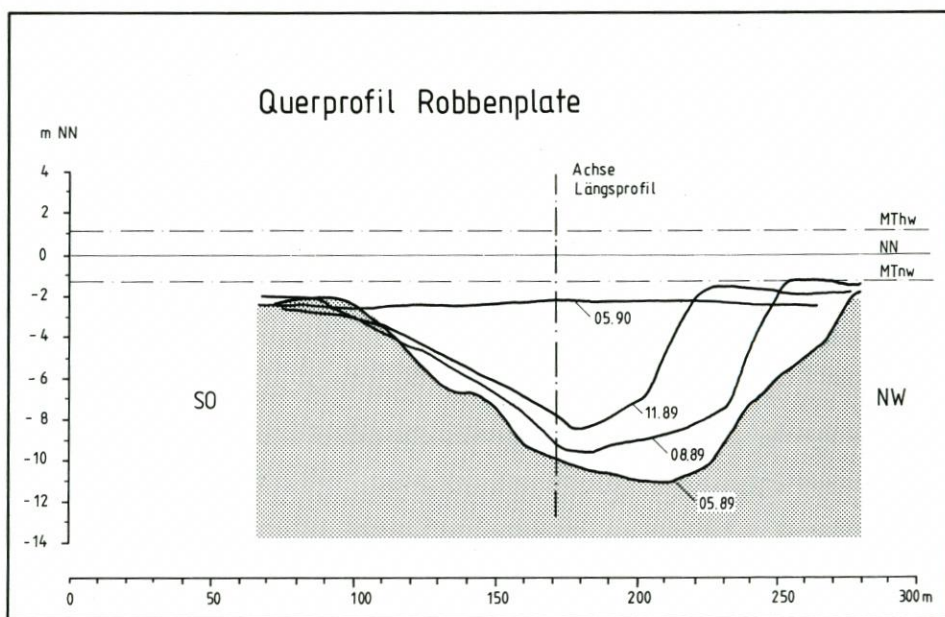
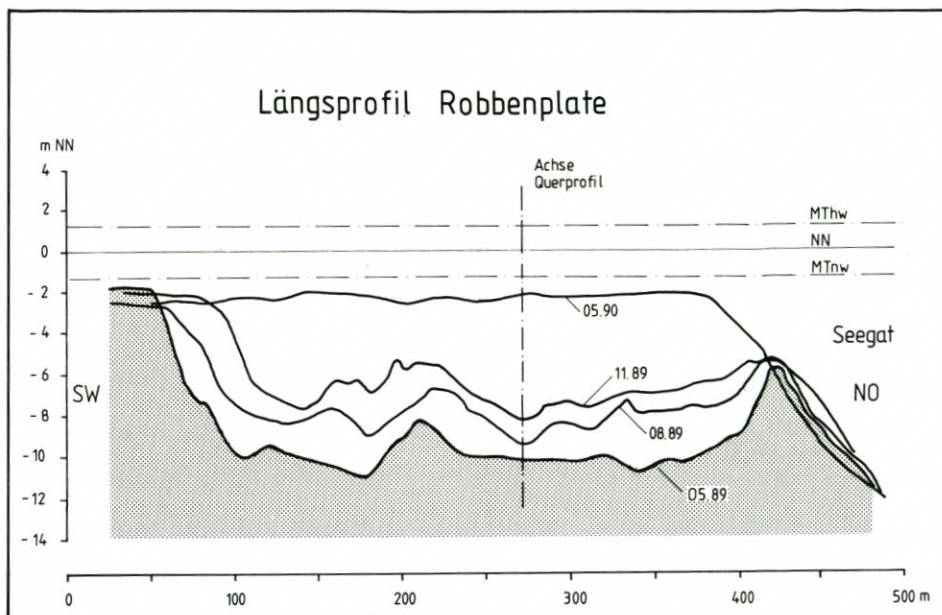


Abb. 16: Zeitliche Entwicklung des Längsprofils (oben) und des Querprofils (unten) der Entnahmestelle Robbenplate

