

Die Versuchsstrandaufspülung 1992 auf Norderney und Messungen zum äolischen Sandtransport

Von HEIE F. ERCHINGER und HEIKO KNAACK

Zusammenfassung

Die 1992 durchgeführte 7. Strandaufspülung am Westkopf der Insel Norderney wurde von dem KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen“ wissenschaftlich begleitet. In dem Teilprojekt „Versuchsaufspülung – Entwicklung und Technik“ sollte die erstmals seeseitig in den Vorstrandbereich ausgedehnte Aufspülung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Aspekte untersucht werden.

Die Auffüllung des Vorstrandes wurde am Nordweststrand durch den Einbau konzentrierter Sandmassen in Form von Sandhöften vorgenommen. Diese Bauausführung stellte eine wirtschaftlich günstige Variante dar und bereitete keine wesentlichen technischen Probleme. Die Umformung der Sandhöfte und die Verteilung des Sandes durch Seegangs- und Strömungskräfte vollzog sich unerwartet schnell innerhalb weniger Wochen. Eine wesentliche Verlängerung der Standzeit des aufgespülten Sandes und eine verbesserte Regeneration der oberen Strandbereiche konnten durch diese Aufspülung im Bereich des Vorstrandes jedoch nicht erreicht werden.

Zur Bestimmung des nicht vernachlässigbaren Volumens des äolischen Sandtransportes am Strand wurden entsprechende Messungen vorgenommen. Die Untersuchungen ergaben eine generelle Übereinstimmung zwischen den Messungen auf Norderney und vorhandenen theoretischen Herleitungen in der Literatur. Die große Streubreite der Ergebnisse verdeutlicht aber die noch vorhandenen Wissenslücken, die noch geschlossen werden müssen, bevor Berechnungen und Vorhersagen möglich sind, die über eine grobe Abschätzung der transportierten Sandmassen hinausgehen.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen MTK 0545 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Summary

The 1992 seventh artificial beach nourishment at the western end of Norderney Island was scientifically investigated within the KFKI research project "Near Shore- and Beach Nourishment in the Vicinity of the Norderney Groyne Protection System". The goal of the sub-project "Experimental Nourishment – Development and Technical Aspects" was a technical and economical evaluation of new near shore nourishment techniques. The replenishment of the near shore region was started through the deposition of sand concentrated in the form of sand mounds. This technique was economically efficient and posed no significant technical problems. The reshaping of these mounds and their further distribution by wave – and flow – induced forces was unexpectedly quick and was completed within a few weeks. A significant extension of the beach retention time of the deposited sand or an improvement in the regeneration of the upper beach could, however, not be achieved.

Appropriate measurements were undertaken in order to determine the non-negligible volume of aeolian sand transport at the beach. The data showed general agreement with theoretical formulations found in literature. The large scatter in the results indicates, however, that certain basic knowledge has yet to be obtained before calculations and predictions can be made which extend beyond a rough estimate of the sand transport.

The research project MTK 0545, whose results are summarized in this paper, was funded by the German Federal Agency for Research and Technology (BMFT). The authors are solely responsible for the paper's content.

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Durchführung der Strandaufspülung 1992	4
2.1 Planung der Aufspülung	4
2.2 Sandentnahme	5
2.3 Spülgerät und -leitung	5
2.4 Spülbetrieb	6
3. Strandentwicklung nach der Aufspülung 1992	6
3.1 Entwicklung am Weststrand zwischen den Buhnen D und A	6
3.2 Entwicklung am Nordweststrand zwischen den Buhnen A und L1	7
4. Vergleich der Strandentwicklung nach den Aufspülungen 1989 und 1992	10
5. Bewertung der Aufspülung 1992	13
6. Quantifizierung des äolischen Sandtransportes auf dem Strand	13
6.1 Einführung	13
6.2 Versuchsdurchführung	15
6.3 Ergebnisse der Messungen	16
6.3.1 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	16
6.3.2 Äolischer Sandtransport	17
6.4 Vergleich der gemessenen mit berechneten Transportraten und kritische Betrachtung	19
7. Schriftenverzeichnis	22

1. Einleitung

Der Westkopf der Insel Norderney ist von der natürlichen Sandversorgung durch Platanenlandungen aus dem Riffbogenbereich abgeschnitten und unterliegt einem anhaltenden Erosionsprozeß. Der Mensch versucht seit über 130 Jahren durch den Bau von Buhnen und Deckwerken den Abbruch des Westkopfes zu stoppen. In den Jahren 1951/52 wurde die Schutzkonzeption erweitert; nicht allein starre Bauwerke, sondern Schutzbauten und ein zusätzlich vorgespültes Sanddepot sollten den angreifenden Strömungs- und Brandungskräften entgegenwirken. Einschließlich 1992 sind seither insgesamt sieben Strandaufspülungen durchgeführt worden (Tab. 1 und Abb. 1). Zu den bisherigen Aufspülungen gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen (z. B. KRAMER, 1958/59; ERCHINGER, 1986), und insbesondere die ebenfalls von einem KFKI-Forschungsvorhaben begleitete Versuchsaufspülung 1989 ist durch mehrere Veröffentlichungen gut dokumentiert (siehe „Die Küste“ Heft 54/1992).

Nach der Strandaufspülung vom Mai 1989 war im Frühjahr 1990 ein erheblicher Sandmassenverlust festgestellt worden. Die außergewöhnlich hohen Umlagerungsmengen wurden mit einer extremen Häufung von Sturm- und Orkanfluten in diesem Zeitabschnitt erklärt. Die erhoffte Regeneration des Strandes blieb jedoch aus, und der ungünstige Trend setzte sich fort. Im Frühjahr 1992 lag das Strandniveau so tief, daß eine weitere Strandaufspülung unumgänglich war, wollte man nicht das Risiko schwerer Schäden am Deckwerk eingehen.

Im Rahmen des interdisziplinären KFKI-Forschungsvorhabens „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen“ wurde vom Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz (StAIK), Norden, das Teilprojekt „Versuchsaufspülung – Entwicklung und Technik“ bearbeitet. Es wurden Möglichkeiten einer Auffüllung des Vorstrandes hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Aspekte untersucht. Des weiteren wurden, in Fortsetzung des vorherigen Projektes, Untersuchungen zur Frage des äolischen Sandtransportes am Strand durchgeführt. Diese Untersuchungen fanden teilweise in Zusammenarbeit mit dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, statt. Das

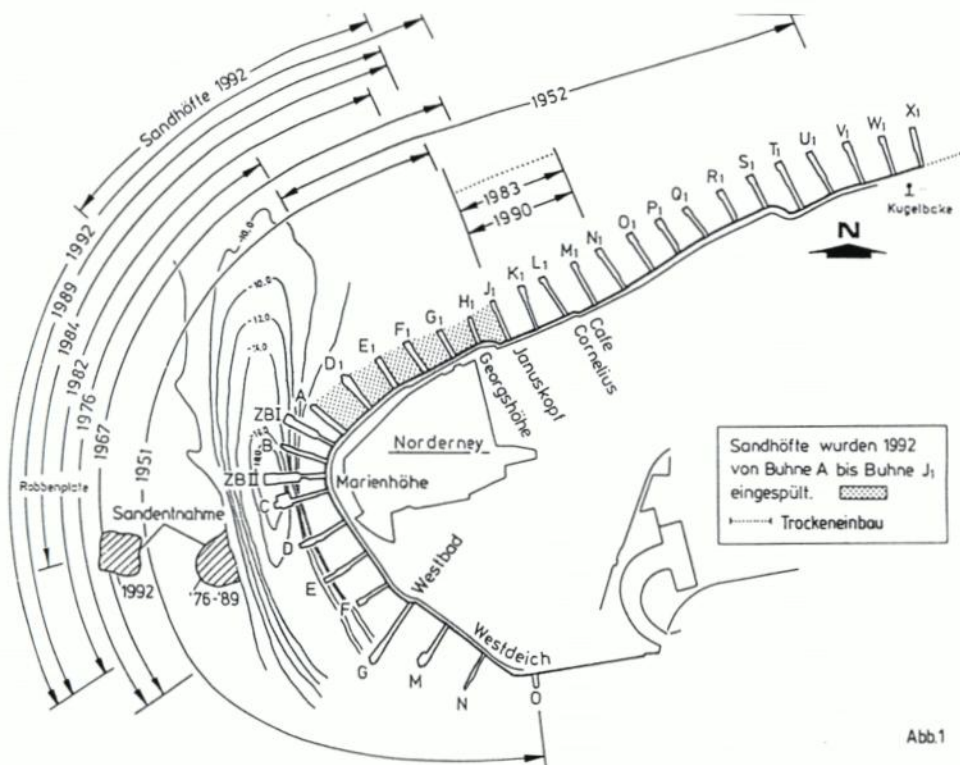


Abb.1

Abb. 1: Übersichtsplan der Aufpülstrecken und Sandentnahmen am Westkopf der Insel Norderney

Tab. 1: Hauptmerkmale der Strandauffüllungen 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 Buhne 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	450 000	Robbenplate
1992	2,1	D-L1	500 000	Robbenplate
Trockeneinbau				
1983	0,6	J1-N1	64 000	Strand östl.
1990	0,5	J1-N1	45 000	Weißer Düne
Wiederherstellung und Sicherung Schuttdüne östl. der Kugelbake				
1981	0,65		82 000	Strand östl.
1983	0,43		99 000	Weißer Düne
Gesamtmenge des eingebauten Sandes 4 110 000 m ³				

Projekt begann am 1. 1. 1992 und endete am 30. 6. 1994. Es schließt unmittelbar an das, ebenfalls vom BMFT finanzierte, KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ an.

2. Durchführung der Strandaufspülung 1992

2.1 Planung der Aufspülung

In die Planungen für die Aufspülung 1992 und den Entwurf des Aufspülprofils wurden die Anregungen und Vorschläge der Projektgruppe des Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ einbezogen.

Der gesamte Aufspülbereich erstreckte sich von Buhne D bis hin zur Buhne L1 und wurde generell zweigeteilt. Im Bereich des Westkopfes von Buhne D bis Buhne A wurden die Bühnenfelder nach dem Vorbild der 1989er Aufspülung bis zur MTnw-Linie nach der modifizierten DEAN-Formel (KOTZBAUER, 1990; ERCHINGER U. TILLMANN, 1992) profiliert. Die steilen Unterwasserhänge am Seegat schlossen eine Auffüllung des Vorstrandes aus.

