

# Untersuchungen über Dünenabbrüche und Stranderosionen im Großen Wellenkanal

VON HANS HENNING DETTE

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit Untersuchungen zum Einfluß von Vorstränden auf den Abbruch von Dünen bei Sturmfluten. Hierzu wird einleitend der gegenwärtige Kenntnisstand zur Abschätzung von Dünenabbrüchen und Stranderosionen nach Extremereignissen zusammengefaßt. Danach werden erste Ergebnisse aus naturmaßstäblichen Untersuchungen im „Großen Wellenkanal“ in Hannover vorgestellt und diskutiert. Aufgabe dieser mehrjährigen Forschungsarbeit in der Grundlagenforschung ist es, u. a. die sohnahen Feststoffkonzentrationen im Küstenquertransport, die komplexen Vorgänge in der Grenzfläche zwischen Sediment und Wasser sowie den Mechanismus von Dünenabbrüchen und Strandumlagerungen unter brechenden Wellen zu untersuchen. Abgeleitet daraus werden zugleich Entscheidungshilfen für aktuelle praktische Fragestellungen erwartet. Dies bezieht sich z. B. auf die Art, Ausführung und Wirksamkeit von künstlichen (aufgespülten) Sanddepots, durch die als sog. „Verschleißkörper“ weitere Abbrüche und Rückgänge von natürlichen Dünen aufgehalten werden sollen.

## Summary

*In this paper the set-up and results of a research program on the recession of dunes and the erosion of beaches during storm surges is presented. The state of the art concerning prediction methods in this field of interest is summarized. First test results obtained from investigations in the Large Wave Channel („Großer Wellenkanal“) in Hannover are discussed. The objective of this longterm research project is the study of nearbottom sediment suspensions and the complex interactions in the boundary layer between sediment and fluid. Furthermore quantitative relationships concerning the mechanism of dune recession and beach erosion are investigated. By this means it is intended to contribute to the understanding of physical processes research; moreover for actual practical applications, design criteria are expected e.g. with respect to the kind, geometry and effectiveness of artificial (dumped) sand depots in front of natural dunes in order to stop their further recession during severe storm surges.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	248
2. Morphologische Prozesse an sandigen Küsten . . . . .	249
3. Wellenerzeugter Sedimenttransport und Ausbildung von Gleichgewichtsprofilen . . . . .	252
3.1 Allgemeines . . . . .	252
3.2 Übersicht über theoretische Ansätze und empirische Methoden zur Beschreibung von Gleichgewichts-Strandprofilen. . . . .	252
3.3 Numerische Berechnungen der Dünen- und Stranderosion . . . . .	256
4. Untersuchungen im Großen Wellenkanal. . . . .	259
4.1 Aufgabenstellung . . . . .	259
4.2 Durchführung der Versuche im GWK . . . . .	260
4.3 Ergebnisse der Untersuchungen . . . . .	261
4.3.1 Einfluß von regulären und irregulären Wellen auf die Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils. . . . .	261
4.3.2 Zur Parametrisierung von Vorstrandprofilen mit Riffbildung . . . . .	262

4.3.3 Zur Parametrisierung von Vorstrandprofilen bei Untersuchungen mit Wellenspektren . . . . .	267
4.3.4 Zum Einfluß eines Vorstrandes auf die Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils . . . . .	269
4.3.5 Zum Einfluß eines Vorstrandes auf den Abbruch einer Düne . . . . .	271
4.3.6 Beiträge zur quantitativen Erfassung des Küstenquertransportes . . . . .	274
5. Ausblick . . . . .	280
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	281

## 1. Einleitung

Die Kenntnisse über die Wechselwirkungen an sandigen Küsten zwischen dem natürlichen Küstenregime und einem Küstenschutzbauwerk, sei es eine Ufermauer oder ein Deckwerk beim passiven Küstenschutz oder eine Sandvorspülung beim aktiven Küstenschutz, sind noch immer unzureichend. Dies bezieht sich weniger auf Standsicherheitsfragen, sondern vielmehr auf Auswirkungen von menschlichen Eingriffen auf die Umwelt.

Beiträge zum physikalischen Verständnis scheiterten in der Grundlagenforschung bislang auf solchen Gebieten, auf denen theoretische Lösungen nicht möglich und Ergebnisse, die aus kleinmaßstäblichen Untersuchungen gewonnen wurden, aus Gründen der Ähnlichkeitsmechanik hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Natur mit Unsicherheiten behaftet sind. Dies gilt ganz besonders für Brandungsvorgänge auf Stränden und quantitative Beziehungen zu sohnahen Feststoffkonzentrationen und Sedimentbewegungen bei Sturmfluten. Kleinmaßstäbliche, experimentelle Untersuchungen, die nur mit Wellenhöhen bis etwa  $H = 0,5$  m durchgeführt werden können, erlauben nur die Simulation von Normalwetterlagen, bei denen sich an der Sohle Riffel ausbilden. Bei höheren Wellen, insbesondere bei Sturmfluten, lösen

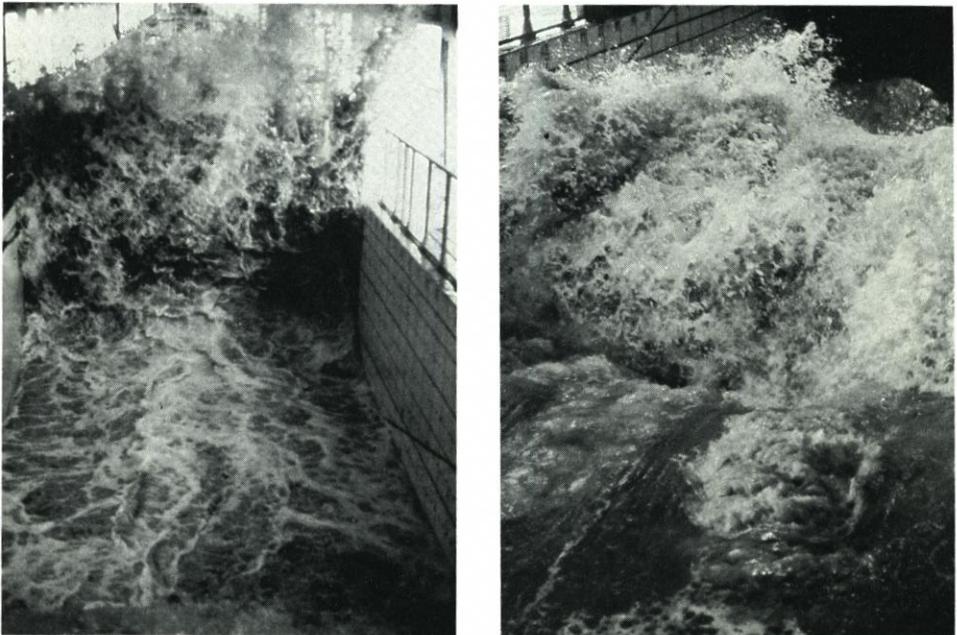


Abb. 1. Bild einer brechenden „Clapotis“ (links) und die Ausbildung eines Dreiphasengemisches aus Sand, Wasser und Luft nach dem Brechen der Welle (rechts)

sich die Riffel, die eine Art von Sohlstabilisierung darstellen, jedoch auf, und das Sediment wird dann in einer mobilen Schicht und in dichten Schwaden über die Sohle transportiert. Für die Untersuchung derartiger Feststoffbewegungen, besonders unter brechenden Wellen (Abb. 1, links), wobei der Lufteintrag bis zur Sohle reicht und dann ein Dreiphasengemisch aus Sand, Wasser und Luft (Abb. 1, rechts) entsteht, sind Versuchsaufbauten im Maßstab 1:1 erforderlich. Diese Anforderungen erfüllt der Große Wellenkanal in Hannover (Länge: 324 m, Breite: 5 m und Tiefe: 7 m), in dem bei Wassertiefen von 5 m Wellenhöhen bis  $H = 2$  m nachgebildet werden können.

## 2. Morphologische Prozesse an sandigen Küsten

Es wird allgemein angenommen, daß sich Strand und Düne an Abbruchküsten in Form eines im langzeitigen Mittel stabilen Gesamtprofils allmählich landwärts verlagern. Von der jeweiligen Höhenlage des Dünenfußes und von der Höhe und Breite des Strand es hängt es ab, wann es bei Sturmfluten durch Wellenangriff zum Dünenabbruch kommt. Um diesen Vorgang zu analysieren, ist die Kenntnis der wirksamen Einflußparameter erforderlich. Hierzu zählen insbesondere der Wasserstandsverlauf und die Höhe des eingetretenen Scheitel-

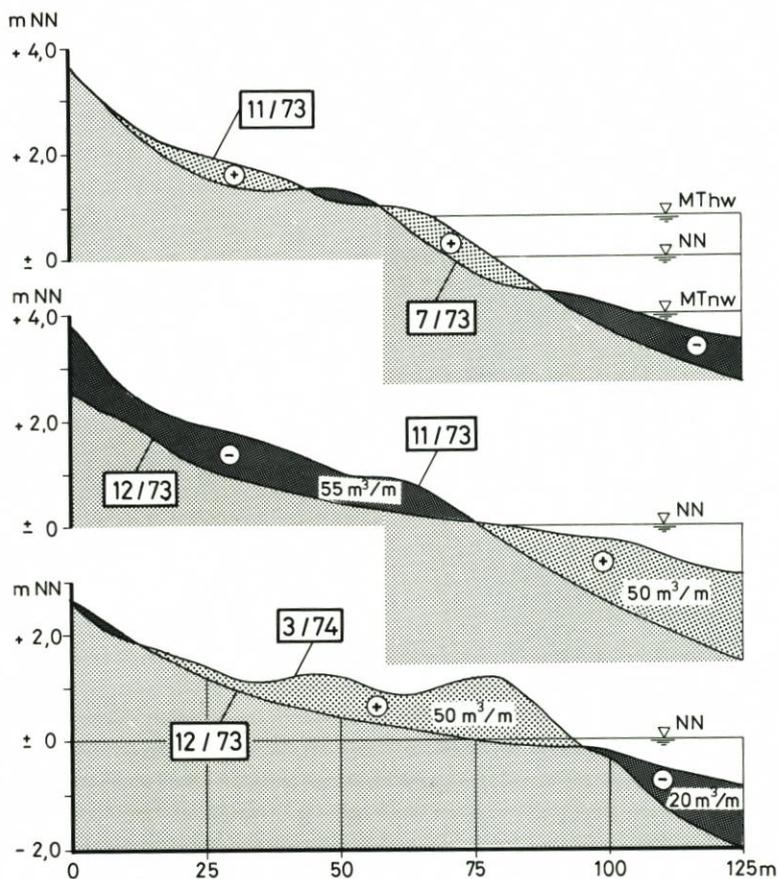


Abb. 2. Strandhöhenveränderungen vor Westerland/Sylt in den Jahren 1973/74

wasserstandes sowie das zugehörige Wellenklima. Aus Naturbeobachtungen ist bekannt, z. B. auch vor Sylt (vgl. z. B. DETTE, 1974, und FÜHRBÖTER, 1974), daß sich die Wellenparameter sehr stark mit den momentanen Strand- und Vorstrandverhältnissen ändern. Aus diesem Grunde ist es so gut wie unmöglich, aus Untersuchungen in der Natur zu analysieren, welche Abbruchraten jeweils bestimmten Sturmflutwasserständen bzw. Wellenparametern zuzuordnen sind. Das Einsetzen eines Dünenabbruchs hängt hauptsächlich von der momentanen Höhenlage des Dünenfußes in Abhängigkeit vom Wasserstand ab. Darüber hinaus ist auch noch der jeweilige Zustand des vorgelagerten Strandes zum Zeitpunkt eines Extremereignisses eine wichtige Einflußgröße. Hierzu ist zu berücksichtigen, daß Strände erheblichen zeitlichen Umlagerungen unterliegen und Höhenänderungen im Meterbereich auftreten können. Dies veranschaulicht Abb. 2 beispielhaft für ein Strandprofil an der Westküste von Sylt hinsichtlich kurzfristiger Umlagerungen nach einem Extremereignis (Sturmflutkette im November und Dezember 1973) sowie jahreszeitlich bedingter Strandumformungen (Wechsel zwischen sog. „Sommer- (= Auflandungs-)profilen“ und „Winter- (= Erosions-)profilen“).

Derartige Strandveränderungen, die, kurzzeitig betrachtet, positiv oder negativ verlaufen, lassen an Abbruchküsten nur im langjährigen Trend eine negative Resultierende erkennen (Abb. 3, am Beispiel der Thw-Linie). Veränderungen an einer Düne sind, abgesehen von Vordünenbildungen nach anhaltenden, mehrjährigen Normalwetterlagen, ohne Extremereignisse, wodurch bei einer nachfolgenden Sturmflut der Abbruch der Düne zunächst verzögert wird, im allgemeinen nur negativer Art. Im Gegensatz zu den kontinuierlichen Strandverände-

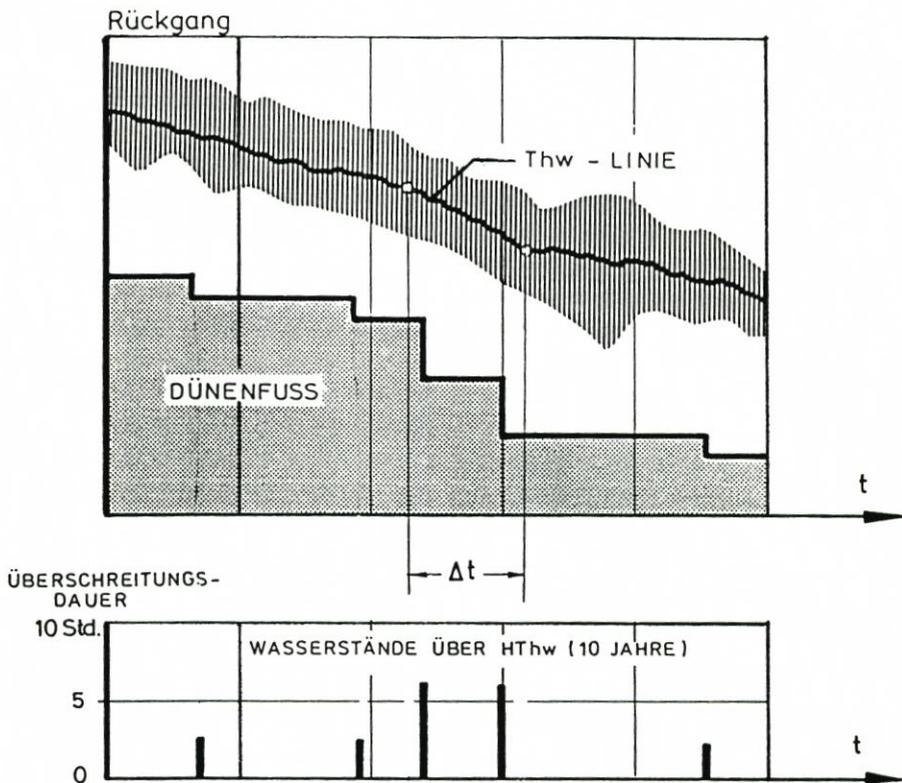


Abb. 3. Kontinuierlicher Strand- und diskontinuierlicher (stufenweiser) Dünenrückgang (schematisch)

rungen sind Dünenrückgänge als stufenweise (diskontinuierliche) Vorgänge bei bestimmten Sturmflutereignissen einzuordnen (Abb. 3, am Beispiel des Dünenfußes).

Die vorgenannten zufälligen Dünen- und Strandverhältnisse müssen bei Aussagen über die langfristige morphologische Entwicklung einer Düne und des vorgelagerten Strandes nach einzelnen Sturmflutereignissen unbedingt berücksichtigt werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Dies bezieht sich z. B. auf den Hinweis einer vermeintlichen Lagestabilität von Düne und/oder Strand, die jedoch nur eine scheinbare ist, wenn gerade eine sturmflutarme Periode verherrscht; umgekehrt können in einem sturmflutreichen Winter stärkere Veränderungen auftreten als in einer Reihe von Jahren zuvor.