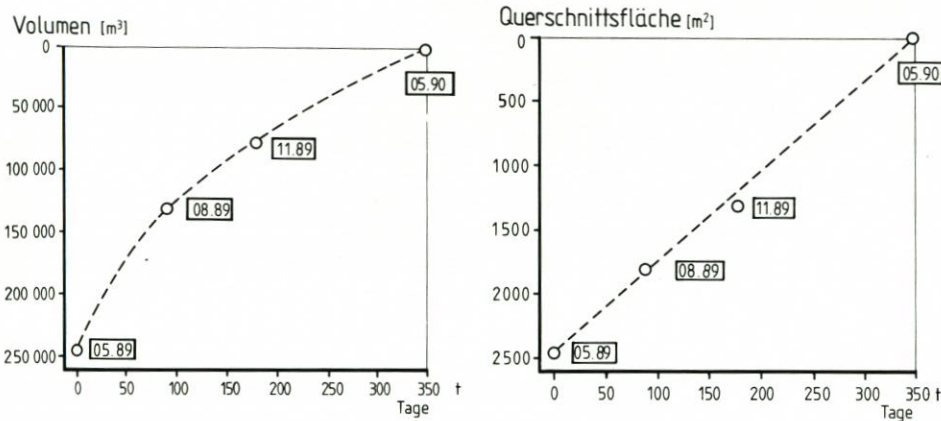


Abb. 17: Entwicklung von Volumen und Querschnitt der Entnahme

Verfüllungsrate in diesen Wintermonaten vermutlich höher war als aus Abb. 17 zu schließen ist. Aber es ist ablesbar, daß nach einem halben Jahr bereits $\frac{2}{3}$ des Restvolumens von Mitte Mai '89 wieder verfüllt ist. Der beträchtliche Sandeintrieb von 170 000 m³ in den 350 m langen Entnahmetrichter während des Sommerhalbjahres verdeutlicht die Größenordnung der Sedimentbewegung durch Tideströmung und Brandung auf derartigen Platen.

Aus diesem Vorgang kann auch geschlossen werden, daß der Entnahmetrichter ausschließlich mit feinem Sediment aus der Oberfläche der Platen verfüllt worden ist.

7. Häufige Sandzugaben durch eine stationäre Spüleleitung

7.1 Die Grundidee und mögliche Sandentnahmegebiete

Es ist bereits mehrfach erörtert worden, ob nicht eine stationäre Spüleleitung den Erfordernissen des Inselschutzes durch eine ständig mögliche partielle Sandzugabe am ehesten Genüge leisten könnte. Nach Einschätzung der Arbeitsgruppe Norderney des Küstenausschusses Nord- und Ostsee ist ein Jahresbedarf von etwa 90 000 m³ Sand zu ergänzen. KRAMER (1959) schlägt aufgrund der Erfahrungen nach der ersten Aufspülung vor, jährlich etwa 80 000 m³ nachzuspülen. Diese Idee bietet eine Vielzahl von Vorteilen. Es wäre möglich,

- die Strandhöhe langfristig auf einem relativ niedrigen Niveau zu belassen, ohne den Bestand der bestehenden Deckwerke zu gefährden,
- nach Sturmfluten den Strand gezielt dort aufzuspülen, wo die größten Verluste registriert werden, und
- durch eine häufigere Einspeisung geringer Sandmengen die Anfangsverluste zu verringern.

Vor Verwirklichung dieser Idee sind die technischen und wirtschaftlichen Aspekte abzuwägen.

Soll eine stationäre Spüleinrichtung geschaffen werden, so muß zunächst die Frage der Sandentnahmestelle geklärt werden. Dafür kommen in Betracht:

- a) die zwischen den Inseln Juist und Norderney gelegene Robbenplate, die bei den Strandaufspülungen seit 1976 zur Sandentnahme diente, und
- b) ein Strandabschnitt östlich des Platananlandungsbereichs, also östlich des Strandbades „Weiße Düne“.