Am flacheren Nordweststrand sollte zusätzlich zur Strandgrundversorgung der Vorstrand in die Aufspülmaßnahme einbezogen werden, lediglich im Bereich des „Nordbades“ (Bühnenfelder J1-K1 und K1-L1) wurde der Vorstrand nicht aufgefüllt. Da eine großflächige Auffüllung im Unterwasserbereich zu den technisch und finanziell sehr aufwendigen Lösungen gehört, wurde nach alternativen Lösungsmöglichkeiten gesucht. Zur Ausführung kam eine Variante, die vorsah, die im Vorstrand erforderlichen Sandmengen in konzentrierter Form durch das Vortreiben großer Sandhöfte einzuspülen. Die wesentlichen Merkmale eines „Höftprofils“ zeigt die Abb. 2. Die Umformung der Sandhöfte in gleichmäßige Unterwasserhänge sollte durch Strömung und Brandung erfolgen. Die Höfte wurden in ihrer Breite und Länge an die Morphologie und an die gegebenen Strömungsverhältnisse angepaßt: Wegen des relativ steil abfallenden Unterwasserhanges wurden im Bühnenfeld A-D1 zwei kurze Sandhöfte eingebaut; in den Feldern D1-E1, E1-F1, F1-G1 und G1-H1 wurde jeweils in der Feldmitte ein großes Sandhöft aufgespült, während im Bühnenfeld H1-J1, wegen des zunehmenden, nach Osten gerichteten Längstransportes, das Sandhöft auf die westliche Drittelsachse des Feldes verschoben wurde (Abb. 3).

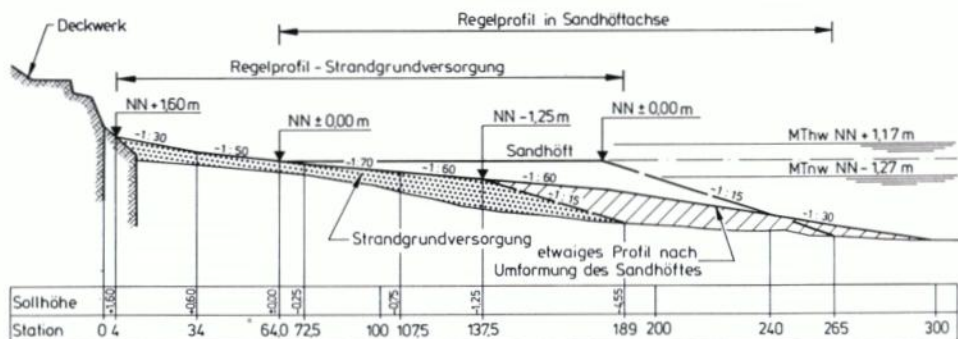


Abb. 2: Hauptmerkmale des Regelprofils eines Höftes

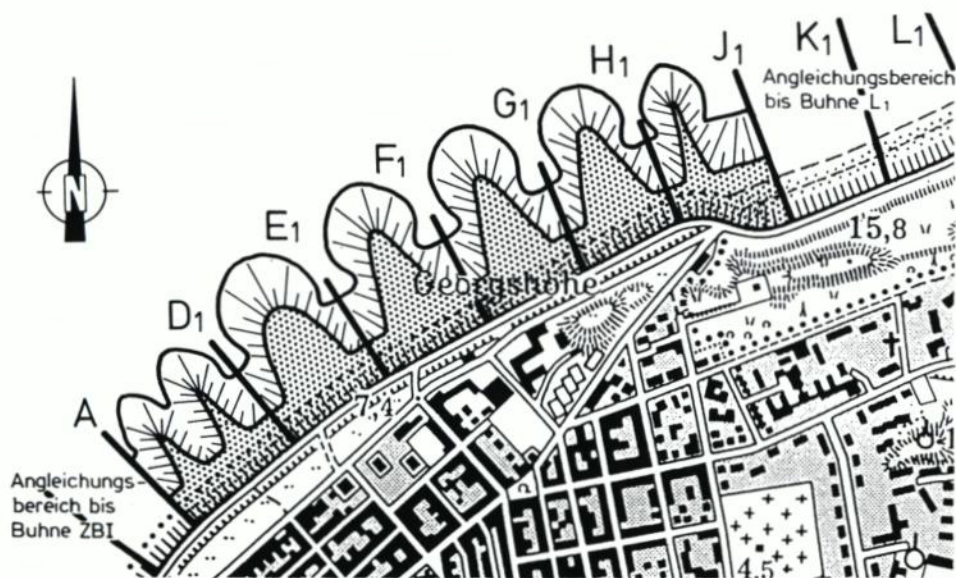


Abb. 3: Der Aufspülbereich 1992 mit den geplanten Sandhöften

2.2 Sandentnahme

Das Sandmaterial wurde wie auch bei den vorangegangenen Aufspülungen durch einen Saugbagger aus der Robbenplate entnommen. Eingehende Voruntersuchungen vom Oktober 1990 hatten ein Gebiet am westlichen Rand der Plate als vielversprechend ausgewiesen (Abb. 1); der dort gefundene Sand wies in gewissen Schichten mittlere Korndurchmesser von $d_{50} = 0,22$ bis $0,23$ mm auf. Wie auch bei der Aufspülung 1989 war der tatsächlich geförderte Sand jedoch feiner und hatte nach den Untersuchungen der Forschungsstelle Norderney einen mittleren d_{50} -Wert von $0,20$ mm.

2.3 Spülgerät und -leitung

Zum Heben und Fördern des Sandes wurde vom Auftragnehmer der Saugbagger „PIRAT IX“ eingesetzt. Mit einer Verdrängung von 440 m^3 , einem Tiefgang von 2 m , einer Arbeitstiefe von 16 m und einer Pumpenleistung von ca. 850 kW ist dieser Baggertyp zu den eher kleinen Geräten zu zählen. Die Saugleitung hatte einen Durchmesser von 550 mm , die Druckleitung einen Durchmesser von 500 mm . In 35 Tagen Spülbetrieb wurden $500\,000 \text{ m}^3$ Sand gefördert, dies entspricht einer Tagesleistung von ca. $14\,300 \text{ m}^3$. Bei einer Gesamtleitungslänge von 3150 m war die Pumpenleistung an der Obergrenze ihres Leistungsvermögens angelangt. Am östlichen Ende des Aufspülbereiches wurde der Druckabfall so groß, daß das übliche Sand-Wassergemisch (30 % Sand) nicht mehr transportiert werden konnte.

Um den Sand vom Gewinnungs- zum Einbauort zu transportieren, mußte erstmals eine etwa 600 m lange Leitung auf der Plate bis zum Westhang des Seegats verlegt werden. Die Installation dieser Rohrleitung verlief problemlos, ihr Heben nach Abschluß der Baumaß-

nahme war jedoch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Zum einen war das anfangs freiliegende Rohr stark eingesandet und zum anderen hatte der Bruch eines Gummisackes am Schluß der Spülarbeiten zu einer Teilfüllung des Rohres mit Sand geführt. Die Querung des Seegats erfolgte in bewährter Methode mittels eines Dükers. Sowohl das Ein- wie auch das Ausschwimmen dieses etwa 500 m langen Baugliedes verliefen problemlos.

Das Leitungssystem am Strand wurde entsprechend dem Baufortschritt verlängert. Von einer parallel am Deckwerksfuß installierten Leitung aus wurden über Abzweigstücke Querleitungen zur Beschickung der Bühnenfelder verlegt. Um das Vorstrecken dieser Querleitungen auch während des laufenden Spülbetriebes zu ermöglichen, wurde hier ein Stecksystem erfolgreich eingesetzt.

2.4 Spülbetrieb

Die Spülarbeiten begannen am 4. 5. 1992 im Bühnenfeld D-C, dem Anlandungsbereich des Dükers, und wurden am 12. 6. 1992 beendet. Während der Bauzeit herrschten außergewöhnlich ruhige Witterungs- und Tideverhältnisse bei überwiegenden Ostwindlagen vor.

Es war in der Planung beabsichtigt, die Sandhöfte mit der Oberfläche ihres Kronenbereiches auf NN-Höhe vorzutreiben. In der praktischen Umsetzung zeigte sich allerdings, daß eine Höherlegung der Höftkronen um etwa einen Meter zu einer erheblich besseren Kontinuität des Spülbetriebes führte. Die Verringerung der Spülverluste wurde dadurch erreicht, daß am Kopf der Höfte nahezu ausschließlich bei auflaufendem Wasser gespült wurde. Durch diese Maßnahme stellten sich vor dem Kopf der Höfte, anstelle der erwarteten Böschungseigung von etwa 1:15, Neigungen von 1:8 bis 1:12 ein. Die Zeiten ablaufenden Wassers wurden zum Vorstrecken der Längs- und Querleitungen genutzt, oder die deckwerksnahe Basisauffüllung (Strandgrundversorgung) wurde eingespült. Trotz der ruhigen Wetterlage mit sehr häufigen Ostwindlagen vollzog sich die Umformung der eingespülten Höfte in einer nicht erwarteten Geschwindigkeit. Der Einsatz von Planiertraupen beschränkte sich auf unwesentliche Korrekturarbeiten. Um die geplanten Einspülmengen nicht erheblich zu überschreiten, wurden die Höfte nicht in voller Länge ausgeführt. Die während des Spülvorganges einsetzende seitliche Verlagerung des Sandes führte bereits während der Höftaufspülung zu erheblichen Aufhöhungen der Höftseitenräume.

3. Strandentwicklung nach der Aufspülung 1992

3.1 Entwicklung am Weststrand zwischen den Bühnen D und A

Im Bereich des Westkopfes zwischen den Bühnen D und A wurde nur der obere Strandbereich entsprechend der Aufspülung 1989 nach der modifizierten DEAN-Formel aufgefüllt (ERCHINGER u. TILLMANN, 1992).

Dieser Strandabschnitt erwies sich in bezug auf die Massenverhältnisse als relativ stabil (Abb. 4). Oberhalb der MTnw-Linie (als MTnw wurde wegen der besseren Vergleichbarkeit mit dem vorherigen Projekt das Zehnjahresmittel 1976-1985 von NN-1,27 m gewählt) betrugen die Massenverluste bis April 1994 etwa 20 %, zwischen MTnw und NN-4 m (als untere Begrenzung der Untersuchungen) hingegen nahmen die Massen mit zwischenzeitlichen Schwankungen leicht zu. Somit kam es hier bei geringen Veränderungen der Gesamtmasse zu einer Verlagerung des Sandes in die tieferen Strandabschnitte.

