

# FACHPLAN KÜSTENSCHUTZ SYLT

*Fortschreibung*

**Amt für Land- und  
Wasserwirtschaft Husum**

**Husum, 11. August 1997**

# **FACHPLAN KÜSTENSCHUTZ SYLT**

## *Fortschreibung*

Bearbeitet:  
Husum, den 11.08.1997

Aufgestellt:  
Husum, den 11.08.1997

Im Auftrage

Im Auftrage

gez. Hinrichsen  
(*Dipl.-Geophys.*)

gez. Beismann  
(*Regierungsbaudirektor*)

**Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum**

**gez. Kamp**

# 1 Einleitung

## 1.1 Veranlassung und Zweck

Die Westküste von Sylt ist aufgrund geologischer Abschätzungen in über 7000 Jahren um fast 13 km in östlicher Richtung verschoben worden, d.h. um rd. 1,8 m/Jahr. Während dieser Zeit haben sich im Norden und Süden des Inselkernes Nehrungshaken gebildet, so daß die Länge der Küste auf ca. 40 km angewachsen ist (Abbildung 1).

Die Auswertungen der Vermessungsdaten von 1950 bis 1984 ergeben einen Rückgang des hohen Strandes und der Düne, bzw. des Kliffes von 1,5 m/Jahr, das einem jährlichen Substanzverlust von 1,4 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr entspricht, wenn das gesamte Profil einschließlich des Vorstrandes bis NN-10m ostwärts wandert (s. ALW 1985, S. 81).

Die auf Grundlage des Fachplanes Küstenschutz Sylt durchgeführten Sandaufspülungen haben sich grundsätzlich als wirkungsvolle Maßnahme zum Schutz der Westküste bewährt. Durch systematische Untersuchungen waren jedoch die Kenntnisse über den Rückgang der Sylter Westküste zu vertiefen, die Wirksamkeit der bisherigen Verfahren zu bewerten und eventuell durch neue Küstenschutzverfahren zu verbessern und damit die Wirtschaftlichkeit zu steigern.

Die damit verbundene Problematik ist über Jahre im Rahmen des nachfolgenden Forschungsvorhabens "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt" mit dem Ziel untersucht worden, ein wirkungsvolles Küstenschutzkonzept, das auf vorhandene Konzeptionen aufbaut, zu entwickeln (KAMP & HINRICHSSEN 1995).

Aufgrund der heutigen Erkenntnisse wird der Fachplan fortgeschrieben, wobei für die Bereiche, in denen keine neuen Ergebnisse vorliegen, die Angaben im Fachplan (Stand 13.01.1985) weiterhin Gültigkeit besitzen. Dadurch kann auf eine weitgehende Wiederholung der Darstellungen verzichtet werden.

Die Zielsetzung für die notwendigen Küstenschutzmaßnahmen läßt sich als

- Erhalt der Sylter Westküste in seiner Lage
- Schutz der Inselenden

zusammenfassen. Dabei sind die Kosten sowie Einflüsse von Maßnahmen auf Nachbarbereiche zu berücksichtigen.

## 1.2 Fachplan Küstenschutz Sylt (Stand: 13.01.1985)

Der Fachplan Küstenschutz Sylt sollte

- Planungsgrundlage für alle Baumaßnahmen des Küstenschutzes sein,
- begleitende Untersuchungen vorschlagen, um die Wirkung und den Erfolg durchgeführter Maßnahmen erkennen zu können,
- weitere Untersuchungen aufzeigen, die notwendig sind, um die bestehenden Erkenntnisse zu vertiefen und um noch offene Einzelfragen zu beantworten,

- die Kriterien liefern, nach denen Anträge für Küstenschutzmaßnahmen von Privaten und Gemeinden beurteilt werden, und nach denen entschieden wird.

Für den Zeitraum 1985-1995 schlägt der Fachplan konkrete Maßnahmen vor und stellt für den Zeitraum 1985-2020 die Planungsgrundlage dar.