Zu a):

Die Robbenplate ist auch in Zukunft als geeignetes Sandentnahmegebiet einzustufen (s. Abschn. 4.2). Es wäre zu erwägen, das Seegat mit einem Dauerdüker zu durchqueren. Ein Risiko ist allerdings bei der Verankerung und dem Wiederauffinden des freien Endes auf der Plate zu sehen. Die jeweils am Deckwerksfuß verlaufende Spülleitung ist für jede Aufspülung mit Schiebern und Abzweigrohren neu zu verlegen, da sie dort nicht dauerhaft eingebaut werden kann. Auch die Spülleitung auf der Robbenplate vom Cutter zum Düker müßte für jede Aufspülung neu verlegt werden, da die Sturmflutbrandung und die Umlagerungen auf der Plate ein hohes Risiko für den Leitungsbestand bilden. Aufgrund der Verschiebungen des Platenrandes und der in Sturmfluten besonders hohen Strömungen im Seegat ist auch der Bestand des Dauerdükers nicht absolut sicher.

Zu b):

Die 1959 von KRAMER vorgeschlagene Sandentnahme aus dem Strandabschnitt östlich der „Weißen Düne“ wäre aufgrund der dort vorgefundenen Sandkörnungen ebenfalls geeignet. Zu bedenken ist:

- Der Sand muß von einem Cutter aus dem Unterwasserhang nördlich des Strandes aufgenommen und über eine Schwimm- und Dükerleitung zu einer entlang der Randdüne verlaufenden Dauerleitung gepumpt werden. In dieser seegangsexponierten Lage können sich mittlere Cutter nur bei geringem Seegang aufhalten. Bei aufkommendem stärkeren Wind muß der Cutter durch das Fahrwasser mit geringer Tiefe im Norderneyer Riffbogen zum Hafen geschleppt werden – ein weiter und schwieriger Rückzugsweg. Der Einsatz eines großen Cutters kommt wegen der geringen Spülmassen ohnehin nicht in Betracht.
- Die regelmäßig wiederkehrende Sandentnahme in diesem Bereich in einer Größenordnung von 50 000 bis 80 000 m³ je Jahr ist zunächst auf ihre langfristige Wirkung zu untersuchen. Ein erheblicher Teil des Sandes wird durch den Küstenlängstransport vom Nordweststrand aus wieder in diesen Bereich zurückgeführt. Nach ERCHINGER (1986) muß dabei mit einer Wandergeschwindigkeit von rd. 1 km/Jahr gerechnet werden, so daß er erst nach 6 bis 8 Jahren wieder im Entnahmegebiet eintrifft. Auch die Platananlandung geschieht nicht regelmäßig. Die ständige Sandentnahme kann somit zu Sandmangel im Entnahmegebiet und östlich davon führen sowie Strand- und Dünenabbrüche verursachen.
- Die Spülentfernung zwischen der Entnahme- und der Einbaustelle am Westkopf beträgt bis zu 9 km. Je nach Maschinenausstattung des Cutters sind für das Spülen ein oder zwei Zwischenpumpstationen erforderlich.
- Die Dauerrohrleitung muß entweder an der Binnenseite der Randdünen oder am Strand in der Nähe des Dünenfußes verlegt werden. Die Verlegung in dem kopierten Dünengelände scheidet aus Gründen des Dünen- und Naturschutzes aus. Bei der Verlegung in Dünenfußnähe muß eine große Zahl von Buhnen gekreuzt werden – ein erheblicher baulicher Aufwand. Die zugehörige(n) Zwischenpumpstation(en) müssen sturmflutsicher an der Binnenseite der Randdüne eingerichtet werden. Sie müssen dort mit Kraftstoff versorgt werden können und erfordern somit eine feste Wegeanbindung.
- Der Cutterbagger und die Zwischenpumpstation(en) werden jeweils in der Nähe von belebten Badestränden arbeiten. Die Maschinengeräusche und bei bestimmten Windrichtungen auch die Abgase werden im belebten Staatsbad Norderney als lästige Störung empfunden werden.