In dem sich südlich an den Aufspülbereich anschließenden Bühnenfeld E-D nahmen die

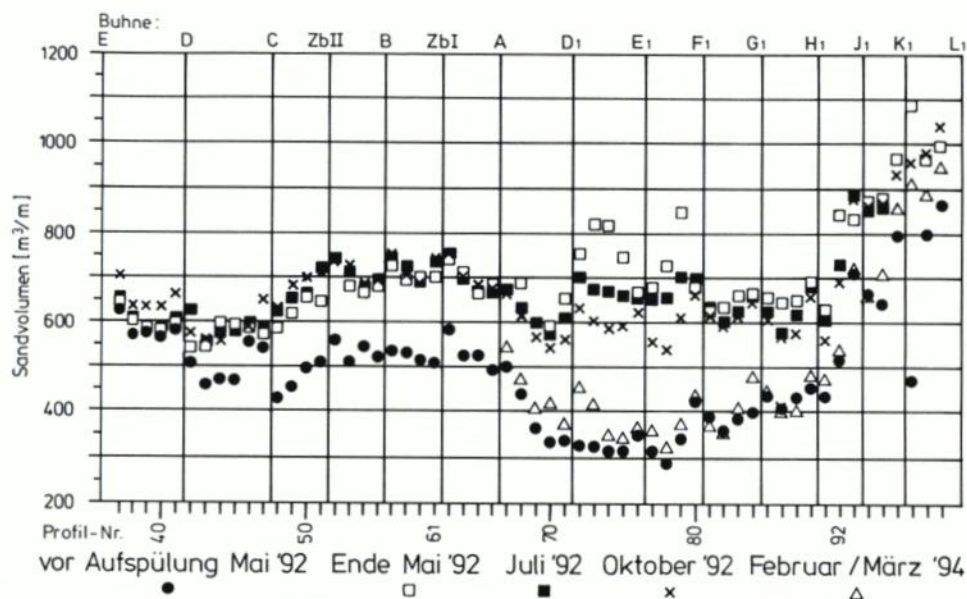


Abb. 4: Materialbilanz im Strandkeil oberhalb NN-4 m am Westkopf der Insel Norderney

Massen nach der Aufspülung bis zum Oktober 1992 deutlich zu. Verursacht wurde dies durch den Längstransport (NIEMEYER, 1986; KUNZ u. STEPHAN, 1992) von Material aus den angrenzenden Bühnenfeldern. Dieser Längstransport aus Richtung des von hohen Materialverlusten betroffenen Divergenzbereiches und die stärkere abschirmende Wirkung der sich nordwärts verlagernden Robbenplate dürften mit verantwortlich sein für die günstige Strand-situation unmittelbar am Westkopf der Insel.

3.2 Entwicklung am Nordweststrand zwischen den Bühnen A und L1

Am Nordweststrand wurden in sechs Bühnenfeldern Sandhöfte zur Auffüllung des Vorstrandes eingebaut. Schon während der Spülarbeiten wurde klar, daß die Höfte nach ihrem Einbau sehr schnell umgeformt wurden.

Im folgenden sei die Entwicklung am Beispiel des Bühnenfeldes E1-F1 dargestellt. Die Abb. 5 gibt die kurzfristigen Veränderungen des oberen Teiles des Sandhofes innerhalb der ersten 14 Tage nach der Aufspülung wieder. Im gesamten Profilquerschnitt zwischen dem Deckwerk und der NN-4-m-Linie sind in diesem Bühnenfeld vom Ende der Spülarbeiten (25. Mai 1992) bis zur Peilung im August 1992 etwa 20 % des eingespülten Sandes verlorengegangen. Die Verluste bis zu diesem Zeitpunkt sind mit -14 000 m³ oberhalb MTnw ausschließlich im oberen Strandbereich aufgetreten, während es im Vorstrand zwischen MTnw und NN-4 m eine leichte Massenzunahme von 2500 m³ gegeben hat (Tab. 2).

Ein Großteil des oberhalb der MTnw-Linie abgetragenen Sandes dürfte zunächst zur Auffüllung des Vorstrandes beigetragen haben und dann später u. a. in benachbarte Bühnenfelder verfrachtet worden sein. Solche hohen Anfangsverluste oberhalb MTnw charakterisie-

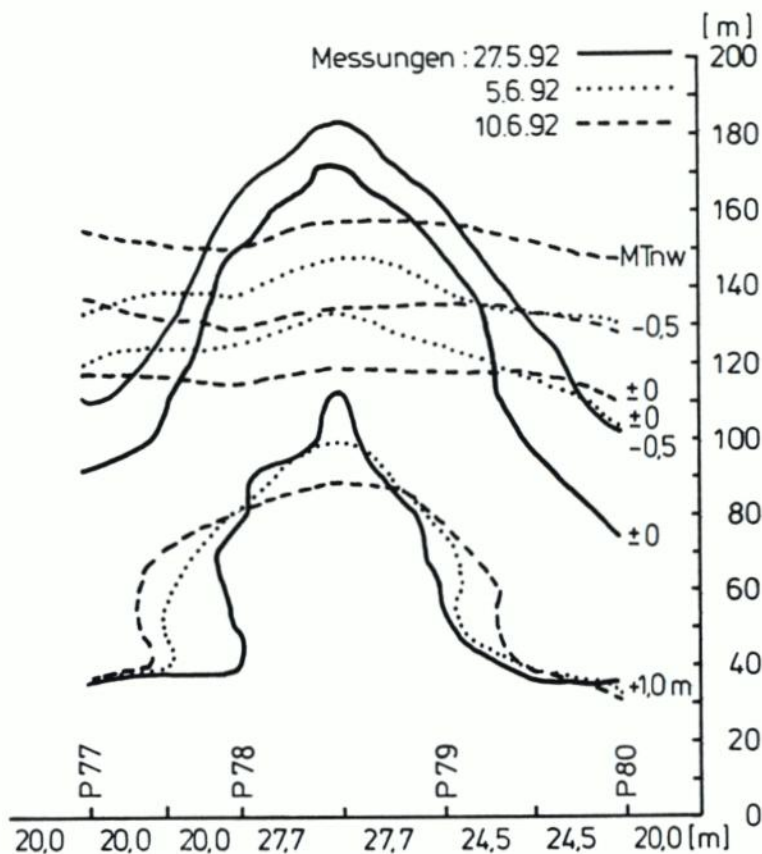


Abb. 5: Kurzfristige Umformung des Sandhöfies im Bühnenfeld E1-F1

Tab. 2: Massenbilanz im Bühnenfeld E1-F1

Bühnenfeld E1-F1	oberhalb NN-1,27 m		NN-1,27 m bis -4 m		Verluste bezogen auf eingespülte Menge oberhalb NN-4 m
	Masse	Änderung gegen 25. 5. 92	Masse	Änderung gegen 25. 5. 92	
	(m ³)	(%)	(m ³)	(%)	(%)
4. 5. 92	8 500		48 000		
eingespült:	+39 900		+21 500		
25. 5. 92	48 400		69 500		
Juli 92	39 100	-19	74 600	+ 7	- 7
August 92	34 300	-29	72 000	+ 4	-19
Oktober 92	27 800	-43	71 000	+ 2	-31
Februar 93*	13 500	-72	53 800	-23	-82
Februar 94	10 900	-77	50 900	-27	-91

*) Die Massenberechnung erfolgte unter Einbeziehung aller Profile im Bühnenfeld mit Ausnahme der Werte vom Feb. 93, hier lag nur die Vermessung des Hauptprofils vor.

ren die Entwicklung in den Bühnenfeldern D1-E1 und E1-F1, während in den anderen Bühnenfeldern des Nordweststrandes diese Verluste nicht so deutlich ausfallen, und die Massenbilanzen bis zum Herbst relativ ausgeglichen sind.

Die weitere Entwicklung ist an Hand des Hauptprofils in der Abb. 6 dargestellt. Es ist bei der Graphik zu beachten, daß größere Massenverluste in dem Hauptprofil in den ersten Monaten nach der Aufspülung wegen der Verlagerung des Sandes in den Bereich zwischen Höft und Bühne nicht gleichbedeutend mit entsprechend großen Massenverlusten aus dem Bühnenfeld sind. Für die Zeit nach dem Ausgleich der Höfte gibt das Hauptprofil mit genügender Genauigkeit die Entwicklung im gesamten Bühnenfeld wieder (KUNZ U. STEPHAN, 1992).

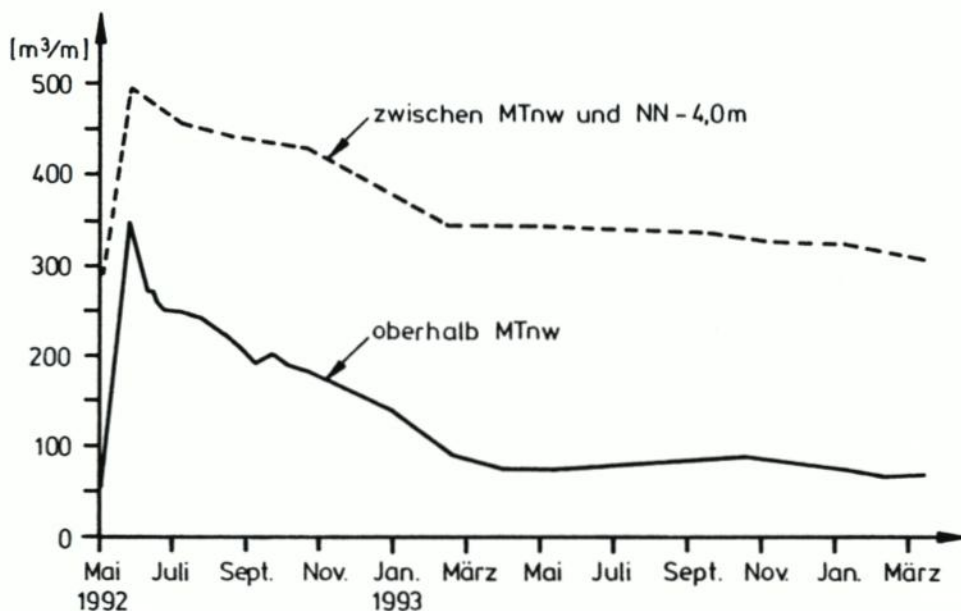


Abb. 6: Sandvolumenentwicklung im Profil 79, Bühnenfeld E1-F1

Im Verlauf des Winters 92/93 kam es in allen Bühnenfeldern des Nordweststrandes zu deutlichen Massenabnahmen; bis zur Tiefe von NN-4 m betrugen die Verluste etwa $\frac{3}{4}$ des eingespülten Materials. Im Verlaufe des Jahres 1993 blieb die Strandsituation nahezu unverändert, zum Teil traten geringe Massenzunahmen auf. Im Winter 93/94 nahmen die Massen oberhalb MTnw insbesondere in Folge der schweren Sturmfluten Ende Januar 1994 noch einmal deutlich ab. Hiervon waren besonders die Bühnenfelder F1-G1 und G1-H1 betroffen, in denen das Strandniveau oberhalb MTnw unter das vor der Aufspülung sank. In den Feldern zwischen den Bühnen A und H1 nahmen die Massen [im Höhenbereich zwischen MTnw und NN -4 m] ebenfalls ab, während in den Bühnenfeldern H1-J1, J1-K1 und K1-L1 bis zum Frühjahr 1994 eine Massenzunahme festzustellen war, die mit einer Verflachung des Unterwasserhanges einherging.

