

Erfahrungen mit der Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983

VON HANS HENNING DETTE und JOACHIM GÄRTNER

Zusammenfassung

Bis zur Erstellung des Fachplanes Küstenschutz Sylt im Jahre 1985 wurden an der Westküste Sylts wiederholte Versuchssandvorspülungen durchgeführt; hierzu zählte auch die Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983. Es wird aufgezeigt, wie sich diese Maßnahme vor Hörnum, das in einem morphologisch-hydrologisch komplexen Gebiet liegt, als Schutzfunktion vor der abbruchgefährdeten Randdüne bewährt hat. Zugleich konnte auch veranschaulicht werden, in welchem Ausmaße, unabhängig von der Sandvorspülung, großräumige morphologische Prozesse im Vorstrandbereich des Untersuchungsgebietes in einer relativ kurzen zeitlichen Abfolge wirksam werden und möglicherweise zu der Fehlbeurteilung einer Maßnahme führen können.

Abstract

Various types of beach replenishment were tested at the west coast of Sylt before the guidelines for future coastal protection were published in 1985. One of these study areas was a morphologically complex zone at the southern end of the island. Here erodable dunes were to be protected.

The effectiveness of the artificial sand deposition following three years of investigations is documented. It could be shown, that misinterpretation of the data can occur when large scale short term morphological processes in the nearshore area are ignored.

Inhalt

1. Dünenabbrüche im südlichen Bereich der Insel Sylt	210
2. Auswirkungen des Längswerkes vor Hörnum auf den Dünenrückgang	212
3. Veranlassung und Aufgaben einer Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983	219
3.1 Vorbemerkung	219
3.2 Planungsgrundlagen	219
3.3 Zur Geometrie der Versuchssandvorspülung	220
3.4 Begleitende Untersuchungen	222
3.5 Erkundung von Sandentnahmegebieten im Küstenvorfeld	224
3.6 Durchführung der Sandvorspülung	226
4. Zusammenfassung der wirksamen äußeren Umweltparameter vor Hörnum im Zeitraum 1983 bis 1986	233
4.1 Vorbemerkung	233
4.2 Tidewasserstände und Sturmfluthäufigkeit	233
4.3 Wellenmessungen	236
4.3.1 Vorbemerkung	236
4.3.2 Ergebnisse der Wellenmessungen	237
4.3.3 Seegangsbelastung auf den Vorspülkörper in den Zeiträumen zwischen den einzelnen Vermessungen	239
5. Verhalten der Versuchssandvorspülung im Zentralbereich	243
6. Vergleich der Hörnumer Sandvorspülung mit der zweiten Sandvorspülung vor Westerland im Jahre 1978	245
7. Auswirkungen der Versuchssandvorspülung auf die angrenzenden Bereiche	247
7.1 Vorbemerkung	247

7.2 Nördlicher Anschlußbereich	247
7.3 Südlicher Anschlußbereich	249
7.4 Zusammenfassung	249
8. Morphologische Veränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet	250
8.1 Vorbemerkung	250
8.2 Veränderungen im Vorstrandbereich	251
9. Schlußbetrachtung	256
10. Schriftenverzeichnis	258

1. Dünenabbrüche im südlichen Bereich der Insel Sylt

Der südliche Abschnitt der Insel Sylt wird im Fachplan Küstenschutz Sylt (MELF, 1985) im Hinblick auf den Dünenabbruch und unter Berücksichtigung der hinter den Dünen zu schützenden Objekte in verschiedene Bereiche aufgeteilt. Der nördliche Teilbereich erstreckt sich auf 8,5 km Länge von Rantum-Süd (Station 14 S) bis zum Ortseingang von Hörnum (Station 31 S, Abb. 1). In diesem Abschnitt ist die Dünenkette über weite Strecken relativ schmal und niedrig; bei einem Durchbruch der Randdüne während einer Extremsturmflut wären lediglich Verkehrswege gefährdet. Der anschließende, etwa 2 km lange Teilbereich (Station 31 S bis Station 35 S) ist von besonderer Bedeutung für den unmittelbaren Hochwasserschutz des Ortes Hörnum, da bei einem Durchbruch der als Hochwasserschutz dienenden natürlichen Randdüne eine Fläche von 135 ha überflutungsgefährdet wäre.

Auf der Höhe von Station 35 S liegt das im Jahre 1968 erstellte Tetrapoden-Querwerk. Hier schließt sich nochmals auf einer Länge von rd. 2 km (Station 35 S bis 39 S) die Hörnum-Odde an, ein Gebiet, das unbewohnt ist und als Naturschutzgebiet ausgewiesen wird. Es gehört damit nicht zu den vordringlich zu schützenden Gebieten.

Die Entwicklung der Dünenabbrüche entlang der Westküste von Sylt in Abhängigkeit von der Sturmfluthäufigkeit (Scheitelwasserstände und Verweilzeiten der Wasserstände) wurde eingehend im Fachplan Küstenschutz Sylt (MELF, 1985) untersucht. Danach wurde als Folge der erhöhten Sturmfluthäufigkeiten nach 1950 festgestellt, daß sich im Zeitraum 1952 bis 1984 die mittlere jährliche Abbruchrate an allen Küstenabschnitten im Vergleich zum Zeitraum 1870 bis 1952 nahezu verdoppelt hat und sich im Mittel für die gesamte, etwa 40 km lange Küste von 0,9 m/Jahr (1870 bis 1952) auf 1,5 m/Jahr (1952 bis 1984) erhöht hat.

Die Abbruchraten im südlichen Abschnitt zwischen Profil 14 S und 35 S zeigt Abb. 2 für die vorgenannten Untersuchungszeiträume. Bei einem Vergleich fällt auf, daß sich der Bereich relativ hoher Abbrüche im Zeitraum 1870 bis 1951 auf den Ortsbereich Hörnum (Profil 31 S bis 35 S, vgl. auch Abb. 1, 2) beschränkte; im nachfolgenden Zeitraum 1951 bis 1984 hat sich dieser Bereich erheblich nach Norden hin, etwa bis Profil 20 S (Abb. 2) um mehr als 5 km ausgedehnt. Dies zeigt auch die Zunahme des mittleren jährlichen Abbruchs der Randdüne (obere Dünenabbruchkante) zwischen Profil 20 S und 31 S von 0,6 m/Jahr (1870 bis 1951) auf 1,7 m/Jahr (1951 bis 1984), was etwa einer Verdreifachung entspricht (MELF, 1985). Vor dem Ort Hörnum (Profil 31 S bis 35 S) erhöhte sich der mittlere jährliche Abbruch von 2,2 m/Jahr (1870 bis 1951) auf 2,5 m/Jahr (1951 bis 1984), womit zugleich die anhaltende Gefährdung des Ortes Hörnum aufgezeigt werden konnte.



Abb. 1: Luftbild der Insel Sylt, südlicher Teil von Rantum bis Hörnum-Odde

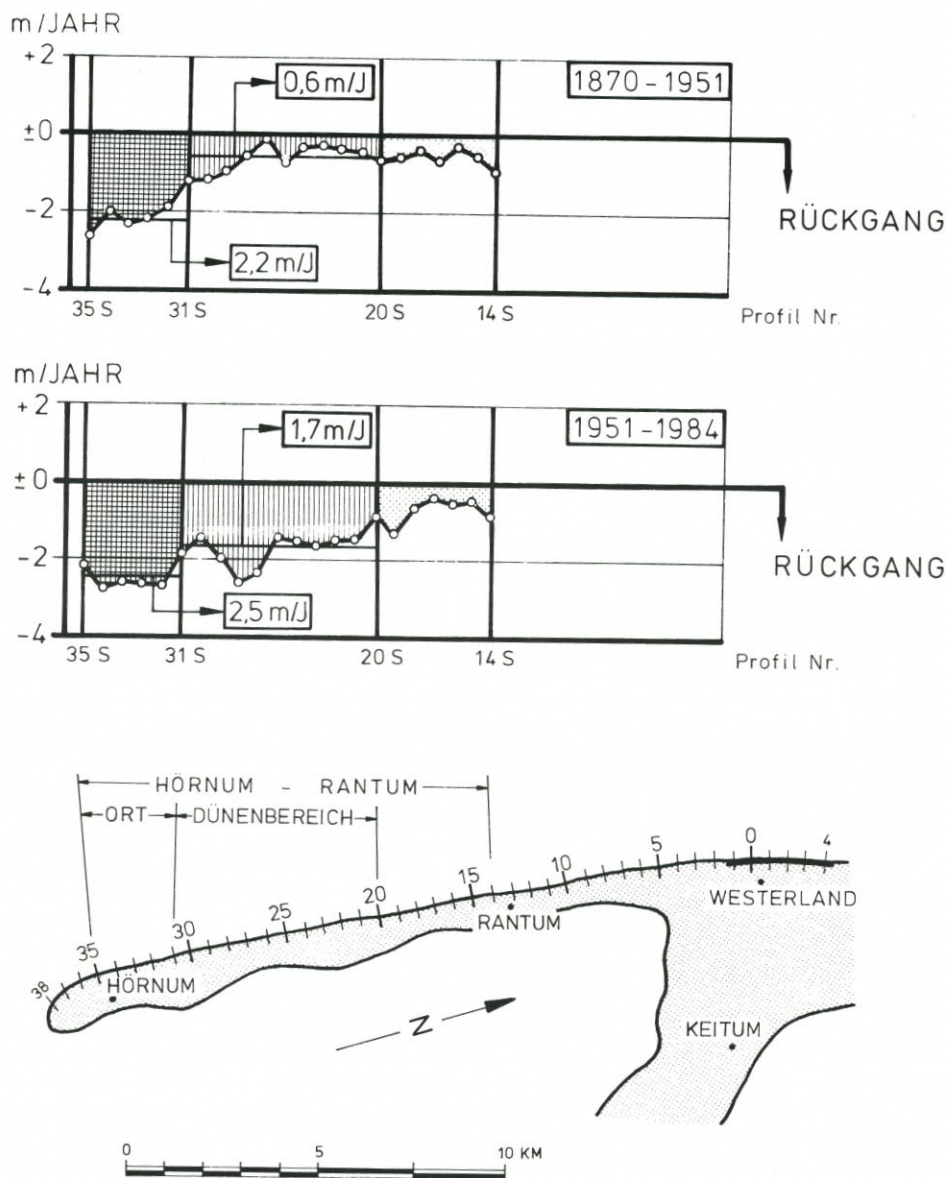


Abb. 2: Mittlere Dünenabbrüche im südlichen Abschnitt der Insel Sylt (südlich von Profil 14 S, Abb. 1) in den Zeiträumen 1870 bis 1951 sowie 1951 bis 1983 (MELF, 1985)

2. Auswirkungen des Längswerkes vor Hörnum auf den Dünenrückgang

Der natürliche Prozeß des Küstenrückganges in dem ungeschützten Dünenabschnitt vor Hörnum wurde im Jahre 1968 durch den Bau eines Tetrapoden-Längswerkes von 1270 m Länge und eines Tetrapoden-Querwerkes (als sog. Buhne) von 230 m Länge unterbunden.



Abb. 3: Schutz der „Kersig-Siedlung“ durch ein Tetrapoden-Längswerk und Querwerk (Blickrichtung Nord z. Z. der Erstellung)

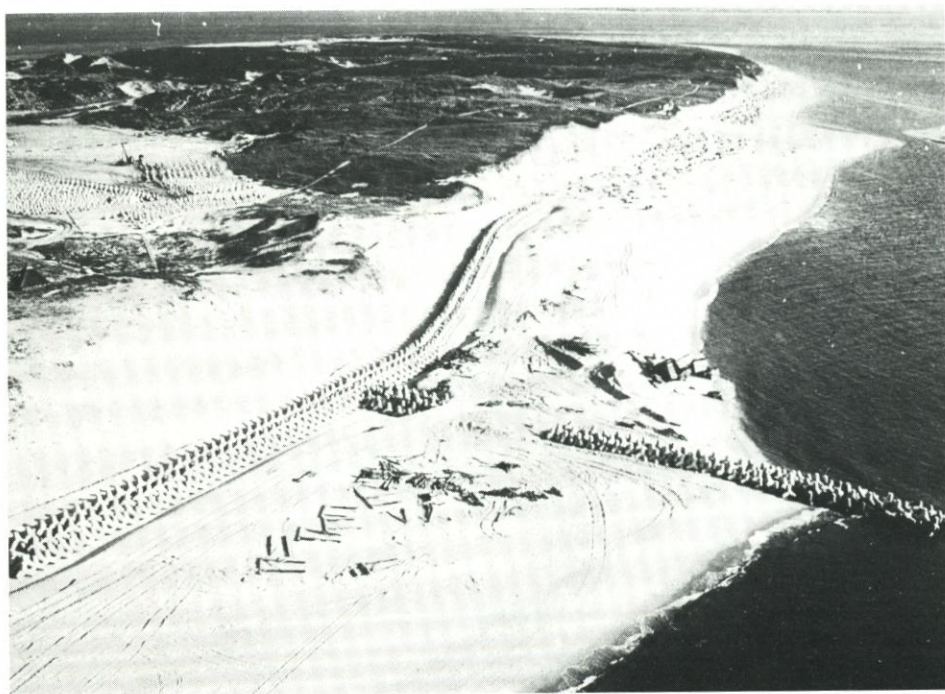


Abb. 4: Einbindung des Längswerkes in den Bereich Hörnum-Odde (Blickrichtung Süd z. Z. der Erstellung)

Grundlage für diese Maßnahme (Abb. 3 u. 4) war der nahezu vollständige Verlust der Randdüne vor der „Kersig-Siedlung“ während der Extremsturmflut vom 16./17. 2. 1962. Das Längswerk wurde auf dem trockenen Strand auf der Höhenlinie NN + 1 m auf sandgefüllten Nylonschläuchen als Unterbau errichtet. Als sogenanntes „Haufwerk“ bestand es aus 4 Tetrapoden je lfdm Strandlänge (Einzelgewicht 6 t) und erreichte bei einer Bauhöhe von 5 m eine Kronenhöhe von NN + 6 m, etwa 1,5 m über dem Bemessungswasserstand. An das

VERWEILZEIT

STD

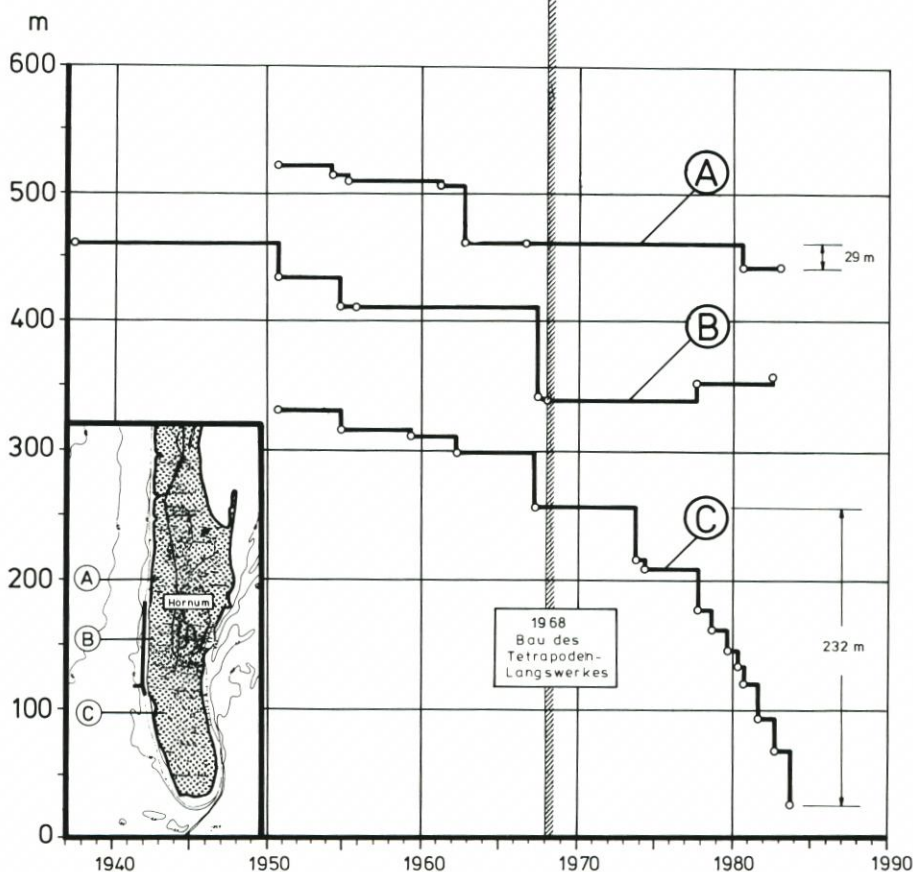
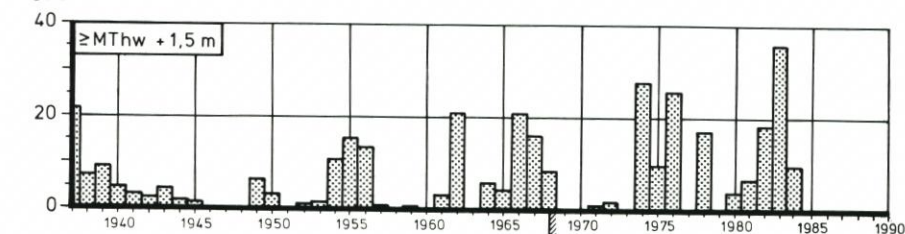


Abb. 5: Rückgang der Randdüne nördlich des Tetrapoden-Längswerkes (Profil A), im Bereich des Längswerkes (Profil B) und südlich des Längswerkes (Profil C) in Abhängigkeit von der jährlichen Verweilzeit von Sturmflutwasserständen (in Stunden) oberhalb MThw + 1,5 m im Zeitraum 1937 bis 1984 und der Erstellung des Längswerkes im Jahre 1968

Längswerk wurden insgesamt fünf „Stummelbuhnen“ in einer Länge von je 25 m (Kronenhöhe im Anschluß an das Längswerk NN + 3,0 m, auf NN + 2,0 m am seewärtigen Ende abnehmend) und das Querwerk (6 Tetrapoden je lfdm) in einer Länge von 270 m (Kronenhöhe NN + 3,8 m am Längswerk und NN + 1,0 m am seewärtigen Ende) angeschlossen.

Mit dem zusätzlichen Querwerk wurde beabsichtigt, die Abwanderung des Sandes im Küstenlängstransport vom Mittelteil der Insel nach Süden in das Hörnum Tief zu verhindern und zugleich durch Sandfang die Standsicherheit des neuen Längswerkes zu erhöhen (MELF, 1969). Bis etwa zum Jahre 1977 erfüllte das Tetrapodenwerk im nördlichen Teil die Erwartungen, die Strandverluste von 1962 durch Auflandungen aus dem Küstenlängstransport vor der Kersig-Siedlung auszugleichen. Im südlichen Teil dagegen machten sich schon 1972 die negativen Folgen menschlicher Eingriffe in die bislang ungestörten Küstenprozesse am Süden der Insel Sylt bemerkbar, als im Bereich der Hörnum-Odde hinter dem Tetrapodenwerk eine Lee-Erosion einsetzte und sich in den nachfolgenden Jahren laufend verstärkte. Abb. 5 veranschaulicht am Beispiel von drei Küstenprofilen im Nahbereich des Längswerkes in Abhängigkeit von der jährlichen Verweilzeit von Sturmflutwasserständen oberhalb MThw + 1,5 m (= 720 cm PN – 5 m NN) den Rückgang der Randdüne, der in allen Profilen von 1951 bis 1967 vor dem Bau des Längs- und Querwerkes (1968) etwa gleichsinnig verlief (Tafel 1).

Tafel 1. Abbruch und Anwachs der Dünen im Nahbereich des Längswerkes in den Zeiträumen 1951 bis 1967 (vor dem Bau) und 1967 bis 1984 (nach dem Bau)

Profil	Bereich	Dünenabbrüche			
		1951–1967		1967–1984	
		insgesamt	m/Jahr	insgesamt	m/Jahr
–	–	m	m	m	m
A	nördlich LW	54	3,4	29*)	1,8
B	Längswerk (LW)	66	4,1	18**)	1,2
C	südlich LW	69	4,3	232	13,6

*) bis 1983

**) Anwachs

Im nachfolgenden Zeitraum von 17 Jahren (bis 1984) betrug der Rückgang im nördlichen Bereich rd. 30 m, was dem natürlichen Rückgang an der Westküste entspricht. Südlich des Längswerkes im Lee-Erosionsbereich erreichte der Rückgang fast den 8fachen Betrag mit insgesamt 232 m. Die Lee-Erosion setzte verstärkt Anfang der 70er Jahre ein und wies innerhalb von wenigen Jahren (1973) schon das Ausmaß auf, wie es der Vergleich der Abb. 6 u. 7 zeigt. Auf Abb. 7 ist zugleich das Absacken des Längswerkes am südlichen Ende zu erkennen, das schubweise während einzelner Sturmfluten erfolgte und von Norden nach Süden gleichmäßig abnehmend, bis zum Jahre 1980 einen Betrag von 3,8 m (Kronenhöhe = NN + 2,2 m) am südlichen Ende erreichte.