Die hier aufgeführten Nachteile und Schwierigkeiten bei einer Sandentnahme östlich der „Weißen Düne“ lassen dieses Entnahmegebiet als ungeeignet erscheinen. Es bleibt folglich bei der seit 1976 üblichen Sandentnahme aus der Robbenplate, nach den Bodenaufschlüssen von 1990 bevorzugt aus dem Westteil der Robbenplate.

7.2 Aufspülkörper und Aufspülintervall

Seit 1976 ist eine Wiederholungsaufspülung jeweils durchgeführt worden, wenn im Nordweststrandbereich der Spülkörper bis auf einen Rest von etwa $50 \text{ m}^3/\text{m}$ (Mindestprofil) im Strandkeil oberhalb von MTnw abgetragen worden war. Die zuvor übliche weitergehende Strandabnahme hatte in schweren Sturmfluten wie 1962, 1973 und 1976 jeweils zu erheblichen Schäden am Deckwerk und zu Wassereinbruch über das Deckwerk in den Ort geführt. Das Mindestsandvolumen von $50 \text{ m}^3/\text{m}$ ist für die Fußsicherung der Schutzwerke und die Siche-

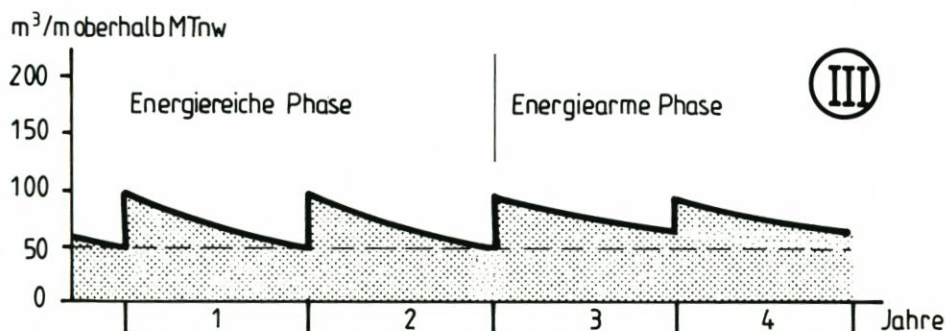
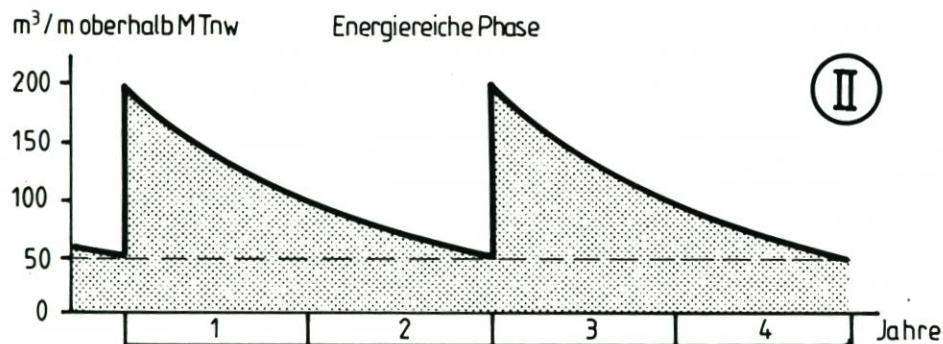
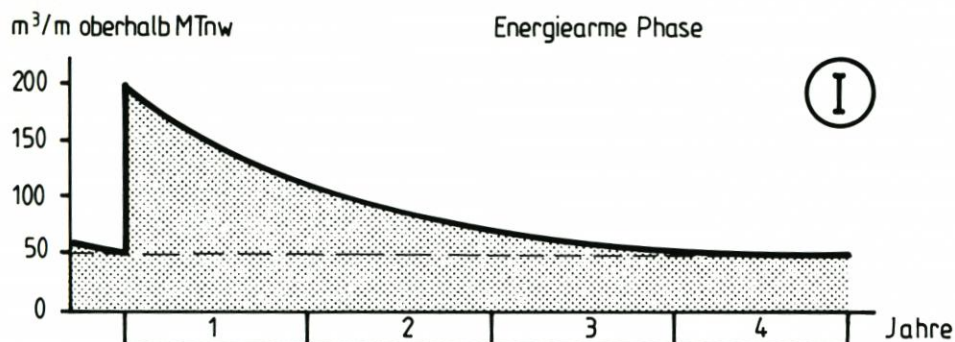