Auf Grund des stark abgesunkenen Niveaus im oberen Strandbereich wurde am Nordweststrand eine neuerliche Aufspülung im Frühjahr 1994 nötig. Sie wurde zwischen den Bühnen A und O1 ausgeführt, wobei die Auffüllung im östlichen Teil ab Bühne L₁ der Verbesserung der Badestrandsituation diene und entsprechend finanziert wurde.

Die Neigungsentwicklung im unteren Strandbereich zwischen NN-2 m und NN-4 m ist in Abb. 7 ebenfalls exemplarisch für das Bühnenfeld E1-F1 dargestellt. Im Entwurf war von einer Neigung von etwa 1:15 vor dem Kopf der Sandhöfte ausgegangen worden. Bedingt durch das Spülen bei auflaufendem Wasser waren die tatsächlich erzielten Neigungen unmittelbar nach der Einspülung jedoch steiler und betrugen 1:8.

Wie die Graphik verdeutlicht, erfolgte die Abflachung der Hänge relativ langsam. Die vor der Aufspülung vorgefundenen Neigungen wurden erst nach über einem Jahr wieder erreicht mit einer sich fortsetzenden Tendenz zur weiteren Verflachung.

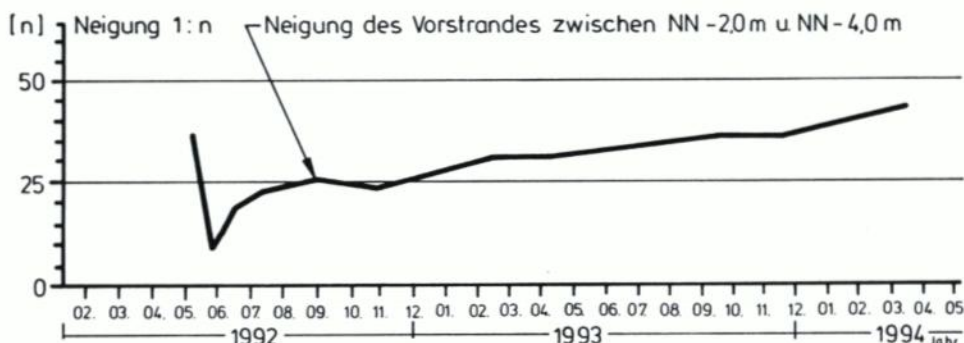


Abb. 7: Neigungsentwicklung im Profil 79, Bühnenfeld E1-F1

4. Vergleich der Strandentwicklung nach den Aufspülungen 1989 und 1992

Bei einem Vergleich der Entwicklung nach den Aufspülungen 1989 und 1992 ist zu berücksichtigen, daß sich die Faktoren, welche die Massenverluste verursachen, wie z. B. das Seegangsgeschehen, auf Grund anderer meteorologischer Bedingungen und Strukturveränderungen im Vorfeld des Strandes von Jahr zu Jahr unterscheiden können. Als Beispiel sind in Abb. 8 die Anzahl der jährlichen Sturmtiden seit 1950 sowie die Materialentwicklung im Profil 74 dargestellt.

Die Ausgangssituation nach den beiden Aufspülungen war am Weststrand annähernd gleich, während sich am Nordweststrand die Strandverhältnisse wegen der 1992 eingespülten Sandhöfte deutlich unterschieden. Die unterschiedliche Entwicklung ist in den Abb. 9 und 10 beispielhaft an den Profilen 54 (ZbII-B) und 79 (E1-F1) dargestellt.

Während sich die Strandsituation am Westkopf nach der 92er Aufspülung als relativ stabil erwies, traten nach der Aufspülung 1989 deutliche Verluste auf. Diese Sandabnahme erfolgte insbesondere im oberen Strandbereich, über MTnw nahm die Masse innerhalb eines Jahres um ca. 40 % ab (Mittelwert aller Profile). Nach 1992 betrug der Verlust in einem vergleichbaren Zeitraum nur etwa 15 %. Im unteren Strandbereich waren die Massenänderungen nach beiden Aufspülungen nur gering.

Am Nordweststrand traten nach beiden Aufspülungen hohe Verluste auf. Die Massenabnahmen oberhalb der MTnw-Linie waren ähnlich und betrugen ein Jahr nach den Aufspülungen jeweils etwa 60 % der im Mai 1989 bzw. Mai 1992 vorhandenen Sandmenge. Deutlich unterschieden sich die Entwicklungen hingegen im unteren Strandbereich. Während nach der

Materialbilanz Norderney Westkopf Profil 74 (Buhnenfeld D₁... E₁)

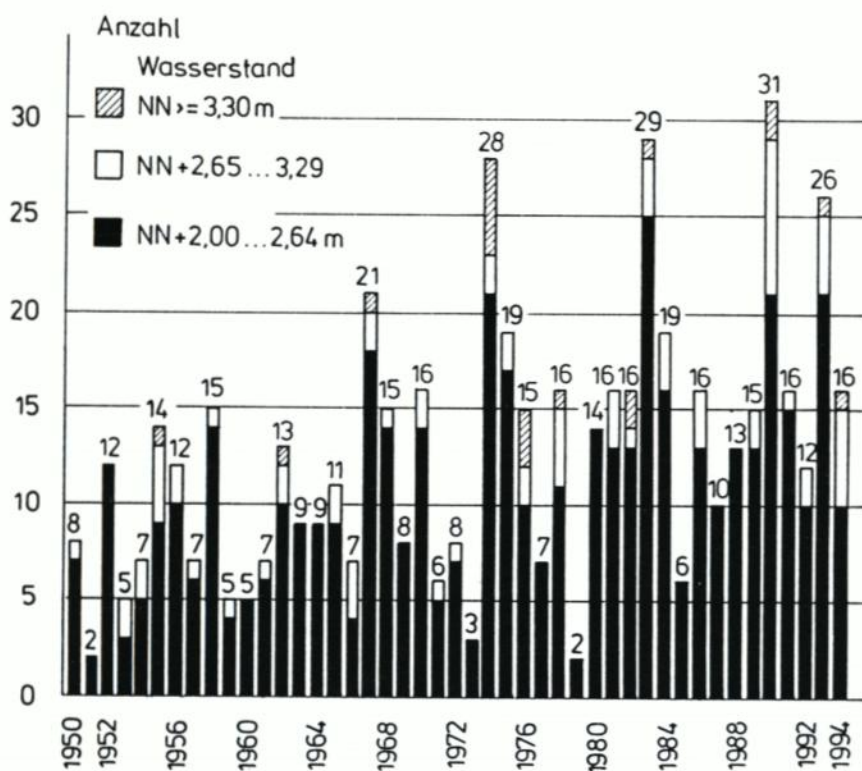
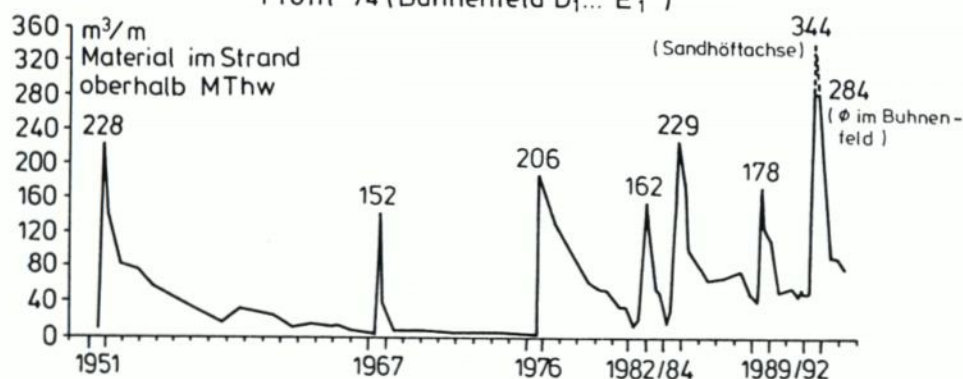


Abb. 8: Materialbilanz im Profil 74, Buhnenfeld D₁-E₁ und Anzahl der jährlichen Sturmzeiten

Aufspülung 1989 die Massen zwischen MTnw und NN-4 m nur um wenige Prozent abnahmen, verringerte sich die Sandmenge nach der 92er Aufspülung innerhalb eines Jahres um etwa 20 %. Nach 1989 gingen die Verluste im oberen Strand mit einer Aufhöhung im Vorstrandbereich einher, diese Entwicklung blieb nach 1992 aus (Abb. 10). Am Nordwest-

strand waren somit die absoluten Verluste nach der 92er Aufspülung deutlich größer als nach der Aufspülung 1989, dies ist vermutlich zum Teil auf die weit vorgespülten Sandhöfte zurückzuführen.