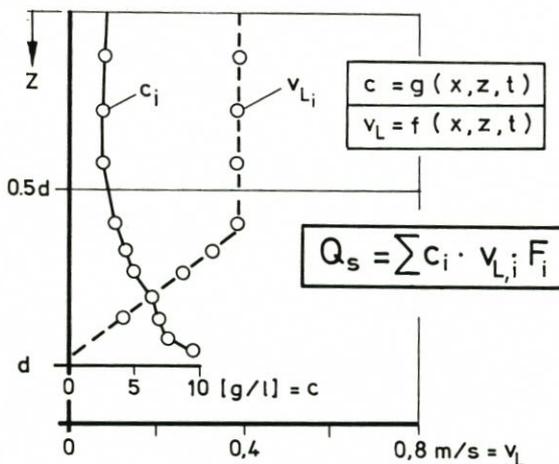
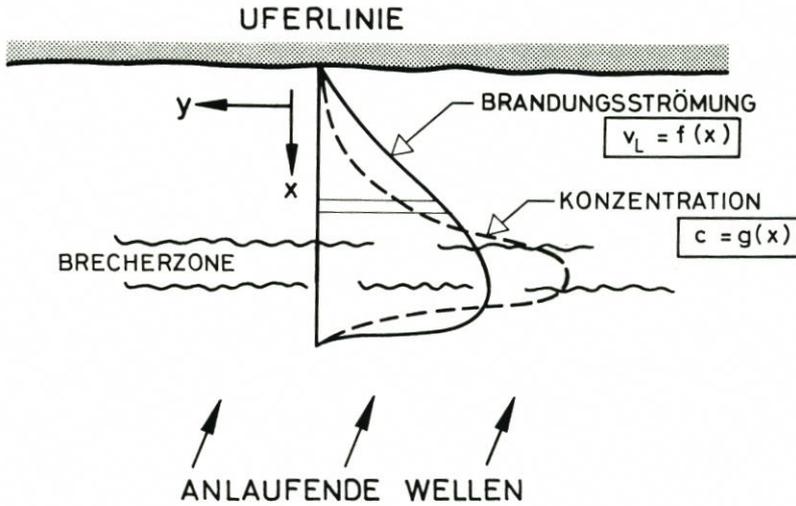


Abb. 4. Methodischer Ansatz zur Erfassung des Feststoffdurchsatzes im Küstenlängstransport (schematisch)

### 3. Wellenerzeugter Sedimenttransport und Ausbildung von Gleichgewichtsprofilen

#### 3.1 Allgemeines

Die momentane wellenerzeugte Bewegung von Sedimenten weist in der Brandungszone sowohl eine Küstenquer- als auch eine Küstenlängskomponente auf. Wenn die zeitlich und räumlich gemittelte Konzentrationsverteilung über die Wassertiefe ebenso bekannt wäre wie die zugehörige, ebenfalls zeitlich gemittelte Verteilung der Strömung nach Richtung und Geschwindigkeit, dann könnte für einen bestimmten Strandquerschnitt unschwer durch Integration nach der Kontinuitätsgleichung der Feststoffdurchsatz ermittelt werden (Abb. 4).

Bei Extremsturmfluten verlaufen die Wellen gewöhnlich nahezu senkrecht auf die Küste zu, so daß der Küstenquertransport vorherrscht. Die damit verbundenen Wechselwirkungen im Strandprofil zwischen Wasserstand, Brandung und Sedimentbewegung veranschaulicht Abb. 5.

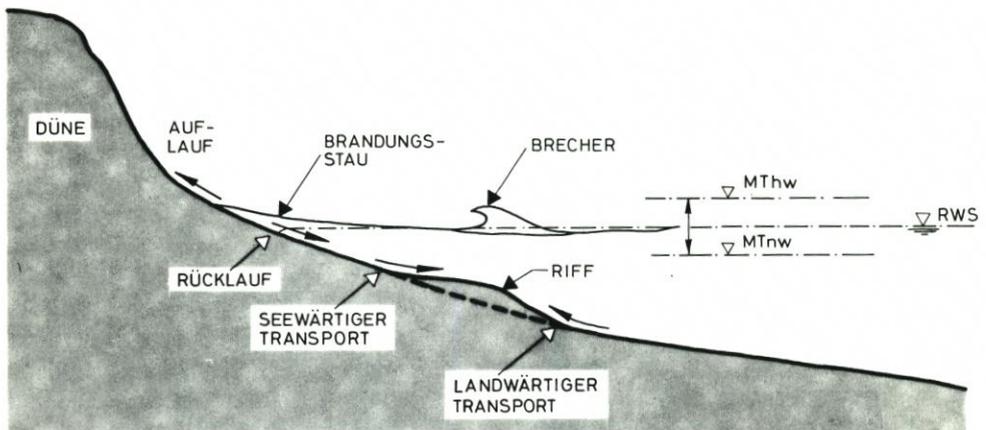


Abb. 5. Wechselwirkungen zwischen Wasserstand, Brandung und Sedimentbewegung bei senkrechtem Wellenangriff (schematisch)

#### 3.2 Übersicht über theoretische Ansätze und empirische Methoden zur Beschreibung von Gleichgewichts-Strandprofilen

Die ersten Ansätze zur Berechnung des Abbruchs von Dünen und zur Erosion von Stränden beruhten auf Beobachtungen, wonach sich in Abhängigkeit vom Wasserstand, den Wellen- und Sedimentparametern ein zugehöriges, stabiles Gleichgewichtsprofil während eines kurzzeitigen Sturmereignisses ausbildet (vgl. z. B. BRUUN, 1954, SWART, 1974, und DEAN, 1977). Abb. 6 zeigt schematisch die Erosion einer Düne und die Ausbildung eines Vorstrandprofils (Winter- oder Sturmflutprofil) nach einer Sturmflut.

DEAN (1977) wies aufgrund von Profilaufmaßen an der Golf- und Atlantikküste der USA nach, daß das Gleichgewichtsprofil durch eine einfache Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Danach ist die Wassertiefe ( $h$ ) über dem Strandprofil proportional zur  $\frac{2}{3}$  Potenz des horizontalen Abstandes ( $x$ ) von der Wasserlinie:

$$h = A \cdot x^{2/3}$$

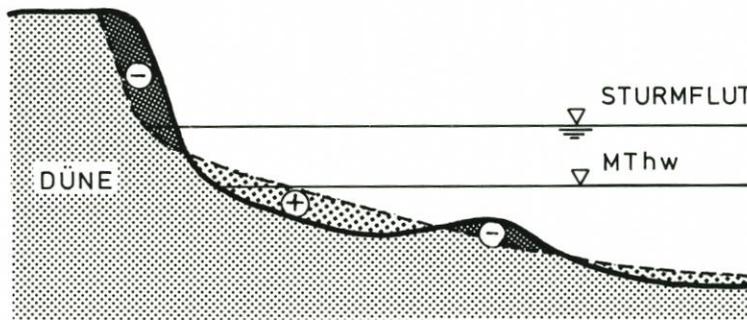


Abb. 6. Prinzip einer Dünenerosion bei Sturmfluten (schematisch)

In einer späteren Arbeit (DEAN, 1983) wurde der Koeffizient  $A$  wie folgt angegeben:

$$A \sim d^{1/3}$$

mit  $d$  = Korndurchmesser

Diese Beziehung wurde nach der Auswertung weiterer Sturmflutprofile nach Extremereignissen ermittelt. Einschränkend wird von DEAN jedoch darauf hingewiesen, daß der gefundene Zusammenhang nur für Küsten mit Schwallbrecherbrandung (Brechen der Wellen über mehrere Wellenlängen) mit einer zudem gleichförmigen Wellenenergiedissipation längs der Küste angewendet werden kann. Für Brandungsküsten mit überwiegender Sturzbrecherbrandung (Brechen der Wellen über weniger als eine Wellenlänge, wie z. B. vor Sylt) liegen noch keine Erfahrungen darüber vor, wie weit der Ansatz von DEAN anwendbar ist.

Hinsichtlich einer Klassifikation von Strandprofilen für Normal- und Sturmweatherlagen schlugen SUNAMURA und HORIKAWA (1974) folgende Unterscheidungen vor (Abb. 7):

Als Haupteinflußgröße auf die Ausbildung eines Sedimentprofils (= Stufenprofil  $\triangleq$  aufländiger Transport) oder eines Erosionsprofils (= Riffprofil  $\triangleq$  seewärtiger Transport) ermittelten SUNAMURA und HORIKAWA (1974) die Wellensteilheit der Ausgangswellen ( $H_o/L_o$ ). Darüber hinaus wurde dem Korndurchmesser noch ein wesentlicher Einfluß zugeordnet. Im Hinblick auf die Abschätzung und Vorausberechnung der Erosionsmengen aus Dünenabbruch und Strandabtrag wurden, ausgehend von dem Konzept eines Gleichgewichtsprofils nach einem Sturm, anfänglich sog. schematische Methoden angewendet. BRUUN (1962) stellte zuerst ein derartiges sehr einfaches Modell vor. Darin wurde angenommen, daß während eines Sturmes kein Sediment im Küstenlängstransport, sondern nur im Küstenquertransport bewegt wird und daß sich, abgesehen vom Rückgang, die Form des Strandprofils vor und nach dem Sturmereignis nicht ändern würde.

Unter dieser Voraussetzung ermittelte BRUUN grafisch die Erosionsmenge, indem er das Gleichgewichtsprofil um den Betrag des Wasserstandanstieges nach oben und dann landwärts soweit verschob, bis das oberhalb des Sturmflut-Scheitelwasserstandes erodierte Volumen dem unterwasserseitig abgelagerten Volumen entsprach. EDELMAN (1968) und DEAN (1976) gingen ähnlich vor und empfahlen, die durch einen Sturm bedingte Erosion grafisch aus der Kenntnis des Profils vor und nach einem Ereignis sowie aus der Kenntnis des maximalen Wasserstandes und der Brecherhöhen zu bestimmen. EDELMAN beobachtete bei Sturmfluten, daß sich die Umlagerung eines Strandes, die vorwiegend senkrecht zur Küste erfolgt, nur bis zur seewärtigen Grenze der Brandungszone erstreckt. Aus aufgemessenen und idealisierten Profilen vor einem Sturm bestimmte EDELMAN in Abhängigkeit vom Scheitelwasserstand das zugehörige Gleichgewichtsprofil nach dem Sturm; dies ist dann ebenfalls grafisch so zu verschieben, bis sich ein Massenausgleich im Profil zwischen Düne und Brecherzone ergibt.

DEAN (1976) arbeitete ebenfalls mit Profilen vor und nach einem Sturm und wandte ein analytisches Integrations- und Gleichsetzungsverfahren an, um das Erosionsvolumen zu bestimmen. Die vorgenannten Verfahren sind insofern nachteilig, als lediglich ein Bezug zum Scheitelwasserstand, nicht jedoch zur zeitlichen Entwicklung des Wasserstandes und des Profils während einer Sturmflut hergestellt wird.

SWART (1974) untersuchte in klein- und großmaßstäblichen Modellversuchen die zeitliche Entwicklung eines Profils bei Sturmfluten, wobei zwischen einer Brandungs- und Ausbrandungszone unterschieden wurde. Zugleich wurde auch der Sedimenttransport an der Sohle und in Suspension in Abhängigkeit von der Energiedissipation der Wellen berücksichtigt. Auf dieser Grundlage entwickelte SWART einen empirischen Ansatz, der es ermöglicht, die land- und seeseitigen Grenzen des Sedimenttransportes sowie die Form eines Gleichgewichtsprofils zu bestimmen.

HUGHES (1983) befaßte sich ebenfalls mit physikalischen Modellen zur Dünen- und Stranderosion aufgrund von kleinmaßstäblichen Untersuchungen. Dabei wurde angenommen, daß die Fallgeschwindigkeit des Einzelkornes gleichwertig dem Verhältnis von Trägheits- zur Schwerkraft sowohl im Modell als auch in der Natur ist. Der aus diesen Annahmen abgeleitete Ansatz erlaubt Maßstabsverzerrungen im Modell und beinhaltet einen morphologischen Zeitmaßstab. In den Modellbeziehungen sind auch Überprüfungen mit Aufmäßen von Dünenabbrüchen nach dem Wirbelsturm „Eloise“ (1975) berücksichtigt. Danach wurde der

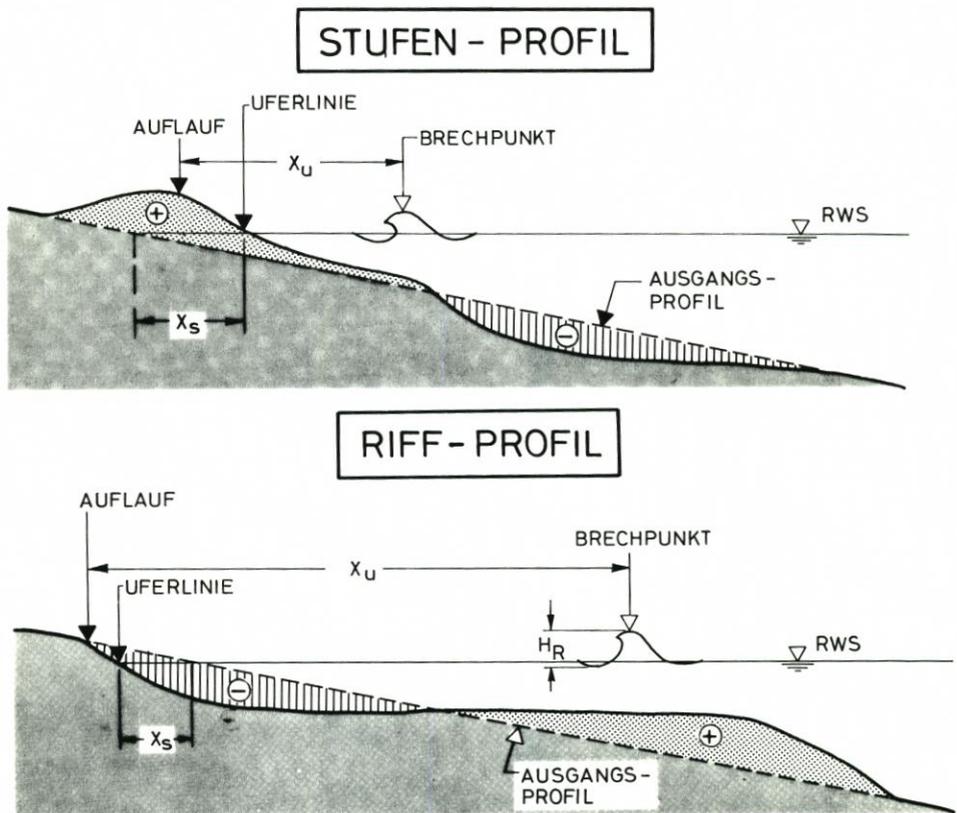


Abb. 7. Unterscheidung von Stufenprofil (= Sedimentation) und Riffprofil (= Erosion) nach SUNAMURA und HORIKAWA (1974)

Ansatz nochmals mit zusätzlichen Wirbelsturmdaten überprüft und verbessert, so daß schließlich eine allgemeine Anwendbarkeit empfohlen werden konnte.

Die grundsätzlichen Probleme bei der Nachbildung von Stränden in kleinmaßstäblichen Untersuchungen und der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Naturzustand werden anschaulich von WANG (1986) aufgezeigt.

Auf der Grundlage von naturmaßstäblichen Untersuchungen im Delta-Flume in den Niederlanden entwickelte VELLINGA (1982 und 1983) ein weiteres Vorhersageverfahren zum Dünenabbruch und zur Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils. Die Überprüfung dieses Ansatzes mit aufgemessenen Strandprofilen nach den Sturmfluten von 1953 und 1976 in Holland sowie nach dem Wirbelsturm „Eloise“ (1975) in Florida ergab zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Natur und Berechnung. VELLINGA definierte für vorgegebene hydrographische und sedimentologische Parameter zunächst ein Referenzprofil und verbesserte dies dann für eine allgemeine Anwendung auf der Grundlage von klein- und naturmaßstäblichen Modellversuchen. Auch zu diesem Ansatz ist einschränkend zu bemerken, daß es sich ebenfalls auch nur um eine weitere empirische Methode handelt, die eigentlich nur für die zugrundegelegten Versuchsbedingungen, d. h. für ein Ereignis mit einem konstanten Wasserstand über eine Dauer von fünf Stunden, anzuwenden ist. Bei längeren Verweilzeiten wird daher einschränkend empfohlen, das Verfahren nur für überschlägliche Betrachtungen heranzuziehen.

KRIEBEL und DEAN (1985) bemerken in einer zusammenfassenden Beurteilung, daß schematische Methoden für die Erfassung der Erosionsmengen, die einem Sturm zuzuordnen sind, nur unzureichend für eine Anwendung in der Praxis geeignet sind. Der Ansatz von BRUUN (1962) beruht auf der Annahme, daß sich eine gleichförmige Ablagerung von erodierten Sedimenten weit über die Brandungszone seewärts erstreckt. Aufmaße in der Natur haben jedoch ergeben, daß der maßgebliche Anteil des erodierten Sediments bei Sturmfluten nur unwesentlich über die Brecherzone hinaus seewärts verlagert wird (vgl. z. B. HAYES, 1967). Die Methoden von EDELMAN (1972) und DEAN (1976) beruhen auf dem Ansatz, daß das einem Sturmflut-Scheitelwasserstand zuzuordnende Erosionspotential dem über die Dauer des Sturmflutereignisses aufsummierten, tatsächlichen Erosionspotential entspricht. Untersuchungen u. a. von CHIU (1977; bei KRIEBEL und DEAN, 1985) ergaben für diese Annahme eine typische, etwa 5fache Überschätzung der tatsächlichen sturmspezifischen Erosionsmengen. Eine derartige Überschätzung wird darauf zurückgeführt, daß die zeitabhängige Wasserstandsentwicklung und die damit verbundene, verzögernde Rückkoppelungsbeziehung zwischen Wellenangriff und Strandumlagerung nicht berücksichtigt wird. Trotz der Einbeziehung des Sedimenttransportes weist auch die Methode von SWART noch den Nachteil auf, daß der Einfluß von Dünen vernachlässigt wird. Darüber hinaus haben die naturähnlichen Versuche von VELLINGA (1982) ergeben, daß sich die seewärtige Grenze des Sedimenttransportes nicht bis in Wassertiefen von

$$d = 2 \text{ bis } 3 \cdot d_B$$

$$\triangleq 1 \text{ bis } 2 \cdot H_S$$

mit  $d_B$  = Brechertiefe und  
 $H_S$  = signifikante Wellenhöhe

erstreckt, sondern nur maximal in Wassertiefen bis

$$d = 0,5 \text{ bis } 0,8 H_S$$

Der derzeitige Kenntnisstand zur Vorausberechnung von Dünenabbrüchen und Stranderosionen kann dahingehend zusammengefaßt werden, daß die Methode von VELLINGA (1982,

1983) als einzig realistische und daher brauchbare angesehen werden kann, weil darin die wirksamen Wellen- und Strandparameter sowie die zeitabhängige Wasserstandsentwicklung berücksichtigt wird. Dennoch muß auch hier eingeschränkt werden, daß es sich ebenfalls „nur“ um eine empirische Methode handelt. Sie kann nicht ohne weiteres auf Profilentwicklungen und Sturmflutverhältnisse, die von den im Laboratorium getesteten Bedingungen abweichen, angewendet werden.