Abb. 18: Sandmassenabtrag am Nordweststrand bei unterschiedlichem Ausgangsvolumen für energiearme und -reiche Zeiträume von 1 bis 4 Jahren – Prinzipskizze –

rung des über 130 Jahre alten Deckwerks durch Begrenzung der Seegangsbelastung unbedingt erforderlich.

In den Aufspülungen von 1976 bis 1989 sind jeweils 400 000–500 000 m³ auf rd. 2 km Strandstrecke eingebaut worden. Das Aufspülintervall bis zur nächsten Maßnahme betrug zwischen 2 und 6 Jahren und war vor allem von der Energiebelastung in Sturmfluten abhängig (s. Abb. 2). Nach der Aufspülung 1982 betrug das Wiederholungsintervall lediglich 2 Jahre, da die Sturmfluthäufung 1983 zu erheblichem Strandabtrag führte. Nach 1984 verstrich ein Intervall von 5 Jahren mit geringer Sturmfluttätigkeit bis zur Aufspülung 1989. Die Volumenabnahme über die Zeit kann für diese beiden Fälle als für eine energiereiche (1982–1984) und eine energiearme Phase (1984–1989) unterschieden werden. Sie liegen den Beispielen der Abb. 18 zugrunde. Die Beispiele umfassen einen Zeitraum von 4 Jahren und beinhalten Wiederholungsintervalle von 4, 2 oder 1 Jahr für energiereiche und -arme Phasen. Da die Sturmflutentwicklung eines Jahres nicht vorhergesehen werden kann, muß das aufzufüllende Sandvolumen für eine energiereiche Phase ausreichen. Abb. 18 läßt erkennen, daß bei 4jährigem Intervall (energiearm) (Beispiel I) und 2jährigem (energiereich) (Beispiel II) ein Spülkörper von 150 m³/m und bei einjährigem Intervall (energiereich) (Beispiel III) nur von 50 m³/m oberhalb des Mindestprofils als Ausgangsmasse erforderlich sind.

Tabelle 3. Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Einzelaufspülmaßnahmen und Maßnahmen mit jährlicher Auffüllung und stationärer Dükerleitung

Lösung	Aufspülstrecke Km	Aufspülintervall Jahre	Aufspülvolumen			BE + BR		Kosten Spülbetr. DM	Gesamt- kosten DM
			über MTnw m ³ /m	unter m ³ /m	gesamt m ³	mit Düker DM	ohne DM		
A	2	2	150	50	400 000	480 000		960 000	1 440 000
B	2	1	50	15	130 000	560 000		455 000	1 015 000
	2	1	50	15	130 000		330 000	455 000	785 000

7.3 Kostenvergleich

Der Kostenvergleich zwischen dem bisherigen Verfahren (Lösung A) und der alljährlichen Sandergänzung durch eine geringe Sandmenge mit Verbleiben des Dükers im Seeegat (Lösung B) ergibt sich aus Tab. 3. Verglichen werden die Jahre 1 und 2 der Beispiele II und III in Abb. 18. Das Ergebnis mit Kosten von 1,44 Mio. DM für Lösung A und 1,8 Mio. DM für Lösung B macht die wirtschaftliche Überlegenheit des bisherigen Verfahrens deutlich. In Anbetracht der geringen Sandmengen, des verbleibenden umfangreichen Spülleitungsbaus sowie des jeweiligen Antransportes und der Vorarbeiten des Cutters sind die Festkosten je Maßnahme relativ hoch.