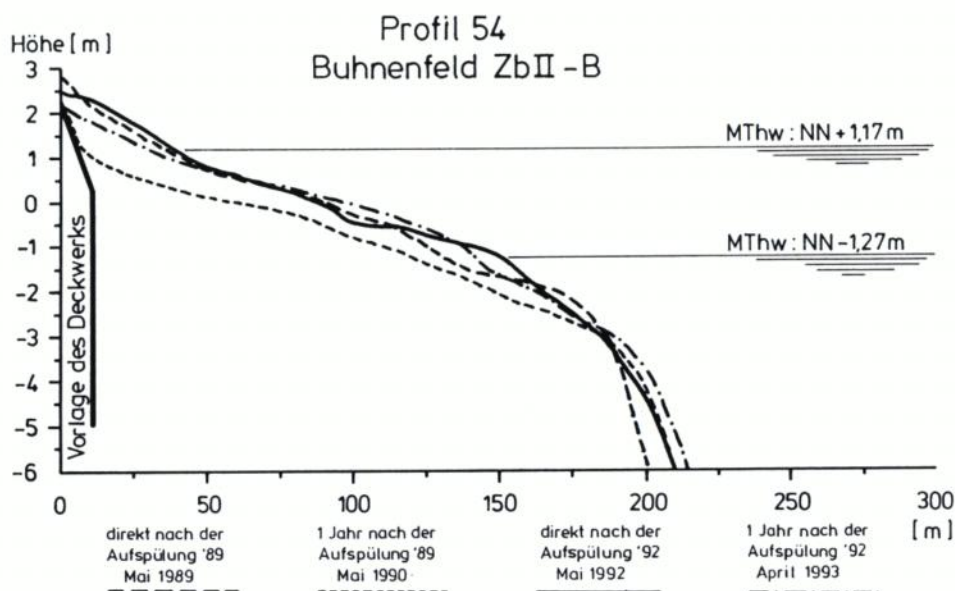


Abb. 9: Vergleich der Entwicklung des Profils 54, Buhnenfeld ZbII-B, nach den Aufspülungen 1989 und 1992

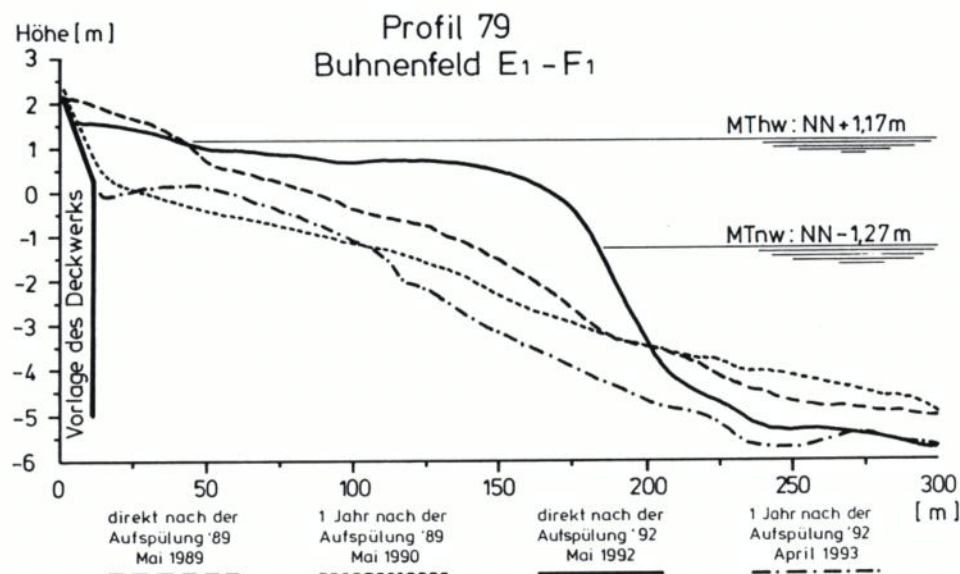


Abb. 10: Vergleich der Entwicklung des Profils 79, Buhnenfeld E₁-F₁, nach den Aufspülungen 1989 und 1992

Die größere Massenabnahme am Nordweststrand ist als Folge des Längstransportes möglicherweise einer der Gründe für die relativ günstige Situation am Weststrand mit den im Vergleich zu 1989 geringeren Verlusten. Ferner ist als Ursache hierfür ein geändertes Seegangsgeschehen auf Grund der starken morphologischen Umformungen des Seegats denkbar.

5. Bewertung der Aufspülung 1992

Das Einspülen von Sandhöften in der 1992 praktizierten Form stellt eine wirtschaftlich günstige Arbeitsweise der Vorstrandauffüllung dar und bereitet technisch keine Schwierigkeiten.

Bei der Beobachtung der Umformung der Sandhöfte innerhalb weniger Wochen war festzustellen, daß die dynamischen Seegangs- und Strömungskräfte binnen kurzer Zeit ein Idealprofil formen. Es ist für zukünftige Aufspülungen davon auszugehen, daß mehr Gewicht auf die notwendigen Massen als auf eine geräteintensive und exakte Herstellung einer berechneten Profilform zu legen ist.

Die Anfangsverluste bis zum Herbst waren im Bereich der Sandhöfte groß, aber lagen, relativ zur unmittelbar nach der Aufspülung im Strandkeil vorhandenen Masse, nicht wesentlich höher als nach der Aufspülung 1989; absolut waren die Verluste allerdings der größeren eingebauten Sandmenge entsprechend deutlich höher. Zu einer Verringerung der Anfangsverluste haben die Sandhöfte somit nicht geführt, sie scheinen diesbezüglich eher einen ungünstigen Einfluß gehabt zu haben, sofern im Vergleich zu 1989 gleiche morphologische und hydrodynamische Verhältnisse vorgelegen haben. Eindeutige Unterschiede in der Wirksamkeit der drei verschiedenen Einbauformen konnten nicht festgestellt werden. Die Hoffnung, daß durch die Sandhöfte im Vorstrandbereich eine Art „Depotwirkung“ eintritt, hat sich nicht erfüllt. Der obere, letztlich für die Sicherheit des Deckwerkes entscheidende Strandbereich hat rasch an Höhe verloren, ohne daß zwischenzeitlich eine wesentliche Regeneration stattgefunden hat. Da der Einbau von Sandhöften keine eindeutigen Vorteile erbracht hat, wurde in der Aufspülung 1994 auf eine Vorstrandaufspülung verzichtet, das Sollprofil wurde vereinfacht in Anlehnung an das der Aufspülung 1989 und der Grundversorgung 1992 gewählt.

6. Quantifizierung des äolischen Sandtransportes auf dem Strand

6.1 Einführung

Die Bewegung von Bodenpartikeln durch Wind wird verursacht durch die auf sie übertragene Schubspannung, darzustellen als Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Das Windprofil über dem Boden läßt sich für stationäre und homogene Verhältnisse durch folgende vereinfacht dargestellte Beziehung beschreiben („Log+Linear-Gesetz“ von Monin/Obukhov [MONIN et al., 1967], zitiert nach BENESCH et al., 1978):

$$u(z) = u_*/k \cdot (\ln[z/z_0] - \mu[z])$$

$u(z)$ = Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe

u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit

k = von Kármán-Konstante (= 0,4)

z = Höhe

z_0 = Rauigkeitslänge

$\mu(z)$ = Stabilitätsfunktion zur Beschreibung der Geschwindigkeitsabweichung bei nicht neutraler thermischer Schichtung

Der Auswertung der auf Norderney durchgeführten Messungen wurde dieses Gesetz zugrunde gelegt mit der vereinfachenden Annahme, daß während der Messungen eine neutrale thermische Schichtung vorgelegen hat ($\mu(z) = 0$). Diese Annahme dürfte bei höheren Windgeschwindigkeiten und bedecktem Himmel annäherungsweise erfüllt sein.

Der Windkraft wirken am Boden Trägheits- und Kohäsionskräfte entgegen, so daß sich ein Sandkorn erst in Bewegung setzt, wenn die Schubspannung diesen Widerstand übersteigt, und somit eine für den Bewegungsbeginn kritische Schubspannungsgeschwindigkeit u_{sc} erreicht ist.

Der äolische Transport von Sedimentpartikeln kann in drei Transportarten unterteilt werden: Suspension, Springen und Kriechen (Zusammenfassung bei LYLES, 1988).

a) Suspension

Kleinste Bodenpartikel mit Durchmessern von zumeist $<0,1$ mm (CHEPIL, 1957; GILLETTE u. WALKER, 1977) können von turbulenten Windströmungen in große Höhen getragen und dort über weite, teilweise Kontinent übergreifende Strecken transportiert werden.

b) Springen

Durch diese auch als Saltation bezeichnete Bewegungsart wird beim äolischen Sandtransport die weitaus größte Masse umgelagert. Hierbei heben einzelne Körner vom Boden ab, werden in Windrichtung versetzt und kehren auf Grund der Erdanziehung und des Luftwiderstandes auf bestimmten Bahnen zum Boden zurück. Bei dem Aufprall springt das Sandkorn wieder hoch und/oder regt andere Körner zur Bewegung an. Die Sprünge können bis zu 120 cm hoch sein, liegen meist jedoch unter 30 cm Höhe (LYLES, 1988).

c) Kriechen

Größere Bodenpartikel mit Durchmessern von ca. 0,5 bis 1 mm, die zum Abheben zu schwer sind, werden durch das Auftreffen springender Körner in Bewegung gesetzt und auf der Bodenoberfläche weitergeschoben und gerollt. Bodenkriechen nimmt etwa 7–25 % der Gesamttransportmenge ein und führt unter entsprechenden Bedingungen zur Bildung von Rippeln (BAGNOLD, 1941).

Die drei genannten Transportarten treten zumeist nebeneinander auf, und die Übergänge sind fließend. Die in der jeweiligen Bewegungsart transportierten Massen sind von verschiedenen Faktoren, in erster Linie der herrschenden Windgeschwindigkeit und der Korngrößenverteilung, abhängig. Da feine Schluff- und Tonpartikel in den Strandsanden auf Norderney nur in sehr geringen Anteilen vorkommen, kann bei der Betrachtung der Transportvorgänge dort die Suspension vernachlässigt werden (SINDOWSKI, 1956), der wesentliche Transport findet dort also durch Saltation statt. Ein springendes Korn kann bei seinem Aufprall auf der Bodenoberfläche mehrere andere Körner in Bewegung setzen. Dadurch werden, einer Lawine gleich, immer mehr Körner in Windrichtung versetzt, bis sich ein für die Wind- und Bodenverhältnisse typischer Sättigungszustand des Transportes einstellt, d.h. daß dann gleichviele Körner vom Boden abheben wie zurückfallen. Die Anlaufstrecke, die benötigt wird, bis sich dieser Gleichgewichtstransport einstellt, steht im reziproken Verhältnis zur Erodierbarkeit des Bodens (CHEPIL, 1959). Somit stellt er sich bei dem relativ leicht zu bewegenden Sand eines Strandes schon nach wenigen Metern ein; SVASEK u. TERWINDT (1974) geben eine Strecke von 10 bis 20 m an.

Für die im Gleichgewichtszustand transportierte Masse Q gilt allgemein die Gleichung:

$$Q = f ([\text{Bodeneigenschaften}]^a, [\text{Strömungsverhältnisse}]^b)$$

Der Exponent b wird meistens $b=3$ gesetzt, entsprechend dem allgemein anerkannten Verhältnis $Q \approx u_*^3$ (LYLES, 1988). Die wesentlichsten den Transport beeinflussenden Bodeneigenschaften sind: Oberflächenrauigkeit, Korngröße, Bodengefüge, Dichte, Feuchtigkeit etc.; die Strömungsverhältnisse werden durch die Schubspannungsgeschwindigkeit, Turbulenzparameter, Luftdichte und Temperatur bestimmt.