### 3.3. Numerische Berechnungen der Dünen- und Stranderosion

Ausgehend von dem Kenntnisstand zur Vorausberechnung von Dünen- und Stranderosionen (vgl. Abschn. 3.2) stellen KRIEBEL und DEAN (1985) eine alternative schematische Methode zur Dünen- und Strandentwicklung bei Stürmen in Abhängigkeit von wechselnden Wasserständen, d. h. Einbeziehung des zeitabhängigen Sturmflutablaufes und unterschiedlicher Wellenhöhen, vor. Der Ansatz ist hauptsächlich auf eine praktische Anwendung ausgerichtet, wobei jedoch die physikalischen Prozesse der Dünen- und Stranderosion, wenn auch nur mit einfachen Beschreibungen, einbezogen wurden. Als Ergebnis werden numerische Lösungen für vereinfachte Gleichungen, die die Strandentwicklung und den resultierenden Sedimenttransport im Küstenvorfeld beinhalten, vorgestellt. Zusätzlich wird die zeitabhängige Profilentwicklung während eines Sturmes berücksichtigt und schließlich auch noch eine verbesserte Beschreibung des Strandprofils vorgestellt. Es handelt sich um ein zusammenge-

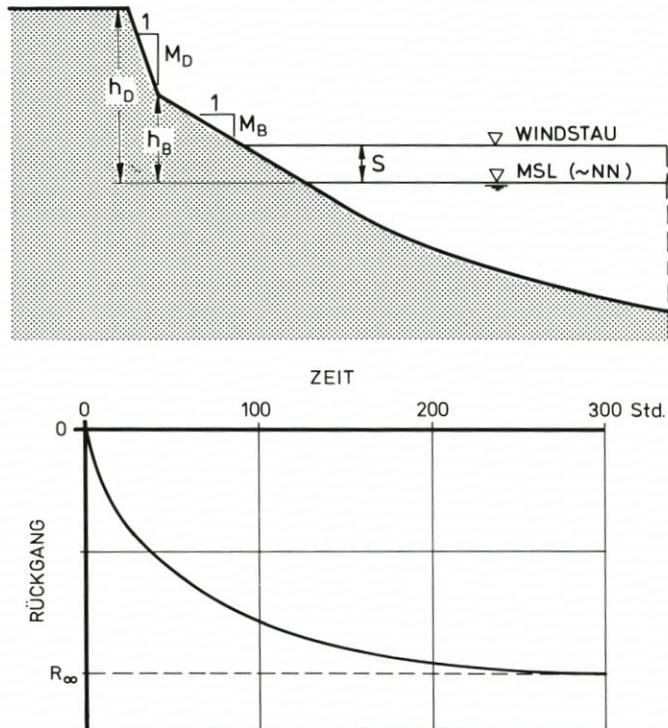


Abb. 8. Bezeichnungen für das numerische Modell von KRIEBEL und DEAN (1985) zur Berechnung des Rückganges einer idealisierten Düne (oben) sowie Annahme zum zeitlichen Rückgang (unten)

setztes Dünen- und Strandprofil, das auf der Grundlage von mehreren Hundert Naturprofilen noch durch eine Beschreibung des Küstenvorfeldprofils ergänzt wurde.

Der vorgenannte numerische Lösungsansatz lieferte für ausgewählte Aufmaße nach Sturmfluten qualitativ gute Übereinstimmungen hinsichtlich der Erosionscharakteristika, ebenso auch für ähnliche Untersuchungen in klein- und großmaßstäblichen Modellen. Quantitativ wurden ebenfalls zufriedenstellende Übereinstimmungen mit den tatsächlichen Erosionsmengen aus Dünenabbrüchen während des Wirbelsturmes „Eloise“ sowie aus Laboruntersuchungen ermittelt.

Am Beispiel des Rückganges einer idealisierten Düne haben KRIEBEL und DEAN (1985) über numerische Berechnungen anschaulich die Änderung der Größenordnung von Dünenabbrüchen bei Variation von jeweils nur einem Einflußparameter und sonst gleichen Bedingungen aufgezeigt. Abb. 8 (oben) zeigt die ausgewählten Untersuchungsparameter.

Die zeitabhängige Auftragung des Rückganges einer Düne veranschaulicht die dem Modell zugrundeliegende Annahme einer asymptotischen Annäherung des Rückganges an einen Gleichgewichtszustand während eines Extremereignisses. Der Rückgang wird als Exponentialfunktion wie folgt beschrieben:

$$R(t) = R_{\infty} [1 - \exp(-t/T_s)]$$

mit  $t$  = Zeit  
 $T_s$  = charakteristischer Zeitmaßstab

Die Annahme eines asymptotisch verlaufenden Rückganges ist als realistisch anzusehen, da diese relativ gut durch klein- und großmaßstäbliche Untersuchungen bestätigt wurde. Der Zeitmaßstab muß dagegen noch als weitgehend unbestimmte Größe angesehen werden. Aufgrund der numerischen Berechnungen werden folgende Größenordnungen des Zeitmaßstabes für natürliche Strände genannt:

10 Std. bis 100 Std.: Stürme bzw. Sturmfluten

1000 Std. bis 10 000 Std.: Regeneration von Stränden nach einem Sturm sowie Sedimentumlagerungen in größeren Wassertiefen, z. B. infolge langfristiger Wasserstandsveränderungen

Für willkürlich gewählte Einflußparameter zeigt Abb. 9 die Änderung in der Größenordnung des Dünenabbruchs in Abhängigkeit von der jeweiligen Variation folgender Parameter:

- (1) Windstau (Wasserstandserhöhung)
- (2) Wellenhöhe
- (3) Strandneigung und
- (4) Korndurchmesser

Unter den vorgenannten, einschränkenden Gesichtspunkten sind die quantitativ vergleichenden Auftragungen auf Abb. 9 zu werten, insbesondere im Hinblick auf den Zeitmaßstab. Außerdem ist nochmals zu bemerken, daß der vorgestellte numerische Ansatz ausdrücklich nur für Küsten anwendbar ist, an denen überwiegend eine Schwallbrecherbrandung vorherrscht. Für Küsten, wie z. B. die von Sylt, wo die Seegangenergie in einer relativ schmalen Brandungszone umgewandelt wird, sind mit Sicherheit andere Größenordnungen des Zeitmaßstabes sowie auch zahlenmäßig unterschiedliche Rückgänge bei gleicher Größe der Einflußparameter zu erwarten. Antworten u. a. auf diese Fragestellungen werden aus den naturähnlichen Versuchen im Großen Wellenkanal erwartet, die im Jahre 1985 begonnen wurden und deren erste Ergebnisse nachfolgend vorgestellt werden sollen.

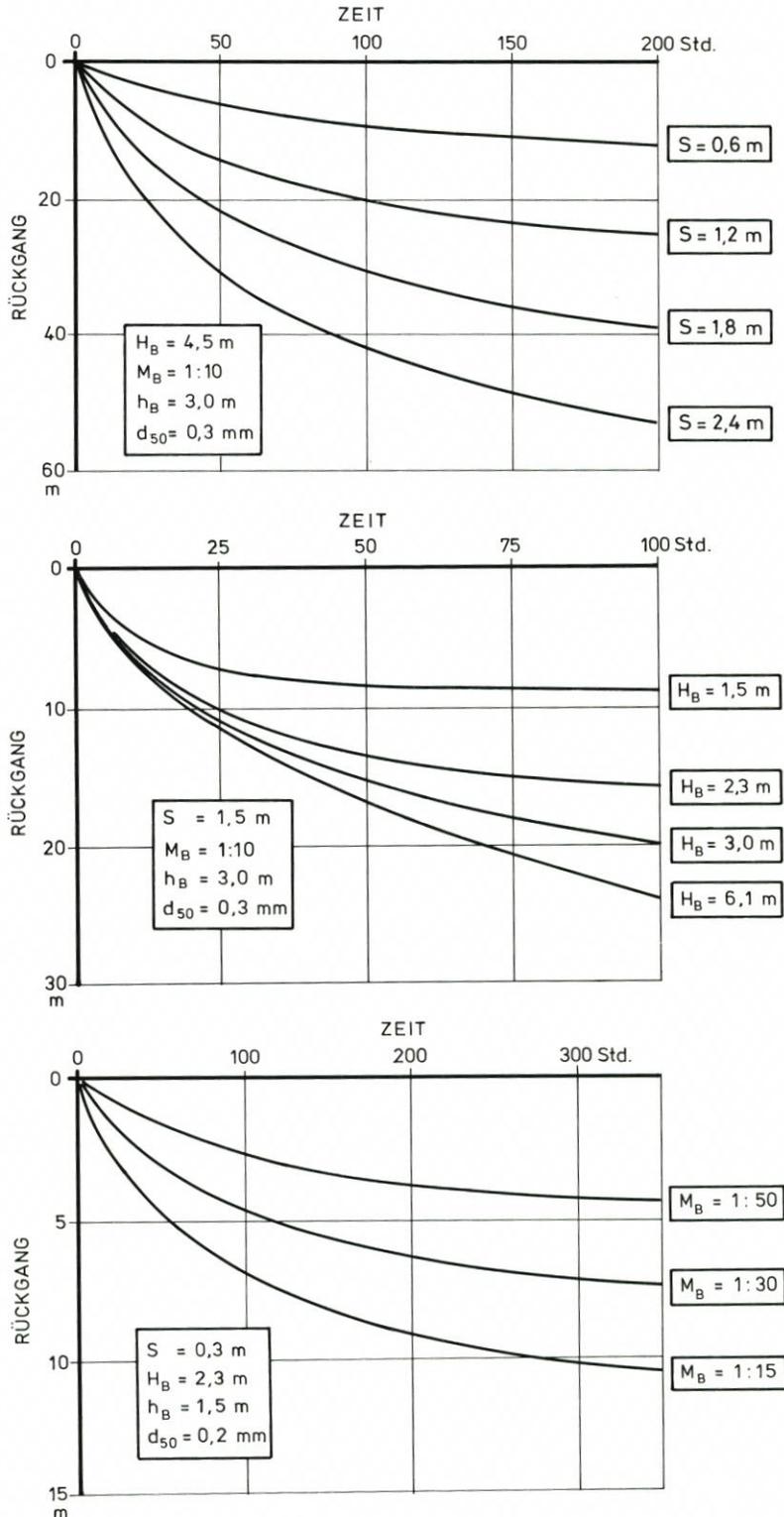


Abb. 9. Beispielhafte Darstellung der unterschiedlichen Einflüsse von Windstau (oben), Wellenhöhe (Mitte) und Strandneigung (unten) auf den Rückgang einer idealisierten Düne nach KRIEBEL und DEAN (1985)

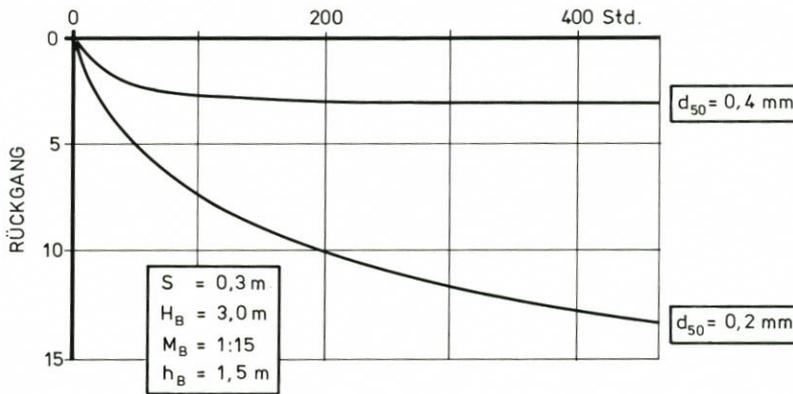


Abb. 9a. Beispielhafte Darstellung des Einflusses der Korngröße auf den Rückgang einer idealisierten Düne nach KRIEBEL und DEAN (1985)

## 4. Untersuchungen im Großen Wellenkanal

### 4.1 Aufgabenstellung

Grundlagenuntersuchungen zum physikalischen Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Brandung, wellenerzeugten Strömungen und den daraus resultierenden Abbrüchen von Dünen und Transportvorgängen auf den vorgelagerten Stränden waren Schwerpunkt von experimentellen Versuchen im Großen Wellenkanal (GWK) im zurückliegenden Förderungszeitraum durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Die einzelnen Untersuchungen waren u. a. auf folgende Fragestellungen ausgerichtet:

1. Vergleichsversuche mit regulären und irregulären Wellen (Wellenspektren) hinsichtlich der Umwandlung einer 1:4 geneigten Böschung (Düne oder Kliff) an einen natürlichen Strand.
2. Einfluß eines hohen Vorstrandes auf den Abbruch von Dünen und die Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils
3. Erfassung der Sedimente in Suspension über die Wassertiefe und über den Querschnitt des Strandprofils in Abhängigkeit von den Brandungsparametern und Orbitalbewegungen an der Sohle

Ziel der naturmaßstäblichen Untersuchungen im GWK ist es, für die Grundlagenforschung möglichst umfassende experimentelle Versuchsdaten aufzuzeichnen und mit den gewonnenen Daten theoretische und physikalische Ansätze zum Mechanismus der Dünenabbrüche und Umformung von Stränden bei Extremereignissen zu prüfen bzw. weiterzuentwickeln.

Die vorgenannten Untersuchungen beinhalten zugleich auch aktuelle Fragestellungen für die Praxis des Küsteningenieurwesens. Diese beziehen sich z. B. auf die künftige Sicherung des Abbruchs von natürlichen Dünen durch ein vorgespültes Sanddepot („künstliche Vordüne“) als sog. „Verschleißbauwerk“ bei Sturmfluten, das von Zeit zu Zeit wieder aufgefüllt werden muß. Hierzu gibt es noch keine Erfahrungen darüber, ob bei gleichem Auffüllvolumen je lfm Strandbreite z. B. ein hohes Sanddepot auf dem trockenen Strand (etwa 6 m bis 7 m über MThw) wirksamer ist, d. h. eine längere Verweilzeit des Sandes erwarten läßt, als ein flacheres Sanddepot in gleicher Lage, jedoch mit zusätzlicher Erhöhung des Vorstrandes im nassen Strandbereich (bis unterhalb MTnw).

## 4.2 Durchführung der Versuche im GWK

Für die experimentellen Untersuchungen im GWK wurden die auf Abb. 10 schematisch dargestellten Versuchsreihen gewählt; dies sind, um Größenordnungen zu nennen, etwa 350 m<sup>3</sup> Sand für die Versuchsreihe „Deich und Vorland“ und etwa 1000 m<sup>3</sup> Sand für die Versuchsreihen „Düne ohne Vorstrand“ und „Düne mit Vorstrand“. Als Einbaumaterial wurde ein Sand mit einem mittleren Korndurchmesser von  $d_{50} = 0,33$  mm gewählt, der als repräsentativ für Brandungsküsten, wie etwa Sylt, angesehen werden kann.