Die Lebensdauer des Dükers ist für eine längerfristige Betrachtung noch bedeutsam. Nach hiesigen Erfahrungen mit einem normalen St-37-Rohrdüker dürfte der Düker nach 500 bis 800 000 m³ Materialdurchgang nicht mehr ausreichend sicher sein. Der im Vergleich der Tab. 3 unter B aufgeführte Düker wird voraussichtlich noch für ein paar weitere Jahresspülmengen halten, so daß sich der Kostenvergleich noch etwas zugunsten der Lösung B verändert. Aber selbst bei sich einstellender Kostengleichheit ist noch zu werten,
– daß ein erhebliches Risiko für den Bestand des das tiefe Seegat kreuzenden Dükers besteht,

weil dieser 600 m lange Düker teilweise freispülen und abknicken könnte, wenn sich die Plate verlagert; das freigespülte Dükerende könnte sogar als Unterwasserhindernis zu einer Gefährdung der Schifffahrt führen;

- daß die in jedem Frühjahr durchzuführende Aufspülung eine erhebliche Störung mit sich bringt, und
- daß die relativ geringen Aufspülmengen auch nur eine geringere Sandversorgung für die unterstrom folgenden Strände mit sich bringen würde.

Das Kostenverhältnis und die Wertung des Vergleichs sprechen daher eindeutig für die Beibehaltung der bisherigen Aufspülmethode durch Einzelmaßnahmen in dem bisherigen Umfang (s. Tab. 1).

8. Der äolische Sandtransport

Dem äolischen Sandtransport kommt vor allem für die Sandbewegungen auf dem trockenen Strand, u. a. im Zusammenhang mit der Dünenbildung, eine erhebliche Bedeutung zu. Über die dabei in Abhängigkeit von Windrichtung und -stärke transportierten Mengen liegen bisher nur wenige Messungen vor, u. a. von GISZAS (1970) und ZANKE (1982). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde auch dieser Frage nachgegangen, erste Ergebnisse dazu liegen vor. Die Untersuchungen werden allerdings in dem nachfolgenden Projekt ab Januar 1992 fortgesetzt. Die Ergebnisse sollen nach Abschluß des neuen Projektes veröffentlicht werden.

9. Ein Ergebnis der Untersuchungen: Strandaufspülung 1992 einschl. Vorstrandaufhöhung durch Sandhöfte

Die Erörterungen in der Projektgruppe haben ergeben, daß die nächste Strandaufspülung auch die Aufhöhung des Vorstrandes mit einbeziehen sollte. Das anzustrebende Strandprofil wurde aufgrund der beschriebenen Untersuchungsergebnisse nach Abb. 19 entwickelt. Da eine flächenhafte Aufspülung im ständigen Unterwasserbereich nicht ohne besonderen Aufwand möglich ist, kann der für die Vorstrandaufhöhung notwendige Sand in Form von Sandhöften eingebracht werden. Strömung und Brandung werden diese Sandkörper seitlich verteilen und über eine zu erforschende Zeit ein flächenhaftes Unterwasserprofil herstellen.

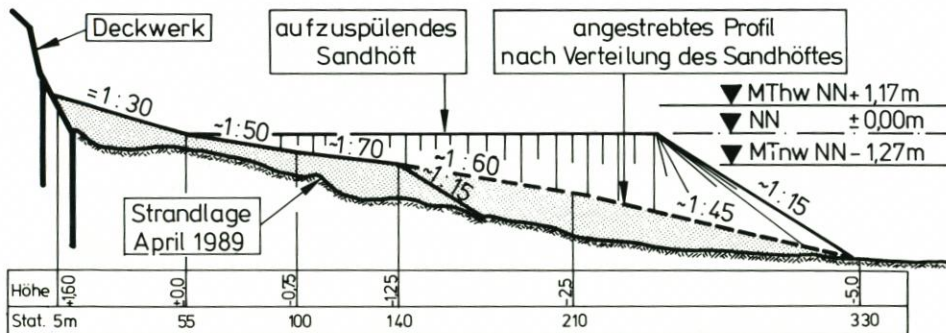


Abb. 19: Regelprofil für die Strandaufspülung 1992 Norderney mit flach geneigtem Vorstrand nach natürlicher Umlagerung von auf den Vorstrand aufgespülten Sandhöften