Nicht nur das Längswerk, sondern auch das Querwerk setzte sich allmählich. Im Jahre 1980 war das seewärtige Ende bereits um 3,5 m auf eine Kronenhöhe von NN – 2,5 m in den Untergrund eingesackt. Auf diesen Umstand ist es sicherlich zurückzuführen, daß der durch den Bau des Querwerkes erhoffte Anlandungsprozeß im nördlichen Bereich vor dem Längswerk, also unmittelbar vor der Kersig-Siedlung, nur für etwa 10 Jahre andauerte. Danach setzte auch hier eine Strandausräumung ein, und schon im Jahre 1977 ragten die sandgefüllten Gewebesläuche, die als Auflage für die Tetrapoden in einer Höhenlage von NN + 1 m auf dem Strand verlegt worden waren (MELF, 1985), an einzelnen Stellen bis zu etwa 0,5 m aus

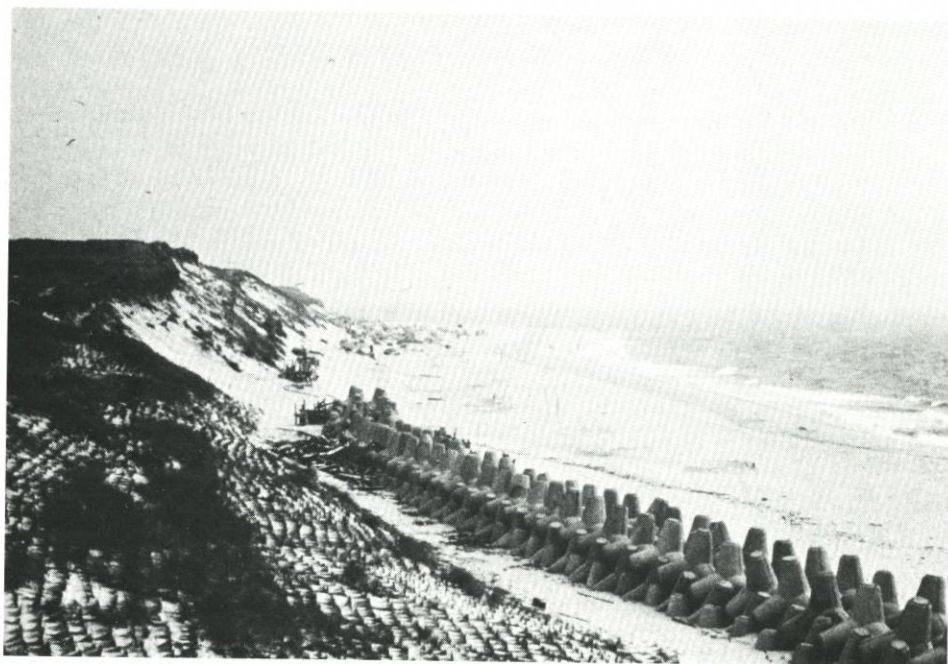


Abb. 6: Südliches Ende des Längswerkes im Jahre 1968



Abb. 7: Lee-Erosion südlich des Tetrapoden-Querwerkes und Bereich der Odde mit abgesackten Tetrapoden



Abb. 8: Freilage der Tetrapoden-Auflage mit „Stummelbühne“ im Hintergrund nördlich des Querwerkes im Jahre 1977

dem Sand (NN + 0,5 m) hervor (Abb. 8). Die Anlandungszone, die sich im Jahre 1972 bis etwa 700 m nördlich des Querwerkes ausgedehnt hatte, verringerte sich danach wieder bis auf rd. 400 m im Jahre 1980.

Bedingt durch das anhaltende Absacken des Längswerkes wurde der Fuß der Randdüne wieder zunehmend bei Sturmfluten dem unmittelbaren Wellenangriff ausgesetzt; als Folge schob sich keilförmig von Norden her eine Dünenabbruchsfläche bei den einzelnen Sturmfluten zwischen Längswerk und Randdüne nach Süden hin vor. Den Zustand im Frühjahr 1983 veranschaulichen Abb. 9 und 10.

Während die Tideströmungen im Mittelteil der Insel Sylt im Vergleich zu den wellenerzeugten Strömungen von untergeordneter Bedeutung sind, ist deren Wirkung an beiden Enden der Insel infolge der starken Tideströmungen im Lister und Hörnum Tief gegenüber dem Mittelteil der Insel bedeutend, wodurch der wellenerzeugte Küstenlängstransport verstärkt wird. Die Überlagerung von Tideströmung und wellenerzeugten Strömungen erstreckt sich im südlichen Teil bis zu einer Entfernung von etwa 10 km von der Inselspitze entfernt. Sichtbares Zeichen dieser vorherrschenden Umweltbedingungen ist die Ausbildung von sog. „cross bars“ (schräg zum Ufer verlaufende „Sandhaken“) und dem Ufer vorgelagerten Sandbänken (vergleichbar den Riff-Formationen im Mittelteil), die sich unter starker Veränderung ihrer geometrischen Form relativ schnell von Norden nach Süden verlagern. Diese Formationen, die bis zu 250 m vom Ufer entfernt verlaufen, werden kurz vor Erreichen des Querwerkes zum Teil aufgelöst und zum anderen in einem großen Bogen seewärts um das Querwerk herumgelenkt und treffen etwa 1200 m südlich wieder auf den Strand der Hörnum-Odde. Die Erforschung dieser komplexen physikalischen Vorgänge und eine Zuordnung zu den wirksamen Tide- und Seegangsparmetern, die sich nicht voneinander trennen lassen, ist



Abb. 9: Zustand der Randdüne und des Vorstrandes vor Hörnum im Jahre 1983 (Blickrichtung vom Hauptübergang nach Norden)



Abb. 10: Zustand der Randdüne und des Vorstrandes vor Hörnum im Februar 1983 (Blick vom Hauptübergang und nach Süden)

noch nicht abgeschlossen. Hinweise hierzu werden u. a. von einem langjährigen interdisziplinären Forschungsvorhaben erwartet, das seit 1986 gemeinsam vom Bundesministerium für Forschung und Technologie und vom Land Schleswig-Holstein gefördert wird.

3. Veranlassung und Aufgaben einer Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983

3.1 Vorbemerkung

Bis zur Erstellung des Fachplanes „Küstenschutz Sylt“ im Jahre 1985 (MELF, 1985) war noch unklar, auf welche Weise künftig in Schleswig-Holstein ein wirksamer und zugleich wirtschaftlich vertretbarer Küstenschutz an sandigen Küsten mit natürlichen Dünen und dahinter liegenden hochwassergefährdeten Orten durchgeführt werden sollte. Bei der auf rd. 2 km Länge (Profil 31 S bis 35 S, Abb. 1) gefährdeten Ortslage von Hörnum kam für eine Entscheidungsfindung erschwerend der Umstand hinzu, daß Hörnum in einem zuvor schon beschriebenen, morphologisch-hydrologisch besonders komplexen Gebiet liegt.

Aufgrund der aktuellen Gefährdung im Frühjahr 1983 (Abb. 9 u. 10) nach einem ungewöhnlichen sturmflutreichen Winterhalbjahr 1982/83 und einer entsprechend hohen Verweilzeit der Sturmflutwasserstände (vgl. Abb. 5) entschloß sich das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (MELF) des Landes Schleswig-Holstein, nördlich des Tetrapoden-Querwerkes eine Versuchssandvorspülung durchzuführen, um damit den am stärksten gefährdeten Dünenabschnitt vorläufig zu sichern und zugleich durch ein breit angelegtes begleitendes Untersuchungsprogramm die Frage zu klären, wie weit durch eine noch zu wählende Art einer Sandvorspülung eine wirtschaftlich vertretbare Sicherung der gefährdeten Randdüne in einem morphologisch-hydrologisch besonders komplexen Vorstrandbereich möglich ist.

3.2 Planungsgrundlagen

Im Frühjahr 1983 erstreckte sich die unmittelbar zu schützende Uferstrecke nördlich des Tetrapoden-Querwerkes auf rd. 1,0 km Länge. Dieser Abschnitt wurde daher für die Lage der Versuchssandvorspülung ausgewählt. Um die Wirksamkeit realistisch bewerten zu können, wurde ein Zeitraum von drei Jahren nach der erfolgten Vorspülung für erforderlich erachtet. Dies wurde damit begründet, daß die durch die Wellen- und Tideeinwirkungen bedingte Abnahme der Vorspülmenge einem exponentiellen Gesetz folgt, das, wie bei dem radioaktiven Zerfall, durch eine Halbwertszeit gekennzeichnet ist. Diese gibt die Zeitdauer an, nach der noch die Hälfte der vorgespülten Sandmenge (ohne Spülsandverluste) vorhanden ist (FÜHRBÖTER, 1974). Um sicherzustellen, daß sich die vorzuspülende Sandmenge deutlich von den natürlichen, jahreszeitlich bedingten Änderungen des Sandvorrates im Vorspülbereich abhebt, wurde dieser zunächst in Voruntersuchungen überschlägig mit $100 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ Strandlänge und Jahr abgeschätzt. Danach wurde entschieden, daß die nachweisbare Sandvorspülmenge nach einer Halbwertszeit von drei Jahren noch mindestens das zweifache Volumen, also rd. $200 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ Strandbreite, ausmachen sollte. Daraus ergab sich dann die Größenordnung von – im Mittel – rd. 350 m^3 bis $400 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ vorzuspülende Sandmenge als Planungsgrundlage für die Versuchssandvorspülung.

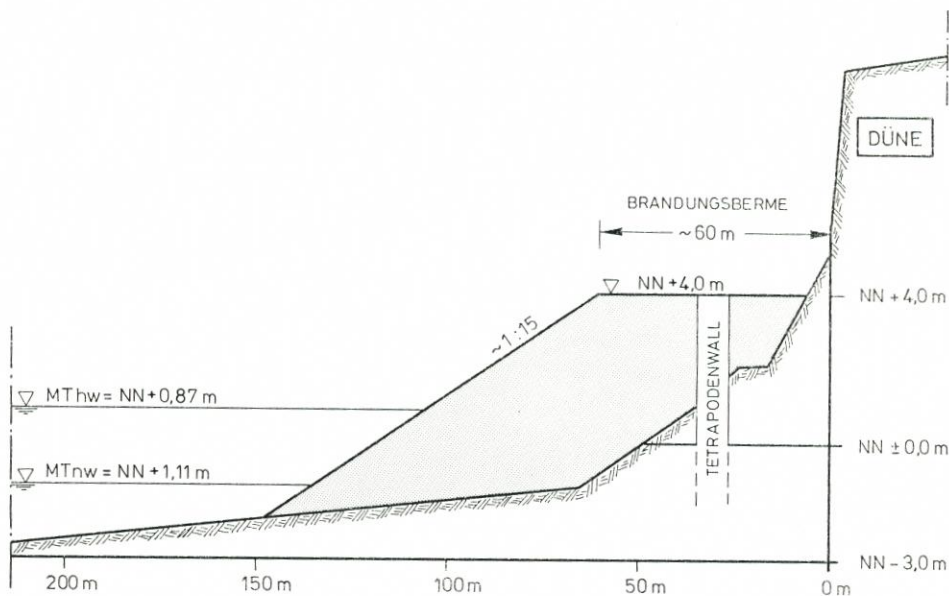


Abb. 11: Vorschlag (schematisch) für die Form (Querschnitt) der Versuchssandvorspülung im Jahre 1983 (FÜHRBÖTER, 1983)

3.3 Zur Geometrie der Versuchssandvorspülung

Hinsichtlich der geometrischen Form der Versuchssandvorspülung (Querschnitt) wurde von FÜHRBÖTER (1983) die auf Abb. 11 dargestellte sogenannte Verwallung empfohlen.

Die vorgeschlagene seeseitige Böschung von 1:15 ist etwa diejenige Strandneigung, die sich unter dem Einfluß von Wellen und Strömungen in der sturmflutarmen Jahreszeit als natürliche Strandneigung (Sommerprofil) am Weststrand von Sylt einstellt (LAMPRECHT, 1955). Die Höhe der Brandungsberme von NN + 4,0 m entspricht etwa dem HHThw vom 24. 11. 1981 mit NN + 4,05 m. Bei dieser Höhenlage würden bei Eintreten des Bemessungswasserstandes von NN + 4,50 m an den Fuß der natürlichen Randdüne nur noch die Wellenbelastungen bzw. die Wellenenergien gelangen, wie sie auf Abb. 12 schematisch dargestellt sind. Die Brandung der Wellen bzw. der hauptsächliche Energieumsatz erfolgt dadurch bis zu 60 m von der natürlichen Randdüne entfernt. Dies gilt für die Bemessungsturmflut als einem Wasserstand, der bisher noch nicht aufgetreten ist. Bei Extremsturmfluten mit Wasserständen unter NN + 4,0 m ist die Wirkung der Brandungsberme noch günstiger als auf Abb. 12 schematisch dargestellt, da in diesem Falle die Brandungsberme, von dem Wellenaufbau an der Seeseite abgesehen, einem flächenhaften Abtrag durch den Seegang weitgehend entzogen ist.

Als noch weitgehend ungeklärt mußte bei der Wahl der Böschungsneigung von 1:15 die Frage nach der möglichen Ausbildung von Kliffs – auch bei niedrigeren Sturmflutwasserständen (sogenannten Kantenfluten) – an dem künstlich aufgehöhten Strand noch unbeantwortet bleiben. Es konnte daher bei der Planung nur darauf hingewiesen werden, im Hinblick auf spätere Maßnahmen diese Erscheinung sorgfältig zu beobachten. Die Breite der Berme von rd. 60 m, die sich durch Wahl ihrer Neigung und Höhe aus dem vorgesehenen Vorspülvolumen je

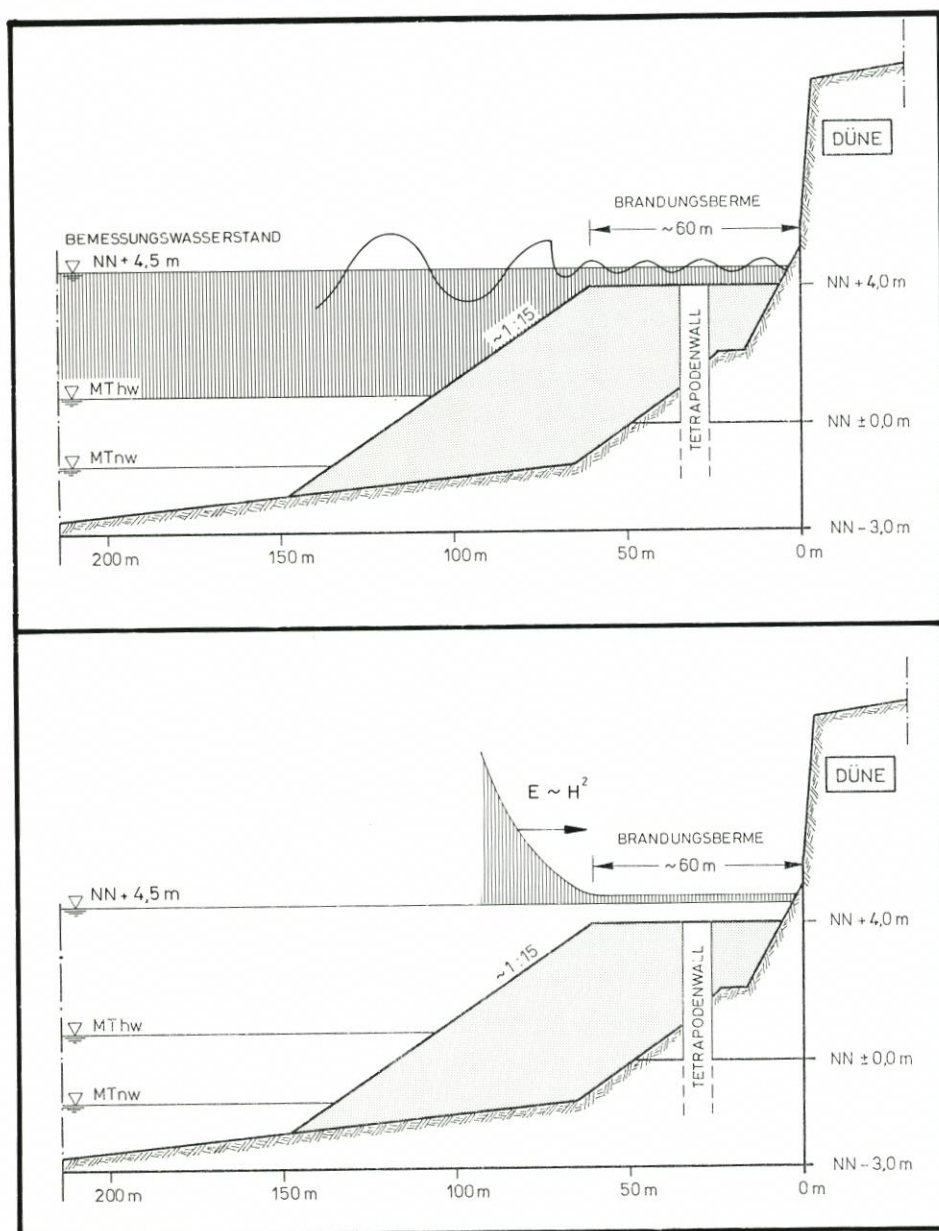


Abb. 12: Wellenbelastung auf die Randdüne (oben) und zugehöriger Energieumsatz der Wellen (unten) in Abhängigkeit vom Vorspülkörper (schematisch, FÜHRBÖTER, 1983)

lfdm Strandlänge ergab, bietet im Vergleich zu einer durchgehenden Böschung bis zur Düne, z. B. mit einer flacheren Neigung den Vorteil einer relativ großen Strandbreite auf Höhe der Sturmflutwasserstände und damit ausreichende Reserven in bezug auf die Abbruchvorgänge an der Brandungsberme und den Abstand zur natürlichen Düne. Auf der Grundlage der vorgenannten Überlegungen zu der Versuchssandvorspülung wurde vom ALW Husum im

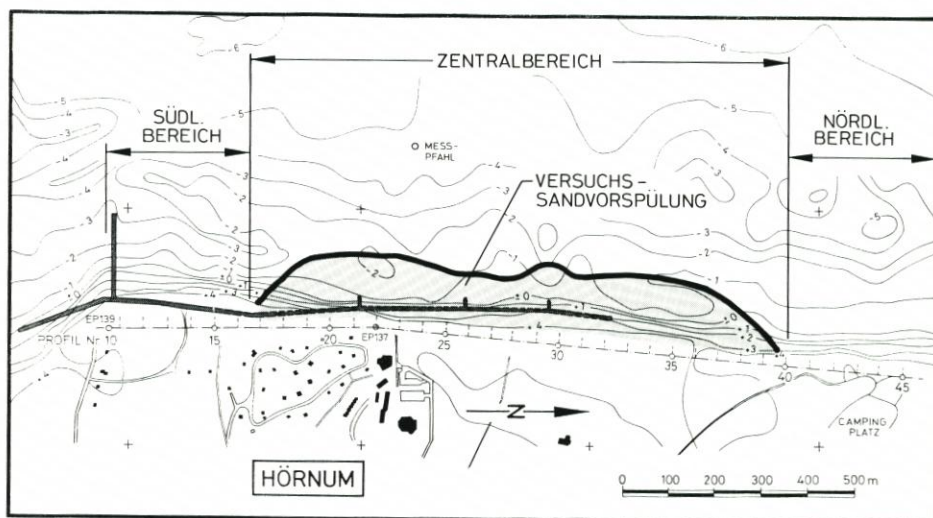


Abb. 13: Lage und Ausdehnung der Versuchssandvorspülung vor Hörnum (Zentralbereich) und angrenzende Untersuchungsbereiche (nördlich und südlich)

Frühjahr 1983 die auf Abb. 13 dargestellte Aufspülfläche (zwischen Profil Nr. 17 und 39) zur Ausführung ausgeschrieben.

Die erforderliche Vorspülmenge von insgesamt $640\,000\text{ m}^3$ Sand verteilte sich auf Teilmengen von $120\,000\text{ m}^3$ zur Verstärkung der Randdüne am Aralsteg und beim Parkplatz des Campingplatzes (Profil 42 bis 45 auf Abb. 13) sowie $10\,000\text{ m}^3$ Sand für eine Dünenverwaltung parallel zur Straße an der Sommerhaus-Siedlung (am südlichen Ende des Längswerkes). Für die eigentliche Versuchssandvorspülung vor der Randdüne war damit noch eine Gesamtmenge von rd. $500\,000\text{ m}^3$ verfügbar.

3.4 Begleitende Untersuchungen

Zu den Voruntersuchungen vor der Versuchssandvorspülung gehörte vorrangig die Erkundung und Bewertung von geeigneten Sandentnahmestellen im Küstenvorfeld, da eine Sandentnahme vom Lande aus ausgeschlossen war. Im Anschluß an die Vorspülung war u. a. die Umformung und der Abbruch des Vorspülkörpers in Abhängigkeit von den jeweils vorherrschenden Umweltbedingungen (u. a. Seegang, Strömungen, Wasserstände etc.) zu ermitteln, um die Frage beantworten zu können, welche Sandmengen nach drei Jahren (angenommene Halbwertszeit) tatsächlich noch in dem unmittelbaren Vorspülbereich und in den angrenzenden Uferabschnitten (Abb. 13) vorhanden sind.

Vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW Husum) wurde hierzu ein begleitendes Untersuchungsprogramm für den Zeitraum vor, während der Versuchssandvorspülung und bis zu drei Jahren danach mit folgenden Schwerpunkten ausgearbeitet und den nachfolgend genannten Institutionen übertragen:

A. Wiederholte Aufmäße des Strandbereiches sowie Peilung des Küstenvorfeldes im Nahbereich des Untersuchungsgebietes durch das ALW Husum (Profil 0 bis 46 auf Abb. 14) u. a. im Hinblick auf:

- Erfassung des „Nullzustandes“ vor Spülbeginn (= Referenzzustand)

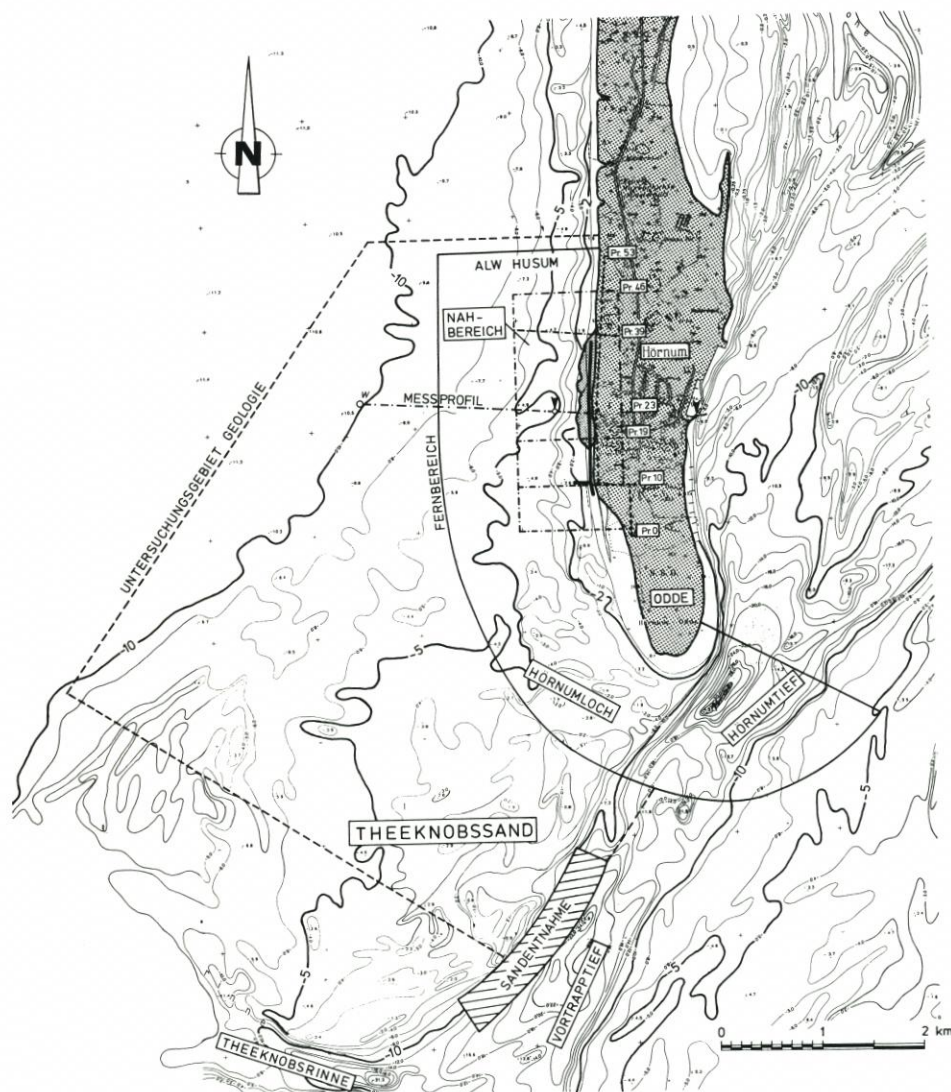


Abb. 14: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes

- Dokumentation der Sandvorspülung (Baufortschritte)
- Umlagerungen und Sandverluste im Untersuchungsgebiet im dreijährigen Zeitraum nach der Vorspülung durch Aufmäße jeweils im Frühjahr und Herbst eines Jahres sowie nach schweren Sturmfluten.

B. Untersuchungen im Fernbereich des Untersuchungsgebietes durch das ALW Husum zwischen Hörnum Tief und Profil 53 (s. Kennzeichnung auf Abb. 14) u. a. im Hinblick auf die:

- Erfassung der Strandveränderungen und Dünenabbruchkanten durch jährliche tachymetrische Aufmäße, beginnend mit dem „Nullzustand“ (vor Spülbeginn)
- Veränderung der Tiefenverhältnisse im großräumigen Küstenvorfeld einschl. Hörnum

Loch, Teile des Hörnum Tiefs, Vortrapptief und vorgelagerte Sände durch Peilung im Abstand von fünf Jahren

- allgemeine Dokumentation des Dünen- und Strandzustandes durch wiederholte Luftbildbefliegungen.

C. Untersuchungen zur Geologie im Nahbereich des Vorspülgebietes sowie in einem großräumigen Bereich (Abb. 14) durch das Geologisch-Paläontologische Institut und Museum der Universität Kiel (Prof. Köster) u. a. für folgende Fragestellungen:

- Erfassung von sedimentologischen Veränderungstendenzen im Nahbereich seit 1970
- Kenntnisse über die seewärtige Ausbreitung des Spülgutes sowie auch längs der Küste im Zeitraum 1983 bis 1986 durch wiederholte Entnahme von Sedimentproben von der Oberfläche des Küstenvorfeldes in einem Grundraster von 200 m × 100 m
- großräumige Sedimentverteilungen im Untersuchungsgebiet der Geologie durch Probeentnahmen im Raster von 300 m × 150 m (vor der Vorspülung und einmalige Wiederholung nach der Vorspülung)

D. Messung und Auswertung der wirksamen Umweltparameter in einem ausgewählten Meßprofil (Profil 23 auf Abb. 14) durch das ALW Husum und das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig (Prof. FÜHRBÖTER) u. a. im Hinblick auf:

- Zuordnung der zeitlichen Veränderungen am Vorspülkörper und im Vorstrandbereich zu den vorherrschenden Angriffskräften
- Beurteilung der Wirksamkeit der Versuchssandvorspülung und Empfehlungen für künftige Maßnahmen.

Die Dokumentation der Ergebnisse aus den vorgenannten Untersuchungen sind den Unterlagen des ALW Husum sowie den Berichten der Universität Kiel (KÖSTER u. AHRENS, 1986) und der Technischen Universität Braunschweig (FÜHRBÖTER et al., 1986, 1986a, 1986b u. 1987 sowie FÜHRBÖTER u. DETTE, 1986) zu entnehmen.

3.5 Erkundung von Sandentnahmegebieten im Küstenvorfeld

Auf Vorschlag des Geologischen Landesamtes Schleswig-Holstein in Kiel wurden die Untersuchungen zum Auffinden eines geeigneten Sandentnahmegebietes auf den Bereich des Theeknobssandes und der Theeknobsrinne (Abb. 15) konzentriert. Ein ursprünglich geplantes umfangreiches Bohrprogramm mußte aufgrund der schwierigen Arbeitsbedingungen mit den vorgesehenen Geräten bei vorherrschenden ungünstigen Seegangs- und Strömungsverhältnissen schließlich auf zwei Rammkernsondierbohrungen in Tiefen von 10 m und 12 m sowie auf ergänzende fünf Greiferproben vom Seegrund am Nordrand der Theeknobsrinne beschränkt werden.

Aus diesem Grund wurde noch eine zusätzliche Versuchsbaggerung am Süd- und Ostrand des Theeknobssandes durchgeführt. Hierzu wurde ein Schleppkopf-Hopperbagger (Friesland III mit einem Tiefgang von 2,6 m und einem Laderauminhalt von 430 m³) angemietet. Dem Spülgut wurden 22 Proben entnommen und deren Korngrößenverteilung bestimmt.

Als Ergebnis der Untersuchungen zum Auffinden eines Sandentnahmegebietes konnte festgestellt werden, daß am Rande des Theeknobssandes mittel- bis grobkörnige Sande vorhanden und mit einer Ungleichförmigkeit von

$$1,9 \leq U \leq 3,0$$

durchweg gut sortiert sind.

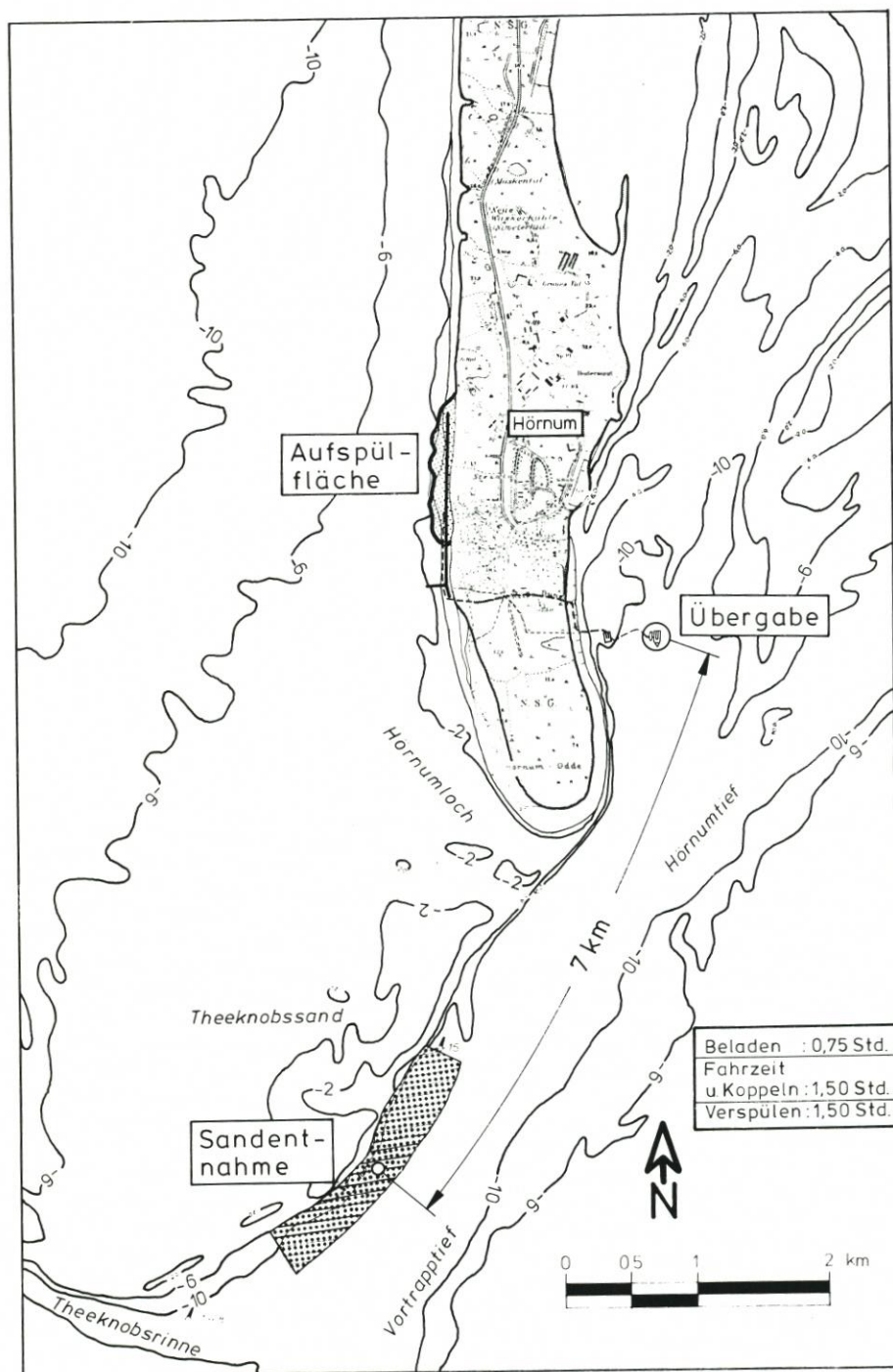


Abb. 15: Übersichtskarte Sandentnahmegebiet

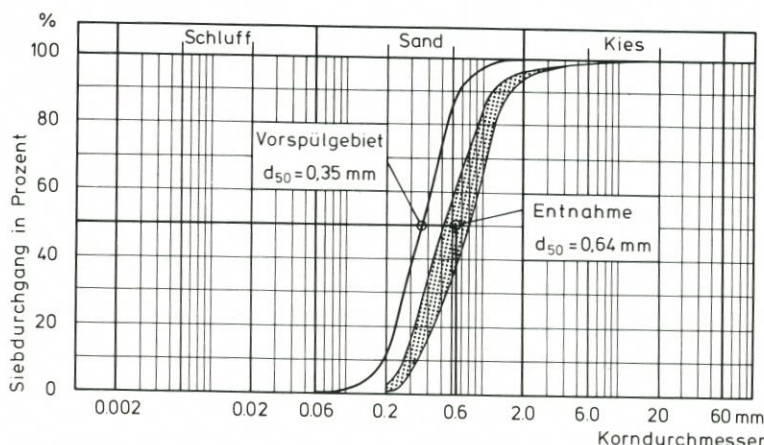


Abb. 16: Vergleich einer repräsentativen Korngrößenverteilung im Vorspülgebiet $d_{50} = 0,35$ mm mit der Einhüllenden von Korngrößenverteilungen im Entnahmegebiet $d_{50} = 0,64$ mm

Als geeignete Entnahme wurde schließlich ein Gebiet von 2100 m Länge und 160 m Breite am Osthang des Theeknobssandes zum Vortrappief hin (Abb. 15) ausgewählt und später auch zur Entnahme freigegeben.

Abb. 16 zeigt im Vergleich eine repräsentative Kornverteilung der im Vorspülgebiet vorhandenen Korngrößen mit einem mittleren Korndurchmesser von $d_{50} = 0,35$ mm sowie die Einhüllende von Korngrößenverteilungen im Entnahmegebiet mit einem $d_{50} = 0,64$ mm. Damit wird die allgemeine Forderung erfüllt, daß das Vorspülgut gröber als das vorhandene Sediment sein sollte (EAK, 1981).

3.6 Durchführung der Sandvorspülung

Für die Ausführung der Sandvorspülung (vgl. Abb. 11 u. 13) bot es sich wegen der relativ schmalen Inselbreite am südlichen Ortsrand von Hörnum an, die Anlegestation des Hopperbaggers in den Lee-Bereich der Insel vor dem Ostufer zu legen (Abb. 17). Die Trassenführung der Spülrohrleitung über die Insel bis zum Vorspülbereich am Weststrand zeigt eine Luftbildaufnahme (Abb. 18) zum Zeitpunkt der Ausführungsarbeiten.

Für die Spülentfernung von rd. 3,5 km Länge war die Zwischenschaltung einer Pumpstation erforderlich. Abb. 19 zeigt schematisch die Anlegestation (Ponton) mit dem Hopperbagger. Von dort verlief eine Schwimmleitung (Durchmesser 800 mm) mit zwischengeschalteter Pumpstation an die fest verlegte Rohrleitung (ebenfalls Durchmesser 800 mm) auf der Landseite. Der vorgesehene Spülkörper mit der Berme (vgl. Abb. 11) wurde, wie aus Abb. 20 ersichtlich, hergestellt. Zunächst wurde unmittelbar längs der Düne, von Süden nach Norden vorgehend, und danach in umgekehrter Richtung in einer weiter seewärts verlegten zweiten Trasse vorgespült (s. auch Abb. 18).

Die Ausschreibung der Maßnahme ergab bei Einrichtungskosten für die Baustelle zwischen 600 000 DM und 700 000 DM, Angebotssummen zwischen 3,2 Mio. DM und 5,3 Mio. DM; dies entspricht Einheitspreisen zwischen 3,80 DM/m³ Sand bis 7,00 DM/m³. Einschließlich der Kosten für das Untersuchungsprogramm zur Versuchssandvorspülung in den Jahren von 1983 bis 1986 in Höhe von 1,3 Mio. DM beliefen sich die Gesamtkosten auf 4,5 Mio. DM.

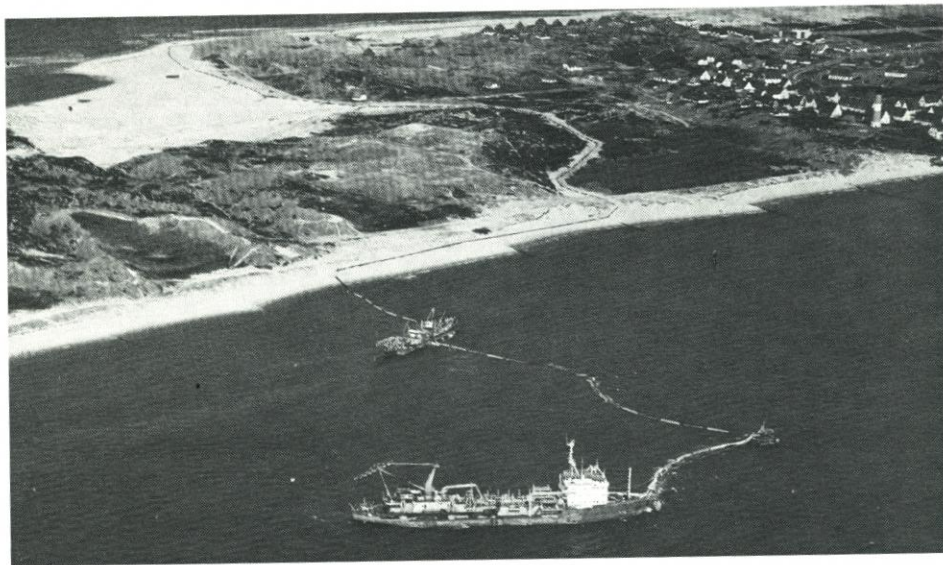


Abb. 17: Anlegestation des Hopperbaggers

Für die Maßnahme wurde ein Hopperbagger mit einem Ladevolumen von 3000 m^3 bei einem Tiefgang von 6,5 m eingesetzt (Pumpenleistungen des Hoppers: Gewinnen = $2 \times 1100 \text{ kW}$ sowie Verspülen = 2700 kW und Druckerhöhungsstation = 1620 kW). Bei einer mittleren Entfernung zwischen der Sandentnahme in der Theeknobsrinne und der Übergabestelle am Ostufer von rd. 7 km ergaben sich folgende mittlere Baggerumläufe:

– Laden des Hoppers	= 0,75 Std.
– Fahrzeiten einschl. Koppelung	= 1,5 Std.
– Verspülen	= 1,5 Std.
insgesamt:	= rd. 4 Std.

Mit einer mittleren Leistung von $20\,000 \text{ m}^3/\text{Tag}$ (6–7 Hopperfahrten) wurde die Versuchssandvorspülung in dem auf Abb. 13 gekennzeichneten Bereich innerhalb von nur fünf Wochen in den Monaten Mai und Juni 1983 durchgeführt. Abb. 21 zeigt beispielhaft an den Profilen 23 und 34 (Position, s. Abb. 13) die vorgespülten Mengen durch Gegenüberstellung des Ausgangszustandes (August 1982) und des Zustandes nach Beendigung der Maßnahme (September 1983) in Querprofilen. Bei Profil 34 ist oberhalb $\text{NN} \pm 0 \text{ m}$ noch die ursprünglich ausgeführte seeseitige Neigung von 1:15 zu erkennen, während bei Profil 23 schon eine Abflachung des Vorspülkörpers durch die vorherrschenden Wellen und Strömungen im Zeitraum von Juni 1983 (Ende der Vorspülung) bis September 1983 (Zeitpunkt der Seevermessung) festzustellen ist. Auffällig ist bei beiden Profilen ein Knick in der Böschung auf der Höhenlinie $\text{NN} \pm 0 \text{ m}$. Im Unterwasserbereich bis $\text{NN} - 3,0 \text{ m}$ hat sich im Vergleich zu der oberhalb gelegenen Böschung eine flachere Neigung von etwa 1:50 eingestellt.

Auf der Grundlage von Massenberechnungen zwischen dem Ausgangszustand (Peilung vom August 1982 = 0 m^3) und den Zusatzmassen nach der Vorspülung (Peilung vom September 1983) wurde für den Zentralbereich (Profil 17 bis 39) zwischen der Tiefenlinie NN



Abb. 18: Trassenführung der Spülrohrleitung von der Übergabe (Hopperbagger) bis zum Vorspülbereich nördlich des Tetrapodenquerwerkes

Baustelleneinrichtung

Sandvorspülung Hörnum

Maßstab 10 0 10 20 30 m

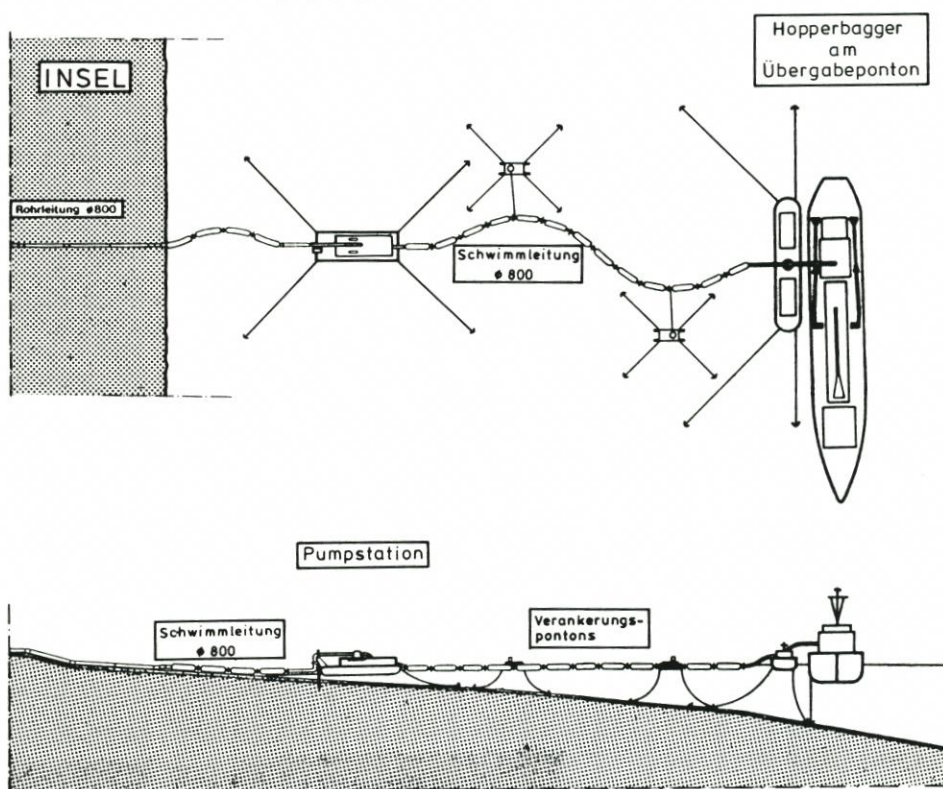


Abb. 19: Anleger des Hopperbaggers und Übergabeleitung zum Vorspülgebiet (schematisch)

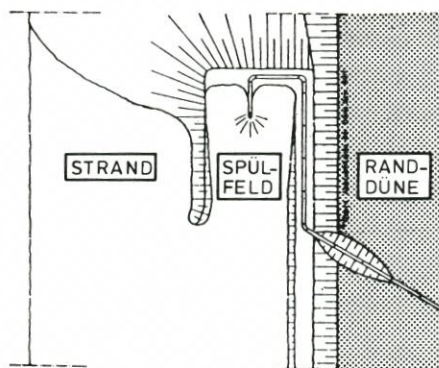


Abb. 20: Spülfeldauslauf (schematisch)