Im Folgenden soll über die Versuche zu Dünenabbrüchen und Strandumformungen berichtet werden. Der Versuchskörper „Düne ohne Vorstrand“ setzte sich im Ausgangszustand aus einer Berme von 30 m Länge und einer Höhe von 7 m über der Kanalsohle bzw. 2 m über dem Ruhewasserspiegel (RWS) sowie einer 1:4 geneigten Böschung zusammen. Der Versuchskörper „Düne mit Vorstrand“ bestand aus einer 10 m breiten Berme und einem Vorstrand mit der Neigung 1:20, der am Dünenfuß eine Höhe von 4 m über Kanalsohle (= 1 m unter RWS) aufwies und sich seewärts bis zur Kanalsohle erstreckte (= 80 m Breite). Unter der Annahme, daß die Energie in einer Folge von regulären Wellen etwa der eines Wellenspektrums entspricht, wenn die signifikante Wellenhöhe die Größenordnung der regulären Wellenhöhe ( $H_{1/3} = H_{reg}$ ) aufweist, wurden für die Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen eine

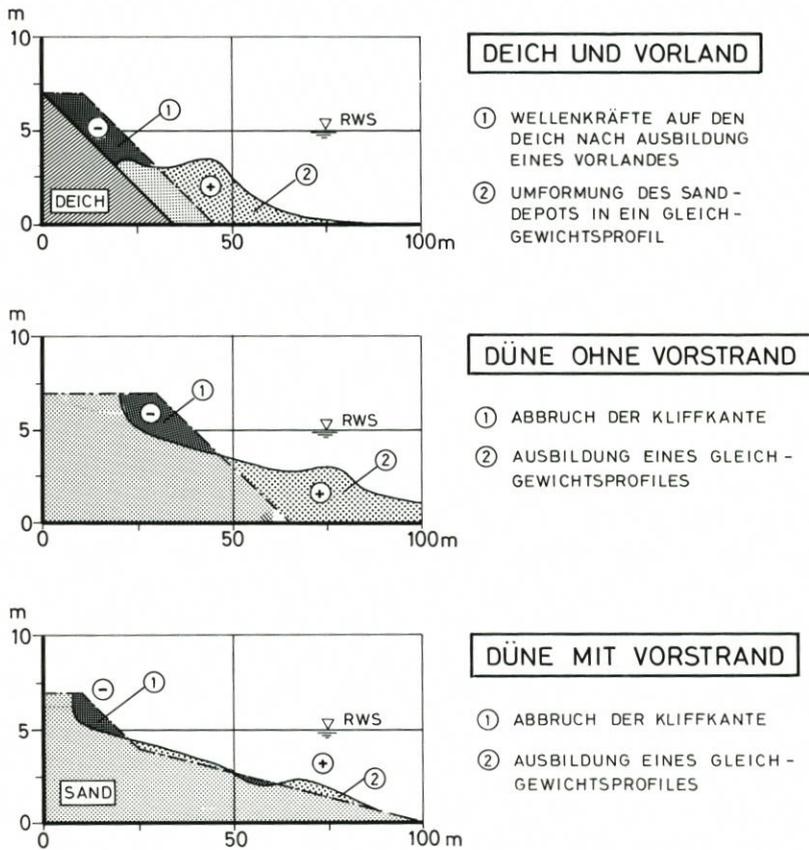


Abb. 10. Versuchseinbauten (schematisch) im GWK und Versuchsziele

Wellenhöhe von  $H = 1,5$  m mit einer Periode von  $T = 6$  s sowie ein JONSWAP-Spektrum mit  $H_{1/3} = 1,5$  m und  $T_p = 6$  s für die Untersuchungen mit irregulären Wellen gewählt. Um eine Verfälschung der Versuche im GWK durch nennenswerte Reflexionen, die sich den Ausgangswellen überlagern, zu vermeiden, wurden jeweils nur Folgen von je 50 bis 100 Wellen gefahren. Danach wurde die Wellenmaschine ausgeschaltet und eine Pause von etwa 1,5 Stunden zur Beruhigung des Wasserspiegels eingelegt. Diese Zeit wurde u. a. dazu genutzt, zugleich in drei Profilen und in Abständen von 0,5 m bis 1,0 m den jeweiligen Abbruchzustand der Düne sowie die Vorstrandhöhen aufzumessen.

### 4.3 Ergebnisse der Untersuchungen

#### 4.3.1 Einfluß von regulären und irregulären Wellen auf die Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils

In einer ersten Versuchsreihe wurde die Umbildung einer Düne mit einer 1:4 geneigten Böschung in einen natürlichen Strand untersucht. Zunächst wurden reguläre Wellen ( $H = 1,5$  m und  $T = 6$  s) bis zur Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils verwendet; danach wurde der Versuch mit einem JONSWAP-Spektrum ( $H_{1/3} = 1,45$  und  $T_p = 6$  s) wiederholt. Der wichtigste Unterschied beider Versuchsreihen bestand darin, daß sich bei regulären Wellen ein Strandprofil ausbildet, das deutlich eine Barre (Riff) aufweist (Abb. 11, oben). Eine derartige Entwicklung war dagegen in vorausgegangenen kleinmaßstäblichen Untersuchungen bei gleichem Versuchsaufbau im Maßstab 1:10 nicht beobachtet worden. Dies kann auf die veränderten Energieumwandlungsprozesse infolge einer vermehrten Luftaufnahme beim Brechen der Welle im Naturmaßstab zurückgeführt werden.

Auf die noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich des physikalischen Verständnisses zur Ausbildung von Riffen weist u. a. ALLEN (1984) hin. Bei den Untersuchungen mit einem

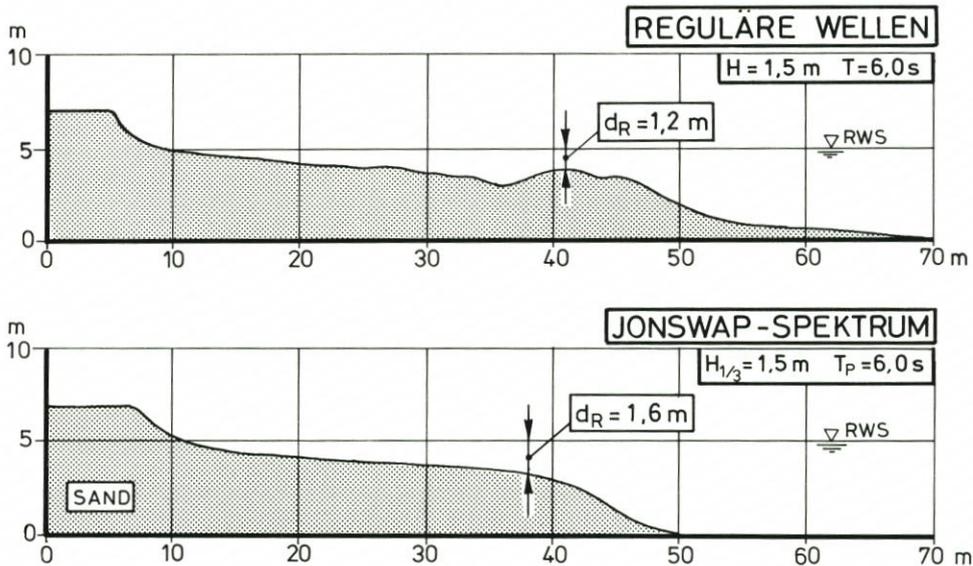


Abb. 11. Gleichgewichtsprofile vor einer Düne nach 3000 Wellen (rd. 5 Std.) nach Versuchen mit regulären (oben) und irregulären Wellen (unten)

Wellenspektrum im Naturmaßstab konnte hingegen die Ausbildung eines Riffprofils nicht festgestellt werden. Es ergab sich vielmehr ein gedrungenes sog. „Bermenprofil“ (Abb. 11, unten) mit einer Neigung von 1:15 bis 1:20 unterhalb der Wasserlinie und einem steilen Abfall des Profils auf die Kanalsohle an der seewärtigen Grenze der Brandungszone.

Auffällig ist beim Vergleich beider Profile die beachtlich voneinander abweichende seewärtige Verlagerung der erodierten Sedimente, was das unterschiedliche Transportvermögen bei regulären und irregulären Wellen veranschaulicht. Hinzuweisen ist ferner auf die Tiefen des Riffes mit  $d_R = 1,2$  m unter dem Ruhewasserspiegel und einer Tiefe von  $d = 1,6$  m am seewärtigen Ende des Bermenprofils.

#### 4.3.2 Zur Parametrisierung von Vorstrandprofilen mit Riffbildung

Im Hinblick auf die Art der Auswertung und eine mögliche Parametrisierung von Vorstrandprofilen mit einer Riffbildung wurde die zeitabhängige Strandentwicklung im Zusammenhang mit den Veränderungen der Wellenparameter in der Brecherzone ausgewertet. Abb. 12 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe mit regulären Wellen bezüglich der Umwandlung einer 1:4 geneigten Düne (ohne Vorstrand) in ein nahezu stabiles Strandprofil nach etwa 4000 Wellen (rd. 6 Stunden). Abb. 13 veranschaulicht dazu beispielhaft die Verteilung der Wellenhöhen über dem jeweiligen Strandprofil.

Aus den vorgenannten Abtragungen sowie aus den visuellen Beobachtungen der Versuche im GWK können folgende qualitativen Aussagen abgeleitet werden:

1. Der Brechpunkt, der bei Versuchsbeginn zunächst unmittelbar auf dem oberen Teil des Strandes liegt, wird im weiteren Lauf der Strandentwicklung monoton seewärts verlagert, wobei die Brecherart von der einer brechenden „Clapotis“ in die eines ungesättigten Sturzbrechers übergeht (Abb. 14).
2. Schon nach etwa 200 Wellen (rd. 20 Min.) bildet sich eine erste Barre (Riff) aus, die im weiteren Verlauf der Untersuchungen monoton weiter seewärts wandert, wobei die Wassertiefe über der Barre nahezu konstant bleibt.
3. Wenn auch, wie Abb. 13 beispielhaft zeigt, der Brechpunkt (= Maximum der Wellenhöhe) und der höchste Punkt der Barre (Riff) nicht immer zusammenfallen, so ist doch offensichtlich, daß Brechpunkt und Riff immer sehr dicht nebeneinanderliegen und sich gleichsinnig seewärts während der Versuchsreihe verlagern. Die nahezu konstante Wellenhöhe landwärts der Brecherzone zeigt die Bedeutung dieser Schwallzone für die Vorgänge der Kliffbrandung, wobei sich bei dem instationären Prozeß der Strandumwandlung diese Schwallzone monoton seewärts erweitert.
4. Das Wechselspiel zwischen brechenden Wellen und Strandumlagerung spielt sich in einer Brandungszone ab, die mit den bisherigen Klassifikationen (Schwallbrecher, Sturzbrecher, Reflexionsbrecher, brechende „Clapotis“) nicht beschrieben werden kann. Es wird für diese Art der Brandung der Term **Kliffbrandung** vorgeschlagen. Der „Kliffbrecher“ ist dadurch gekennzeichnet, daß an dem sich bildenden Kliff an der Dünenkante ein Teil der Wellenenergie reflektiert wird. Der reflektierte Brecher läuft dann auf einer allmählich fallenden Schorre dem ankommenden Brecher entgegen. Erwähnenswert aufgrund von visuellen Beobachtungen ist der große Luftanteil in diesem Rücklaufschwall. Der sich bildende Sturzbrecher brandet in dieses Rücklaufwasser (Abb. 15) und erzeugt den nächsten Rücklaufschwall, der ebenfalls wieder von der Kliffkante größtenteils reflektiert wird usw.

Um die morphologischen Vorgänge der Strandentwicklung (Abb. 12) zu parametrisieren, wird die Bildung dimensionsloser Parameter gewählt. Dazu wurden in einer ersten Betrachtung je zwei Längen- und Höhenangaben zugrundegelegt, wie sie auf Abb. 16 schematisch dargestellt sind. Im Hinblick auf ein einheitliches Koordinatensystem wurde als Nullpunkt der Schnittpunkt des Ruhewasserspiegels mit dem jeweiligen Strandprofil gewählt; von diesem Punkt aus wird mit der Länge  $x$  die jeweilige Entfernung eines Ortes in der Brandungszone von diesem Nullpunkt bezeichnet. Mit den Parametern  $H_B$  (Höhe der Welle am Brechpunkt) und  $a_B$  (= Abstand des Brechpunktes von der Uferlinie mit  $x = 0$ ) werden dabei die Wellenparameter einschließlich der Wellenenergie, mit  $d_R$  (kleinste Wassertiefe über dem Riff) und  $a_R$  (Abstand des Riffes von der Uferlinie) die Hauptparameter der sich umbildenden Sohle erfaßt.

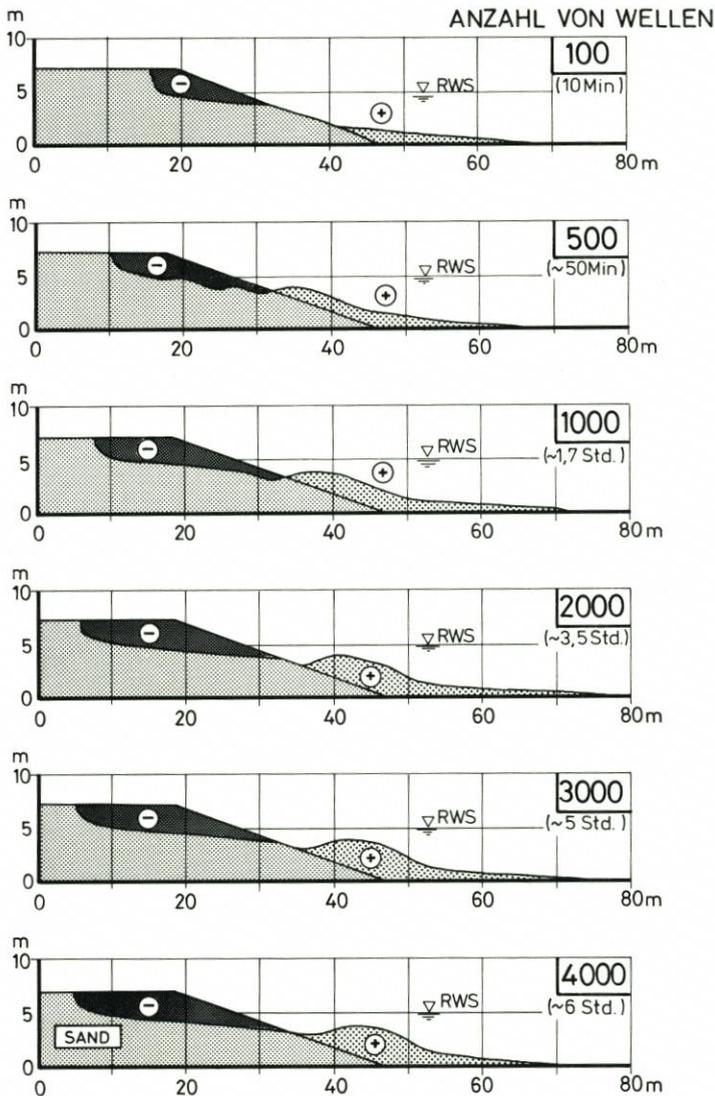


Abb. 12. Umformung einer 1:4 geböschten Düne (ohne Vorstrand) in ein stabiles Gleichgewichtsprofil bei regulären Wellen ( $H = 1,5$  m und  $T = 6$  s)

Die Entwicklung der Parameter  $H_B$  und  $d_R$  in Abhängigkeit von der Wellenzahl  $N$  zeigt Abb. 17, in beiden Fällen sind nur geringe Änderungen während der Versuchszeit festzustellen. Anders ist es mit den Abständen  $a_R$  und  $a_B$  (Abb. 18), die bei allen Versuchen eine monotone Zunahme mit der Wellenzahl zeigen, wobei sich zugleich bei Wellenzahlen oberhalb  $N = 3000$  ein asymptotisches Verhalten andeutet.

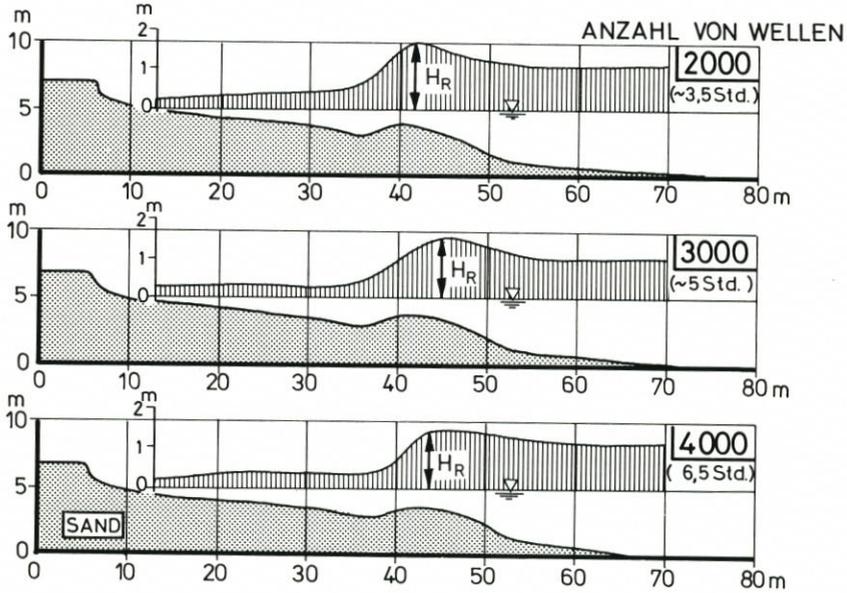


Abb. 13. Verteilung der Wellenhöhen über dem jeweiligen Strandprofil bei regulären Wellen