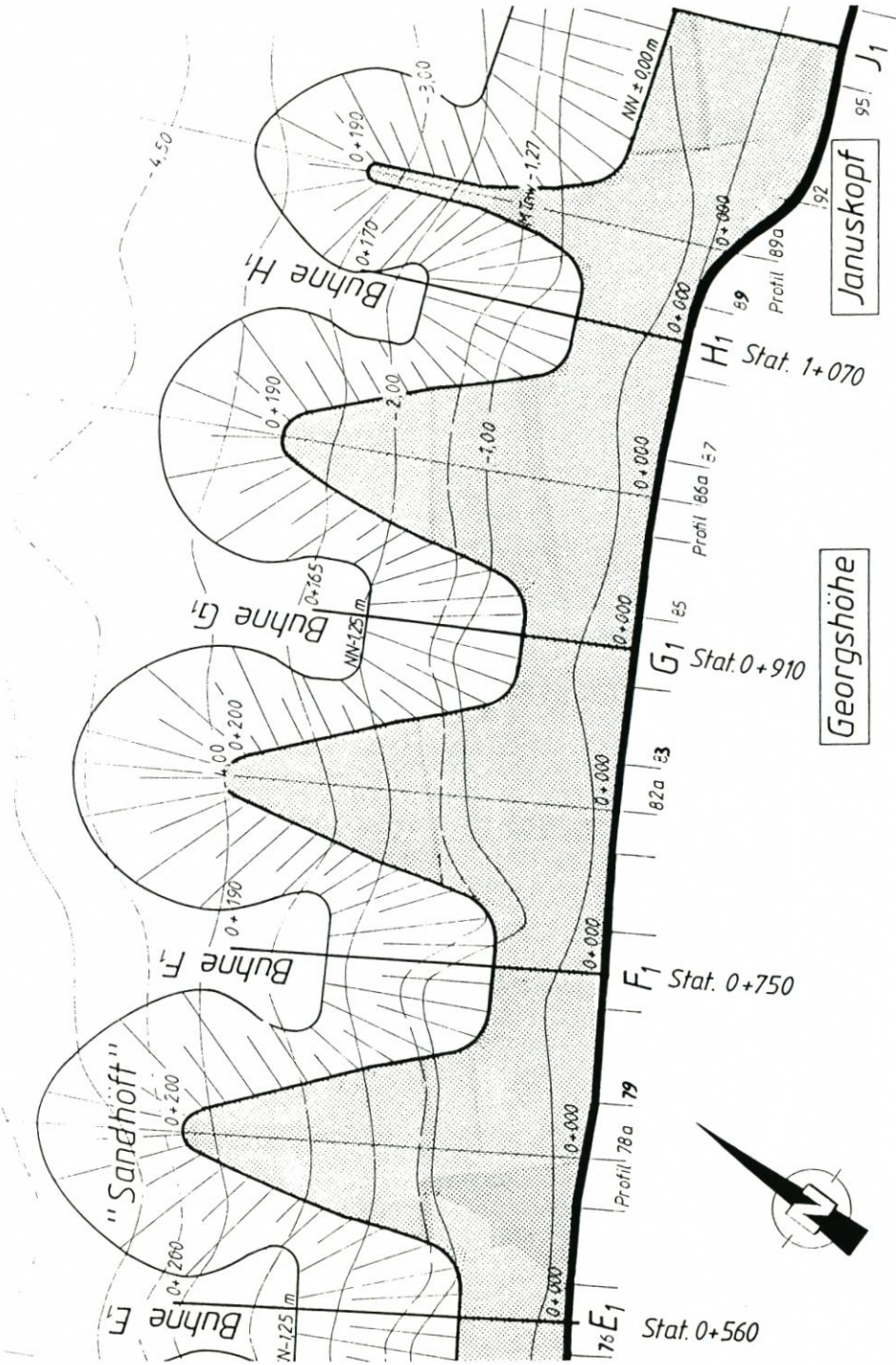


Abb. 20: Geplante Sandhöfte Norderney 1992 in der Draufsicht

Bei der Bilanzierung der Sandmassen des Strandes wird die bisherige Betrachtung bis zur MTnw-Linie aufgegeben werden müssen, da ja bewußt der Vorstrand bis NN -5 m mit aufgefüllt werden soll und der bis dort sich ablagernde bzw. eingebrachte Sand nicht als „Verlust“ bezeichnet werden kann.