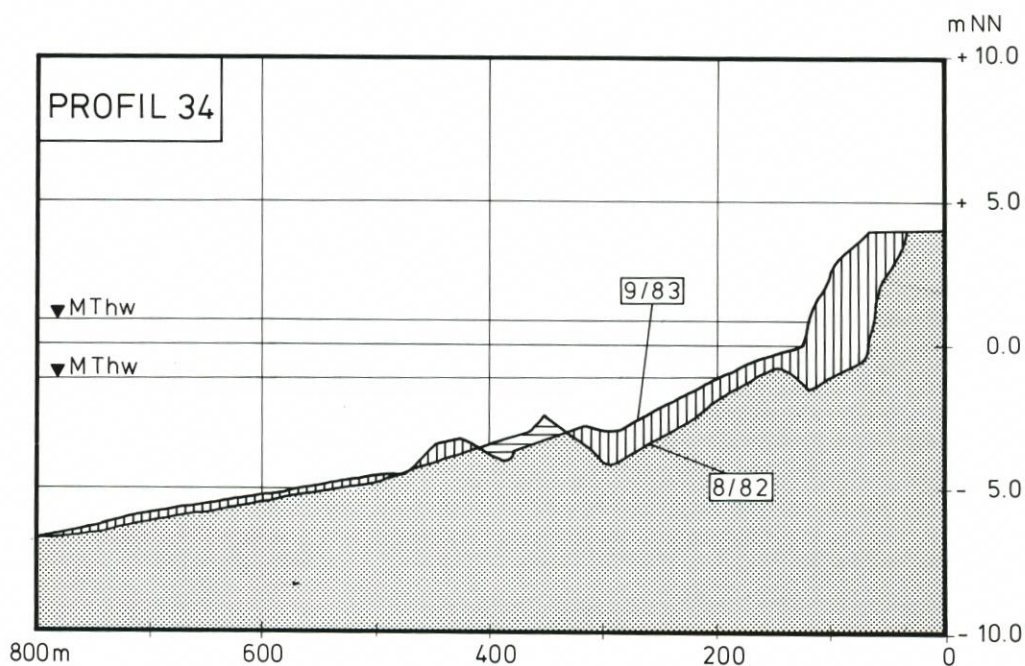
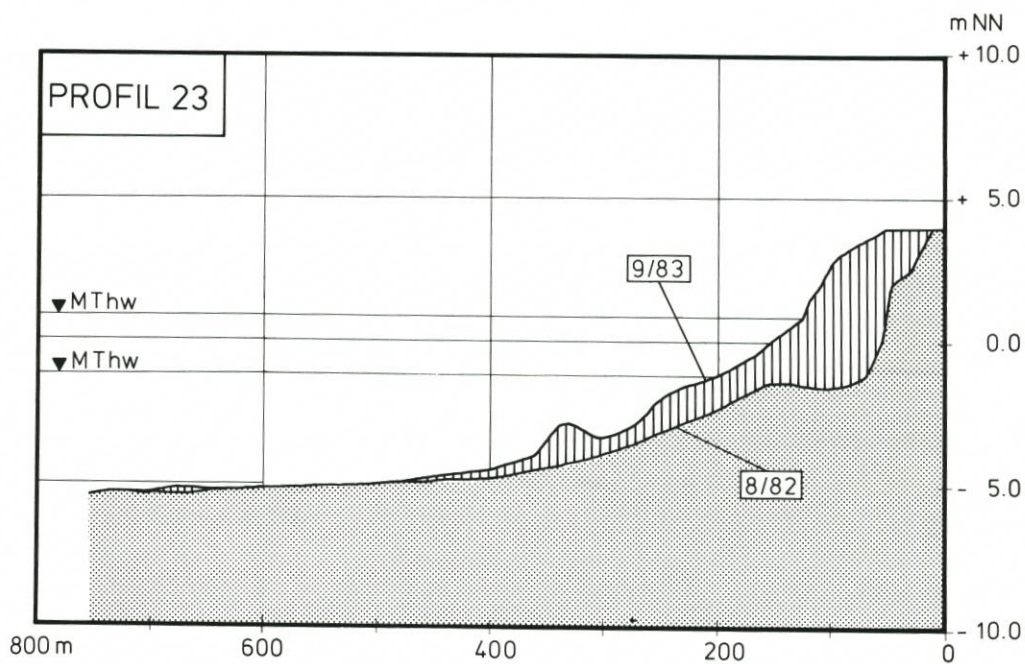


Abb. 21: Durchführung der Sandvorspülung im Jahre 1983 beispielhaft veranschaulicht am Profil Nr. 23 (oben) und Nr. 34 (unten)

- 8 m (bzw. seewärtige Grenze des Untersuchungsgebietes auf Abb. 13) und der Höhengschichtlinie NN + 4 m eine Gesamtvorspülmenge von

$$504\,000\text{ m}^3$$

nachgewiesen. Hinsichtlich der Massenermittlung ist zu bemerken, daß jeweils für jedes Profil (vgl. Beispiele auf Abb. 21) die Massenänderung, getrennt nach Höhen- bzw. Tiefenbereichen in Intervallen von je 1 m (z. B. zwischen NN + 4 m und NN + 3 m), in m^2 berechnet und der Betrag dann mit dem mittleren Profilabstand von 50 m (je 25 m zu beiden Seiten des Profiles) multipliziert wurde, um die Massen im $\text{m}^3/\text{je } 50\text{ m}$ Strandlänge zu erhalten. Durch Aufsummieren aller Einzelmassen konnten dann jeweils die Gesamtmengen, z. B. für den Zentralbereich der Vorspülung, ermittelt werden (Tafel 2).

Tafel 2. Nachweis der Aufspülungen im Zentralbereich (Profil 17 bis 39) der Versuchssandvorspülung vor Hörnum nach Peilungen im August 1982 und September 1983

Höhenbereich	Sandvolumen		Bemerkung
	m^3	%	
NN + 4 m bis NN + 3 m	46 600	9,2	Trockener Strand
NN + 3 m bis NN + 2 m	54 500	10,8	
NN + 2 m bis NN + 1 m	57 900	11,5	
NN + 1 m bis NN $\pm$ 0 m	66 500	13,3	Wasserwechselzone
NN $\pm$ 0 m bis NN - 1 m	85 500	17,1	
NN - 1 m bis NN - 2 m	59 200	11,7	Unterwasserstrand
NN - 2 m bis NN - 3 m	28 900	5,8	
NN - 3 m bis NN - 4 m	31 200	6,2	
NN - 4 m bis NN - 5 m	24 400	4,8	
NN - 5 m bis NN - 6 m	36 500	7,2	
NN - 6 m bis NN - 7 m	12 800	2,5	
NN - 7 m bis NN - 8 m	0	0	
Gesamtmenge	504 000	100	rd. 190 000 m

Um zu veranschaulichen, wie sich die Vorspülmenge von rd. 500 000 m^3 flächenmäßig auf die bestehenden Verhältnisse ausgewirkt hat, zeigt Abb. 22 beispielhaft den Verlauf der Höhenlinien NN + 3 m und NN $\pm$ 0 m vor der Vorspülung (8/82) im Vergleich zu deren Verlauf nach der Vorspülung (9/83). Es geht hieraus hervor, daß eine ausreichend breite Verwallung im Zentralbereich der Vorspülung vor dem natürlichen Dünenfuß (entsprechend etwa dem Verlauf der NN + 3-m-Linie im August 82) geschaffen werden konnte.

Aufgabe der begleitenden Untersuchungen im Zeitraum von 1983 bis 1986 (= 3 Jahre) war es nun, das Verhalten bzw. die Umformung des Vorspülbereiches wie auch die Auswirkungen auf die unmittelbar angrenzenden südlichen (bis zum Tetrapodenquerwerk) und nördlichen Bereiche (bis Profil 45 = Grenze der wiederholten Peilungen) zu erfassen und in Abhängigkeit von den einwirkenden Seegangs- und Wasserstandsverhältnissen zu beurteilen.

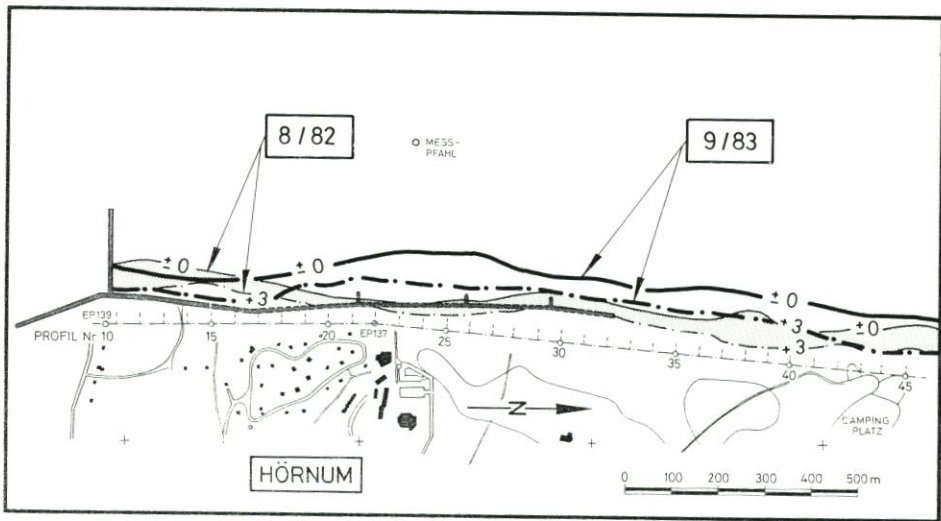


Abb. 22: Größenordnung der „Verwallung“ vor der Randdüne, dargestellt am Verlauf der NN +3-m- und NN ±0-m-Linie (9/83) sowie Vergleich zum Zustand 8/82

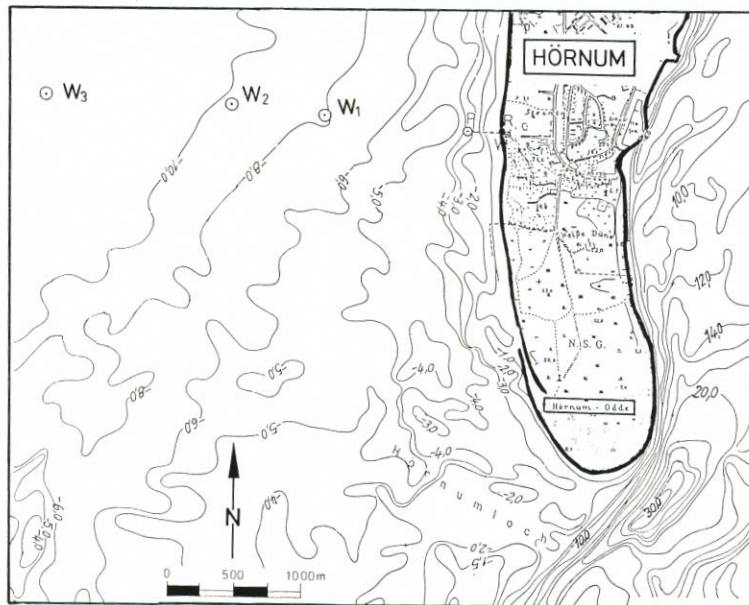


Abb. 23: Lage des Wellenmeßprofils vor Hörnum/Sylt mit den Positionen der einzelnen Meßstellen

4. Zusammenfassung der wirksamen äußeren Umweltparameter vor Hörnum im Zeitraum 1983 bis 1986

4.1 Vorbemerkung

Zur Erfassung der wirksamen äußeren Umweltparameter (Tidewasserstände, Wind, Wellen und Strömungen) wurde u. a. ein Wellenmeßprofil vor Hörnum eingerichtet; Abb. 23 zeigt die Positionen W₃ bis W₁, an denen Wave-Rider-Wellenmeßbojen ausgelegt wurden, sowie die Position P, an der ein Unterwassermesspfahl als Geräteträger eingespült wurde. Die Ergebnisse der hydrologischen Untersuchungen sowie die Auswertung der Strand- und Seevermessungen von 1983 bis 1986 sind der Dokumentation des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig zu entnehmen (FÜHRBÖTER et al., 1986 u. 1987). Die geologischen Untersuchungen sind in der Dokumentation des Geologisch-Paläontologischen Instituts und Museums der Universität Kiel (KÖSTER u. AHREND, 1986) zusammengefaßt.

4.2 Tidewasserstände und Sturmfluthäufigkeit

Mit der Inbetriebnahme der Meßstation an der Westküste vor Hörnum konnten erstmals auch mehrjährige Wasserstandsaufzeichnungen im Vorstrandbereich verwirklicht werden; bis dahin wurden die Tidewasserstände im dortigen Bereich über Korrekturtafeln aus den Aufzeichnungen im Hafen von Hörnum (Lee der Insel) ermittelt. In Tafel 3 sind für den Zeitraum von Oktober 1983 bis September 1986 (= 3 Jahre) die maximalen und minimalen Kennwerte einzelner Tiden zusammengestellt, um damit zugleich auch die Bandbreite der Schwankungen aufzuzeigen.

Tafel 3. Maximale und minimale Kennwerte einzelner Tiden vor Hörnum-West im Zeitraum 10/83 bis 9/86 (FÜHRBÖTER et al., 1987)

Kennwerte		Maximum		Minimum	
			Datum		Datum
Tidehochwasser	Thw	NN+2,96 m	04. 01. 84	NN-0,82 m	24. 01. 84
Tideniedrigwasser	Tnw	NN+1,68 m	06. 11. 85	NN-2,63 m	31. 01. 86
Tidehub	Thb	2,60 m	21. 01. 84	0,86 m	14. 11. 83
Flutdauer	T _F	9,25 Std.	06. 12. 85	4,4 Std.	10. 08. 86
Ebbdauer	T _E	8,30 Std.	21. 03. 86	4,0 Std.	13. 01. 84

Aus der Zusammenstellung der mittleren Tideverhältnisse vor Hörnum-West für den 3jährigen Untersuchungszeitraum (Tafel 4) ist neben dem mittleren Tidehub von rd. 1,9 m auch der Unterschied zwischen Flutdauer (45 % der Tidedauer) und Ebbdauer (55 %) hervorzuheben; dies ist auf die Ein- und Ausströmung im Hörnum Tief zurückzuführen.

Als höchster Sturmflutscheitelwasserstand im Untersuchungszeitraum wurden 796 cm PN - 5 m NN (rd. 2,1 m über MThw) am 4. Januar 1984 um 2.03 Uhr registriert; am Pegel Hörnum-Hafen wurden etwa 50 Minuten später 829 cm PN - 5 m NN gemessen. Dieser Wert liegt etwa 0,75 m unter dem HHThw von 905 cm PN - 5 m NN, das am 24. November

Tafel 4. Zusammenstellung der mittleren Tidekennwerte für Hörnum-West im Zeitraum von 10/83 bis 9/86 (FÜHRBÖTER et al., 1987)

Bezeichnung	Angabe	
Mittleres Tidehochwasser	MThw	= NN + 0,87 m
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw	= NN - 1,01 m
Mittlerer Tidehub	MThb	= 1,88 m
Mittlere Flutdauer	MT _F	= 5,40 Std.
Mittlere Ebbdauer	MT _E	= 6,45 Std.

Tafel 5. Jährliche Verweilzeiten erhöhter Sturmflutwasserstände vor Hörnum-West in ausgewählten Höhenbereichen (FÜHRBÖTER et al., 1987)

Zeitraum	Verweilzeiten des Wasserstandes in Stunden in ausgewählten Höhenbereichen		
	≥ 700 cm PN	≥ 725 cm PN	≥ 750 cm PN
10/83 - 9/84	54	26	7
10/84 - 9/85	8	2	-
10/85 - 9/86	17	10	7

1981 eingetreten ist. Die Auswertung der Verweilzeiten des Wasserstandes oberhalb ausgewählter Höhen (Tafel 5) vermittelt einen Eindruck von der Sturmflutintensität in den genannten drei Jahren; es fällt hier ein relativ sturmflutaktives Jahr (9/83-10/84) im ersten Jahr nach der Vorspülung auf, dem danach ein „sturmflutarmes“ Jahr folgte.

Um diese Angaben größenordnungsmäßig in die langfristige Sturmfluthäufigkeit einordnen zu können, sind in Abb. 24 die Verweilzeiten der Sturmflutwasserstände von 1900 bis 1984 am Pegel List-Hafen aufgetragen. Daraus wird ersichtlich, daß sich im Winter 1983/84 die Verweilzeiten oberhalb 700 cm PN - 5 m NN am Pegel List auf insgesamt 22 Stunden aufsummierten. Diese Angabe, die für MThw + 1,3 m gilt, ist vergleichbar mit den 26 Stunden für Hörnum-West oberhalb 725 cm PN - 5 m NN entsprechend MThw + 1,4 m (Tafel 5). Daraus kann für die hier vorliegende Betrachtung gefolgert werden, daß die Langzeitstatistik der Verweilzeiten am Pegel List (Abb. 24) auch für die Beurteilung der Verhältnisse am Süden der Insel Sylt als repräsentativ herangezogen werden kann. Hinsichtlich einer Einordnung der Verweilzeiten des Winters 1983/84 in das Langzeitgeschehen geht aus Abb. 24 hervor, daß in den 85 Jahren seit 1900 nur in elf Jahren höhere Verweilzeiten aufgetreten sind.

Danach kann das erste Jahr nach der Sandvorspülung Hörnum als überdurchschnittlich sturmflutaktives Jahr bezeichnet und hinsichtlich der Seegangsbelastung auf die hohen Strandbereiche und die Randdünen in das obere Drittel des langjährigen Geschehens eingestuft werden. Abb. 25 zeigt zur Veranschaulichung der Verweilzeiten ein ausgewähltes Sturmflutereignis vom 5./6. 11. 1985, das mit NN + 2,86 m (rd. 2 m über MThw) nach der Sturmflut vom 4. 1. 1984 den zweithöchsten Wasserstand (vgl. Tafel 4) im Zeitraum 1983 bis 1986 lieferte. Die Verweilzeit oberhalb 700 cm PN - 5 m NN belief sich auf 12 Stunden; während dieser Zeit wurde der Bereich oberhalb 750 cm PN - 5 m NN (MThw + 1,6 m) für etwa fünf Stunden überschritten.

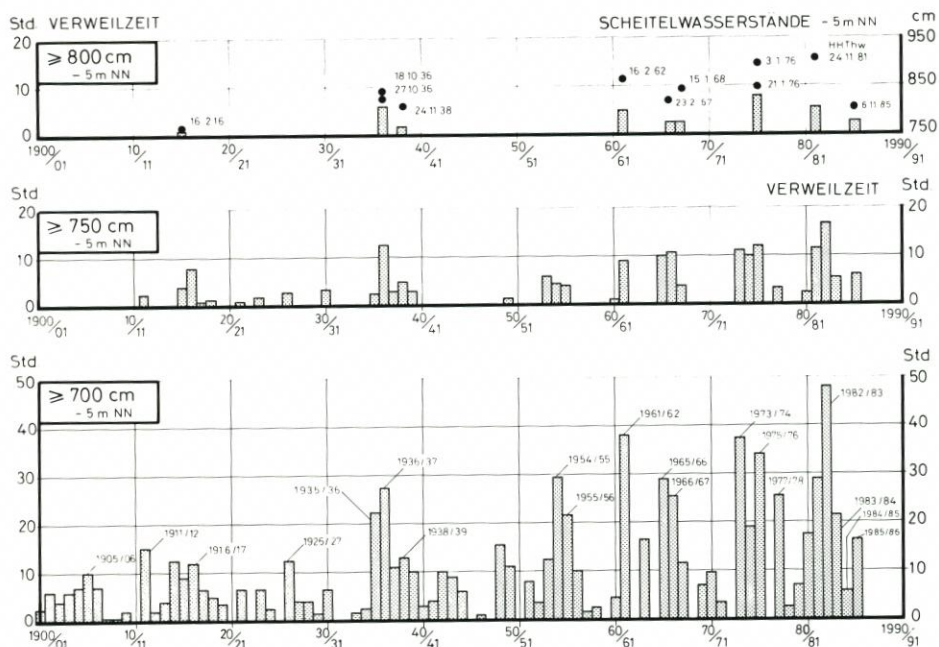


Abb. 24: Verweilzeiten von Sturmflutwasserständen in ausgewählten Höhenbereichen am Pegel List im Zeitraum 1900 bis 1985 (MELF, 1985)

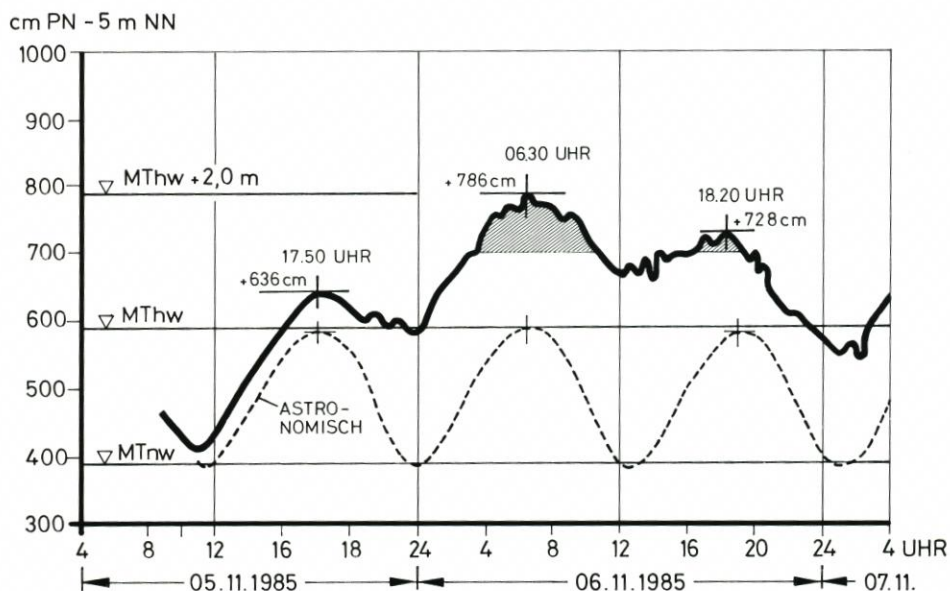


Abb. 25: Verlauf der Wasserstände vor Hörnum/West (Punkt P auf Abb. 23) während der Sturmflut am 5. 11. und 6. 11. 1985

4.3 Wellenmessungen

4.3.1 Vorbemerkung

Während des Untersuchungszeitraumes von 10/83 bis 3/86 wurden Wellenmessungen im Meßprofil (vgl. Abb. 23) nach einem vorgegebenen Programm, insbesondere aber bei erhöhten Tidewasserständen durchgeführt. Um eine möglichst lückenlose Aufzeichnung der statistischen Wellenparameter (u. a. Wellenhöhe, -periode), z. B. in Zeitabständen von wenigen Stunden über die gesamte Untersuchungszeit, zu erhalten, wäre ein unvertretbar hoher Personal- und Kostenaufwand für die Betreuung der Meßkette und die Auswertung aller Messungen erforderlich gewesen. Aus diesem Grunde war verabredet worden, zunächst ein ausreichendes Kollektiv von Einzelmessungen (Wellen und Wind) zu sammeln, um dann über Korrelationsbetrachtungen zwischen Wind- und Wellenkennwerten vor Hörnum auf der Grundlage der lückenlosen Winddaten allein die zugehörigen Wellenhöhen rechnerisch zu ermitteln (vgl. hierzu u. a. DETTE, 1977).