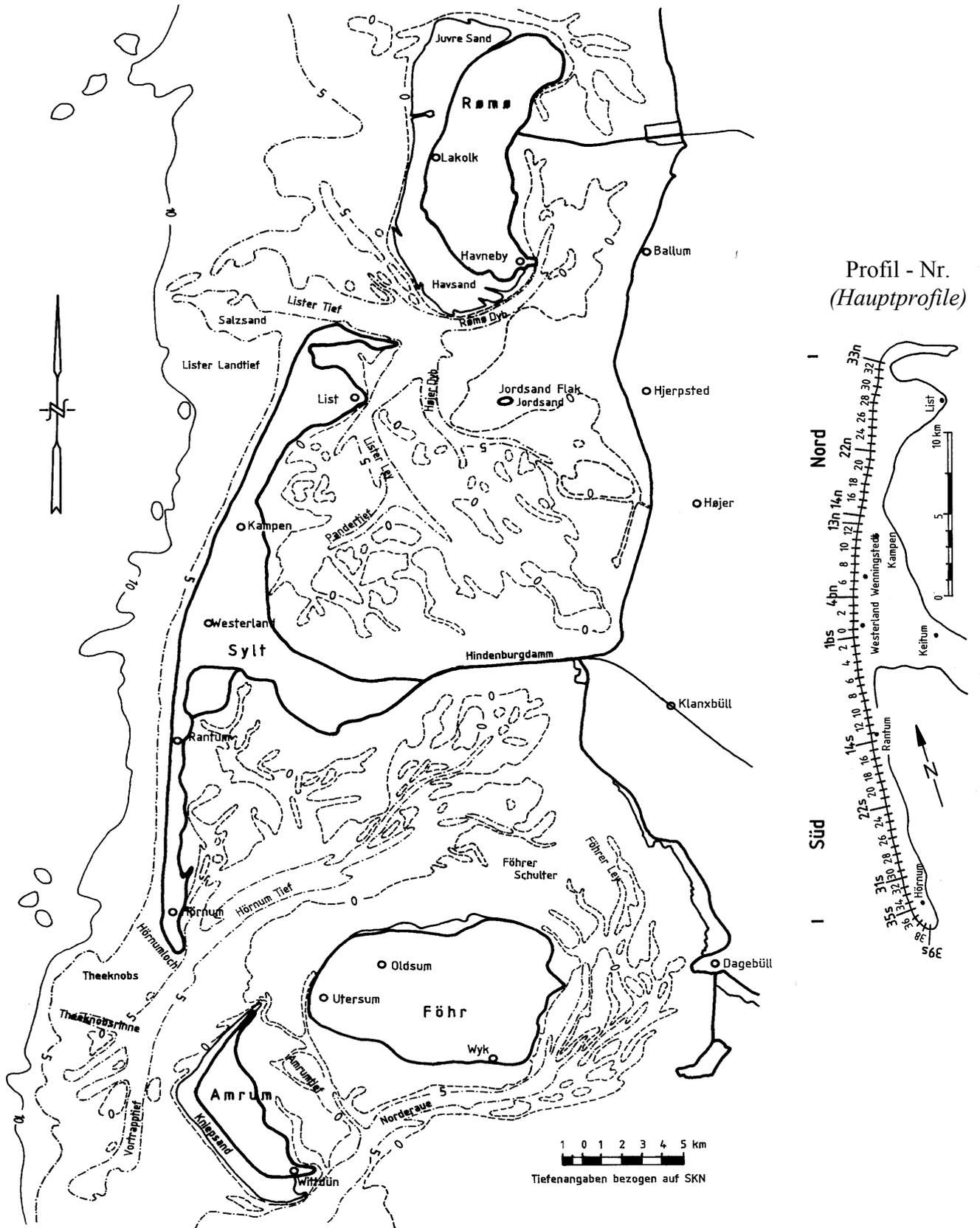


Abbildung 1: Übersichtskarte nördliche Nordfriesische Wattenmeer mit der Insel Sylt

Der Fachplan enthält Ausführungen zu:

- Entwicklung des Küstenschutzes bis 1984
- Planungsgrundlagen (Hydrologie, Seegang, Sturmfluten, Morphologie)
- Planung konkreter Küstenschutzmaßnahmen
- Küstenschutz und andere Belange
- Untersuchungsbedarf
- Träger und Finanzierung

Während die Beschreibung der Tidewasserstände mit Hilfe der vorhandenen Daten möglich war, lagen zur Beschreibung der Tidenstromverhältnisse z.T. widersprüchliche Aussagen vor. (Anm.: Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen führten in Zusammenhang mit den mathematischen Tidemodellen des SI (SI 1994, ALW 1994a) zu einem besseren Verständnis der Hydrodynamik, insbesondere an der Hörnum-Odde).