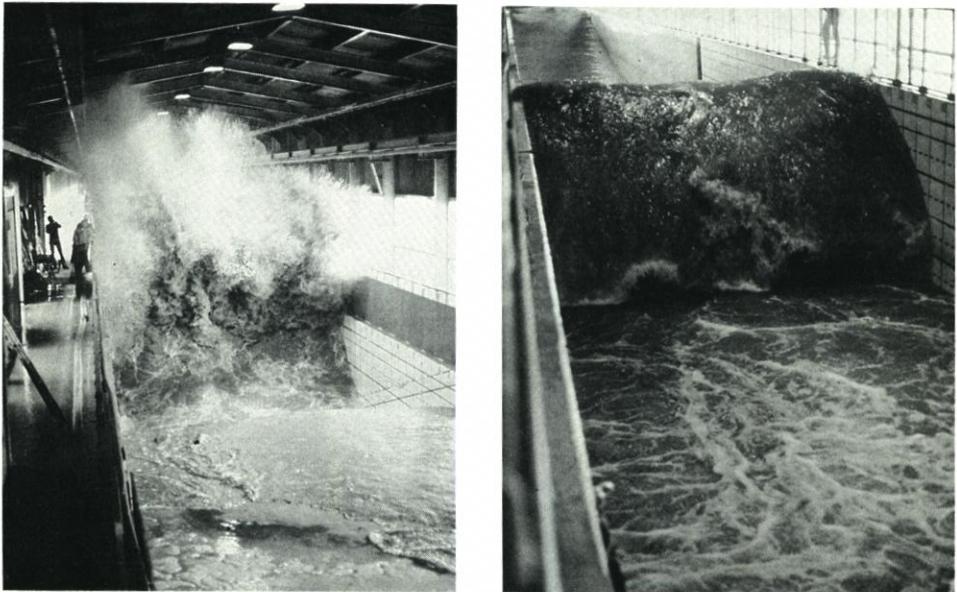


Abb. 14. Auf die Düne auflaufende reguläre Wellen mit der Ausbildung einer brechenden „Clapotis“ bei Versuchsbeginn (links), übergehend in die eines ungesättigten Sturzbrechers (rechts)

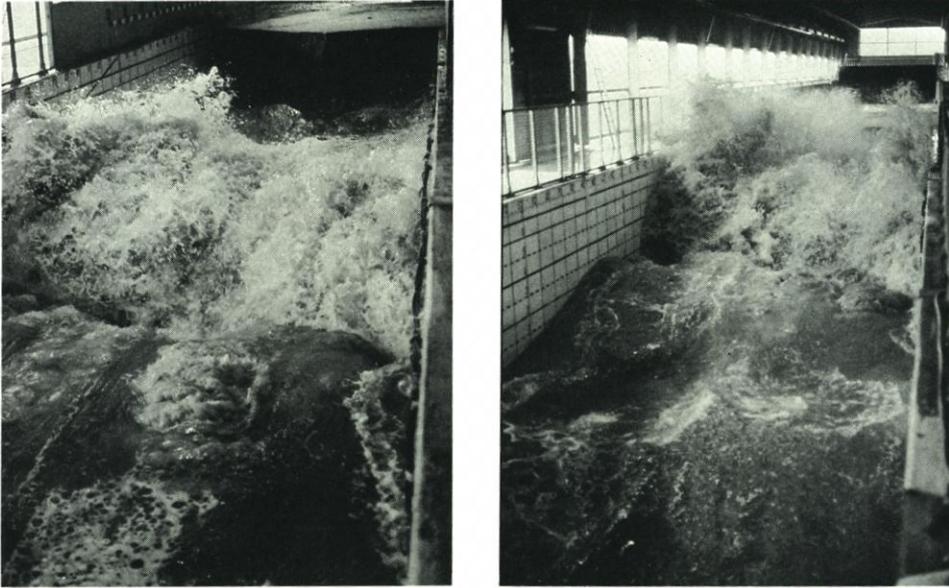


Abb. 15. Aufschlag eines Brechers in das Rücklaufwasser (links) und Auslösen eines Auflaufschalles auf das Kliff (rechts)

Mit dem gewählten dimensionslosen Ausdruck  $H_B/a_B$  wird physikalisch die Wellenenergie ausgedrückt, die sich auf das Flächenelement  $\Delta a$  in der Brandungszone verteilt (spezifische Wellenenergie); der ebenfalls dimensionslose Ausdruck  $d_R/a_R$  stellt den Hauptparameter der Riffentwicklung dar. Wie Abb. 19 zeigt, sind beide Funktionen monoton fallend; für die Wellenenergie bedeutet dieses, daß sie je Flächeneinheit des Strandes mit zunehmender Wellenzahl (= Strandentwicklung) immer kleiner wird, während sich das Riff weiter seawärts verschiebt.

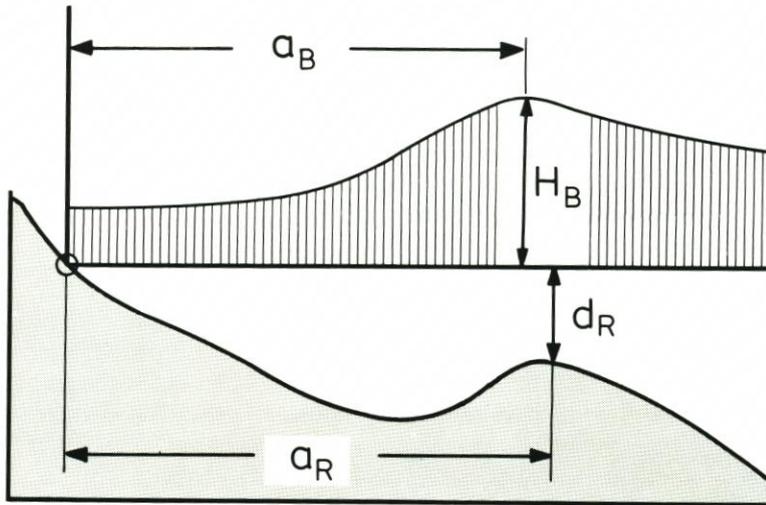


Abb. 16. Definition von Längen und Höhen (schematisch)

Die weiteren, zur Zeit laufenden Untersuchungen sind darauf ausgerichtet, alle kennzeichnenden Parameter der Strandentwicklung in möglichst einer Invarianten zusammenzufassen, die unabhängig von der Strandentwicklung und nur vom Korndurchmesser des Strandes abhängig ist. Es ist zu vermuten, daß theoretisch bei allen Entwicklungsstadien ein augenblickliches Gleichgewicht zwischen der (über die Brandungslänge  $x$  verteilten) Wellenenergie und der (sich verändernden) Strandmorphologie besteht. Diese Zusammenhänge konnten in einem dimensionslosen Strandindex  $S_E$  zusammengefaßt werden, der nach verschiedenen Überlegungen in einem ersten Ansatz zu

$$S_E = \frac{\int_0^x H_B(x) dx}{\int_0^x d(x) dx}$$

gewählt wurde. Diese Beschreibung erfaßt physikalisch das Verhältnis der umgesetzten Wellenenergie zur augenblicklichen Strandentwicklung und stellt geometrisch-formal das Verhältnis der Flächen der Wellenhöhen zu denen der Strandhöhen unter dem Ruhewasserspiegel dar.

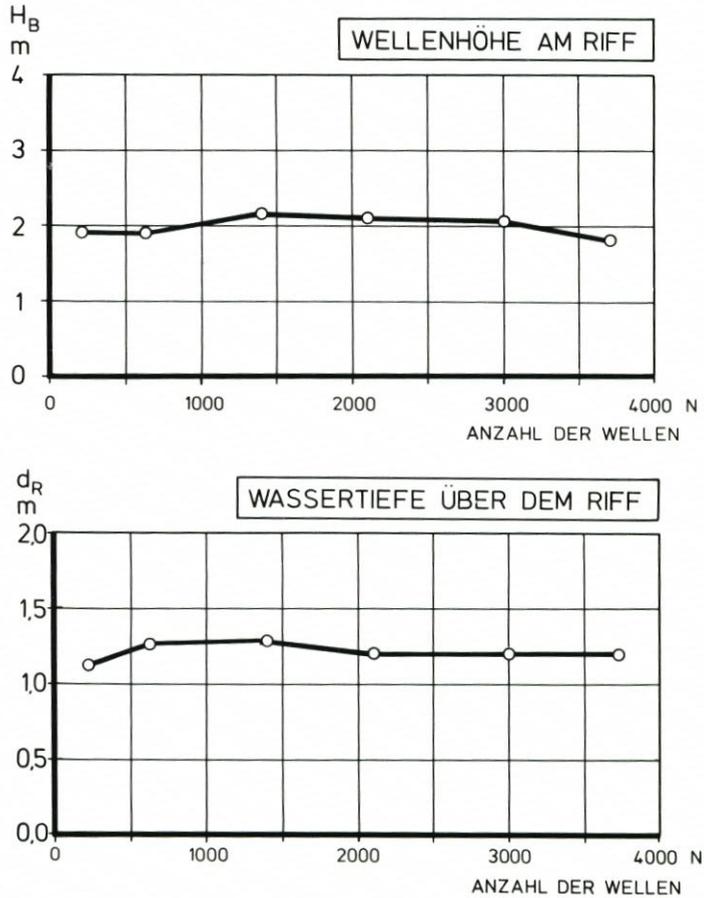


Abb. 17. Zeitabhängige Entwicklung der Wellenhöhe am Riff und der Wassertiefe über dem Riff (Versuchsreihe mit regulären Wellen, Abb. 12 und 13)

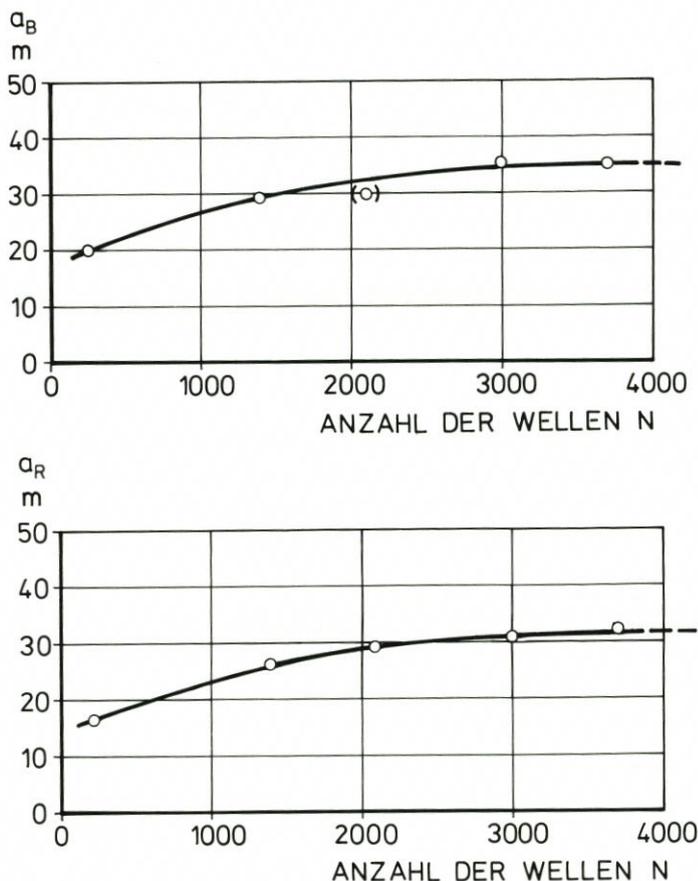


Abb. 18. Monotone Zunahme der Abstände  $a_B$  und  $a_R$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Wellen

Wenn sich herausstellen sollte, daß der Strandindex nahezu konstant über die gesamte Versuchsdauer bleibt, wäre zu erwarten, daß der Wert  $S_E = \text{konst.}$  in Abhängigkeit von der Korngröße bei größerem Korn zunimmt und bei feinerem Material entsprechend kleiner wird. Dies wird Gegenstand weiterer Betrachtungen und auch zukünftiger Versuche im GWK sein.

#### 4.3.3 Zur Parametrisierung von Vorstrandprofilen bei Untersuchungen mit Wellenspektren

Wie in Abschnitt 4.3.1 bereits erwähnt, stellte sich bei den Untersuchungen mit Wellenspektren ein sog. „Bermenprofil“ ohne die Ausbildung eines ausgeprägten Riffes ein. Die zeitliche Entwicklung des Dünenrückganges und der Ausbildung eines nahezu stabilen Gleichgewichtsprofils zeigt, analog zu der Versuchsreihe mit regulären Wellen, Abb. 20 für die Versuchsreihe mit Wellenspektrum.

Im Vergleich zu den Versuchen mit regulären Wellen (Abb. 12) fällt auf, daß bei dem Wellenspektrum das erodierte Sediment nicht so weit seewärts verfrachtet wird. Das Ausbleiben einer Riffbildung ist im wesentlichen auf die unterschiedlichen Wellenhöhen und -perio-

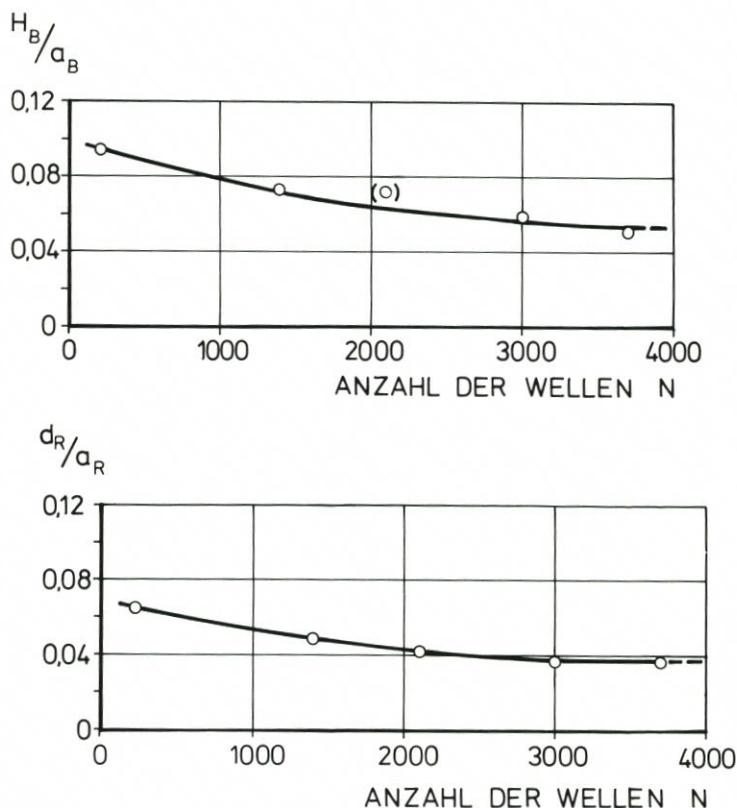


Abb. 19. Änderung der kennzeichnenden dimensionslosen Ausdrücke  $H_B/a_B$  und  $d_R/a_R$  hinsichtlich der zeitabhängigen Riffentwicklung

den, die im Wellenspektrum enthalten sind, zurückzuführen, wodurch anstelle einer konzentrierten, relativ schmalen Brecherzone im Riffbereich (bei regulären Wellen) eine ausgedehnte Brandungszone auf der Strandberme hervorgerufen wird.

Wie weit der in Abschnitt 4.3.2 aufgezeigte Weg einer Parametrisierung für „Bermenprofile“, ggf. durch Einbeziehung eines kennzeichnenden Wellenparameters, der die Spektraleigenschaften repräsentiert, geeignet ist, kann zur Zeit noch nicht beurteilt werden.

Einen bemerkenswerten Ansatz zur Beschreibung der mittleren Energiedissipation in Brandungszonen, die durch irregulär brechende Wellen (Spektren) hervorgerufen wird, haben BATTJES und STIVE (1984) auf der Grundlage von Natur- und Labordaten sowohl für Riffprofile als auch für Bermenprofile verifiziert. Optimal übereinstimmende Werte wurden rechnerisch im Modell für einen veränderlichen Brecherhöhen-Koeffizienten ermittelt, wobei festgestellt wurde, daß sich die Werte zwar schwach, aber dennoch systematisch mit der Wellensteilheit der Ausgangswellen ändern. Eine Parametrisierung dieser Abhängigkeit läßt die Brauchbarkeit des Modells für Vorhersagen erwarten.