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden ausführlich in der Dokumentation des Untersuchungsprogramms (FÜHRBÖTER et al., 1986 u. 1987) beschrieben. Aufgrund der guten Korrelationen konnte lückenlos das Wellenklima vor Hörnum in Zeitintervallen von je einer Stunde für den Zeitraum 10/83 bis 9/86 aus den Windaufzeichnungen allein berechnet werden.

Die Brauchbarkeit dieser Methode einer kontinuierlichen Berechnung des Wellenklimas,

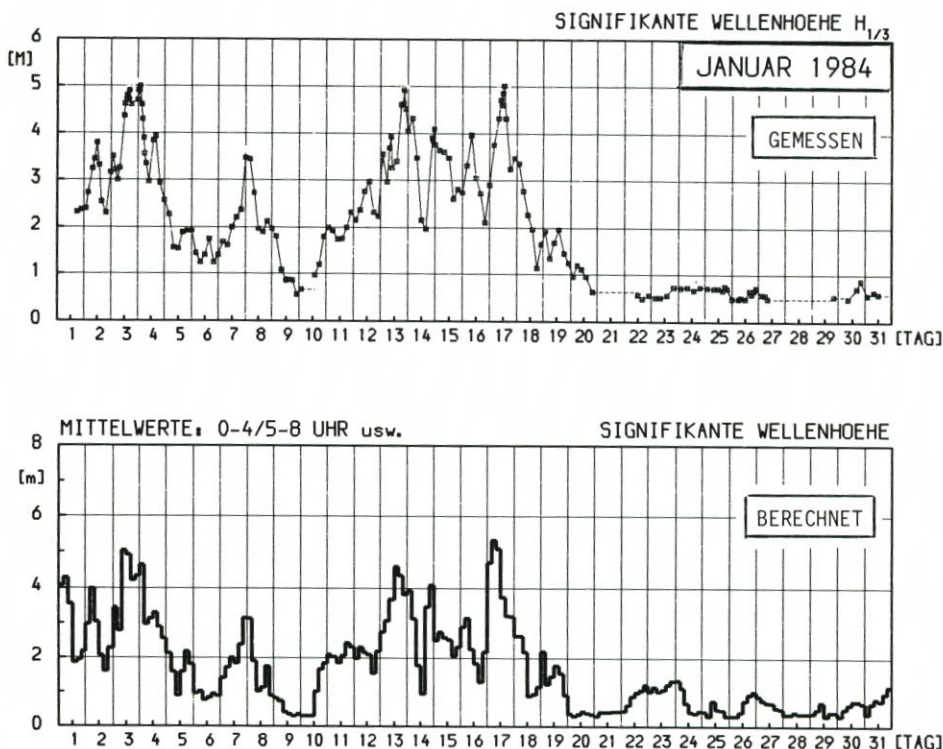


Abb. 26: Vergleich von gemessenen (oben) und über Korrelation mit dem Wind berechneten (unten) signifikanten Wellenhöhen, hier als Mittelwerte über je 4 Stunden für den Monat Januar 1984

am Beispiel der signifikanten Wellenhöhen, für vergleichende, zumindest qualitative Betrachtungen veranschaulicht die Gegenüberstellung von Wellenkennwerten aus Messungen und Berechnungen beispielhaft für die Monate Januar 1984 (Abb. 26) und Januar 1986 (Abb. 27). Die Übereinstimmung ist erstaunlich gut und liegt in einer Abweichung von weniger als 10 %, zumindest bei Wellenhöhen oberhalb $H_s = 2$ m.

4.3.2 Ergebnisse der Wellenmessungen

Bis Ende 1983 waren im Wellenmeßprofil vor Hörnum zwei „Wave-Rider“-Wellenmeßbojen an den Stationen W_3 (mehr als 10 m Wassertiefe) und W_2 (etwa in 10 m Wassertiefe) ausgelegt.

Im Januar 1984 wurden an den beiden Stationen zugleich die höchsten Wellen während des Untersuchungszeitraumes gemessen, und zwar

Station W_3
(3,5 km vor der Küste) $H_{\max} = 9,6$ m

Station W_2
(2,0 km vor der Küste) $H_{\max} = 8,7$ m

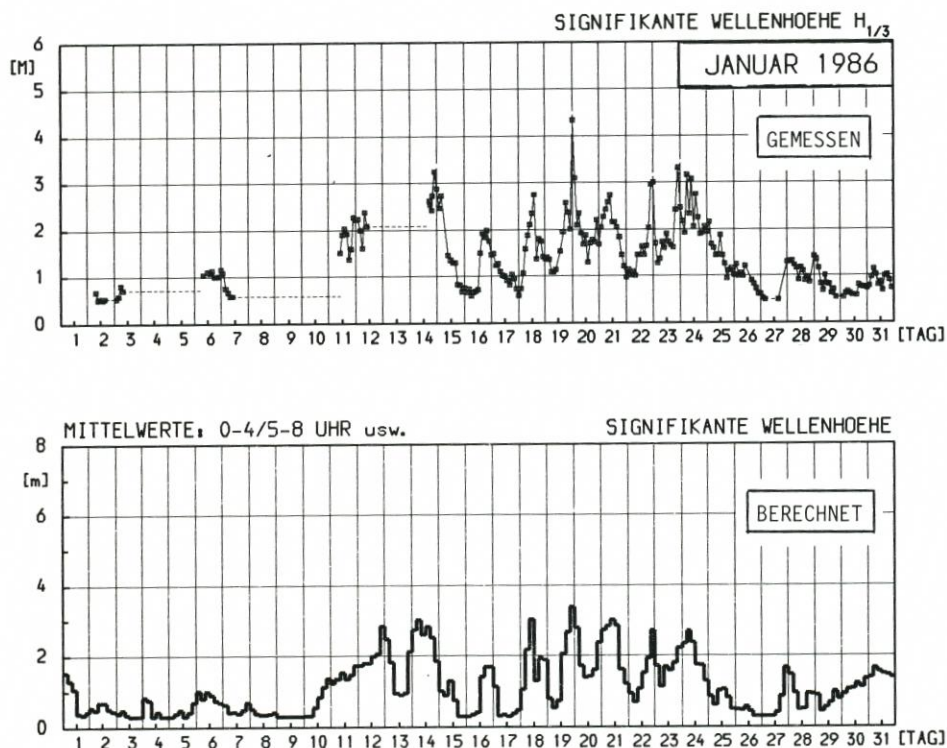


Abb. 27: Vergleich von gemessenen (oben) und über Korrelation mit dem Wind berechneten (unten) signifikanten Wellenhöhen, hier als Mittelwerte für je 4 Stunden für den Monat Januar 1986

In Tafel 6 sind für die im Januar 1984 aufgetretenen Sturmtiden die jeweils höchsten Wellenkennwerte und die maximalen Windgeschwindigkeiten mit zugehöriger Richtung zusammengestellt, um einen Anhalt darüber zu geben, in welchem Maße die Wellen beim Anlauf auf die Küste infolge Grundberührung, Refraktion etc. in ihrer Höhe abnehmen.

Für das Gesamtkollektiv von 2080 ausgewerteten Wellenmessungen an der Station W₂ ergibt sich die folgende Häufigkeitsverteilung von Wellenhöhen (H_s) und zugeordneten Wellenperioden (T_m), wie sie in Abb. 28 in einem Gitternetz von Wellenhöhen in 0,5 m und Wellenperioden in 0,5 s Intervallen zusammengestellt sind.

Aus dieser Auftragung ist ersichtlich, daß mit einer Häufigkeit von 90 % im Kollektiv der 2080 Messungen eine mittlere Wellenhöhe H_s = 1 m mit einer Periode T_m = 4,5 s vorgeherrscht hat. In Tafel 7 sind für praktische Belange die zu einzelnen Wellenhöhen zu erwartenden Wellenperioden zusammengestellt.

Tafel 6. Zusammenstellung der höchsten Wellenkennwerte an den Stationen W₂ und W₃ und der zugehörigen maximalen Windgeschwindigkeiten einschl. Richtungen während der Sturmtiden im Januar 1984

Datum 1984		Wellenkennwerte						Winddaten		
		Station W ₃			Station W ₂			Richtung	Geschw.	
Tag	Uhr	H _{max} m	H _s m	T _m s	H _{max} m	H _s m	T _m s	— Grad	m/s	
03. 1.	13	9,6	5,2	8,9	8,1	4,4	8,1	WSW	250	22,5
08. 1.	04	6,5	3,9	8,9	4,9	3,4	6,9	W	260	18,9
13. 1.	22	8,8	6,0	10,4	8,1	4,5	9,8	W	270	23,3
17. 1.	13	7,9	5,2	10,6	8,7	5,0	9,9	WSW	250	23,3

WELLENHÖHE

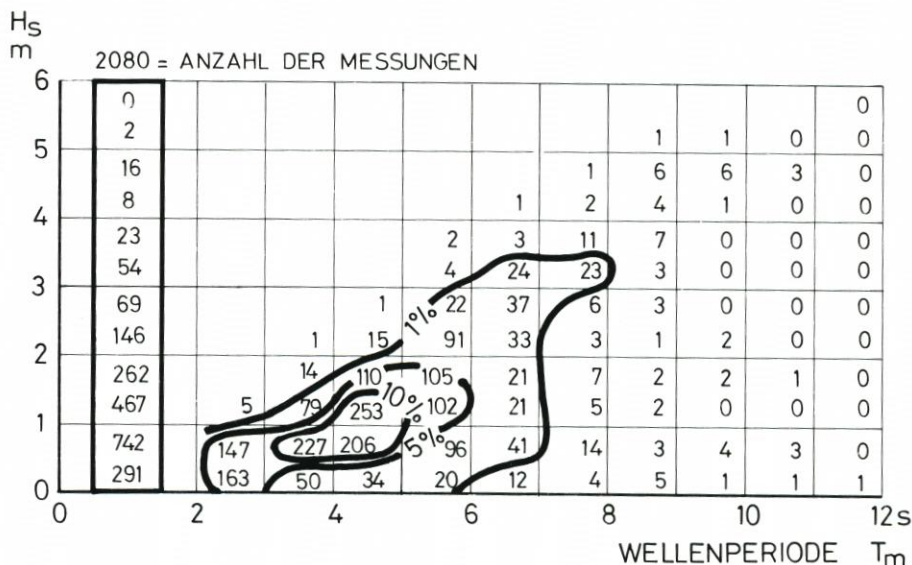


Abb. 28: Häufigkeitsverteilung von Wellenhöhen und zugeordneten Perioden von 2080 Wellenmessungen an der Station W₂ im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986

Tafel 7. Zuordnung von Wellenparametern vor Hörnum-West auf der Grundlage der Wellenmessungen von 1983 bis 1986

Wellenhöhe	Wellenperiode
$H_s = 1 \text{ m}$	$T_m = 4,5 \text{ s}$
$H_s = 2 \text{ m}$	$T_m = 5,5 \text{ s}$
$H_s = 3 \text{ m}$	$T_m = 7,0 \text{ s}$
$H_s = 4 \text{ m}$	$T_m = 8,5 \text{ s}$
$H_s = 5 \text{ m}$	$T_m = 10,5 \text{ s}$

4.3.3 Seegangsbelastung auf den Vorspülkörper in den Zeiträumen zwischen den einzelnen Vermessungen

Hinsichtlich der Seegangsbelastung auf die Sandvorspülung während der einzelnen Zeiträume (A bis D) zwischen den Peilungen sind in Tafel 8 Sturmflutereignisse, die den Scheitelwasserstand von 700 cm PN – 5 m NN (etwa 1,1 m über MThw) überschritten, zusammen mit den maximalen Wellenkennwerten und zugehörigen Windparametern zusammengestellt.

Wie schon aus Tafel 5 ersichtlich, haben 13 Tiden zu der Verweilzeit von 54 Stunden oberhalb 700 cm PN – 5 m NN beigetragen, die maximalen Wellenhöhen erreichten bei

Tafel 8. Zusammenstellung von Wellenkennwerten und zugehörigen maximalen Windgeschwindigkeiten (einschl. Richtung) bei den erhöhten Tidewasserständen im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986

Datum	Scheitelwasser- stand cm PN – 5 m NN	Wellenkennwerte			Wind-	
		$H_{\max}$ m	H_s m	T s	-richtung Grad	-geschwindigkeit m/s
19. 10. 83	715	6,3	3,4	7,6	280 W	20,3
31. 10. 83	714	5,4	3,3	7,2	300 WNW	19,2
01. 01. 84	730	5,9	3,8	8,6	270 W	20,0
03. 01. 84	764	8,1	4,4	8,1	250 WSW	22,2
04. 01. 84	790	8,0	5,0	8,7	250 WSW	21,1
08. 01. 84	717	5,5	3,5	6,5	260 W	18,9
13. 01. 84	704	5,8	3,9	7,2	200 SSW	24,4
13. 01. 84	722	8,1	4,5	9,8	270 W	23,3
14. 01. 84	726	7,4	4,3	8,1	260 W	20,6
14. 01. 84	732	7,0	3,9	7,3	250 WSW	19,7
17. 01. 84	730	8,7	5,0	9,9	250 WSW	23,3
18. 01. 84	704	4,3	3,4	6,7	270 W	19,7
07. 02. 84	720	5,9	3,9	8,5	270 W	19,4
23. 11. 84	711	3,7	2,5	5,4	– –	–
24. 11. 84	745	4,4	3,3*)	7,1	– –	–
06. 11. 85	813	–	5,1**)	–	270 W	26,5
06. 11. 85	750	–	4,3**)	–	270 W	22,0
06. 12. 85	724	–	5,6**)	–	300 WNW	30,0

*) Messungen über den Verlauf der Sturmtiden unvollständig, daher nicht Maximalwerte (Windmeßanlage ausgefallen)

**) übernommen aus Wind-Wellen-Korrelation

diesen Ereignissen durchweg Werte von $H_{\max} > 5$ m bzw. $H_S > 3,5$ m im Küstenvorfeld. Mit Ausnahme von drei Ereignissen trat das Maximum der einzelnen Sturmweatherlagen aus dem verhältnismäßig engen Windsektor von 250° bis 270° (WSW bis W) auf.

Die relativ sehr hohe Seegangsbelastung, gerade im ersten Jahr nach der Vorspülung (Winter 1983/84) veranschaulicht die Zusammenfassung von Wellenhöhen $H_S > 3,0$ m (extreme Belastungen) sowie $H_S > 1,5$ m (normale Belastungen) in Tafel 9. Es handelt sich hier um die Aufsummierung der stündlichen Wellenkennwerte, die auf der Grundlage der Korrelation aus den Winddaten berechnet wurden. Die Anzahl von 20 995 Stundenwerten (etwa 29 Monate) entspricht dem Zeitraum von 10/83 bis 6/86 mit Ausnahme der Monate September bis November 1984 (Ausfall der Windmeßanlage).

Tafel 9. Aufsummierung und Häufigkeitsverteilung der stündlichen Wellenhöhen H_S auf der Grundlage von Korrelationsberechnungen im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986

Zeitraum		Häufigkeiten von Wellenhöhen H_S					
		< 1,5 m		> 1,5 m		> 3 m	
		Stunden	%	Stunden	%	Stunden	%
Gesamtzeitraum							
10/83 – 6/86		17 285	100	3850	100	575	100
Zeitraum							
A	10/83 – 3/84	2 500	14,5	1160	30,1	280	48,7
B	3/84 – 6/85*)	8 010	46,3	1170	30,1	80	13,9
C	6/85 – 10/85	2 350	13,6	680	17,7	95	16,5
D	10/85 – 6/86	4 430	25,6	850	22,1	115	19,9

*) Die Monate Sept. bis Nov. 84 sind ausgenommen, da für diese Zeit keine Windregistrierungen vorliegen

Im Hinblick auf die Beurteilung der Verlagerung von Sandmassen aus der Versuchssandvorspülung im Küstenlängstransport ist es hilfreich, die resultierende Wellenanlafrichtung aus dem Kollektiv aller Wellendaten eines Untersuchungszeitraumes (von Peilung zu Peilung) zu kennen. Da es z. Z. noch keine Kenntnisse darüber gibt, in welchem Maße bei erhöhtem Seegang die Wellenanlafrichtung von der gleichzeitig vorherrschenden Windrichtung abweicht, wird hier angenommen, daß die Wellenlafrichtung im Tiefwasser der Windrichtung entspricht. Auf der Grundlage der in Tafel 9 aufgelisteten Häufigkeiten von Wellenhöhen $H_S > 1,5$ m und $H_S > 3,0$ m in den einzelnen Zeiträumen A bis D zeigt Abb. 29 und 30 jeweils auf der linken Seite die Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen auf die 16teilige Windrose. Um auch für qualitativ vergleichende Betrachtungen eine Aussage über die Verteilung der Wellenenergie auf die Windrose zu ermöglichen, wurde diese zusätzlich jeweils auf der rechten Seite der Abb. 29 und 30 aufgetragen. Dazu wurde die vereinfachte Beziehung

$$E \sim 1,26 \cdot H_S^2 / T_m \text{ [kWh/m}^2 \cdot \text{h]}$$

mit H_S = signifikante Wellenhöhe

T_m = mittlere Wellenperiode zugeordnet zu H_S entsprechend Tafel 7

h = zeitlicher Anteil (Stunden) des Vorherrschens einzelner Wellenhöhen im betrachteten Zeitraum

herangezogen (vgl. NIEMEYER, 1983 u. FÜHRBÖTER et al., 1986).