Die Morphologie an der Westküste wurde beschrieben als ein stets ostwärts sich verlagerndes dynamisches Gleichgewichtsprofil. Die durch Sandaufspülungen hervorgerufenen Neigungen im Strand- und Vorstrand bleiben nicht bestehen, da sich innerhalb weniger Stunden ein dem Seegang zugehöriges Profil ausbildet.

Es wurde festgestellt, daß ein wesentlicher Teil der Erosion des Inselsockels in der Rinne stattfindet. (Anmerkung: Durch die nachfolgenden Sandaufspülungen hat gerade die Rinne einen erheblichen Anwachs zu verzeichnen.)

Auf die Bedeutung des vorgelagerten Riffs als Wellenfilter zum Schutz des hinterliegenden Strandes wurde im Fachplan hingewiesen.

Der Küstenrückgang des Kliff- und Dünenfußes (NN+3,75 m) und der Abbruchkante wurde für die Zeiträume 1870-1950 und 1950-1984 vom Tetrapodenquerwerk Hörnum bis zum Deckwerk in List ermittelt (s. Tab.3, S.70 in ALW (1985)). Für die Inselenden ergab sich der größte Rückgang. Im Bereich Westerland-Kampen waren die Abbrüche stets größer als im Bereich Westerland-Rantum. Insgesamt hatte sich der Abbruch von Rantum bis Kampen nach 1950 gegenüber der Zeit davor verdoppelt. Die Ursache wurde in der Zunahme der Sturmflutaktivität

ten, die zu einer Verlängerung der Verweilzeiten hoher Wasserstände führen, gesehen.

Für Planungsaufgaben wurde mit einem mittleren Abbruch der Westküste der Hörnum-Odde von 15 m/a gerechnet. Als Ursache des Abbruchs der Hörnum-Odde wurde die Zunahme des Ebbestromes in den Gezeitenrinnen, Ausräumung der Theeknobssände und stärkere Seegangsbelastung des Strandes gesehen. Die Entwicklung am Süden dürfte solange anhalten, bis

- die Verkürzung der Halbinsel die Strömungsverhältnisse so verändert hat, daß sich der weitere Angriff vermindert, oder
- durch deutlich verstärkte Sandzufuhr (z.B. Sandaufspülungen) wieder eine Annäherung an ein Gleichgewicht zwischen Strömung und Morphologie erreicht wird, und / oder
- der Hauptstrom sich durch natürliche Pendelbewegungen wieder nach Süden verlagert.

Der jährliche Substanzverlust wurde wie folgt angegeben:

⇒ Hörnum-Odde (2 km): 330 000 m<sup>3</sup>/a

⇒ Westküste (34 km): 1 085 000 m<sup>3</sup>/a, davon entfallen auf den Bereich der befestigten Uferstrecke vor Westerland (3 km): 180 000 m<sup>3</sup>/a.

Damit beträgt der Gesamtverlust von 39s-33n 1,415 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Für die Planung von Küstenschutzmaßnahmen wurde die Küste anhand der Besiedlung und Bebauung in folgende Planungsabschnitte unterteilt:

- mittlerer Abschnitt: 14s-14n
- südlicher Abschnitt: 14s-35s  
mit den Teilbereichen: 14s-31s, 31s-35s
- Hörnum-Odde: 35s-39s
- nördlicher Abschnitt: 14n-33n

Ein Verzicht von Küstenschutzmaßnahmen würde zum Verlust von Bebauung und Grundstücken führen und wurde aus sozialen und volkswirtschaftlichen Gründen für nicht vertretbar angesehen.