Im Rahmen der Untersuchungen zum äolischen Sandtransport auf Norderney war es nicht möglich, alle beeinflussenden Faktoren zu erfassen. Insbesondere wurde der Einfluß der Bodenfeuchtigkeit in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Wasser in den Kornzwischenräumen des Bodens erhöht die Kohäsion der Sandkörner und bedingt somit eine höhere kritische Schubspannungsgeschwindigkeit u_{*c} , d.h. daß sich die Körner erst bei höheren Windgeschwindigkeiten in Bewegung setzen. Bereits kleine Zunahmen in der Feuchtigkeit erhöhen dabei stark die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit (BISAL u. HSIEH, 1966). Beim Transport von Sand spielt auch die Form der Körner durch deren Einfluß auf die Aerodynamik eine Rolle. So zeigte SINDOWSKI (1956), daß mit zunehmender Rundung der Körner auch deren Sprunghöhe und Sprungweite zunimmt. Da die Sande auf Norderney im allgemeinen gut gerundet sind und eine relativ große Kugelähnlichkeit haben, wurde auf eine entsprechende Korrektur der gemessenen Korngrößen verzichtet.

6.2 Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen zum äolischen Sandtransport fanden am Nordstrand der Insel Norderney in der Nähe des FKK-Strandes statt. Dieses Gelände wurde den Strandbereichen im Westen der Insel vorgezogen, da hier wegen der nur geringen Bebauung und der großen Breite des Strandes mit relativ geringen Störungen des Windfeldes zu rechnen war. Der genaue Standort in diesem Bereich wechselte zwischen den einzelnen Meßkampagnen.

Zur Bestimmung der Windverhältnisse auf dem Strand wurde eine Windmeßanlage der Firma A. THIES GmbH + Co. KG benutzt. Die Windgeschwindigkeit wurde mit Schalenanemometern (THIES 4.3712.10.001) in drei Höhen gemessen: 5 m, 2 m und 0,7 m über Grund. Außerdem wurde durch Windfahnen (THIES 4.3120.10.012) an drei Punkten auf einer Strandnormalen im Abstand von je 40 m die Windrichtung gemessen.

Zur Untersuchung der durch den Wind transportierten Sandmassen wurde neben einer vom StAIK konstruierten Sandfalle ein vom Alfred-Wegener-Institut entwickeltes Impaktor-Meßsystem eingesetzt.

Die vom StAIK ursprünglich gebaute Sandfalle war 2 m lang, 0,4 m breit und hatte eine Höhe von insgesamt 0,6 m. Sie wurde bis zur Hälfte in den Strand eingegraben, so daß die Eintrittsöffnung 0,4 m breit und 0,3 m hoch war. Durch einen im vorderen Teil der Falle erzeugten feinen Wassersprühnebel wurden die fliegenden Sandpartikel benetzt und zum Absinken gebracht. Sie fielen dann, wie auch die rollenden Sandkörner, in eine Schublade im unteren Teil der Falle. Nach dem Ende einer Meßperiode wurden die Schubladen aus der Falle gezogen und das Trockengewicht des eingefangenen Sandes bestimmt.

Zu Beginn des Jahres 1993 wurde die Falle um 50 cm verkürzt. Da die den Sprühnebel erzeugenden Düsen sehr störanfällig waren, wurden die Messungen 1993 ohne Sprühnebel durchgeführt. Es ergaben sich zufriedenstellende Ergebnisse, die sich gut in das Bild der Messungen aus 1991 und 1992 mit Sprühnebel einpaßten.

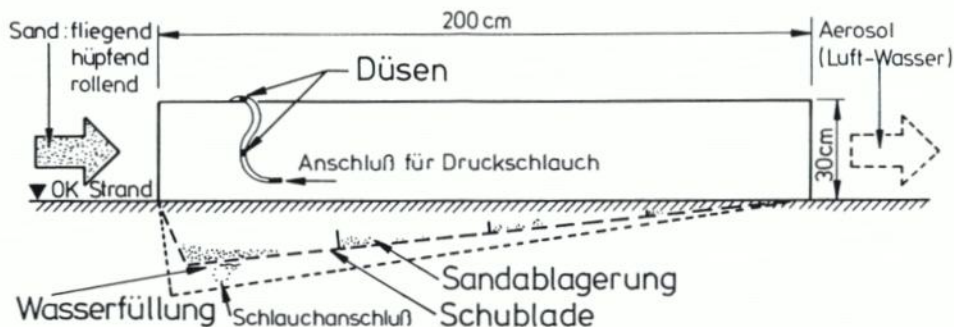


Abb. 11: Seitenansicht der Sandfalle des StAIK (vor dem Umbau)

Das am Alfred-Wegener-Institut entwickelte Impaktor-Meßsystem (Patentnummer P3818875.9) dient der Untersuchung der Feinstruktur von Schneedriften in Polargebieten. Es stand für die Messung des äolischen Sandtransportes vom 26. 5. bis 28. 5. 1993 und vom 6. 9. bis 30. 9. 1993 zur Verfügung. Die Messung des Partikeltransportes erfolgt über mehrere in verschiedenen Höhen montierte piezoelektrische Sensoren. Über ein entsprechendes Auswertungsverfahren der Meßdaten erhält man für jeden Sensor den Gesamtimpuls der auftretenden Partikel pro Zeit und Fläche (WAMSER et al., 1993). Zur weiteren Umrechnung der Impulswerte in die transportierte Masse ist die Kenntnis der mittleren Transportgeschwindigkeit der Partikel notwendig. Diese wird annäherungsweise der Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Sensorhöhe gleichgesetzt, die wiederum entsprechend dem logarithmischen Windprofil aus den gleichzeitig erfolgten Windmessungen ermittelt wird. Bei Division der von den Sensoren registrierten Gesamtimpulse durch die jeweilige Windgeschwindigkeit und Integration über die Höhe erhält man die pro Einheit Strandbreite und pro Zeit transportierte Sandmenge.

6.3 Ergebnisse der Messungen

6.3.1 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Es wurde versucht, aus den Windgeschwindigkeitsmessungen in den drei Höhen 5 m, 2 m und 0,7 m die aerodynamische Rauigkeitslänge z_0 zu bestimmen. Diese Berechnungen ergaben jedoch bei einer großen Schwankungsbreite unrealistisch kleine Rauigkeitslängen, in Extremfällen $> 1 \cdot 10^{-9}$ m. Durch eine allerdings nur kurzzeitige Parallelmessung mit einem Ultraschall-Anemometer-Thermometer durch das Alfred-Wegener-Institut konnte ermittelt werden, daß die Schalenanemometer zu hohe Geschwindigkeiten anzeigten (siehe auch WAMSER et al., 1993). Ein Defekt der Anlage konnte durch eine Untersuchung in einem Windkanal ausgeschlossen werden. Die vermutliche Ursache für die unkorrekte Anzeige ist der bei Schalenanemometern auftretende „Overspeeding-Fehler“ (z. B. KAGANOV u. YAGLOM, 1967), der auf einer mangelhaften Linearität der Drehung der Schalen auf Grund ihrer Massenträgheit und auf Turbulenzen im Windfeld beruht. Dieser Fehler in der Anzeige nimmt mit abnehmender Meßhöhe zu. Für die weitere Auswertung der Messungen des äolischen Sandtransportes wurde die in 5 m Höhe gemessene Windgeschwindigkeit, bei der der „Overspeeding-Fehler“ am geringsten ist, herangezogen. Nach den Vergleichsmessungen war die Anzeige dieses Schalenanemometers zur Zeit dieser Messungen um etwa 6 % zu hoch.

Als Rauigkeitslänge wurde der in der Literatur angegebene Wert von $z_0 = 0,001$ m zugrunde gelegt (SCHMIDT, 1988; KUNTZE et al., 1990; SCHMIDT u. PÄTSCH, 1992).

Da sich sowohl die Sandfalle des StAIK als auch das Impaktor-Meßsystem des AWI nicht automatisch in den Wind drehen, sondern zu Beginn der Messung in der vorherrschenden Windrichtung fixiert werden, sollte untersucht werden, wie stark die Windrichtung innerhalb der Meßintervalle variierte.

Während der einzelnen Zeiträume, in denen die StAIK-Sandfalle im Einsatz war, zeigte die Windrichtung an allen drei Meßpunkten im Mittel eine Schwankungsbreite von $8-9^\circ$, d. h. die Abweichungen von dem jeweiligen Mittelwert betrugen ca. $\pm 4^\circ$. Der aus diesen Windrichtungsschwankungen resultierende Fehler der StAIK-Falle, verursacht durch die Verkleinerung der senkrecht zum Wind stehenden Öffnungsflächen, beträgt nur wenige Prozent und ist somit zu vernachlässigen. Eventuell wird jedoch das Einfangen des Sandes bei schräg auf die Falle treffendem Wind durch Änderungen des Windfeldes vor der Fallenöffnung beeinflusst.

6.3.2 Äolischer Sandtransport

In den Jahren 1991 bis 1993 wurden mit der Sandfalle des StAIK insgesamt 26 auswertbare Messungen durchgeführt. Die jeweilige Meßdauer betrug durchschnittlich 45 Minuten, einige Versuche wurden bereits nach 15 Minuten, einer, bei geringem Sandtransport, erst nach 2,5 Stunden beendet.

Die ermittelten Transportraten lagen zwischen 0,04 und 162 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ bei Windgeschwindigkeiten von etwa 5 bis 13 m/s in 5 m Höhe. Verschiedene Messungen bei annähernd gleichen Windgeschwindigkeiten zeigten große Differenzen zwischen den ermittelten Transportraten, insgesamt war jedoch eine deutliche Abhängigkeit der Transportrate von der Windgeschwindigkeit zu erkennen. Wird die direkte Abhängigkeit bestimmt, so berechnet sich die Ausgleichskurve zu:

$$Q = 5 \cdot 10^{-7} \cdot u_{5m}^{7,25} \text{ mit } R^2 = 0,801$$

Q: Transportrate in $\text{g}/(\text{m}\cdot\text{s})$

u_{5m} : Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe in m/s

Im allgemeinen wird für den äolischen Gleichgewichtstransport ein Verhältnis von $Q \approx u^3$ angenommen. Diesem Verhältnis kommen die Messungen mit der StAIK-Falle recht nahe, wenn man berücksichtigt, daß der Sandtransport erst bei Überschreiten einer kritischen Windgeschwindigkeit einsetzt. Die Ausgleichskurve der Messungen lautet dann:

$$Q = 0,054 \cdot (u_{5m} - u_{c5m})^{3,18} \text{ mit } R^2 = 0,889$$

Q: Transportrate in $\text{g}/(\text{m}\cdot\text{s})$

u_{5m} : Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe in m/s

u_{c5m} : für den Sandtransport kritische Windgeschwindigkeit, bezogen auf eine Höhe von 5 m, in m/s (Berechnung nach BAGNOLD, 1941; siehe Kapitel 6.4)

Die relativ große Streubreite der Meßergebnisse ist auf Schwankungen einiger den Sandtransport direkt oder indirekt beeinflussender Faktoren zurückzuführen, z. B. die aerodynamische Rauigkeitslänge, die Böigkeit des Windes und insbesondere die Feuchtigkeit der Strandoberfläche. Obwohl sich eine höhere Feuchtigkeit des Sandes hemmend auf den äolischen Sandtransport auswirkt (z. B. BISAL u. HSIEH, 1966; LOGIE, 1982), tritt bei entsprechend hohen Windgeschwindigkeiten auch bei Regen Sanddrift auf. So wurde die zweitgrößte mit

der Sandfalle bestimmte Transportrate von 142 kg/(m·h) während eines starken Regenschauers bei einer Windgeschwindigkeit von 12,2 m/s (5 m über Grund) gemessen.