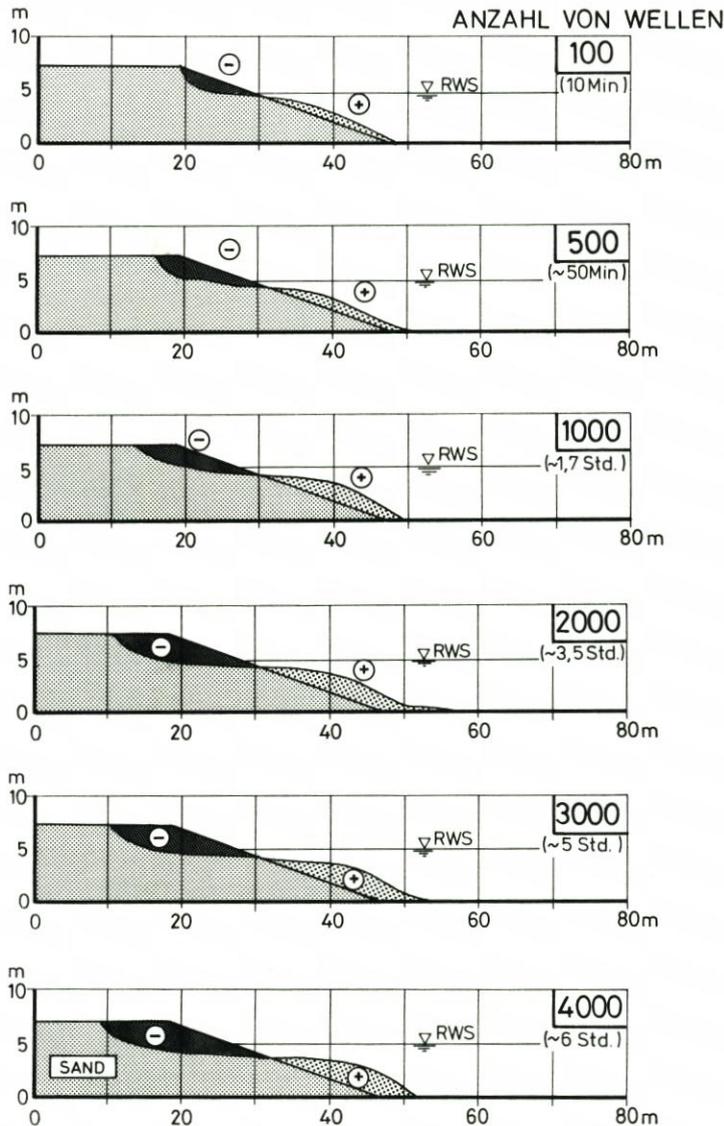


Abb. 20. Umformung einer 1:4 geböschten Düne (ohne Vorstrand) in ein stabiles Gleichgewichtsprofil bei Wellenspektren ( $H_{1/3} = 1,45$  m und  $T_p = 6$  s)

#### 4.3.4 Zum Einfluß eines Vorstrandes auf die Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils

Die Untersuchungen an einer Düne ohne Vorstrand sind als ein Extremfall einzuordnen, da ein derartiger Zustand in der Natur normalerweise nicht auftritt. Dennoch wurde diese Versuchreihe allen nachfolgenden vorangestellt, um festzustellen, wie groß unabhängig vom Vorhandensein einer Vorstrandneigung, nur in Abhängigkeit von den Wasserstands- und

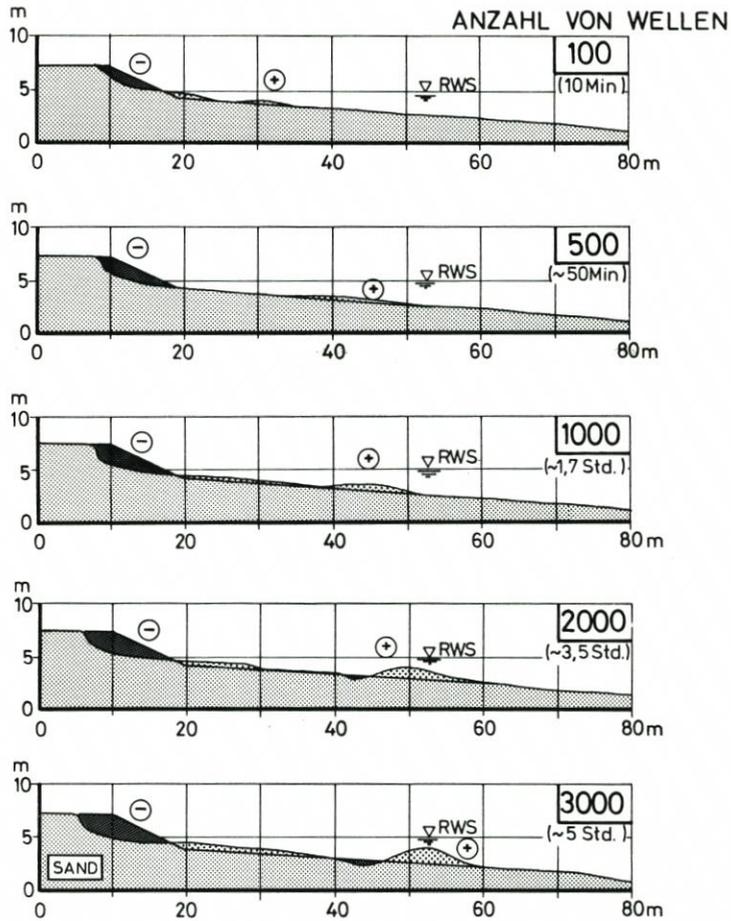


Abb. 21. Umformung einer 1:4 geböschten Düne (mit Vorstrand) in ein stabiles Gleichgewichtsprofil bei regulären Wellen ( $H = 1,5$  m und  $T = 6$  s)

Wellenparametern und dem gewählten Sediment ( $d_{50} = 0,33$  mm), das wellenerzeugte Umformungs- und Transportvermögen bis zur Ausbildung eines stabilen Strandprofils ist. Die Ergebnisse sind auf Abb. 12 für reguläre Wellen und Abb. 20 für Wellenspektren dargestellt.

In der Natur sind Dünen gewöhnlich Vorstrände vorgelagert, deren Korndurchmesser in Verbindung mit dem momentanen Wellenklima die mittlere Vorstrandneigung bestimmt. Nach SPM (1984) ist für einen mittleren Korndurchmesser von  $d_{50} = 0,33$  mm mit einer mittleren Neigung zwischen 1:15 und 1:20 im Gleichgewichtszustand zu rechnen. Dieser Wertebereich wurde mit etwa 1:16 auch für das Gleichgewichtsprofil bei regulären Wellen auf Abb. 12 (unten, nach 4000 Wellen) bestätigt.

Um nun den Einfluß einer vorhandenen Vorstrandneigung auf die Umformung einer Düne zu untersuchen, und zwar zunächst für die Verhältnisse, wie sie in der Natur zu erwarten sind, wurde in den GWK eine 1:4 geböschte Düne eingebaut, an die sich ab 1 m unter dem Ruhewasserspiegel (Kanalsohle + 4 m) ein 1:20 geneigter Strand anschloß. Die zeitliche Entwicklung des Dünenrückganges und die Ausbildung eines nahezu stabilen

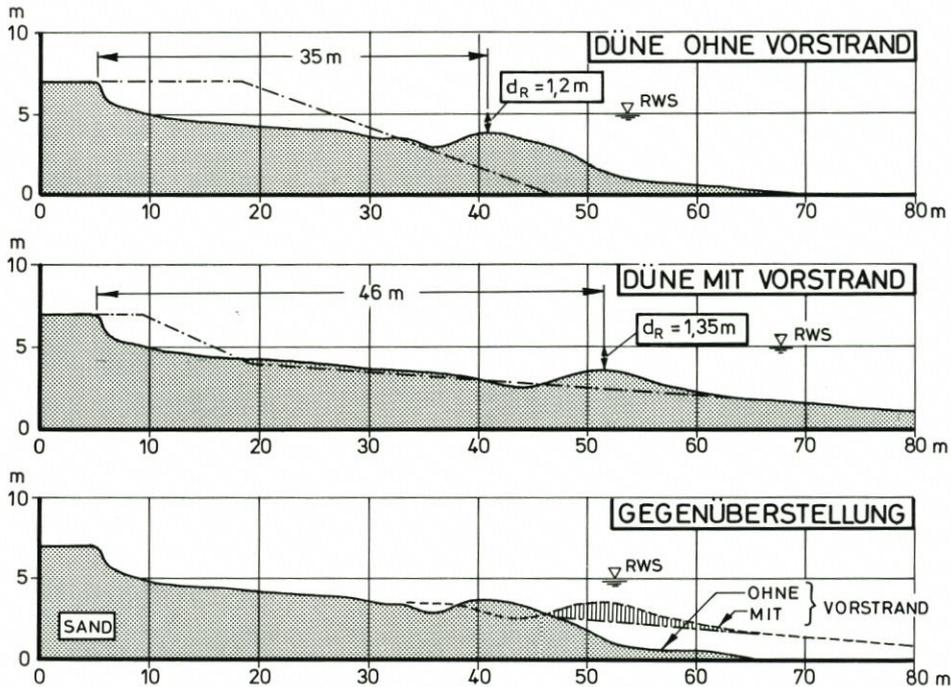


Abb. 22. Umformung einer Düne ohne Vorstrand (oben) und einer Düne mit Vorstrand (Neigung 1:20) nach 3000 regulären Wellen ( $H = 1,5$  m und  $T = 6$  s)

Gleichgewichtsprofils, einschließlich der Entwicklung des Riffes bei regulären Wellen, zeigt Abb. 21 bei Wellen mit  $H = 1,5$  m und  $T = 6$  s.

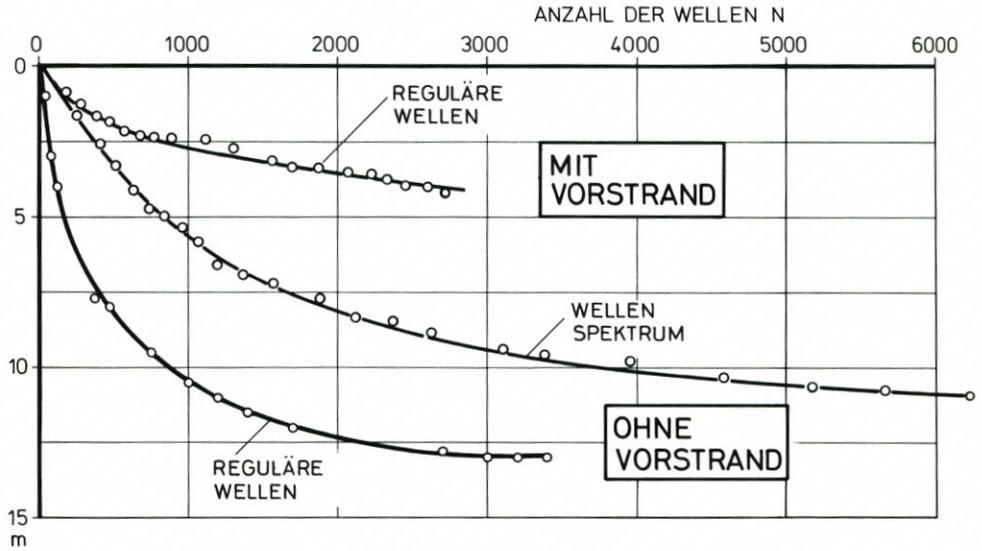
Die Entwicklung des Strandprofils nach etwa 3000 Wellen ist auf Abb. 22 (unten) im Vergleich zu dem zeitlich zugehörigen Strandprofil, das sich aus einer Düne ohne Vorstrand ausgebildet hat (Abb. 22, unten) dargestellt.

Auffällig ist neben der Bildung eines ebenfalls ausgeprägten Riffes ( $d_R = 1,35$  m), daß es um etwa 30 % (mehr als 10 m) weiter seewärts verschoben ist. Nach etwa 1000 Wellen (rd. 1,7 Std.) ist die Ausbildung eines schwachen Riffes bei Station 47 m (Abb. 21) zu erkennen; nach weiteren 2000 Wellen (rd. 3,5 Std.) war das Riff unter stetiger Auffüllung 10 m weiter seewärts gewandert.

Aufgabe weiterer Untersuchungen wird es sein, zusätzliche Neigungen des Vorstandes und vor allem andere Korndurchmesser im GWK zu untersuchen, um weitere experimentelle Daten als Voraussetzung für eine Parametrisierung zu erhalten.

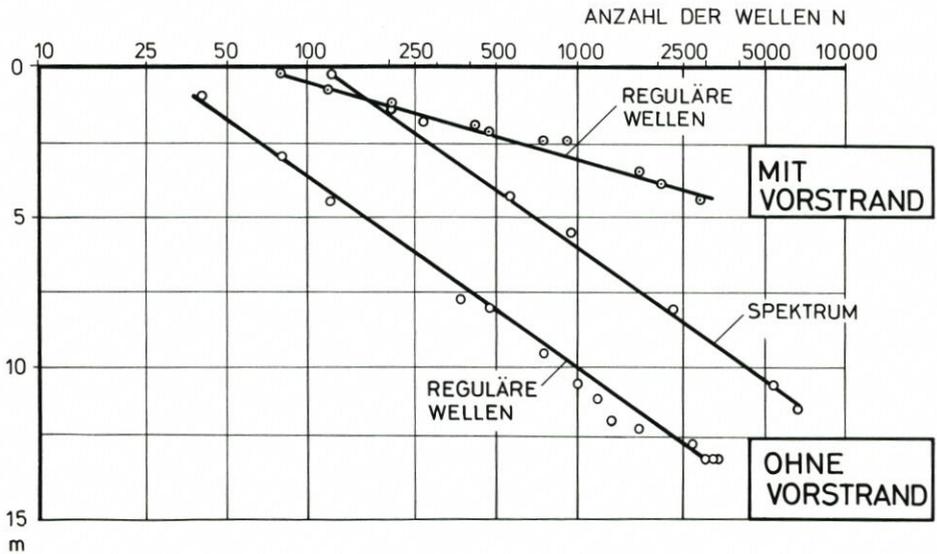
#### 4.3.5 Zum Einfluß eines Vorstandes auf den Abbruch einer Düne

Neben den Untersuchungen zur Ausbildung eines Gleichgewichtsprofils bei Dünen ohne und mit Vorstrand ist insbesondere für die Praxis das unterschiedliche Abbruchvolumen aus dem Dünenkörper bzw. der damit zusammenhängende effektive Rückgang der Dünenkante von erheblicher Bedeutung. Wie Abb. 12 zeigt, steht einem Rückgang von 13 m bei der Düne



### RÜCKGANG DES KLIFFS

Abb. 23. Auftragung des Rückganges einer Dünenkante in Abhängigkeit von der Anzahl der Wellen im linearen Maßstab



### RÜCKGANG DES KLIFFS

Abb. 24. Auftragung des Rückganges einer Dünenkante in Abhängigkeit von der Anzahl der Wellen im einfach-logarithmischen Maßstab

ohne Vorstrand lediglich ein Abbruch von 4 m (etwa 30 %) bei der Düne mit Vorstrand gegenüber (Abb. 21). Somit kann mit diesen anfänglichen Versuchen schon belegt werden, daß durch die Einbeziehung der Vorstrandgeometrie nach Höhenlage und Neigung in die Planung von Sandvorspülungen, z. B. als Sanddepots (sog. „Verschleißbauwerke“) zur Sicherung einer im Abbruch befindlichen Düne, eine beachtliche Optimierung derartiger Maßnahmen hinsichtlich ihrer Stabilität erzielt werden kann.

Aus den Auftragungen der zeitlichen Umformungen der Düne ohne Vorstrand bei regulären Wellen (Abb. 12) und bei Wellenspektren (Abb. 20) sowie der Düne mit Vorstrand bei regulären Wellen (Abb. 21) ist zugleich auch das Abbruchvolumen bzw. der Rückgang der Dünenkante ersichtlich. Im Hinblick auf eine angestrebte Parametrisierung wurde beispielhaft der Rückgang in Abhängigkeit von der Zeit (Anzahl der Wellen) ausgewertet. Die Auftragung im linearen Maßstab (Abb. 23) läßt ein asymptotisches Verhalten erkennen, was durch die Darstellung im einfach-logarithmischen Koordinatensystem bestätigt wird (Abb. 24), da nahezu alle Punkte auf einer Geraden liegen. Diese Ergebnisse bestätigen zugleich die Richtigkeit der Ansätze von KRIEBEL und DEAN (1985) zur numerischen Analyse der Einflußfaktoren auf Dünenabbrüche und Strandumformungen (vgl. Abb. 8 und 9).

Das hier aufgezeigte und analysierte Verhalten des Dünenabbruches wird als brauchbarer Ansatz für weitere, umfassendere Untersuchungen angesehen und soll diesen zugrundegelegt werden.

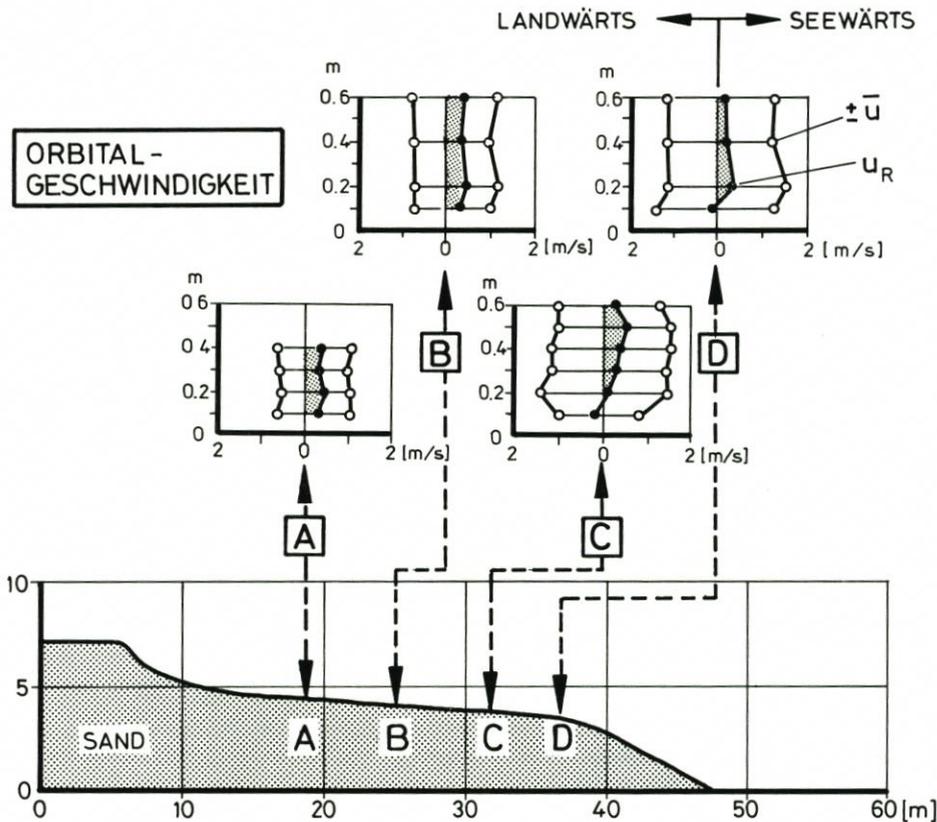


Abb. 25. Messung der sohnahen Orbitalgeschwindigkeiten im GWK bei einem Wellenspektrum (JONSWAP:  $H_{1/3} = 1,5$  m und  $T_p = 6$  s)

#### 4.3.6 Beiträge zur quantitativen Erfassung des Küstenquertransportes

Der Einfluß einer zweidimensionalen Wellenbewegung (z. B. im GWK) auf die Sedimentbewegung im Küstenquertransport ist noch immer unzureichend bekannt. Allgemein wird davon ausgegangen, daß eine Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen Wellen- und Sedimentbewegung zur Ausbildung von Strandprofilen führt. Voraussetzung für eine Analyse der einzelnen Einflußparameter ist eine zufriedenstellende Beschreibung der Verteilung von Orbitalströmung und Sedimentkonzentration über die Wassertiefe in Abhängigkeit von der Zeit und dem Raum. Darüber ließe sich dann der resultierende Küstenquertransport berechnen und aus dessen Veränderlichkeit auf Sohländerungen schließen.