Zur Zeit der Aufstellung des Fachplanes (1983/84) wurden für die Orte Hörnum, Ran-

tum und Westerland Küstenschutzmaßnahmen in Form von Strandaufspülungen durchgeführt, wobei in Hörnum (1983) und Rantum (1984) Randdünen verstärkt wurden, um einen Dünendurchbruch zu verhindern. Vor Westerland (1972,1978,1984) dienten die Aufspülungen zur Sicherung der Längswerke.

Unter der Vorgabe, jeglichen Abbruch entlang der gesamten Westküste zu verhindern, wurden im Fachplan massive Bauweisen (Längswerke, vorgelagerte Brandungswälle, Wellenbrecher), Sandaufspülungen, biotechnische Maßnahmen und Maßnahmen an der Hörnum-Odde im Hinblick auf Funktion, Konstruktion, Baukosten, Sicherungs- und Unterhaltungsaufwand behandelt. Die Bauweisen künstlicher Seetang (o.ä.), schwimmende Wellenbrecher, Unterwasserwellenbrecher könnten keine Abhilfe der vorhandenen negativen Sandbilanz liefern.

Für den Bereich der Hörnum-Odde wurde auf den zunehmenden Ebbstrom im Vortrapptief hingewiesen. Zur Beeinflussung der Tideverhältnisse wurden Untersuchungen zum Einfluß von Sicherungsdämmen (Föhr - Amrum, Föhr - Festland) angeregt. (Anm.: Diese sind im Rahmen des Forschungsvorhabens (Phase I) durchgeführt worden (MELFF 1992).

Die durchzuführenden aktiven Küstenschutzmaßnahmen sollten dem Erhalt der Hochwassersicherheit der Ortschaft Hörnum dienen. Folgende Maßnahmen wurden erläutert:

- Ersatz des Substanzverlustes durch Sandaufspülungen
- Herstellung einer Großbuhne (Sichelbuhne)
- Beseitigung des Tetrapodenquerwerkes
- Aufspülen von Dünentälern
- Biotechnische Maßnahmen

Konkrete Vorschläge für Schutzmaßnahmen an der Hörnum-Odde wurden nicht gemacht, da die durchgeführten Untersuchungen ausgewertet werden sollten.

Für die gesamte zu schützende Westküste Sylts (31 km) wurden Sandaufspülungen in Form eines Sanddepots und einer Strandauffüllung als wirtschaftlichste Küstenschutzmaßnahme angesehen. In Ergänzung dazu wurden biotechnische Maßnahmen zum Aufbau von Vordünen, Befestigung von Randdünen, Verbau von Windrissen und Verhinderung der Entstehung von Wanderdünen vorgeschlagen.

Das 3 km lange Längswerk am Westerbänder Ufer sollte wie bisher durch Sandaufspülungen geschützt werden.

Die Reihenfolge der Bauabschnitte war nach dem Gefährdungsgrad festzulegen. Die erforderlichen Aufspülmengen sollten sich nach dem bisher festgestellten Abbruch richten, wobei die Hälfte der vorgespülten Sandmengen als Reserve nach sechs Jahren noch vorhanden sein sollten. (Anm.: Die Halbwertszeiten der bisherigen Strandaufspülungen betragen i.d.R. 1-3 Jahre.)

Eindringlich wurde darauf hingewiesen, daß auf die Einhaltung einer bebauungsfreien Zone an der West- und Ostseite von 100 Metern geachtet werden muß, damit genügend Entscheidungsspielraum bei langfristigen Entwicklungen gegeben ist.

Die Erkenntnisse aus dem Fachplan Sylt wurden durch das nachfolgende Forschungsvorhaben verbessert und erweitert.

## 2 Planungsgrundlagen

### 2.1 Morphologie

Im Bereich der Westküste Sylts wird die Morphodynamik durch die Wechselwirkung des Strandes und Vorstrandes mit dem angreifenden Seegang, dem Auftreten von Sturmfluten und dem Ausbleiben von energiereichen Wetterperioden geprägt.