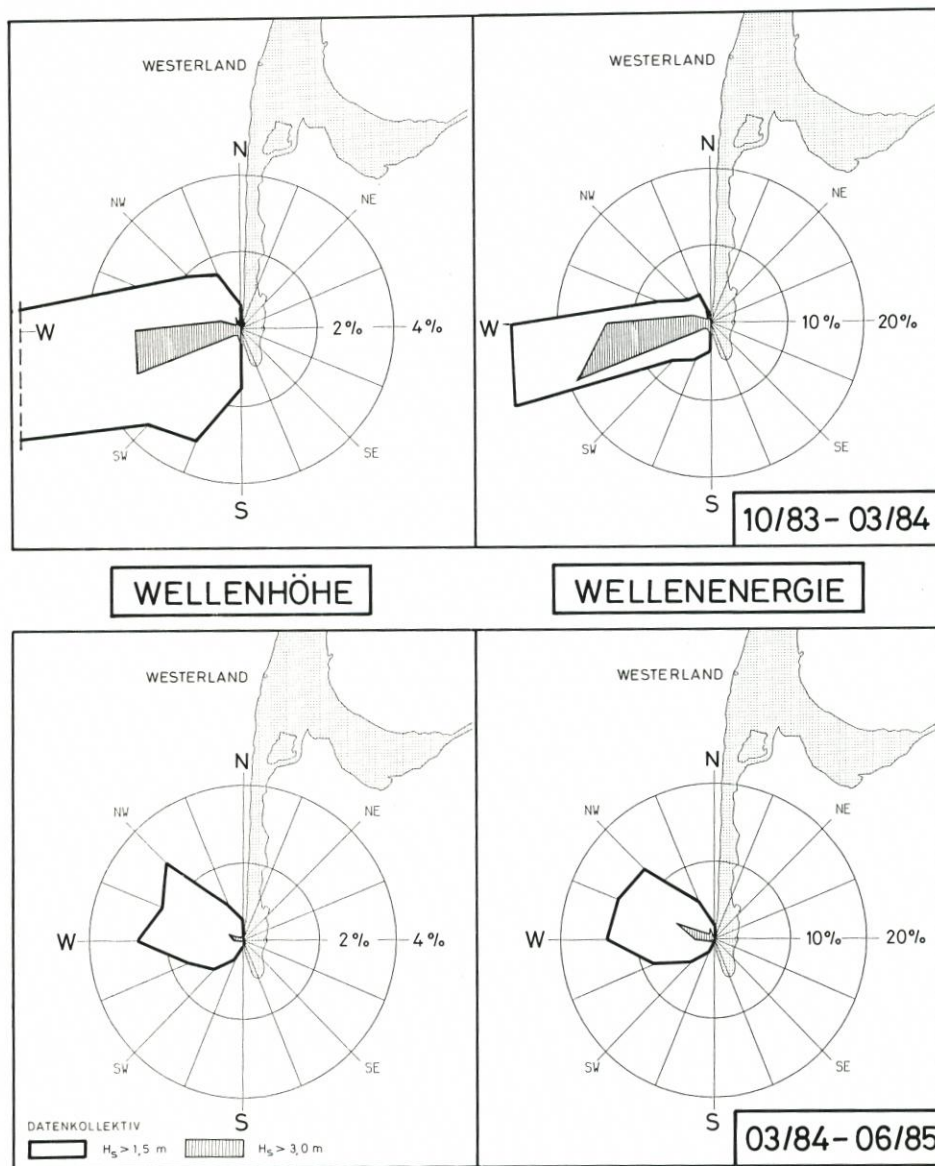


Abb. 29: Häufigkeitsverteilung von Wellenhöhen $H_s > 1,5 \text{ m}$ und $H_s > 3,0 \text{ m}$ auf die Windrose (links) sowie der Wellenenergien für die Kollektive $H_s > 1,5 \text{ m}$ und $H_s > 3,0 \text{ m}$ (rechts) für die Zeiträume 10/83 bis 3/84 (oben) und 3/84 bis 6/85 (unten)

Bei der Betrachtung der Auftragungen fällt auch hier der hohe Anteil von Wellenhöhen $H_s \geq 1,5 \text{ m}$ und $H_s \geq 3,0 \text{ m}$ (schraffierte Flächen) im ersten Zeitraum (Winter 1983/84) auf. Die nachfolgenden Zeiträume B bis D können als verhältnismäßig seegangsarm in Bezug auf die Häufigkeit von $H_s \geq 3,0 \text{ m}$ eingestuft werden. Zu den Darstellungen der Häufigkeiten für die Zeiträume A bis D ist zu bemerken, daß sich die Häufigkeiten in den einzelnen Sektoren jeweils prozentual auf die Dauer des Untersuchungszeitraumes (A = 5 Monate = 100 %, B =

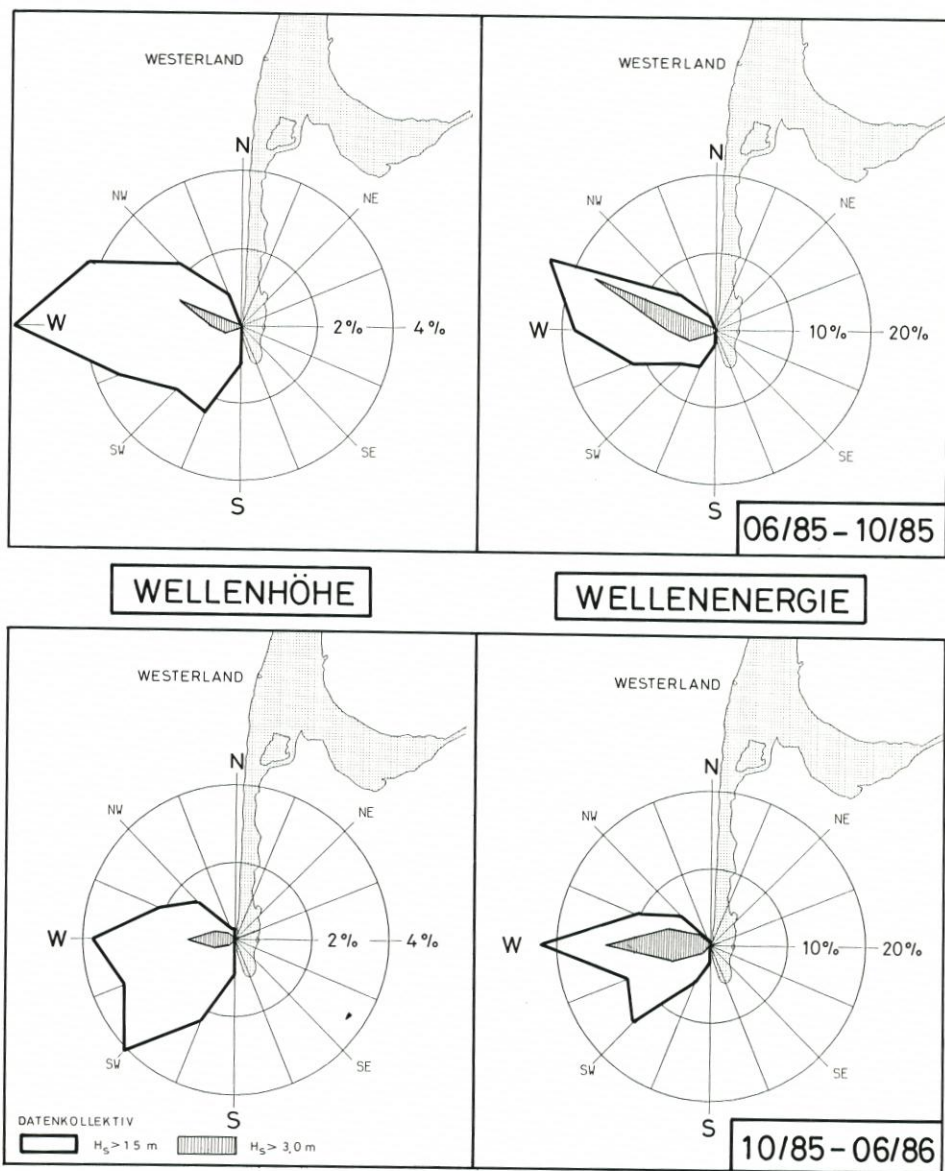


Abb. 30: Häufigkeitsverteilung von Wellenhöhen $H_s > 1,5 \text{ m}$ und $H_s > 3,0 \text{ m}$ auf die Windrose (links) sowie der Wellenenergien für die Kollektive $H_s > 1,5 \text{ m}$ und $H_s > 3,0 \text{ m}$ (rechts) für die Zeiträume 6/85 bis 10/85 (oben) und 10/85 bis 6/86 (unten)

16 Monate, $C = 4$ Monate und $D = 7$ Monate) beziehen, so daß z. B. die „schraffierten Flächen“ (für $H_s \geq 3,0 \text{ m}$) nicht unmittelbar untereinander größenordnungsmäßig verglichen werden können. Wichtig ist bei dieser Darstellung nur, daß aus der Verteilung der unterschiedlichen Häufigkeiten die jeweils resultierende Angriffsrichtung der einzelnen Häufigkeitsverteilungen ersichtlich wird. So fällt z. B. auf, daß die Resultierende sowohl der Wellenhöhe als auch der Wellenenergie im ersten Untersuchungszeitraum (A) zwischen WSW

und W, etwa bei 255° liegt, woraus auf eine resultierende Küstenlängsströmung in nördliche Richtung geschlossen werden kann. Im zweiten Untersuchungszeitraum (B) liegt die Resultierende bei WNW, etwa bei 290° , was eine nach Süden hin herrschende Küstenlängsströmung andeutet (Abb. 29 unten). Im Sommer 1985 (= Zeitraum C, Abb. 30 oben) herrschten für die Jahreszeit eigentlich ungewöhnlich häufig höhere Wellen mit $H_s \geq 3,0$ m vor, mit einem Anteil von nahezu 17 % im Gesamtkollektiv aller Wellenkennwerte für den Gesamtzeitraum 1983 bis 1986 (vgl. Tafel 9). Die Resultierende ist nahezu identisch mit der im zweiten Zeitraum (B). Der vierte Zeitraum (D) mit einem Anteil von etwa 20 % im Kollektiv aller Wellen $H_s \geq 3,0$ m weist als Resultierende sowohl bei Wellenhöhen und Wellenenergie die „neutrale“ (d. h. nahezu küstennormale) Richtung W (etwa 270°) auf. Aufgrund dieser Untersuchungen kann also davon ausgegangen werden, daß während des Gesamtuntersuchungszeitraumes zeitweilig (in den einzelnen Untersuchungszeiträumen) sowohl nach Norden als auch nach Süden hin gerichtete resultierende Küstenlängstransportrichtungen vorherrschen.

5. Verhalten der Versuchssandvorspülung im Zentralbereich

Wie schon in Abschnitt 3.6 erwähnt, wurden die Massenbilanzen (Volumenänderungen) auf der Grundlage von Querprofilauswertungen durchgeführt. Die Analyse der im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986 vorherrschenden Umweltparameter (Tidewasserstände, Wind und Wellen) wurde in Abschnitt 4 den nachfolgenden Betrachtungen über die Änderungen und Verlagerungen von Sandvolumina im Zentralbereich der Versuchssandvorspülung (Profil 17 bis 39, s. Abb. 13) vorangestellt.

Tafel 10. Volumenänderungen im Zentralbereich der Sandvorspülung (Abb. 13)

Zeitraum	Sandvolumina in m^3 bezogen auf 8/82				
	Gesamt- bereich	Hoher Strand	Nasser Strand	Vorstrand	
				nah	entfernt
				NN - 1 m	NN - 4 m
	NN + 4 m	NN + 4 m	NN + 1 m	NN - 1 m	NN - 4 m
	-	-	-	-	-
	NN - 7 m	NN + 1 m	NN - 1 m	NN - 4 m	NN - 7 m
8/82 - 9/83	503 800	159 000	151 800	119 300	73 700
8/82 - 3/84	423 800	74 400	135 900	95 800	117 300
8/82 - 6/85	351 600	51 900	135 700	54 400	108 900
8/82 - 10/85	217 700	55 300	139 600	4 300	18 400
8/82 - 6/86	-84 400	96 500	113 000	-93 200	-200 800

In Tafel 10 sind aufgrund der wiederholten Vermessungen die momentanen Sandvolumina im Zentralbereich für den Gesamtbereich und für ausgewählte charakteristische Strand- und Vorstrandbereiche aufgelistet. Bei der Betrachtung der Volumenänderungen im Gesamtbereich fällt sofort auf, daß am Ende des dreijährigen Untersuchungszeitraumes die Vorspülung von $504\,000\,m^3$ nicht nur vollständig aus dem Zentralbereich ausgetragen wurde, sondern zusätzlich noch einmal rd. $85\,000\,m^3$ aus dem natürlichen Sandhaushalt verlagert wurden. Die differenzierte Betrachtung der Volumenänderungen in ausgewählten charakteristischen Strand- und Vorstrandbereichen zeigt, daß im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986 die Sandvolumina im nassen und hohen Strandbereich, d. h. oberhalb der MTnw-Linie, nur

relativ geringfügig abgenommen haben. Die hohen Verluste im Zentralbereich konzentrieren sich danach ausschließlich auf den nahen und entfernten Vorstrandbereich, wobei die Ausräumungen im entfernteren Vorstrandbereich (zwischen NN - 4,0 m und NN - 7,0 m) mehr als doppelt so hoch sind wie im nahen Vorstrandbereich (Abb. 31 unten). Für den trockenen Strandbereich (oberhalb NN + 1,0 m) ergibt sich nach einem Abtrag von etwa 100 000 m³ auf 50 000 m³ zwischen 9/83 und 6/86 eine Wiederauflandung um nahezu den doppelten Betrag auf etwa 100 000 m³ (6/86). In der Wasserwechselzone sind die Volumina von ursprünglich 150 000 m³ um 40 000 m³ auf 110 000 m³ zurückgegangen (Abb. 31 oben). Die Wiederauflandung im trockenen Strandbereich kann auf eine anhaltende Ostwindlage zu Beginn des Jahres 1986 zurückgeführt werden. Die genannten Mengen bis zu 100 000 m³ sind nicht überzubewerten, da es sich hier größtenteils um jahreszeitlich bedingte Schwankungen der Strandmorphologie im nahen Strandbereich (oberhalb der MTnw-Linie) handelt. Es sei hier jedoch angemerkt, daß mit diesen nachgewiesenen Volumenänderungen die zuvor von FÜHRBÖTER (1983) abgeschätzten Volumenänderungen, die jahreszeitlich bedingt sind, größenordnungsmäßig erstaunlich gut bestätigt wurden. Der planerische Ansatz für die Mindestmenge einer Versuchssandvorspülung auf 1 km Länge von 500 000 m³ (etwa 500 m³/lfdm) wurde damit bestätigt.

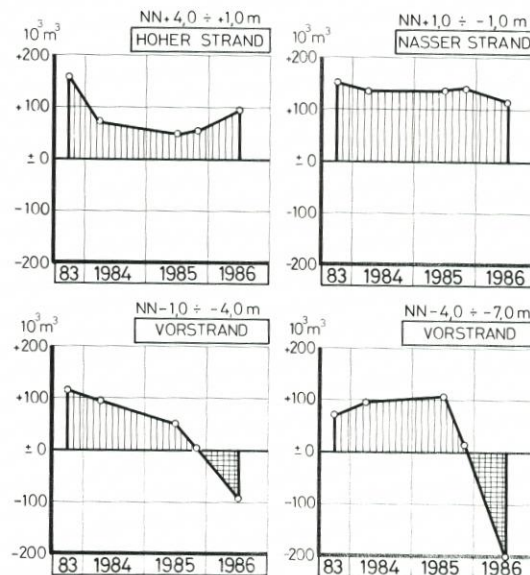


Abb. 31: Änderung der Sandvolumina nach der Sandvorspülung in charakteristischen Strand- und Vorstrandbereichen des Zentralbereiches (Profil 17 bis 39 auf Abb. 13) im Untersuchungszeitraum 9/83 bis 6/86

Um die Wirksamkeit der Versuchssandvorspülung zu beurteilen, werden die nach drei Jahren ($\sim$ Halbwertszeit) im Untersuchungsgebiet verbliebenen Sandmengen als wichtiger Indikator angesehen. Eine Bewertung allein aufgrund der Sandvolumina über alle Höhen- und Tiefenbereiche (NN + 4,0 m bis NN - 8,0 m) ergäbe eine sehr ungünstige Bilanz, da zwischen 9/83 und 6/86 ein Austrag aus dem Zentralbereich der Vorspülung von etwa 585 000 m³ (von + 500 000 m³ [Vorspülmenge] auf -85 000 m³ [6/86]) erfolgte (vgl. Tafel 10). Auf dieser Grundlage müßte die Versuchssandvorspülung als ein Mißerfolg eingestuft werden.

Die differenzierte Betrachtung der Sandvolumina in charakteristischen Strand- und

Tafel 11. Massenbilanz für einzelne Strandabschnitte oberhalb MTnw (NN - 1 m) im Vergleich zwischen 9/83 und 6/86

Bereich	9/83			6/86		
	m ³	m ³ /lfm	%	m ³	m ³ /lfm	%
Hoher Strand (NN + 4 m bis NN + 1 m)	160 000	145	100	97 000	88	60
Nasser Strand (NN + 1 m bis NN - 1 m)	152 000	140	100	113 000	102	74
Gesamtbereich (NN + 4 m bis NN - 1 m)	312 000	285	100	210 000	190	67

Vorstrandbereichen ergibt ein völlig anderes Ergebnis im Hinblick auf die Wirksamkeit, d. h. den Schutz der Randdüne vor weiteren Abbrüchen durch eine möglichst lange Verweilzeit der Vorspülmengen im oberen Strandbereich.

Im einzelnen konnten mit den Werten aus Tafel 10 folgende Restsandmengen und deren prozentuale Anteile im Zentralbereich (Profil 17 bis 39) der Vorspülung mit einer Ausdehnung von 1100 m und einem Bezug der Massen auf 8/82 („Nullzustand“) nachgewiesen werden (Tafel 11).

Aus Tafel 10 und 11 geht hervor, daß sich die vorgenannte negative Bilanz hauptsächlich nur auf den nahen und entfernten Vorstrandbereich (NN - 1,0 m bis NN - 8,0 m) bezieht, hier haben sich die Sandmengen von rd. 190 000 m³ (9/83) um etwa 500 000 m³ auf ein Defizit von 300 000 m³ (6/86) verringert.

Zusammenfassend kann aufgrund der differenzierten Auswertung festgestellt werden, daß sich die Versuchssandvorspülung in bezug auf die eigentliche Aufgabe des Randdünschutzes bewährt hat, da sich die Vorspülmengen oberhalb MTnw von 310 000 m³ (9/83) „nur“ um ein Drittel auf 210 000 m³ (6/86), entsprechend von 285 m³/lfm auf 190 m³/lfm verringert haben und somit die Halbwertzeit von mindestens 50 % der Vorspülmenge in dem vorgenannten Bereich noch nicht eingetreten ist.

6. Vergleich der Hörnumer Sandvorspülung mit der zweiten Sandvorspülung vor Westerland im Jahre 1978

Die Umformung der Versuchssandvorspülung im dreijährigen Untersuchungszeitraum in Abhängigkeit vom Seegang und den erhöhten Tidewasserständen steht als Einzelmaßnahme bis zu den hier genannten Betrachtungen im Raum. Vergleichsbetrachtungen zu ähnlichen Maßnahmen wären wünschenswert, um die Beurteilung noch besser abrunden zu können.

Hierzu bieten sich Vergleiche zur zweiten Westerländer Sandvorspülung im Jahre 1978 an, da jene Maßnahme in der Art der Ausführung der Hörnumer Vorspülung vergleichbar ist.

Abb. 32 (links) zeigt übereinander aufgetragen, getrennt für Strand- und nahen Vorstrandbereich (oberhalb NN - 4,0 m) sowie für den Gesamtbereich (oberhalb NN - 7,0 m) die Abnahme der Sandmengen nach der zweiten Westerländer Sandvorspülung im Zeitraum von 6/78 bis 4/82. Auf Abb. 32 (rechts) sind entsprechend dazu die Abnahmen vor Hörnum im Zeitraum 9/83 bis 6/86 aufgetragen. Es geht hieraus für den oberen Strand- und Vorstrandbereich (Abb. 32 oben) ein etwa ähnliches Abbruchverhalten beider Sandvorspülungen in den ersten zwei Jahren nach der jeweiligen Maßnahme hervor. Danach verläuft der weitere

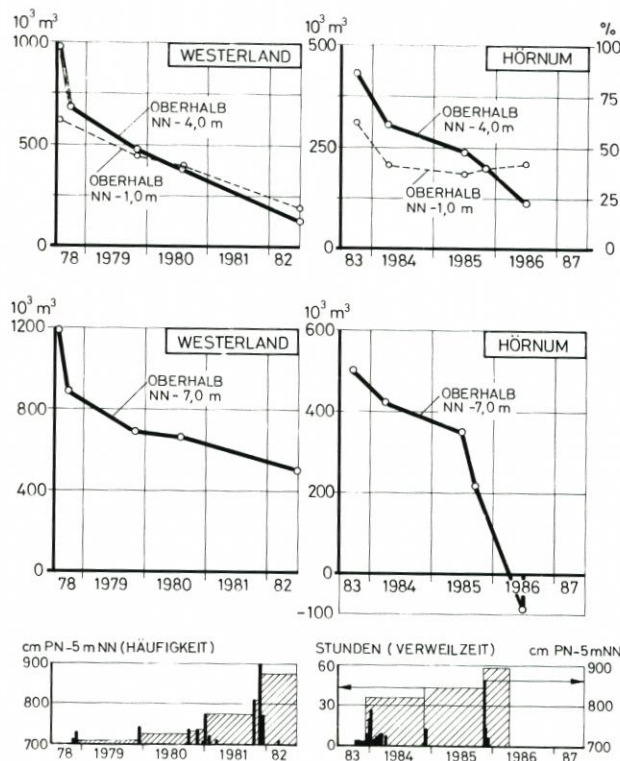


Abb. 32: Vergleich der 2. Westerländer (1978) mit der Hörnummer Sandvorspülung (1983) in Bezug auf die Abnahme der Sandmassen oberhalb NN - 4 m (oben) bzw. oberhalb NN - 7 m (Mitte) und die dazugehörigen Sturmfluthäufigkeiten sowie Verweilzeiten

Abbruch vor Westerland etwa zeitlich linear, während bei Hörnum mit dem Abknicken der „Kurve“ zu diesem Zeitpunkt ein verstärkter Abbruch aufgezeigt wird. Die Betrachtung des Bereiches oberhalb NN - 1 m ($\sim$ MTnw) ergibt ein umgekehrtes Verhalten und zeigt die für Hörnum positivere Wirkung dieser Sandvorspülung gegenüber der vor Westerland auf. Die Auftragung des Abbruches über den Gesamtbereich (oberhalb NN - 7,0 m) veranschaulicht jedoch das plötzliche Einsetzen eines verstärkten Abbruches vor Hörnum im Sommer (6/85), zu einer Jahreszeit, wo die Seegangsintensität allgemein wesentlich geringer als im Winterhalbjahr ist.

Diese vorangestellte Betrachtung sollte an dieser Stelle nicht überbewertet werden, wesentlich ist in diesem Zusammenhang nur die Gegenüberstellung der Häufigkeiten von erhöhten Tidewasserständen (hier oberhalb 700 cm PN - 5 m NN) und die Aufsummierung der Verweilzeiten über die Zeiträume nach der zweiten Westerländer Sandvorspülung und der Hörnummer Sandvorspülung. Obwohl in der Periode 9/78 bis 4/82 die Extremsturmflut vom 24. 11. 1981 aufgetreten ist, kann dieser Zeitraum insgesamt als relativ „sturmflutinaktiv“ angesehen werden (Abb. 24). Dies veranschaulicht auch die Aufsummierung der Verweilzeiten, die erst im dritten Jahr nach 1978 sprunghaft anstiegen (Abb. 32). Der Zeitraum nach der Hörnummer Sandvorspülung war dagegen schon im ersten Winterhalbjahr (1983/84) durch eine Häufung von Sturmfluten, insbesondere im Januar 1984, gekennzeichnet, was ebenfalls durch die aufsummierten Verweilzeiten belegt wird.

Aufgrund dieses Vergleiches kann ausgesagt werden, daß die Hörnum Sandvorspülung in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes stärker durch Sturmfluten belastet wurde als die zweite Westerländer Sandvorspülung. Es kann damit also ausgeschlossen werden, daß sich die Hörnum Sandvorspülung möglicherweise nur infolge einer verminderten Häufigkeit durch Sturmfluten und Seegang bewährt hat.