Aufgrund von Beobachtungen und Laborversuchen über das Brechen von irregulären Wellen auf einem Strand gelangten STIVE und BATTJES (1984) zu der Auffassung, daß der Sedimenttransport im wesentlichen von der wellenerzeugten, zeitlich gemittelten Rückströmung („undertow“ oder „return flow“) über der Sohle abhängt. In einem Modell, in dem nur dieser Parameter berücksichtigt wird, konnte nachgewiesen werden, daß in erster Näherung allein dieser Einflußfaktor die Sohlveränderungen schon zufriedenstellend beschreibt. Im Hinblick auf eine realistische Berechnung der zeitabhängigen Strandentwicklung bei Sturmfluten wird es jedoch für erforderlich erachtet, weitere Parameter als nur die Rückströmung für die Beschreibung des küstennormalen Sedimenttransports im Modell zu berücksichtigen.

Bei den Versuchen über Dünenabbrüche mit einem Wellenspektrum (vgl. Abb. 17) wurden mit elektromagnetischen Strömungsmesssonden der Norddeutschen Seekabelwerke in Nordenham u. a. auch die wellenerzeugten Strömungen an verschiedenen Punkten des ausgebildeten Gleichgewichtsprofils gemessen. Abb. 25 zeigt als Ergebnis die Auswertung der mittleren Orbitalströmungen  $\pm u$  (landwärts bzw. seawärts) sowie die Differenz der beiden Strömungskomponenten, die als resultierende Strömung mit  $u_R$  bezeichnet wird. Auffallend ist die nahezu gleichförmige Rückströmung über der sohlnahen Vertikalen im oberen Strandbereich, wo sich die Ausbrandungszone (Punkt A und B) befindet und resultierende Geschwindigkeiten zwischen  $u_R = 0,3$  m/s und  $0,4$  m/s auftreten. An den Punkten C und D, die den Bereich der Brandungszone kennzeichnen, ist die gemittelte Rückströmung geringer; bemerkenswert ist eine zwar nur schwach ausgebildete, jedoch landwärts gerichtete Strömung in unmittelbarer Sohlnähe ( $0,1$  m über der Sohle).

In einer ersten Betrachtung wurden die gemessenen Strömungen mit rechnerisch ermittelten Werten verglichen. Für die Berechnung der Orbitalströmung wurde der Ansatz aus der linearen Wellentheorie gewählt:

$$u = \pm \frac{H \cdot \pi}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(2\pi \cdot d/L)}$$

$$\text{mit } T_p = 6 \text{ s und } L = \sqrt{g \cdot d} \cdot T_p$$

Um die resultierende Rückströmung  $u_R$  zu berechnen, wurde der Ansatz von STIVE und BATTJES (1984) herangezogen:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{br \text{ random}} &= \bar{u}_{br \text{ period}} \cdot \bar{Q}_b \\ \text{mit} \quad \bar{u}_{br \text{ period}} &= \frac{1}{8} \cdot H_b \sqrt{g/d} \text{ und} \\ \bar{Q}_b &= 20 \cdot (H_{rms}/d)^5 \\ \bar{u} &= u_R \text{ berechnet} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1. Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Orbital- und Rückströmungen bei einem JONSWAP-Spektrum ( $H_{1/3} = 1,45$  m und  $T_p = 6$  s) und einem Strandprofil im Gleichgewichtszustand

Pos.	Parameter			Orbitalströmung		Rückströmung	
	d	H	L	$\bar{u}_{ber.}^{1)}$	$\bar{u}_{gem.}$	$\bar{u}_{R ber.}^{2)}$	$\bar{u}_{R gem.}$
	m	m	m	m/s	m/s	m/s	m/s
A	1,0	0,5	19	0,77	0,95	0,39	0,36
B	1,25	0,6	21	0,83	1,10	0,30	0,30
C	1,5	1,55	23	1,95	1,35	–	0,23
D	1,65	1,6	24	1,92	1,35	–	0,18

<sup>1)</sup> Lineare Wellentheorie    <sup>2)</sup> Ansatz von STIVE und BATTJES (1984)

Aus diesen überschläglichen Betrachtungen geht hervor, daß der Ansatz von STIVE und BATTJES (1984) geeignet erscheint, unter Zugrundelegung der gewählten Einflußparameter die Rückströmung zu beschreiben.

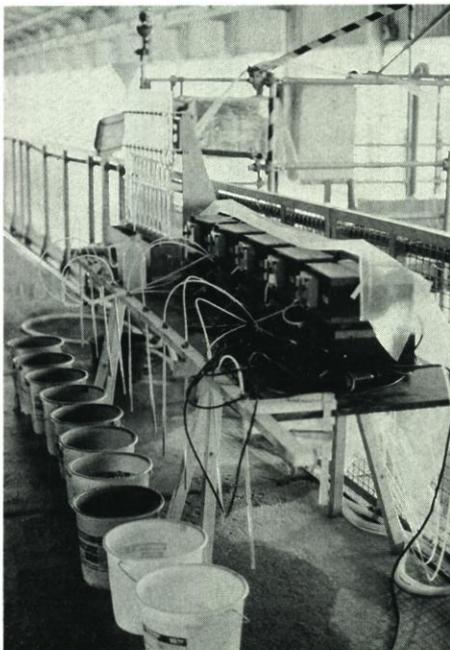


Abb. 26. Suspensionsmeßeinrichtung nach dem Abpumpprinzip beim Einsatz in der Brandungszone am GWK (rechts) sowie Abpumpeinrichtung (links)

Neben der Erfassung der Orbitalströmungen ist, wie schon erwähnt, auch die gleichzeitige Kenntnis der Verteilung der räumlichen Sedimentkonzentration über die Wassertiefe wünschenswert. Abb. 26 zeigt den Einsatz einer Suspensionsmeßeinrichtung im GWK nach dem Abpumpprinzip, die von Delft Hydraulics Laboratory in De Voorst/Niederlande beschafft wurde. Quer zur Wellenrichtung wurden in Höhen ab 0,02 m über der Sohle Düsen

mit einer Öffnung von  $D = 3$  mm, die an einer Stange befestigt waren, angeordnet. Über Schlauchleitungen wurde danach ein Sand-Wassergemisch aus einer Folge von jeweils 50 bis 100 Wellen von bis zu 10 Meßhorizonten abgepumpt. Hinsichtlich der Konzentration konnte auf die Eichversuche dieser Meßeinrichtung von BOSMANN (1982) zurückgegriffen werden.

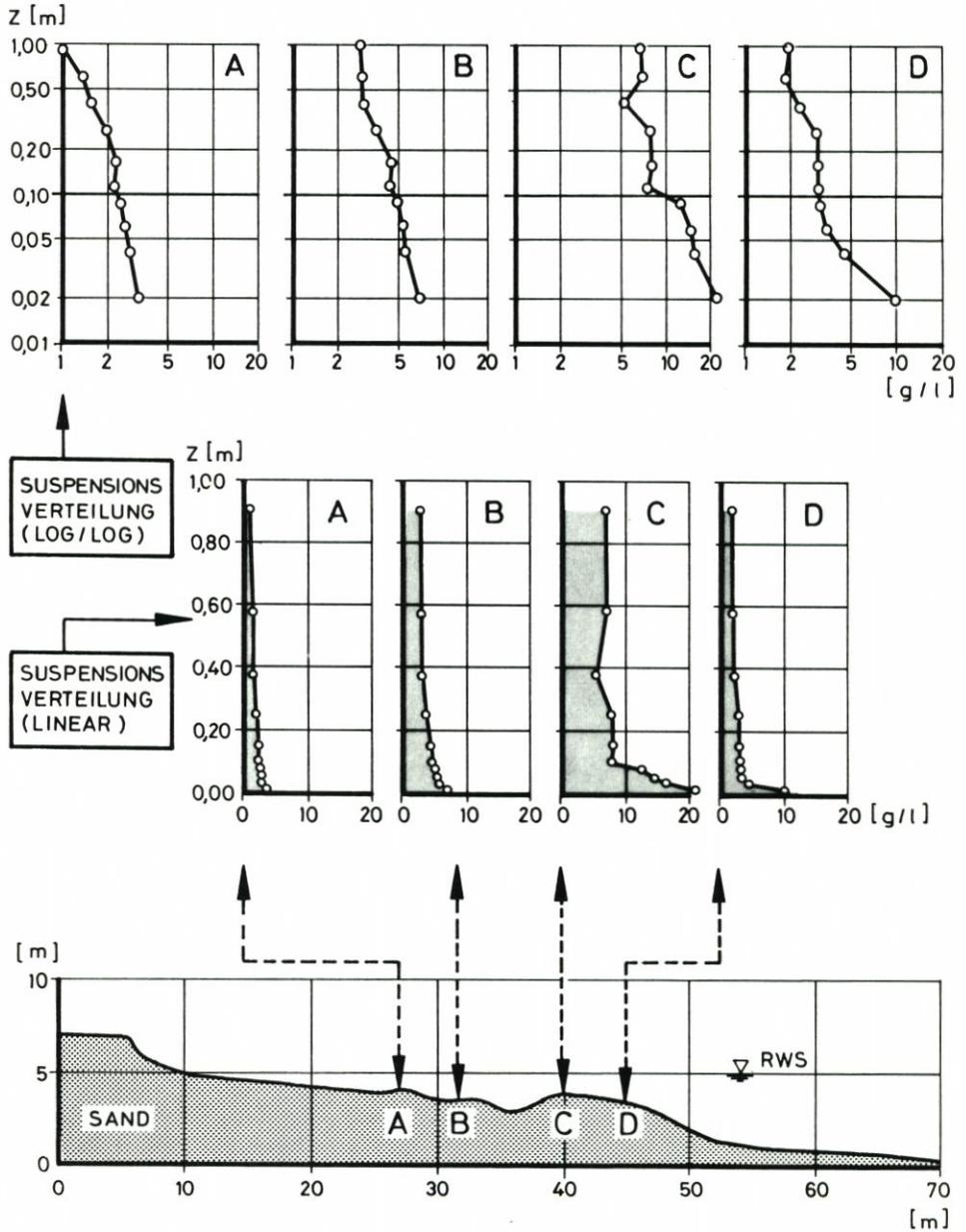


Abb. 27. Meßergebnisse der räumlichen Konzentrationsverteilungen bei der Versuchsserie mit regulären Wellen und einem ausgebildeten Gleichgewichtsprofil bei der Versuchsserie: „Die Düne ohne Vorstrand“ (vgl. Abb. 12)

Die Absauggeschwindigkeit muß danach immer größer als die jeweilige Orbitalgeschwindigkeit sein, wenn Verfälschungen der Meßergebnisse vermieden werden sollen.

Erste Ergebnisse von räumlichen Suspensionsmessungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt und auf Abb. 27 bis 29 jeweils für die Zustände eines nahezu vollständig ausgebildeten

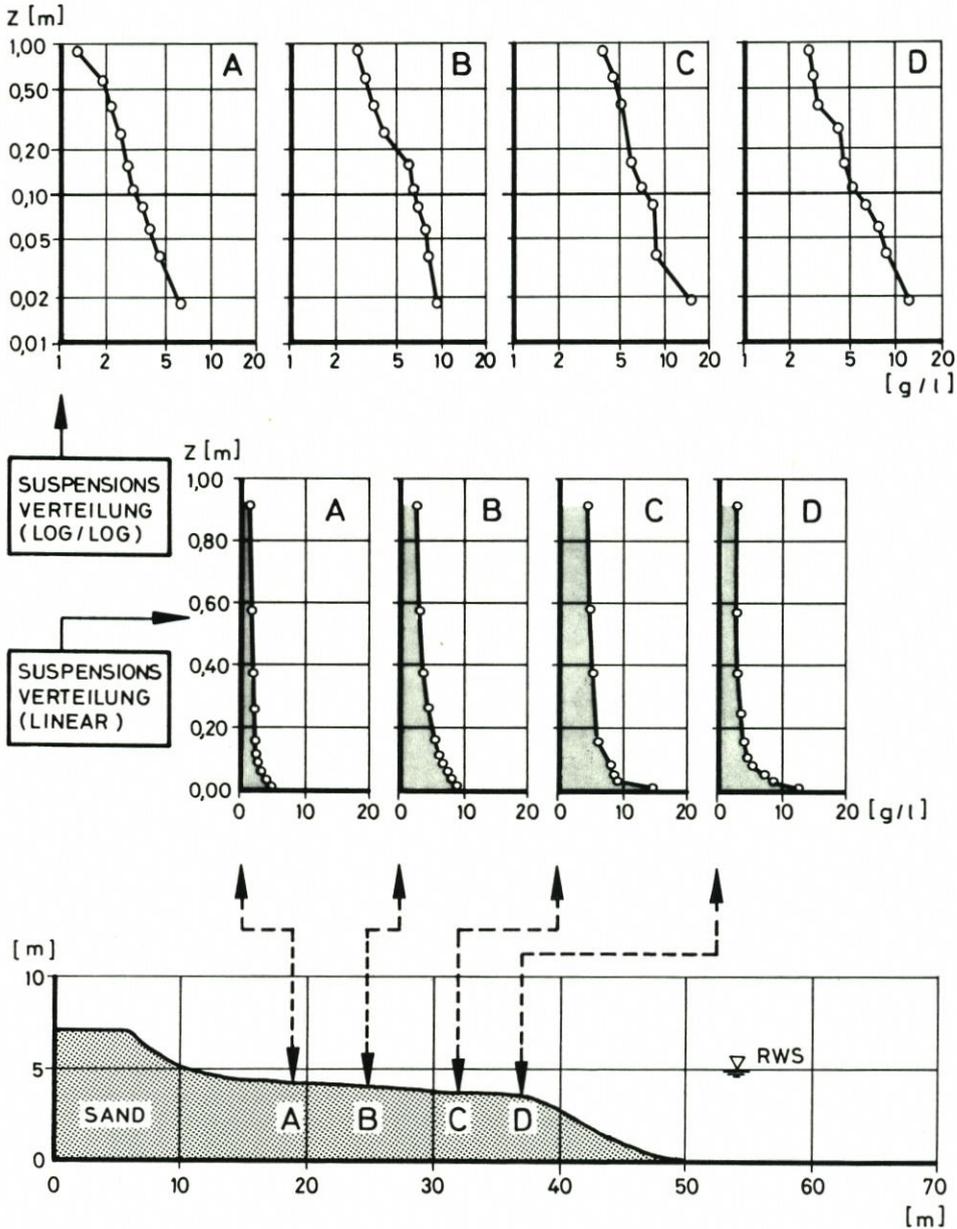


Abb. 28. Meßergebnisse der räumlichen Konzentrationsverteilungen bei der Versuchsserie mit einem JONSWAP-Spektrum und einem ausgebildeten Gleichgewichtsprofil bei der Versuchsreihe: „Düne mit Vorstrand“ (vgl. Abb. 20)

Gleichgewichtsprofils aufgetragen. Ein Vergleich der Konzentrationen bestätigt die relativ hohen Konzentrationen im Bereich der Brandungszone sowohl bei regulären als auch bei irregulären Wellen (jeweils Punkte C und D auf Abb. 27 und 28). Auffallend ist hier auch noch eine vergleichsweise hohe Konzentration in unmittelbarer Sohlhöhe (unterhalb 0,1 m).