Als im Frühjahr 1992 das Strandniveau so niedrig lag, daß eine erneute Sicherungsmaßnahme erforderlich wurde, reifte der Entschluß, Strand und Vorstrand aufzuspülen. Zur Aufhöhung des Vorstrandes sollten Sandhöfte bis auf den Vorstrand vorgespült werden (Abb. 20). Die Herstellung und Entwicklung des neuartigen Aufspülkörpers können in dem vom BMFT bewilligten neuen KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerkssystemen“ untersucht werden. Darüber wird zu gegebener Zeit zu berichten sein.

10. Schriftenverzeichnis

- AUSSCHUSS „KÜSTENSCHUTZWERKE“ der Dt. Ges. für Erd- und Grundbau (DGEG) und der Hafenbautechn. Ges. (HTG): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK '81). Die Küste, H. 36, 1981.
- BRUUN, P.: Beach nourishment – improved economy through better profiling. The Dock & Harbour Authority, Vol. 69, Nr. 805, 1988.
- CENTRE OF CIVIL ENGINEERING RESEARCH CODES AND SPECIFICATIONS (CUR): Manual on artificial beach nourishment. report 130, Delft Hydraulics 1987.
- CHRISTIANSEN, H.: Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten. Hamburger Küstenforschung, H. 35, 1976.
- DETTE, H. H. u. GÄRTNER, J.: Erfahrungen mit der Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983. Die Küste, H. 45, 1987.
- ERCHINGER, H. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43, 1986.
- ERCHINGER, H. F.: Prevention of Seawall Damage and Erosion of German Barrier Islands by Means of Beach Nourishment. Proc. of Beach Prevention Technology, Gainesville, Florida, 1988.
- ERCHINGER, H. F.: Beach Replenishment, Consideration of Natural Processes and Profiles. MAFF-Conference of River and Coastal Engineers, Ss. 2.5, Loughborough, 1991.
- FÜHRBÖTER, A.: Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen. Die Küste, H. 52, 1991.
- GISZAS, H.: Beitrag zur Frage des Sandtransportes durch Wind – Messungen im Gebiet um Scharhörn (Elbe) –. Hamburger Küstenforschung, H. 16, 1970.
- HOMEIER, H.: Die Auswirkungen schwerer Sturmfluten auf die Ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. Jb. der Forschungsstelle Küste, Bd. 27, Norderney, 1975.
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 105/89, 1990.
- KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951–192 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 1958/59.
- KUNZ, H. u. NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. Die Küste, H. 34, 1979.
- KUNZ, H.: History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney. Coastal Sediments '87, Proc. Bd. 1, S. 974–989, 1987.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd ICCE, ASCE, Bd. 3, S. 3254–3267, 1991.
- KUNZ, H.: Protection of the Island of Norderney by Beach Nourishment, Alongshore Structures and Groynes. Proc. COPEDEC, Bd. 1, S. 29–42, 1991.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI Verbund-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- KUNZ, H. u. STEPHAN, H.-J.: Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste, H. 54, 1992.

- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, ARBEITSGRUPPE NORDERNEY: Gutachtliche Stellungnahme zu den Untersuchungen über die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordstrand der Insel Norderney sowie den zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- 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.
- STAATL. AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ: Teilberichte 1 bis 6 und Schlußbericht zum Forschungsteilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“, bearbeitet von: Erchinger, H. F., Kotzbauer, U., Laue, M. und Tillmann, B., Norden, 1989/92 (unveröffentlicht).
- ZANKE, U.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1982.