7. Auswirkungen der Versuchssandvorspülung auf die angrenzenden Bereiche

7.1 Vorbemerkung

Neben den Untersuchungen zur Wirksamkeit der Sandvorspülung im Zentralbereich (Profil 17 bis 39) waren auch Kenntnisse über die Auswirkungen der Sandvorspülung auf die angrenzenden (südlichen und nördlichen) Bereiche (vgl. Abb. 13) von Interesse. Zu diesem Zweck wurden auch für diese Gebiete Massenermittlungen angestellt, und zwar für folgende Abschnitte:

nördlicher Bereich: Profil 40 bis 45

südlicher Bereich: Profil 11 bis 16
(bis zum Querwerk)

7.2 Nördlicher Anschlußbereich

Entsprechend den Aufträgen für den Zentralbereich wurden für den nördlichen Bereich die Veränderungen der Sandvolumina für den Gesamtbereich sowie für charakteristische Strand- und Vorstrandbereiche (Tafel 12) ausgewertet.

Tafel 12. Volumenänderungen im nördlichen Anschlußbereich (Profil 40 bis 45, Abb. 13) nach der Sandvorspülung

Zeitraum	Sandvolumina in m ³ bezogen auf 8/82				
	Gesamt- bereich	Hoher Strand	Nasser Strand	Vorstrand	
				nah	entfernt
				NN - 1 m	NN - 4 m
	NN + 4 m	NN + 4 m	NN + 1 m	-	-
	NN - 7 m	NN + 1 m	NN - 1 m	NN - 4 m	NN - 7 m
8/82 - 9/83	215 000	28 600	35 500	60 700	90 200
8/82 - 3/84	126 900	17 800	41 700	19 700	47 700
8/82 - 6/85	85 500	15 600	31 000	5 600	33 400
8/82 - 10/85	8 700	15 500	30 800	-10 200	-27 400
8/82 - 6/86	-16 900	14 900	28 000	-16 700	-43 100

Wie Abb. 33 für die Strand- und Vorstrandbereiche zeigt, sind auch im angrenzenden nördlichen Gebiet die negativen Bilanzen auf den nahen und entfernteren Vorstrandbereich begrenzt.

Von rd. 150 000 m³ (= 500 m³/lfdm in 9/83) sind im Untersuchungszeitraum bis 6/86 rd. 210 000 m³ (= 700 m³/lfdm) aus dem nördlichen Bereich verlagert worden, so daß sich auch hier ein Defizit von rd. 60 000 m³ (= 200 m³/lfdm) ergibt.

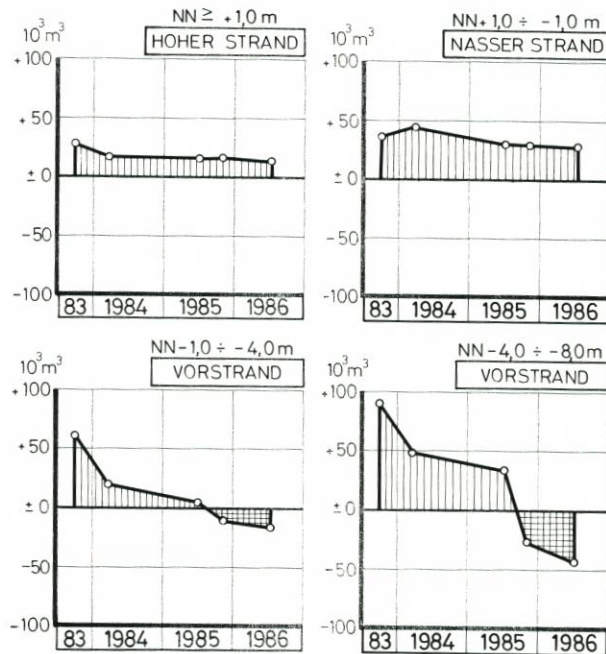


Abb. 33: Änderung der Sandvolumina nach der Sandvorspülung in charakteristischen Strand- und Vorstrandbereichen des nördlichen Anschlußgebietes (Profil 40 bis 45 auf Abb. 13) im Untersuchungszeitraum 9/83 bis 6/86

Oberhalb MTnw (NN - 1,0 m) ist die Bilanz ebenso positiv wie im Zentralbereich. Im einzelnen wurden, wie Tafel 13 zeigt, folgende Volumenänderungen für das nördliche Anschlußgebiet auf einer Strandlänge von 300 m für die Zustände 9/83 (nach der Sandvorspülung) und 6/86 ermittelt.

Die Abnahme der Mengen im Gesamtbereich oberhalb NN - 1,0 m um ein Drittel ist von der gleichen Größenordnung wie die, die für den Zentralbereich festgestellt wurde.

Tafel 13. Massenbilanz für einzelne Strandabschnitte oberhalb MTnw (NN - 1 m) im Vergleich zwischen 9/83 und 6/86

Bereich	9/83			6/86		
	m ³	m ³ /lfm	%	m ³	m ³ /lfm	%
Hoher Strand (NN + 4 m bis NN + 1 m)	28 600	95	100	15 000	50	52
Nasser Strand (NN + 1 m bis NN - 1 m)	35 500	118	100	28 000	93	79
Gesamtbereich (NN + 4 m bis NN - 1 m)	64 100	213	100	43 000	143	68

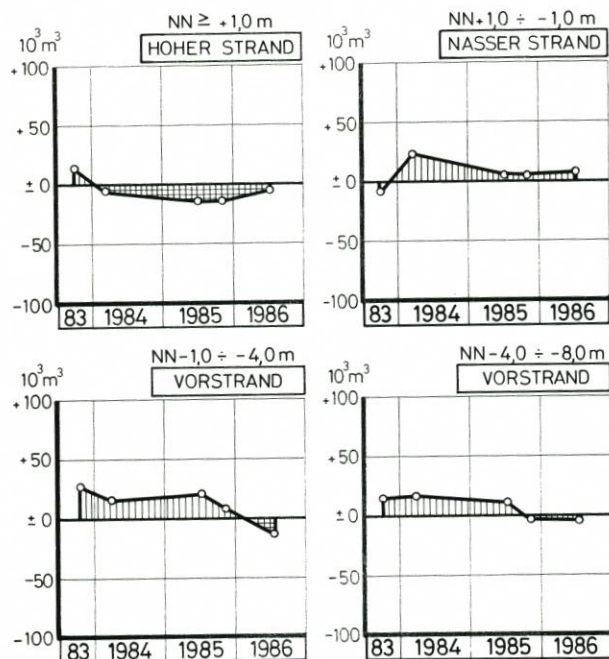


Abb. 34: Änderung der Sandvolumina nach der Sandvorspülung in charakteristischen Strand- und Vorstrandbereichen des südlichen Anschlußbereiches (Profil 11 bis 16 auf Abb. 13) im Untersuchungszeitraum 9/83 bis 6/86

7.3 Südlicher Anschlußbereich

Entsprechend den Auswertungen für den Zentralbereich und den nördlichen Anschlußbereich wurden diese auch für den südlichen Anschlußbereich bis zum Querwerk mit einer Strandlänge von 300 m vorgenommen (Tafel 14 und Abb. 34).

Für den nahen und entfernten Vorstrandbereich ergibt sich ebenfalls eine negative Bilanz. Von rd. $44\,000 \text{ m}^3$ (rd. $145 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ in 9/83) sind im Untersuchungszeitraum bis 6/86 rd. $60\,000 \text{ m}^3$ (rd. $200 \text{ m}^3/\text{lfdm}$) aus dem südlichen Bereich verlagert worden, so daß sich ein Defizit von rd. $17\,000 \text{ m}^3$ (rd. $60 \text{ m}^3/\text{lfdm}$) ergibt.

Oberhalb MTnw (NN $-1,0 \text{ m}$) ist, wenn überhaupt, nur eine schwache positive Bilanz zu erkennen. Dieser Bereich hat zum Zeitpunkt 9/83 noch nicht von der Sandvorspülung „profitiert“, da hier aus dem Vergleich 9/83 zu 8/82 ein Defizit von $23\,000 \text{ m}^3$ ermittelt wurde.

7.4 Zusammenfassung

Für das nördlich an den Zentralbereich anschließende Untersuchungsgebiet (Profil 40 bis 45) kann zusammenfassend festgestellt werden, daß der Strandbereich oberhalb MTnw (NN $-1,0 \text{ m}$) von der Sandvorspülung „profitiert“ hat. Die Abnahme der Sandvolumina von rd. $210 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ auf rd. $140 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ (= ein Drittel) ist in der gleichen Größenordnung, wie sie für den Zentralbereich (Abnahme von rd. $300 \text{ m}^3/\text{lfdm}$ auf rd. $200 \text{ m}^3/\text{lfdm}$) ermittelt wurde.

Tafel 14. Volumenänderungen im südlichen Anschlußbereich (Profil 11 bis 16, Abb. 13) nach der Sandvorspülung

Zeitraum	Gesamt- bereich	Hoher Strand	Nasser Strand	Vorstrand	
	NN + 4 m	NN + 4 m	NN + 1 m	nah NN - 1 m	entfernt NN - 4 m
	- NN - 7 m	- NN + 1 m	- NN - 1 m	- NN - 4 m	- NN - 7 m
8/82 - 9/83	20 600	-15 500	-7 700	29 100	14 600
8/82 - 3/84	52 400	-5 300	23 600	16 800	17 200
8/82 - 6/85	20 400	-14 300	6 100	20 600	7 900
8/82 - 10/85	3 200	-14 600	4 100	9 000	-2 800
8/82 - 6/86	400	-5 000	8 600	-13 600	-3 200

Die negative Bilanz im nahen und entfernten Vorstrandbereich (unterhalb NN - 1,0 m) deckt sich mit der, die auch für den Zentralbereich aufgezeigt wurde.

Im südlichen angrenzenden Bereich bis zum Tetrapodenquerwerk (Profil 11 bis 16) konnten für den hohen Strandbereich (oberhalb NN + 1,0 m) keine Sandmengen aus der Sandvorspülung festgestellt werden. Die Umlagerungen in der Wasserwechselzone (NN + 1,0 m bis NN - 1,0 m) liegen in der Größenordnung von jahreszeitlich bedingten Schwankungen.

Die negativen Änderungen im nahen und entfernten Vorstrandbereich sind in der gleichen Größenordnung wie die, die für den Zentralbereich und den nördlichen Bereich ermittelt wurden. Daraus ergibt sich, daß von den großen Sandverlusten im Untersuchungszeitraum 9/83 bis 6/86 das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen Profil 11 und 45 betroffen ist. Auf die möglichen Ursachen dieser Entwicklung wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

8. Morphologische Veränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet

8.1 Vorbemerkung

Das gesamte Untersuchungsgebiet vor Hörnum erstreckt sich über eine Länge von rd. 1,7 km vom Tetrapodenquerwerk im Süden (Profil 11 auf Abb. 13) bis zum Campingplatz im Norden (Profil 45). Im Hinblick auf die Schutzfunktion der Versuchssandvorspülung für die Randdüne kann diese als eine gelungene Maßnahme angesehen werden. Dies bezieht sich insbesondere auf die Sandabnahmen oberhalb MTnw (NN - 1,0 m), die in diesem Bereich nach dreijährigem Untersuchungszeitraum nur um ein Drittel abgenommen haben. Die Halbwertszeit ist daher also größer als bei der Planung angenommen wurde. Der Vergleich der Höhen- bzw. Tiefenlinien im Lageplan (Abb. 35), hier am Beispiel von NN + 3 m und NN $\pm$ 0 m, zwischen 8/82 und 8/86 belegt diese am Ende der Untersuchungen noch vorhandene Schutzfunktion vor der Randdüne. Auch die Wasserwechselzone (NN + 1 m bis NN - 1 m) hat sich ebenfalls gegenüber der größten seewärtigen Ausdehnung nach der Sandvorspülung (9/83) bis 6/86 nicht nennenswert landwärts zurückverlagert (Abb. 36).

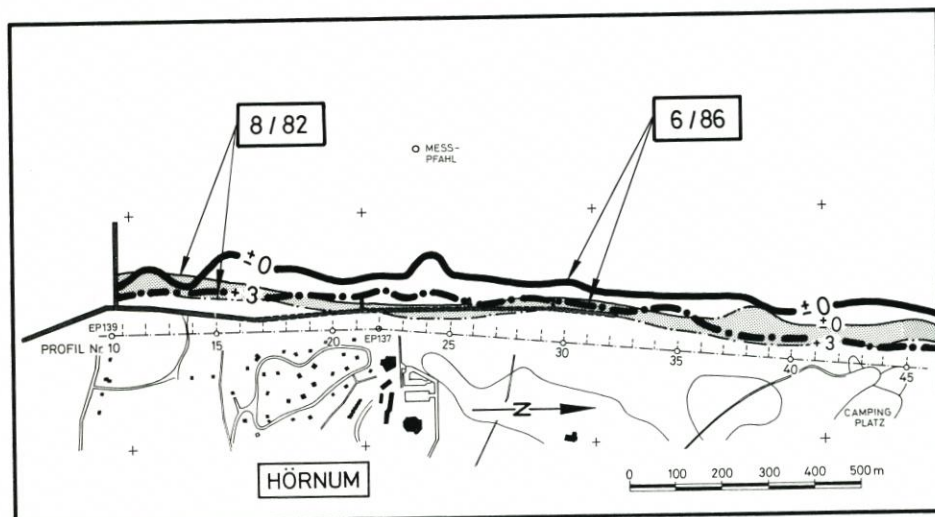


Abb. 35: Gegenüberstellung des Tiefenlinienverlaufes (NN +3 m und NN ± 0 m) zum Zeitpunkt der Peilungen 8/82 (Nullzustand) und 6/86 (Ende des Untersuchungszeitraumes)

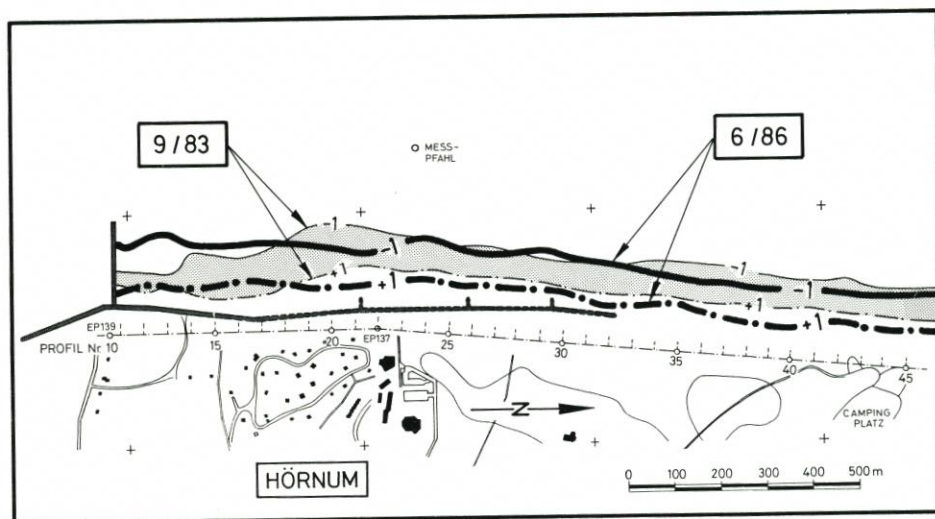


Abb. 36: Gegenüberstellung des Tiefenlinienverlaufes (NN +1 m und NN -1 m) zum Zeitpunkt der Peilungen 9/83 (nach der Sandvorspülung) und 6/86 (Ende des Untersuchungszeitraumes)

8.2 Veränderungen im Vorstrandbereich

Im Gegensatz zu den positiven Strandverhältnissen (Abb. 35 und 36) wird aus Abb. 37 ersichtlich, welche erheblichen Umlagerungen, hier aufgezeigt am Beispiel des Verlaufes der NN ± 0-m- und der NN -4,0-m-Tiefenlinie, sich im nahen und entfernten Vorstrandbereich (NN -1 m bis NN -7 m) zwischen 9/83 und 6/86 eingestellt haben. Zwischen Profil 40 und 45 hat sich eine Rinne mit dahinterliegendem Riff ausgebildet, so daß z. B. die

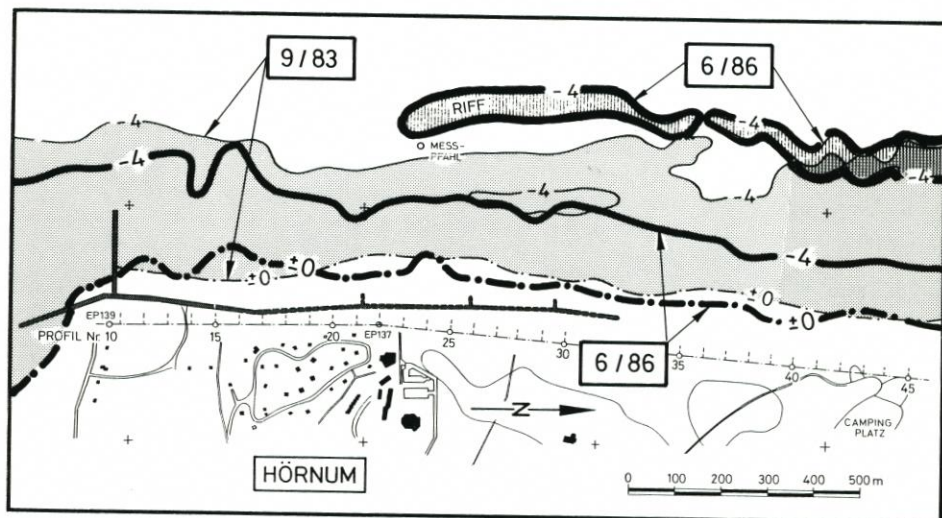


Abb. 37: Veränderungen im Vorstrandbereich zwischen 9/83 und 6/86 am Beispiel der Verläufe der NN ± 0 m- und der NN - 4,0-m-Tiefenlinie

NN - 4-m-Linie um rd. 130 m bis 220 m näher zum Strande hin verlagert wurde, während die NN ± 0 -m-Linie nur unwesentlich landwärts verschoben wurde. In der Folge ist der Unterwasserstrand steiler geworden und wies eine Neigung zwischen 1:30 und 1:40 (6/86) im Vergleich zu der Ausgangsneigung zwischen 1:60 und 1:80 (9/83) auf. Als Folge gelangen nun höhere Wellen in die strandnahe Zone, und die Brandungszone wird außerdem noch auf einen engeren Bereich konzentriert, so daß im nachfolgenden Zeitraum (nach 6/86) eine Verstärkung des Wellenangriffes auf den Strandbereich nicht auszuschließen ist und die Abbruchraten entsprechend zunehmen werden.

Die vorgenannten Vorgänge im Unterwasserstrandbereich sowohl hinsichtlich der Ausbildung steilerer Unterwasserstrandneigungen als auch der damit zusammenhängenden Auswirkung, daß höhere Wellen als vergleichsweise zum Zeitpunkt 9/83 an den Strand gelangen, veranschaulicht der Vergleich zwischen 9/83 und 6/86 am Beispiel des Profiles Nr. 41 auf Abb. 38.

Hier stellt sich nun die Frage, ob und in welchem Ausmaße möglicherweise durch die Art der gewählten Versuchssandvorspülung die großräumigen Umlagerungen im nahen und entfernteren Vorstrandbereich ausgelöst bzw. beeinflusst wurden. Für eine Beurteilung bietet sich der Vergleich der einzelnen Tiefenpläne an.

Die Gegenüberstellung der Peilpläne von 8/82 und 9/83 (Abb. 39, oben und Mitte) läßt erkennen, daß der Verlauf der Tiefenlinien unterhalb NN - 3 m etwa drei Monate nach der Sandvorspülung nur unwesentlich seewärts verschoben ist, so daß sich hier die Sandvorspülung, wie beabsichtigt, nicht nennenswert ausgewirkt hat. Bemerkenswert ist eine morphologische Formation zwischen Profil 30 und 45, hier am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes, in dem zwei schwach ausgebildete Rinnen (unterhalb NN - 4 m) zu erkennen sind. Zum Zeitpunkt der nächsten Peilung (3/84), vermutlich als Folge der Sturmfluten im Winter 1983/84, hat sich die vorgenannte Rinnenausbildung verstärkt, wobei es den Anschein hat, als ob sich diese Rinne mit Tiefen unter NN - 5 m, von Norden kommend, keilförmig in das Untersuchungsgebiet vorgeschoben hat. Gleichzeitig mit diesem Vorgang ist seewärts dieser

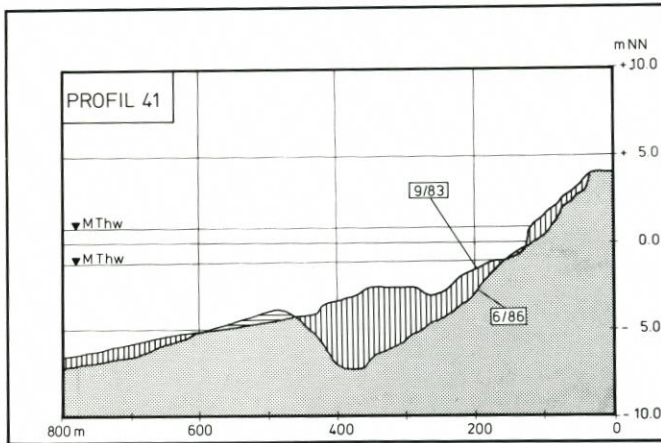


Abb. 38: Beispielhafte Gegenüberstellung eines Querprofils (nach der Sandvorspülung: 1983 und am Ende des Untersuchungszeitraumes: 6/86), hier Profil Nr. 41 (vgl. Abb. 37)

Rinne ein Riff mit Aufhöhungen über dem Seegrund um mehr als 1,0 m auf eine Höhenlage um NN – 3 m entstanden (Abb. 39, unten).