Wie oben ausgeführt, wurden die Messungen 1993 mit einer verkürzten Falle und ohne den Sprühnebel in der Fallenöffnung durchgeführt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten wurde beobachtet, daß ein geringer Teil des transportierten Sandes wieder hinten aus der Falle austrat. Tendenziell scheinen die Meßergebnisse ohne Sprühnebel jedoch eher etwas höher zu liegen als bei Einsatz der Falle mit Sprühnebel, der vermutlich doch eine leichte Stauwirkung verursacht. Insgesamt passen die Ergebnisse aber gut zusammen, und eine wesentliche Änderung der Effektivität der Falle konnte nicht beobachtet werden.

Die wesentlichen Ergebnisse der Messungen mit dem Impaktor-Meßgerät des AWI im Mai wurden in einem Arbeitsbericht des Alfred-Wegener-Instituts dargestellt (WAMSER et al., 1993). Die Ausgleichskurve für die Ergebnisse der September-Messungen des Impaktor-Meßsystems berechnet sich zu:

$$Q = 2 \cdot 10^{-7} \cdot u_{5m}^{8,32} \text{ mit } R^2 = 0,754 \text{ bzw.}$$

$$Q = 0,173 \cdot (u_{5m} - u_{c5m})^{3,34} \text{ mit } R^2 = 0,771$$

Somit besteht auch für diese Messungen bei Berücksichtigung der kritischen Windgeschwindigkeit eine annähernd kubische Abhängigkeit zwischen Transportrate und Windgeschwindigkeit, der Exponent ist jedoch etwas größer als bei den Messungen mit der Sandfalle. Die mit dem Impaktor-Meßgerät ermittelten Transportraten sind im allgemeinen um das 2- bis 3fache größer als die mit der Sandfalle gemessenen. Die Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Meßmethoden ist unklar. Die Meßbedingungen waren nahezu gleich, einige Messungen wurden zeitgleich nur wenige Meter voneinander entfernt durchgeführt, so daß die Unterschiede systembedingt sein müssen. Mögliche Ursachen auf Seiten der Sandfalle wären eine Stauwirkung vor der Fallenöffnung und der in einzelnen Fällen beobachtete Austritt von Sand aus der hinteren Öffnung der Falle. Bei dem Impaktor-Meßgerät entsteht z. B. eine Ungenauigkeit bei der Berechnung der transportierten Masse aus den gemessenen Impulswerten durch die nur als erste Näherung anzusehende Gleichsetzung der Partikelgeschwindigkeit mit der mittleren Windgeschwindigkeit und deren mit Fehlern behafteten Berechnung aus der Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe.

Durch den Aufbau des Impaktor-Meßsystems aus mehreren Sensoren in verschiedenen Höhen ist eine vertikale Aufgliederung des Sanddriftprofils möglich. Hierbei wird eine exponentielle Abnahme des Sandtransportes mit zunehmender Entfernung vom Boden deutlich. Es zeigte sich, daß bei mittleren Windgeschwindigkeiten über 95 % der transportierten Sandmasse zwischen dem Boden und 10 cm Höhe bewegt wird, dies entspricht den von SINDOWSKI (1956) auf Norderney gemachten Beobachtungen. Auch bei höheren Windgeschwindigkeiten findet der wesentliche Sandtransport in unmittelbarer Bodennähe statt. Aus der gemessenen exponentiellen Transportverteilung des Sandes folgt, daß die Öffnung der StAIK-Sandfalle mit 30 cm ausreichend hoch ist, um nahezu den gesamten in der Fallenbreite transportierten Sand einzufangen.

Ein Teil der durch die Sandfalle gesammelten Sandproben wurde durch Trockensiebung auf ihre Korngrößenverteilung untersucht. Die Sortierung ist gut, die d_{50} -Werte liegen zwischen 0,18 und 0,23 mm mit einem Mittelwert von 0,21 mm. Fein- bis Mittelsande mit einem d_{50} in dieser Größenordnung sind in den oberen Strandbereichen auf Norderney weit verbreitet (z. B. KUNZ et al., 1992). Für die theoretischen Berechnungen des äolischen Sandtransportes wurde daher ein mittlerer Korndurchmesser von 0,21 mm zugrunde gelegt. Tendenziell weisen die mit der Sandfalle gesammelten Sandproben bei zunehmender Windge-

schwindigkeit größere d_{50} -Werte auf. Eine genauere Abhängigkeit läßt sich jedoch aus den wenigen vorliegenden Messungen nicht ableiten.

6.4 Vergleich der gemessenen mit berechneten Transportraten und kritische Betrachtung

Es gibt in der Literatur verschiedene, zumeist halbempirisch ermittelte Ansätze zur Berechnung des äolischen Gleichgewichtstransportes. Im folgenden sind beispielhaft drei Formeln sowie die Festlegung der für diese Berechnung erforderlichen Größen aufgeführt.

Berechnung nach OWEN, 1964:

$$Q = u_*^3 \cdot \frac{P_1}{g} \cdot \alpha \cdot (1 - \Phi)$$

$$\alpha = 0,25 + \frac{w_s}{3u_*} \quad w_s \text{ wurde nach ZANKE berechnet (siehe unten)}$$

$$\Phi = \frac{Fr_{cr} \cdot P_s \cdot g \cdot d}{P_1 \cdot u_*^2}$$

$$Fr_{cr} = 0,0064 \quad \text{kritische Froud-Zahl nach BAGNOLD, 1941}$$

Berechnung nach ZANKE, 1982:

$$\begin{aligned} Q_g &= 0,02 \cdot \left(\frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{w_s^2} \right)^{1,5} \cdot D_s^3 \cdot v_1 \cdot P_s \\ Q_g &= 0,02 \cdot \left(\frac{(u_*^2 - u_{*c}^2) \cdot (u_*^2 - u_{*1}^2)}{w_s^4} \cdot D_s^4 \right)^{0,75} \cdot v_1 \cdot P_s \\ Q &= Q_g + Q_s (= \text{Geschiebetransport} + \text{Suspensionstransport}) \end{aligned}$$

$$u_{*c} = 0,1 \cdot (P' \cdot g \cdot d)^{0,5}; \quad \text{kritische Schubspannungsgeschwindigkeit (BAGNOLD, 1941)}$$

$$u_{*1} \approx 0,2 \cdot w_s \quad \text{kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Suspension}$$

$$w_s = \frac{11}{d} \cdot v_1 \cdot ((1 + 0,01 \cdot D_s^3)^{0,5} - 1) \quad \text{Sinkgeschwindigkeit}$$

$$D_s = \left(\frac{P' \cdot g}{v_1^2} \right)^{1/3} \cdot d \quad \text{sedimentologischer Korndurchmesser}$$

Berechnung nach SCHMIDT, 1988:

(Formulierung von BAGNOLD [1941], modifiziert nach LETTAU [1978] und SVASEK u. TERWINDT [1974])

$$Q = C \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{P_1}{g} \right) \cdot u_*^3 \cdot \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right)$$

$$u_{*c} = A \cdot (P' \cdot g \cdot d)^{0,5} \quad \text{kritische Schubspannungsgeschwindigkeit}$$

$$A = 0,1 \quad \text{konstant, wenn } d \geq 0,2 \text{ mm}$$

$$C = 1,7 \quad \text{abhängig von der Kornsortierung}$$

$$D = 0,00025 \text{ m} \quad \text{Bezugskorndurchmesser}$$

Festlegung der Variablen:

u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit
$d = 0,00021$ (m)	Korndurchmesser
$P_1 = 1,22$ (kg/m ³)	Dichte der Luft
$P_s = 2650$ (kg/m ³)	Dichte der Sandkörner ($\approx$ Quarz)
$P' = \frac{P_s - P_1}{P_1}$	relative Dichte
$\nu_1 = 0,000015$ (m ² /s)	kinematische Viskosität der Luft
$g = 9,81$ (m/s ²)	Erdbeschleunigung

Bei Verwendung dieser Größen und Einheiten wird die Transportrate Q in der Einheit kg/(m·s) ermittelt. Für den Vergleich mit den Messungen erfolgte eine Umrechnung in kg/(m·h).

Als weitere Vergleichswerte wurden außerdem die Ergebnisse von Naturmessungen auf Scharhörn (GISZAS, 1970) herangezogen. Die Verhältnisse dort sind denen am Nordstrand von Norderney vergleichbar, insbesondere trifft dies auch auf die Korngröße des Sandes zu; der mittlere Korndurchmesser wird mit 0,2 mm angegeben. Bei den Untersuchungen im Gebiet um Scharhörn wurde die Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe gemessen, für die vergleichende Darstellung in Abb. 12 wurde sie gemäß dem logarithmischen Windprofil auf eine Höhe von 5 m umgerechnet. Ähnliches gilt für die theoretischen Berechnungen: Da in die Formeln nicht die von der Meßhöhe abhängige Windgeschwindigkeit, sondern die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* eingeht, wurde eine entsprechende Umrechnung vorgenommen.

Bei dem vorgenommenen Vergleich fällt auf, daß es zum einen eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Sandfalle und den theoretischen Berechnungen gibt, zum anderen die mit dem Impaktor-Meßsystem ermittelten Transportraten und die Ergebnisse von GISZAS relativ dicht beisammen liegen (Abb. 12). Letztere weisen jedoch keine angenähert kubische Abhängigkeit der Transportrate von der Windgeschwindigkeit auf, der Exponent einer entsprechenden Ausgleichsrechnung ist deutlich kleiner als 3 (GISZAS, 1970).