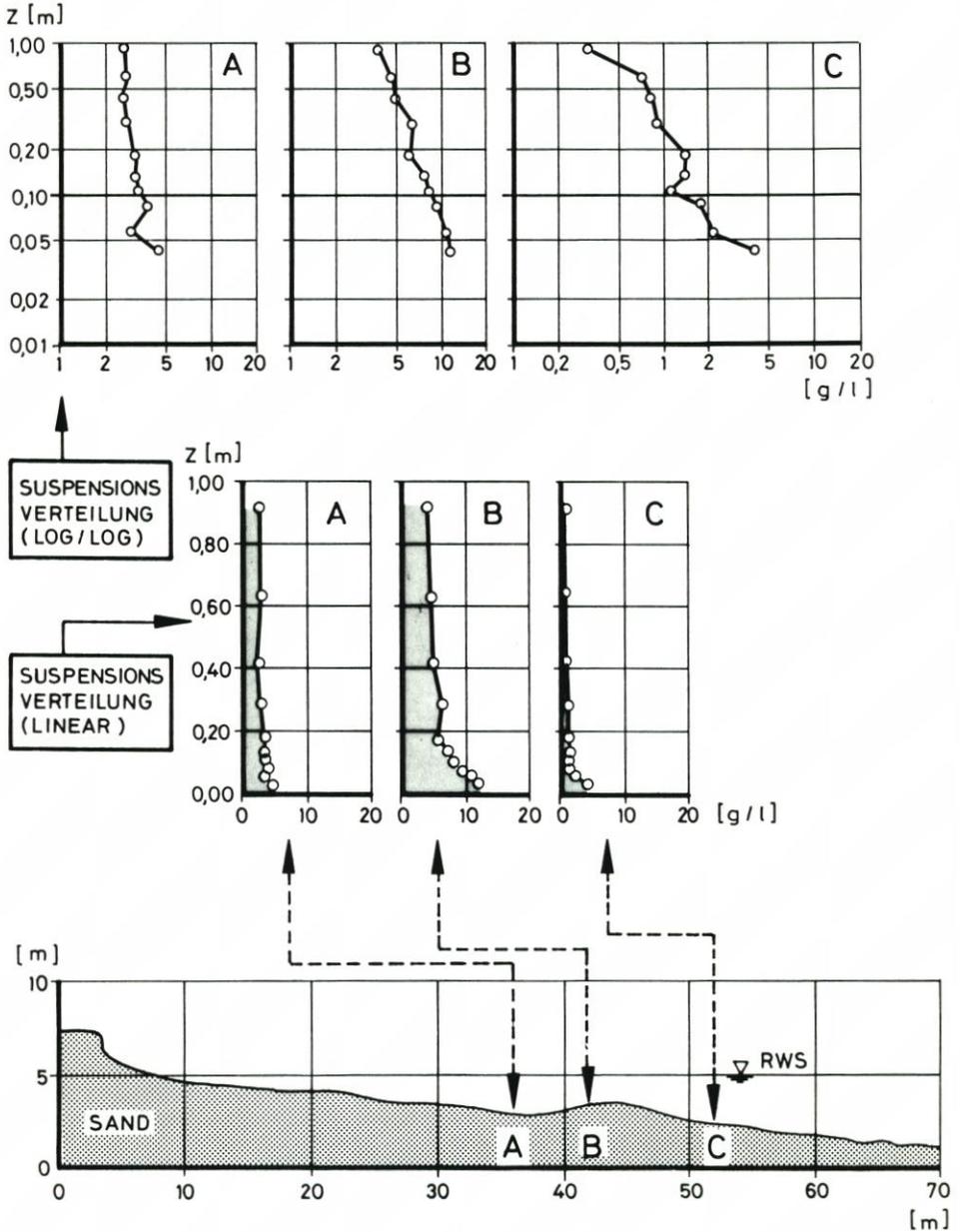


Abb. 29. Meßergebnisse der räumlichen Konzentrationsverteilung bei der Versuchsserie mit regulären Wellen und einem ausgebildeten Gleichgewichtsprofil bei der Versuchsserie: „Düne mit Vorstrand“ (vgl. Abb. 21)

Tabelle 2. Ergebnisse von Konzentrationsmessungen im Großen Wellenkanal

Versuchsreihe	Abstand von der Sohle m	Sedimentkonzentrationen an den Meßpunkten				Bemerkung
		A g/l	B g/l	C g/l	D g/l	
I	0,02	3,3	7,1	21,0	9,9	Düne ohne Vorstrand, Reguläre Wellen H = 1,5 m T = 6,0 s (Abb. 27)
	0,04	2,9	5,9	16,3	4,6	
	0,06	2,7	5,5	14,6	3,5	
	0,085	2,5	5,1	12,6	3,3	
	0,11	2,2	4,6	7,9	3,1	
	0,16	2,3	4,7	8,2	3,0	
	0,26	2,0	3,7	8,0	3,0	
	0,385	1,6	3,1	5,5	2,3	
	0,585	1,4	3,1	7,2	1,8	
0,91	1,0	2,0	7,0	1,9		
II	0,02	6,2	9,5	15,4	13,0	Düne ohne Vorstrand, JONSWAP-Spektrum H <sub>1/3</sub> = 1,5 m T <sub>p</sub> = 6,0 s (Abb. 28)
	0,04	4,6	8,6	9,1	9,0	
	0,06	3,9	8,0	–	8,0	
	0,085	3,5	7,1	8,7	6,5	
	0,11	3,0	6,7	7,3	5,2	
	0,16	2,8	6,3	6,3	4,8	
	0,26	2,5	4,2	–	4,3	
	0,385	2,1	3,6	5,3	3,1	
	0,585	1,8	3,2	4,9	2,9	
0,91	1,3	2,8	4,0	2,7		
III	0,04	4,7	11,9	4,2	–	Düne mit Vorstrand, Reguläre Wellen H = 1,5 m T = 6,0 s (Abb. 29)
	0,06	3,0	10,8	2,1	–	
	0,08	4,0	9,4	1,8	–	
	0,105	3,6	8,0	1,2	–	
	0,13	3,2	7,4	1,4	–	
	0,18	3,4	6,0	1,4	–	
	0,28	3,1	6,2	0,93	–	
	0,405	2,7	5,0	0,85	–	
	0,605	2,9	4,7	0,7	–	
0,93	2,7	4,0	0,4	–		

Bezüglich einer Beschreibung der Konzentrationsverteilung einschließlich der sohnahen Konzentration  $c_0$  in Abhängigkeit u. a. von den Wellenparametern sowie von Wasserstand, Strömung und Korndurchmesser wird auf den Arbeiten von VAN DE GRAAFF und ROELVINK (1984) und VAN DE GRAAFF (1985) aufgebaut. Hierzu wurde inzwischen eine enge Zusammenarbeit mit den Verfassern an der Delft University of Technology in Delft/Niederlande begonnen.

Aufgrund von bisher kleinmaßstäblichen Untersuchungen kommt VAN DE GRAAFF hinsichtlich einer Beschreibung der Konzentrationsverteilung über die Tiefe mit dem Ansatz einer Diffusionsgleichung zu dem Schluß, daß der Diffusionskoeffizient von der Korngröße abhängig zu sein scheint. Zwischen Sediment und Fluid wird folgender Zusammenhang vermutet:

$$\varepsilon (\text{Sediment}) = \beta \cdot \varepsilon (\text{Fluid})$$

mit  $\beta$  = Koeffizient, der annähernd einer linearen Funktion der Sinkgeschwindigkeit  $w$  des Einzelkornes entspricht ( $\beta = 1 + \alpha \cdot w$ )

$\varepsilon$  = Diffusionskoeffizient

Die Darstellung des Koeffizienten  $\alpha$  in Abhängigkeit vom Diffusionskoeffizienten  $\epsilon$  (Fluid) auf Abb. 30 veranschaulicht und untermauert zugleich die Notwendigkeit einer Großversuchseinrichtung, wie z. B. des GWK, um über den relativ engen, durch kleinmaßstäbliche Untersuchungen abgedeckten Bereich des Wertevorrates einzelner Parameter hinaus die große Lücke von Grenzbedingungen bis hin zum Naturmaßstab durch experimentelle Untersuchungen abdecken zu können.

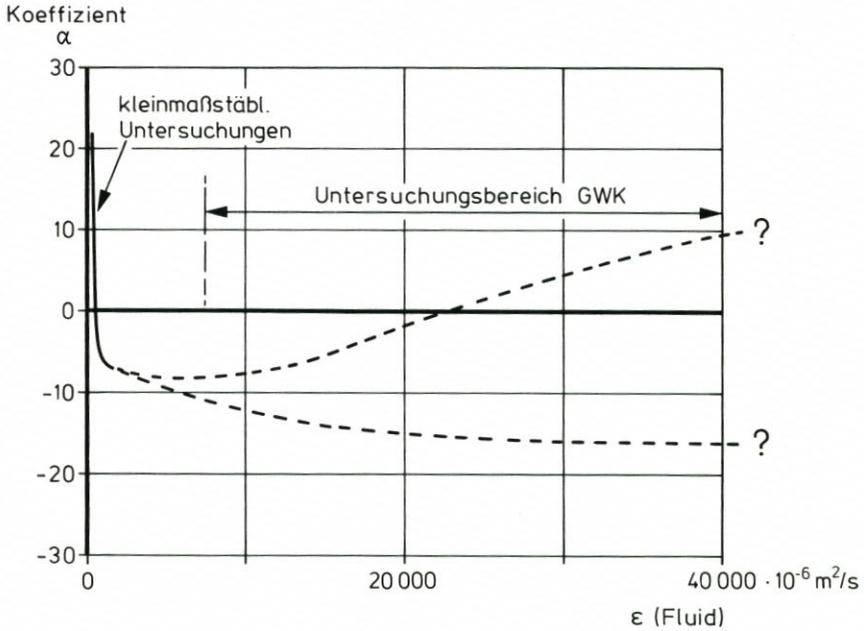


Abb. 30. Darstellung der Untersuchungsbereiche von kleinmaßstäblichen und naturmaßstäblichen Untersuchungen am Beispiel der Diffusionskoeffizienten (VAN DE GRAAFF, 1985)

## 5. Ausblick

Anhand der Schrifttumsübersicht über die derzeitigen Methoden zur Voraussage der zeitabhängigen Abbrüche von Dünen und der Ausbildung von Gleichgewichts-Strandprofilen an sandigen Küsten wurde aufgezeigt, daß es noch keine zufriedenstellenden quantitativen Vorhersagemodelle gibt, sondern nur solche, die auf empirischen Methoden beruhen und daher auch nur globale, mehr qualitative Ergebnisse liefern können. Mit naturmaßstäblichen Untersuchungen, z. B. im Großen Wellenkanal in Hannover, ist es nun möglich, durch eine systematische Variation aller wirksamen Einflußparameter, wie Sturmdauer, Wasserstand, Wellenhöhe, Strandneigung und Korndurchmesser, experimentelle Daten zu sammeln, die zu einem physikalischen Verständnis der Naturvorgänge beitragen und damit die Voraussetzungen für quantitative Ansätze von Vorhersagemodellen schaffen. Da Untersuchungen in einer Großversuchseinrichtung kosten- und zeitaufwendig sind und diese auch für andere Fragestellungen genutzt wird, wird es notwendig sein, die Untersuchung verschiedener Einflußparameter sinnvoll miteinander zu koppeln, um den Aufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Eine enge nationale und internationale Zusammenarbeit wird dazu

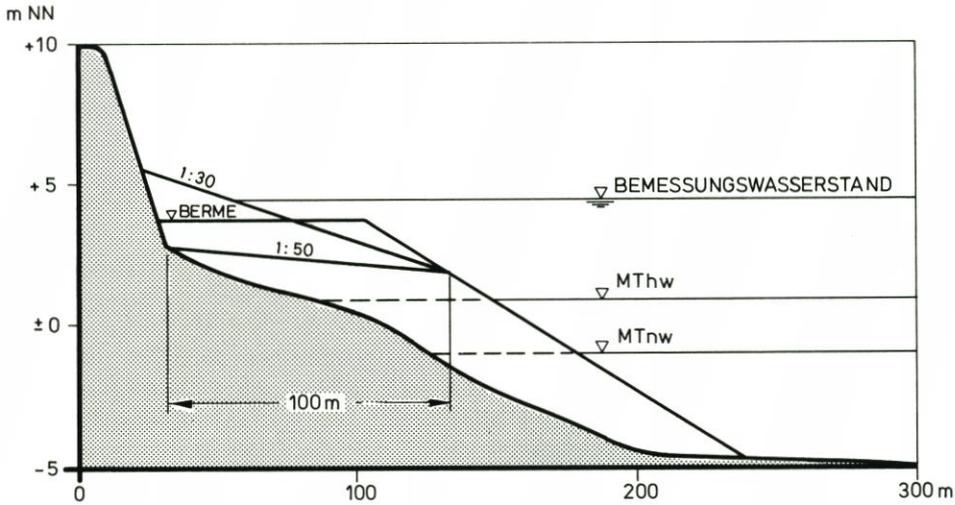


Abb. 31. Mögliche geometrische Anordnungen von Strandauffüllungen vor einer Düne im Hinblick auf Optimierungen

beitragen, die Großversuchseinrichtung Großer Wellenkanal effektiv und optimal zu nutzen.

Im Hinblick auf aktuelle Fragestellungen in der Praxis ist beabsichtigt, bei den weiteren Versuchen im Großen Wellenkanal den Schwerpunkt zunächst auf die Untersuchung der Einflüsse eines unterschiedlichen Korndurchmessers auf das zeitabhängige Abbruchgeschehen von Dünen und die damit verbundene Umformung von Stränden zu legen. Hierzu ist vorgesehen, die hier vorgestellten Versuchsserien mit einem mittleren Korndurchmesser von  $d_{50} = 0,18$  mm bis  $0,20$  mm, das etwa einem Norderney-Sand gleichzusetzen ist, zu wiederholen. Danach folgen dann Versuche zur Optimierung einer Strandauffüllung vor einer Düne (Abb. 31), von der eine möglichst lange Verweilzeit des Sedimentes erwartet werden kann.

#### Anmerkung

Das Forschungsvorhaben „Seegangserzeugte Wechselwirkung zwischen Vorland bzw. Vorstrand und Küstenschutzbauwerk“ wird im Sonderforschungsbereich (SFB) 205 „Küsteningenieurwesen“ an der Universität Hannover als Teilprojekt des Verfassers seit 1983 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die experimentellen Untersuchungen wurden im Großen Wellenkanal in Hannover durchgeführt, der von der DFG mit etwa 20,0 Mio. DM finanziert wurde und als Gemeinsame Zentrale Einrichtung der Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig betrieben wird. Der DFG sei hiermit für die Förderung des Forschungsvorhabens gedankt. Ein weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Uliczka und Dipl.-Ing. Schäfer sowie Herrn Malewski für die Durchführung und Auswertung der Versuche.

#### 6. Schriftenverzeichnis

- ALLEN, J. R. L.: Developments in Sedimentology. Elsevier Verlag, Amsterdam, 1984.  
 BATTJES, J. A. u. STIVE, M. J. F.: Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., Houston, 1984.

- BOSMAN, J. J.: Concentration measurements under oscillatory water motion. Delft Hydraulics Laboratory/TOW. Report on model investigation (M. 1965, part II), Delft, 1982.
- BRUUN, P.: Coast erosion and the development of beach profiles. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Techn. Memo, No. 44, 1954.
- BRUUN, P.: Sea level rise as a cause of shore erosion. Journ. of Waterways and Harbors Division, ASCE, 88 (WW1), 1962.
- CHIU, T. Y.: Beach and dune response to Hurricane Eloise of September 1975. Proc. Coastal Sediments '77, ASCE, Charleston, 1977.
- DEAN, R. G.: Beach Erosion: Causes, Processes and Remedial Measures. CRC Reviews in Environmental Control, CPR Press, 6 (3), 1976.
- DEAN, R. G.: Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Ocean Eng. Rep. No. 12, Dep. Civ. Eng., Univ. Delaware, 1977.
- DETTE, H. H.: Über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS' Zahlen. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig. H. 41, 1974.
- EDELMAN, T.: Dune erosion during storm conditions. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., London, 1968.
- EDELMAN, T.: Dune erosion during storm conditions. Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vancouver, 1972.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig. H. 40, 1974.
- HAYES, M. O.: Hurricanes as geological agents: case studies of hurricane Carla, 1961, and Cindy, 1963. Rep. Invest. No. 61, Bur. Econ. Geol., Univ. Texas, Austin, 1967.
- HUGHES, S. A.: Movable-bed modeling law for coastal erosion. Journ. of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, Vol 109, No. 2, 1983.
- KRIEBEL, D. L. u. DEAN, R. G.: Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. Journal Coastal Eng., Vol 9, No. 3, 1985.
- SAVILLE, T.: Scale effects in two-dimensional beach studies. Transactions 7th Meeting Int. Assoc. Hydraulic Res., Lissabon, 1957.
- SPM (Shore Protection Manual) U.S. Army Coastal Eng. Res. Center, 4. Ausg., 1984.
- STIVE, M. J. F. u. BATTJES, J. A.: A model for offshore sediment transport. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., Houston, 1984.
- SWART, D. H.: Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Public. No. 131, Delft Hydraulics Lab., Delft Univ. Technology, 1974.
- VAN DE GRAAFF, J. u. ROELVINK, J. A.: Grading effects in concentration measurements. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., Houston, 1984.
- VELLINGA, P.: Beach and dune erosion during storm surges. Journal Coastal Eng., Vol. 6, 1982.
- VELLINGA, P.: Verification of predictive computational model for beach and dune erosion during storm surges. Proc. Coastal Structures '83, Arlington, 1983.
- WANG, H.: A note on beach profile modelling. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig. H. 88, 1986.