Trotz einer relativ „sturmflutinkativen“ Zeit (Winter 1984/85) bis zur Peilung 6/85 hat sich die Rinne bei gleichzeitiger Vertiefung (unterhalb NN – 6,0 m) kontinuierlich weiter nach Süden ausgedehnt; die Riffhöhen sind dagegen seit 3/84 im Mittel auf Höhen unter NN – 3,0 m zurückgegangen (Abb. 40, oben). Nur vier Monate später (10/85), über die Sommermonate hinweg, hat sich die Rinnenausbildung mit noch größeren Tiefen (unterhalb NN – 6,5 m) und weiterer Ausdehnung nach Süden auf die Position des Meßpfahles zu fortgesetzt. „Nur“ noch eine verhältnismäßig schmale „Zunge“ des Riffes, das sich insgesamt weiter abgeflacht hat, verhindert noch einen „Durchbruch“ der Rinne in Richtung See im Bereich des Meßpfahles (Abb. 40, Mitte). Dieser sogenannte „Durchbruch“ hat sich dann nach dem Winter 1985/86 eingestellt (6/86). Auf einer Länge von rd. 750 m (auf Höhe von Profil Nr. 28 bis Profil Nr. 42) erstreckt sich eine ausgeprägte Rinne mit Tiefen unter NN – 6,5 m und teilweise sogar unter NN – 7,0 m (Abb. 40, unten). Nach Süden, über die Lage des Meßpfahles hinaus, setzte sich die Rinne fort. Das Riff hingegen scheint dagegen im Zustand der „Auflösung“ zu sein.

Als Folge dieser morphologischen Vorgänge ist z. B. die NN – 4,0-m-Tiefenlinie, wie schon erwähnt, zwischen 130 m und 220 m näher an den Strand herangerückt. Dieser Vorgang sowie auch die Ausbildung des Riff-Rinnen-Systems geht anschaulich aus der Auswertung von Zeit-Weg-Diagrammen (Abb. 41), hier am Beispiel von ausgewählten Profilen (Nr. 11, 16, 21, 26, 31, 36 und 41), hervor.

Zusammenfassend kann zum Zeitpunkt der letzten Peilung (6/86) und auch aufgrund des relativ kleinen Untersuchungsgebietes (Profil Nr. 11 bis 45) keine Antwort auf die für die Ausbildung des Riff-Rinnen-Systems „verantwortlichen“ bzw. „auslösenden“ Erscheinungen im Vorstrandbereich gegeben werden. Es hat zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch den Anschein, daß die vorgenannten Vorgänge von außerhalb in das Untersuchungsgebiet verlagert wurden und diese damit auf großräumige morphologische Vorgänge zurückgeführt werden können. Wieweit sich diese Beobachtungen noch weiter im Hinblick auf eine Gefährdung des Strandbereiches im Untersuchungsgebiet verstärken, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gesagt werden. Es ist daher erforderlich, durch wiederholte Peilungen

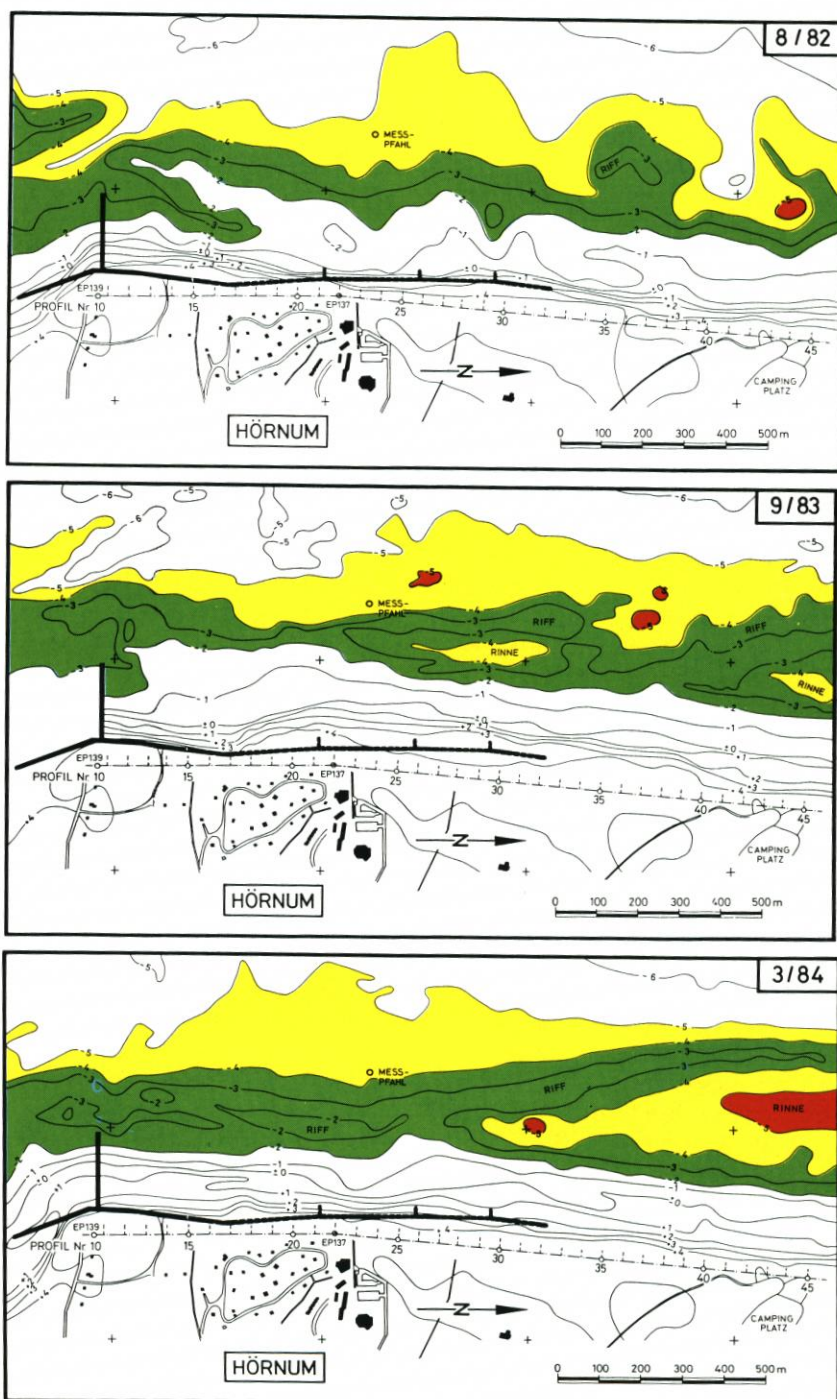


Abb. 39: Strand- und Vorstrandverhältnisse im Untersuchungsgebiet vor Hörnum nach Peilungen im August 1982 (Nullzustand, oben), September 1983 (nach der Sandvorspülung, Mitte) und März 1984 (nach dem 1. Winterhalbjahr, unten)

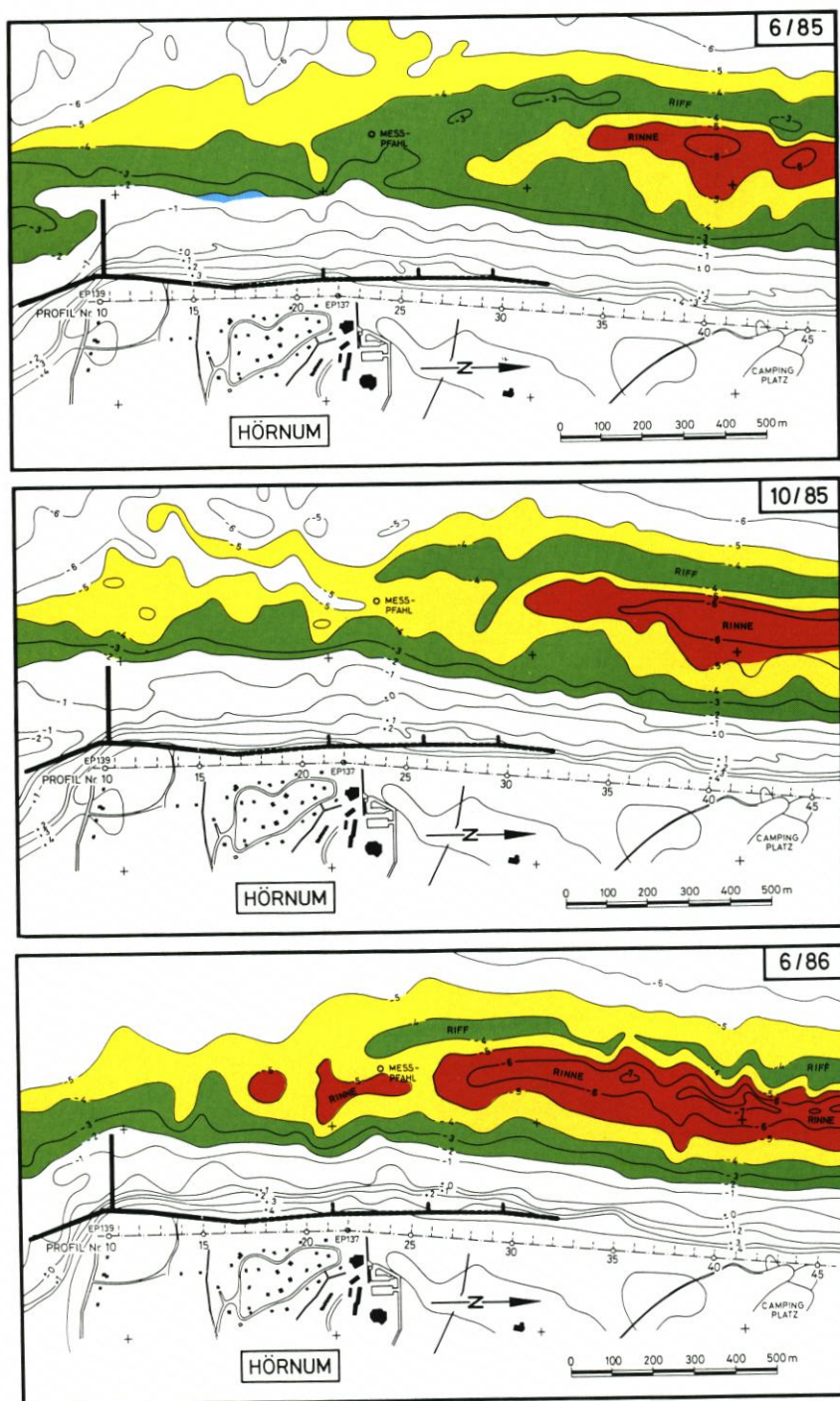


Abb. 40: Strand- und Vorstrandverhältnisse im Untersuchungsgebiet vor Hörnum nach den Peilungen im Juni 1985 (nach 2 Winterhalbjahren, oben), Oktober 1985 (4 Monate später, Mitte) und Juni 1986 (Ende der Untersuchungen, unten)

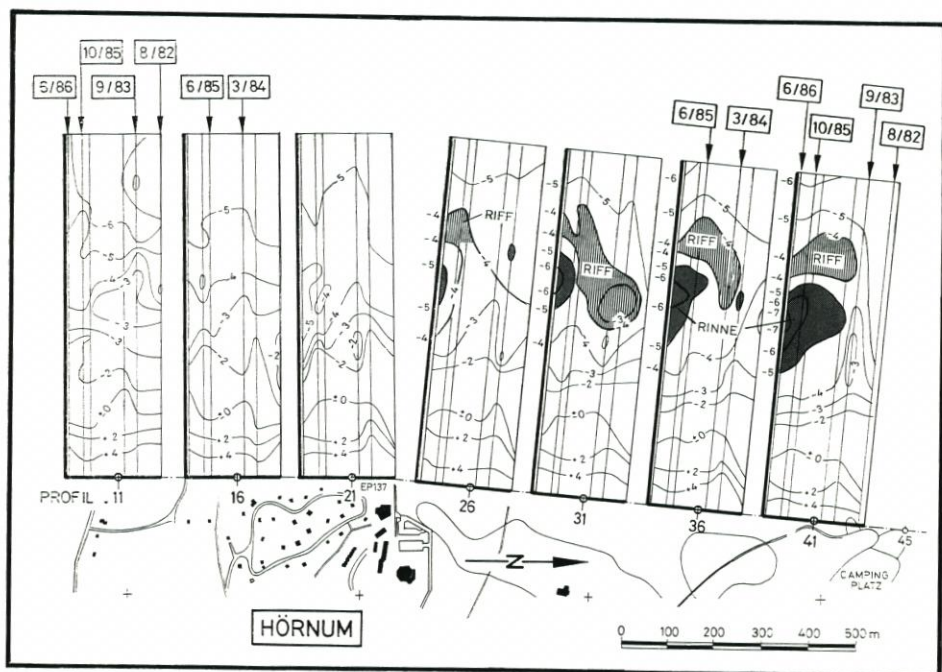


Abb. 41: Zeit - Weg - Diagramm der Verlagerung von einzelnen Tiefenlinien in ausgewählten Profilen von 8/82 bis 6/86

diese Frage laufend zu überprüfen. Andererseits kann es aufgrund der Volumenänderungen in den einzelnen Strand- und Vorstrandbereichen nach der Sandvorspülung wohl schon jetzt ausgeschlossen werden, daß die negative Sandbilanz im Unterwasserstrandbereich mit der Art der Versuchssandvorspülung in einem Zusammenhang steht, sondern daß großräumige Prozesse dafür verantwortlich sind.

9. Schlußbetrachtung

Im Jahre 1983 wurde nördlich des Tetrapodenquerwerkes vor Hörnum eine Versuchssandvorspülung auf einer Länge von rd. 1 km durchgeführt. Mit dieser Maßnahme erfolgte zugleich eine vorläufige Sicherung des am stärksten gefährdeten Dünenabschnittes vor Hörnum (Abb. 9 und 10). Für eine hinreichende Beurteilung der Versuchssandvorspülung wurde ein Zeitraum von mindestens drei Jahren für erforderlich erachtet. Zur Ausführung gelangte die auf Abb. 11 dargestellte Form des Aufspülkörpers; die Vorspülmenge belief sich auf rd. 500 000 m³.

Aufgabe von begleitenden Untersuchungen nach der Sandvorspülung war es, u. a. die Umformung des Vorspülkörpers und die Abbruchraten in Abhängigkeit von den äußeren Einflußparametern (u. a. Sturmfluten und Seegang) zu erfassen und festzustellen, welche Sandmengen nach drei Jahren – dies war die geschätzte sog. Halbwertszeit – noch im Zentralbereich der Sandvorspülung vorhanden sind. Hierzu wurden im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986 kontinuierliche Wind- und Wellenmessungen sowie wiederholte Strandvermessungen und Vorstrandpeilungen durchgeführt.

Die Auswertung der nach jeder Peilung im Untersuchungsgebiet verbliebenen Restsandmengen aus der Sandvorspülung ergab bei der Gesamtbetrachtung von Strand- und Vorstrandbereich (NN + 4 m bis NN - 8 m) eine negative Bilanz. Einer Vorspülmenge von 500 000 m³ im Jahre 1983 stand nach drei Jahren zwar eine Austragsmenge von rd. 585 000 m³ bis zum Juni 1986 gegenüber. Durch eine differenzierte Betrachtung der Sandvolumina in charakteristischen Strand- und Vorstrandbereichen konnte dann jedoch der Erfolg der Versuchssandvorspülung als Schutzmaßnahme für die Randdüne vor weiteren Abbrüchen aufgezeigt werden. Von 310 000 m³ Sand, die oberhalb MTnw (NN - 1 m) auf rd. 1,1 km Länge in Form einer Verwallung vorgespült wurden, waren im Juni 1986 noch 210 000 m³, entsprechend rd. 67 % der Vorspülmenge vorhanden. Die Halbwertszeit von drei Jahren, die für die Versuchssandvorspülung bei der Planung im Jahre 1983 als Maß für eine Wirksamkeit vorgegeben wurde, wurde somit bei einem „Ist“ von 67 % noch nicht erreicht, sie beträgt somit mehr als drei Jahre.

Um festzustellen, ob der Untersuchungszeitraum (9/83 bis 6/86) hinsichtlich der Häufigkeit von Sturmfluten und Seegang als im langjährigen Mittel als normal bzw. als erhöht oder als vermindert einzustufen ist, wurde ein Vergleich mit dem Untersuchungszeitraum (9/78 bis 4/82) nach der zweiten Westerländer Sandvorspülung angestellt. Es wurde ermittelt, daß in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes für die Hörnum Sandvorspülung die Sturmfluthäufigkeit auffallend größer war als im Zeitraum 9/78 bis 4/82. Dies ergab sich auch aus der Aufsummierung der Wasserstandverweilzeiten bei Sturmfluten. Aus diesem Grunde kann der Untersuchungszeitraum vor Hörnum im Vergleich zu anderen Zeiträumen durchaus als normal eingestuft werden, was die Häufigkeit von Sturmfluten anbelangt. Der Erfolg der Hörnum Sandvorspülung braucht daher nicht relativiert zu werden.

Durch eine differenzierte Betrachtung der Sandvolumina nach einzelnen Vermessungen in charakteristischen Strand- und Vorstrandbereichen konnte neben der positiven Wirkung der Versuchssandvorspülung im oberen Strandbereich zugleich aufgezeigt werden, daß die Verluste von nahezu 500 000 m³ Sand (vgl. Tafel 10) allein auf den Vorstrandbereich (unterhalb NN - 1 m) beschränkt sind. Dies ist mit Sicherheit nicht auf die Sandvorspülung zurückzuführen, sondern auf großräumige Vorgänge außerhalb des Untersuchungsgebietes, die sich mit Riff- und Rinnenausbildungen von Norden her kontinuierlich in das Untersuchungsgebiet vorgeschoben haben. Das Vordringen und die stetige Vertiefung des Rinnensystems im Untersuchungsgebiet konnte in der zeitlichen Abfolge von gleichzeitiger Rinnenvertiefung und Riffaufhöhung und nachfolgender Riffauflösung durch die wiederholten Peilungen des ALW Husum eindrucksvoll dokumentiert werden, womit zugleich auch der Wert bzw. die Notwendigkeit wiederholter Aufmaße bestätigt wurde.

Als Folge der Rinnenbildung ist die NN - 4-m-Tiefenlinie erheblich näher an die Uferlinie herangerückt, so z. B. im Profil 42 auf Höhe des Campingplatzes um mehr als 50 % von einer Uferentfernung von rd. 480 m (9/83) auf rd. 230 m (6/86). Aus diesem Grunde muß davon ausgegangen werden, daß im gegenwärtigen Zustand höhere Wellen als zum Beispiel nach der Sandvorspülung (9/83) bis in den unmittelbaren Strandbereich gelangen. Wieweit auf diese Verlagerung der Wassertiefen im Vorstrand die Ausbildung von Kliffkanten nach der zweiten Hörnum Sandvorspülung im Sommer 1986 zurückgeführt werden kann, bedarf noch weiterer Untersuchungen. Auf jeden Fall ist aber neben der Untersuchung der Abbruchraten nach der Sandvorspülung dieses Jahres der weiteren Entwicklung der Vorstrandgeometrie eine erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen.

Eine nennenswerte Kliffausbildung im Bereich des Vorspülbereiches wurde im Untersuchungszeitraum 1983 bis 1986 nicht beobachtet.

Abschließend kann festgestellt werden, daß sich die Versuchssandvorspülung in dem

schwierigen Küstenabschnitt vor Hörnum bewährt hat; am Ende des dreijährigen Untersuchungszeitraumes war vor dem Tetrapodenlängswerk noch ein ausreichend breiter und hoher Strand vorhanden. Die im Vorstrandbereich aufgetretenen Sandverluste sind auf großräumige morphologische Vorgänge mit einer Riff-Rinnen-Ausbildung zurückzuführen und dürfen nicht in Abhängigkeit von der Sandvorspülung beurteilt werden. Auf derartige Vorgänge wird aber bei zukünftigen Sandvorspülungen immer zu achten sein.

10. Schriftenverzeichnis

- AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT: Fachplan Küstenschutz Sylt – Stand 1985 – (unveröff.). Husum, 1985.
- DETTE, H. H.: Ein Vorschlag zur Analyse eines Wellenklimas. *Die Küste*, H. 31, 1977.
- EAK, 1981: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. *Die Küste*, H. 36, 1981.
- FÜHRBÖTER, A.: A Refraction Groyne Built by Sand. Proc. 14th Coastal Engineering Conference, Vol. II, Chapter 85, Kopenhagen, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Vorschläge für die Ausführung einer Versuchssandvorspülung vor Hörnum/Sylt (unveröff.). Braunschweig, 1983.
- FÜHRBÖTER, A.; KÖSTER, R.; KRAMER, J.; SCHWITTERS, J. und SINDERN, J.: Beurteilung der Sandvorspülung 1972 und Empfehlungen für die künftige Stranderhaltung am Weststrand der Insel Sylt. *Die Küste*, H. 29, 1976.
- FÜHRBÖTER, A. und DETTE, H. H.: Beurteilung der Versuchssandvorspülung vor Hörnum/Sylt im Jahre 1983 (unveröff.). Bericht Nr. 633 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, 1986.
- FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H. und SCHULZE, M.: Hydrologische Untersuchungen zur Versuchssandvorspülung vor Hörnum/Sylt im Jahre 1983 – Zeitraum 10/83 bis 3/86 – (unveröff.). Bericht Nr. 630 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, 1986a.
- FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H. und SCHULZE, M.: Hydrologische Untersuchungen zur Versuchssandvorspülung vor Hörnum/Sylt im Jahre 1983 – Zeitraum 10/83 bis 09/86 – Ergänzungen (unveröff.). Bericht Nr. 630 A des Leichtweiß-Institutes der TU Braunschweig, 1987.
- FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H. und OELERICH, J.: Sandvorrat vor Hörnum/Sylt nach der Versuchssandvorspülung 1983 bis zum Juni 1986 – Massenermittlungen (unveröff.). Bericht Nr. 631 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, 1986b.
- FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H. und SCHULZE, M.: Wind- und Wellenmessungen vor Hörnum/Sylt – Zeitraum 4/86 bis 9/86 (unveröff.). Bericht Nr. 632 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, 1986c.
- KÖSTER, R. und AHRENDT, K.: Bericht über die geologischen Untersuchungen zur Versuchssandvorspülung Hörnum/Sylt (unveröff.). Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum der Universität Kiel, 1986.
- LAMPRECHT, H. O.: Brandung und Uferveränderungen an der Westküste vor Sylt. Mitt. des Franzius-Instituts der TU Hannover, H. 8, 1955.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. Ergebnisbericht der Forschungsstelle Norderney, 1983.