Der Vergleich zwischen den Berechnungen und den Messungen wird zum einen durch die sich teilweise leicht unterscheidenden Definitionen (z. B. ZANKE, 1982), zum anderen durch die unsichere Festlegung einiger in die Berechnungen eingehender Größen in seiner Aussagekraft eingeschränkt. Die notwendige Umrechnung der Windgeschwindigkeit, die wegen der fehlenden Kenntnis der exakten Rauigkeitslänge und wegen der Abweichungen des Windprofils in Bodennähe von der „logarithmischen Idealform“ nur angenäherte Werte liefern kann, ist als ein weiterer kritischer Punkt solch eines Vergleiches anzusehen. GISZAS (1970) führt als wesentliche Ursachen für die Differenzen zwischen den Messungen auf Scharhörn und den Werten aus der Literatur die Verwendung unterschiedlicher Meßinstrumente und Unterschiede des transportierten Materials auf. Er weist insbesondere auch daraufhin, daß nach Untersuchungen von HORIKAWA u. CHEN (1960) die Wirksamkeit verschiedener Sandfallen eine mit der Windgeschwindigkeit veränderliche Größe ist. Diese Einschränkung gilt auch für die theoretischen Formeln, da sie zumeist halbempirisch ermittelt wurden.

Generell zeigen die Untersuchungen auf Norderney eine angenähert kubische Abhängigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit und der durch den Wind transportierten Sandmenge auf. In der Größenordnung stimmen die gemessenen Transportraten bei einer breiten Streuung mit denen aus anderen Untersuchungen überein, so daß die in der Literatur vorhandenen theoretischen Transportformeln prinzipiell auch auf die Verhältnisse auf Norderney angewen-

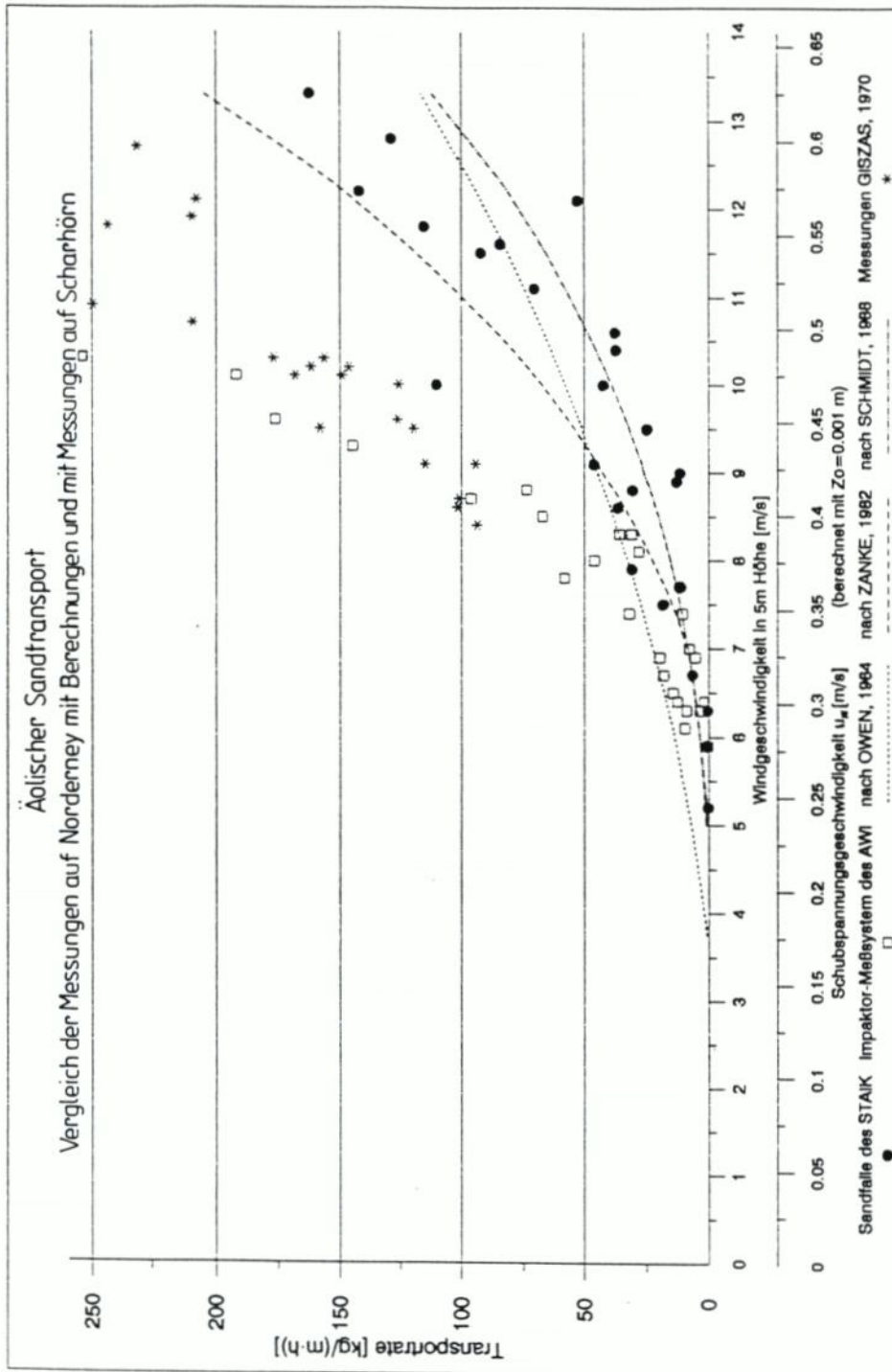


Abb. 12: Ergebnisse der Messungen des äolischen Sandtransports auf Norderney und Vergleich mit Messungen auf Scharhörn und verschiedenen Berechnungen

det werden können. Hierbei sind jedoch eine Vielzahl von Einschränkungen bezüglich der Genauigkeit und Aussagekraft solcher Berechnungen zu berücksichtigen. Problematisch bei der Bestimmung des äolischen Sandtransportes sind insbesondere die exakte Erfassung der tatsächlich auf die Bodenpartikel einwirkenden Windkraft und die Bestimmung des Einflusses der Bodenfeuchtigkeit.

7. Schriftenverzeichnis

- BAGNOLD, R. A.: The physics of blown sand and desert dunes. Methuen and Co., London, 1941
- BENESCH, W., DUENSING, G., JURKSCH, G. u. ZÖLLNER, R.: Die Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 147, Selbstverlag des DWD, Offenbach am Main, 1978
- BISAL, F. u. HSIEH, J.: Influence of moisture on erodibility of soil by wind. Soil Sci., 102, 1966
- CHEPIL, W. S.: Sedimentary characteristics of duststorms: III. composition of suspended dust. Am J. Sci., 255, 1957
- CHEPIL, W. S.: Wind erodibility of farm fields. J. Soil Water Conserv., 14, 1959
- ERCHINGER, H. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43, 1986
- ERCHINGER, H. F. u. TILLMANN, B.: Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste, H. 54, 1992
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G. u. KNAACK, H.: Abschlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen. Teilprojekt: Versuchsaufspülung – Entwicklung und Technik“. Staatl. Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden, 1994
- GILLETTE, D. A. u. WALKER, T. R.: Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of West Texas. Soil Sci., 123, 1977
- GISZAS, H.: Beitrag zur Frage des Sandtransportes durch Wind-Messungen im Gebiet um Scharhörn (Elbe) – Hamburger Küstenforschung, H. 16, 1970
- HORIKAWA, K. u. SHEN, H. W.: Sand movement by wind action. Beach Erosion Board, Technical Memorandum 119, 1960
- KAGANOV, E. J. u. YAGLOM, A. M.: Errors in windspeed measurements by rotation anemometer. Boundary Layer Meteorol., 10, 1976
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. d. Leichtweiß-Inst. d. TU Braunschweig, H. 105/89, 1990
- KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951–1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 1958/59
- KUNTZE, H., BEINHAEUER, R. u. TETZLAFF, G.: Abschlußbericht des BMFT-Projektes „Quantifizierung der Bodenerosion durch Wind I“. Verbundprojekt des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung, Deutscher Wetterdienst – Quickborn, Universität Hannover – Inst. für Meteorologie und Klimatologie, Projekt-Nr.: 0339058 A, B, C, 1990
- KUNZ, H., EITNER, V., RAGUTZKI, G. u. WESTHOFF, T.: Sedimentologische Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt. Schlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ Teilvorhaben „Naturuntersuchungen – Sedimentologie“, Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall – Forsch.-Stelle Küste, Norderney, 1992
- KUNZ, H. u. STEPHAN, H.-J.: Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste, H. 54, 1992
- LETTAU, K. u. LETTAU, H.: Exploring the world driest climate. University of Wisconsin-Madison, 1978
- LOGIE, M.: Influence of roughness elements and soil moisture on the resistance of sand to wind erosion (in: Dan H. Yaalon, Ed.: Aridic Soils and geomorphic Processes), Catena Suppl. 1, Braunschweig, 1982
- LYLES, L.: Basic wind erosion processes. Agr. Ecosys. Env., 22/23, 1988
- MONIN, A. S. u. ZILITINKEVICH, S. S.: Planetary boundary layer and largescale atmospheric dynamics. Appendix V (37pp) of GARP, Report of the Stockholm Study Conference; ICSU-IUGG Committee on Atmospheric Sciences-WMO, 1967

- NIEMEYER, H. D.: Die Ausbreitung und Dämpfung des Seeganges im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber. 1985, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37, Norderney, 1986
- OWEN, P. R.: Saltation of uniform grains in air. J. Fluid Mech. 20, 1964
- SCHMIDT, H.: Eine Abschätzung des äolischen Sandtransportes infolge einer hoch an das Deckwerk der Insel Norderney reichenden Sandvorspülung. Bericht für das KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkung zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ Teilprojekt „Naturmessungen-Meteorologie“, (unveröff.), Deutscher Wetterdienst – Seewetteramt, Hamburg, 1988
- SCHMIDT, H. u. PÄTSCH, J.: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Abschlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkung zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ Teilprojekt „Naturmessungen-Meteorologie“, Deutscher Wetterdienst – Seewetteramt, Hamburg, 1992
- SINDOWSKI, K.-H.: Korngrößen- und Kornform-Auslese beim Sandtransport durch Wind (nach Messungen auf Norderney). Geol. Jahrb., Bd. 71, 1956
- SVASEK, J. N. u. TERWINDT, J. H. J.: Measurements of sand transport by wind on a natural beach. Sedimentology, 21, 1974
- WAMSER, C., TÜG, H., LYKOSOV, V. u. TILLMANN, B.: Der Einsatz hochauflösender Meßsysteme zur Bestimmung äolischer Partikeltransporte. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Berichte aus dem Fachbereich Physik, Report 46, Bremerhaven, 1993
- ZANKE, U.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982