Die hydrodynamische Situation an den Inseln wird durch die Hauptiderinnen (Vorstraptief, Hörnum Tief und Lister Tief), die das Wattenmeer befüllen und entleeren, und die vorgelagerten Sände (Theeknobssand, Salzsand) gekennzeichnet.

#### 2.1.1 Westküste

Obwohl weltweit über Jahrzehnte intensive Küsten- und Küstenschutzforschung betrieben worden ist, ist der angewandte Küstenschutz immer noch von vereinfachten Annahmen und Erfahrungswerten abhängig. Die "exakte" Beschreibung der Hydrodynamik der Brandungszone und ihre Verknüpfung mit der Bewegung der Sedimente wird möglicherweise erst in ferner Zukunft möglich sein. Nur bei einer Verfelsung der Küste kann die Wirkung eindeutig prognostiziert werden.

Das Verhalten der Sylter Küste wird von folgenden wesentlichen Randbedingungen geprägt:

- Sylt stellt ein offenes Sandsystem mit einer negativen Sandbilanz dar
- Sturmfluten mit bis zu ca. 3 m erhöhten Wasserständen erodieren Dünen und Kliffs
- der Seegang ermöglicht eine Akkumulation erodierten Materials im Vorstrand
- zwischen Strand und Vorstrand finden Austauschprozesse statt

Bei Sturmfluten bildet sich ein neues Unterwasserprofil aus, wobei große Mengen aus dem hohen Strand bzw. der Düne oder dem Kliff in die "tägliche" Brandungszone querlagert und vom Seegrund in den Vorstrand transportiert werden. Dieser Sand wird durch den küstenparallelen Sandtransport bei den nachfolgenden mittleren Tide- und Seegangszuständen küstenparallel versetzt und geht langfristig der Küste z.T. verloren. Ein Teil der bei Sturmfluten im Vorstrand akkumulierten Mengen wird von den strandaufbauenden Wellen wieder dem Strand zugeführt. Durch den äolischen Sandtransport wird ein Wiederaufbau des Strandes mit biotechnischen Maßnahmen ermöglicht.

Die Morphodynamik einer sandigen Küste wird durch eine Vielzahl von Parametern geprägt (z.B. Lage der Küstenlinie, Strandbreiten, Fülligkeiten im Strand und Vorstrand, Lage und Höhe von Riff und Rinne, Abbruchmengen). Eine ausführliche Dokumentation der Parameter wurde für alle verfügbaren Datensätze in der Machbarkeitsstudie Sandaufspülungen (ALW 1996b) vorgenommen.

Die Westküste Sylts kann aufgrund der Auswertung von Luftbildserien in acht morphologische Einheiten eingeteilt werden.

*Abbildung 2* zeigt die Einteilung in die einzelnen Abschnitte. Dabei wird die strandnahe Brandungszone durch das Auftreten von Platen bzw. Vorhandensein einer steilen Wasserwechselzone charakterisiert. Seewärts dieser Zone liegt die seewärtige Brandungszone, in der die Riffstrukturen vorhanden sind. Die Lage und Höhe dieser Zone unterscheidet sich innerhalb der einzelnen morphologischen Einheiten, wie aus der Berechnung von mittleren Profilen gesehen werden kann. Um die zeitliche Entwicklung von den die Morphologie beschreibenden Parametern darzustellen, ist eine Mittelwertbildung innerhalb dieser Abschnitte sinnvoll.

Eine Auswahl der im Zeitraum 1972/83 bis 1995 gemittelten Vorstrandparameter ist *Abbildung 3* in bis *Abbildung 10* für die gesamte Westküste einschließlich der Inseln zusammengestellt. Dabei sind in der oberen Abbildungshälfte die zugehörigen Riffhäufigkeiten dargestellt. (Beispiel: Die Riffhäufigkeit von 100 % ergibt sich, wenn bei jeder Vermessung ein Riff beobachtet werden konnte.)

# Einteilung in morphologische Einheiten

10. 07. 03. 06. 12. 08. 03. 04. 02. 05. 03. 09. 12. 10. 10. 10.  
 95 94 93 92 91 90 90 89 86 85 84 80 78 76 74 72

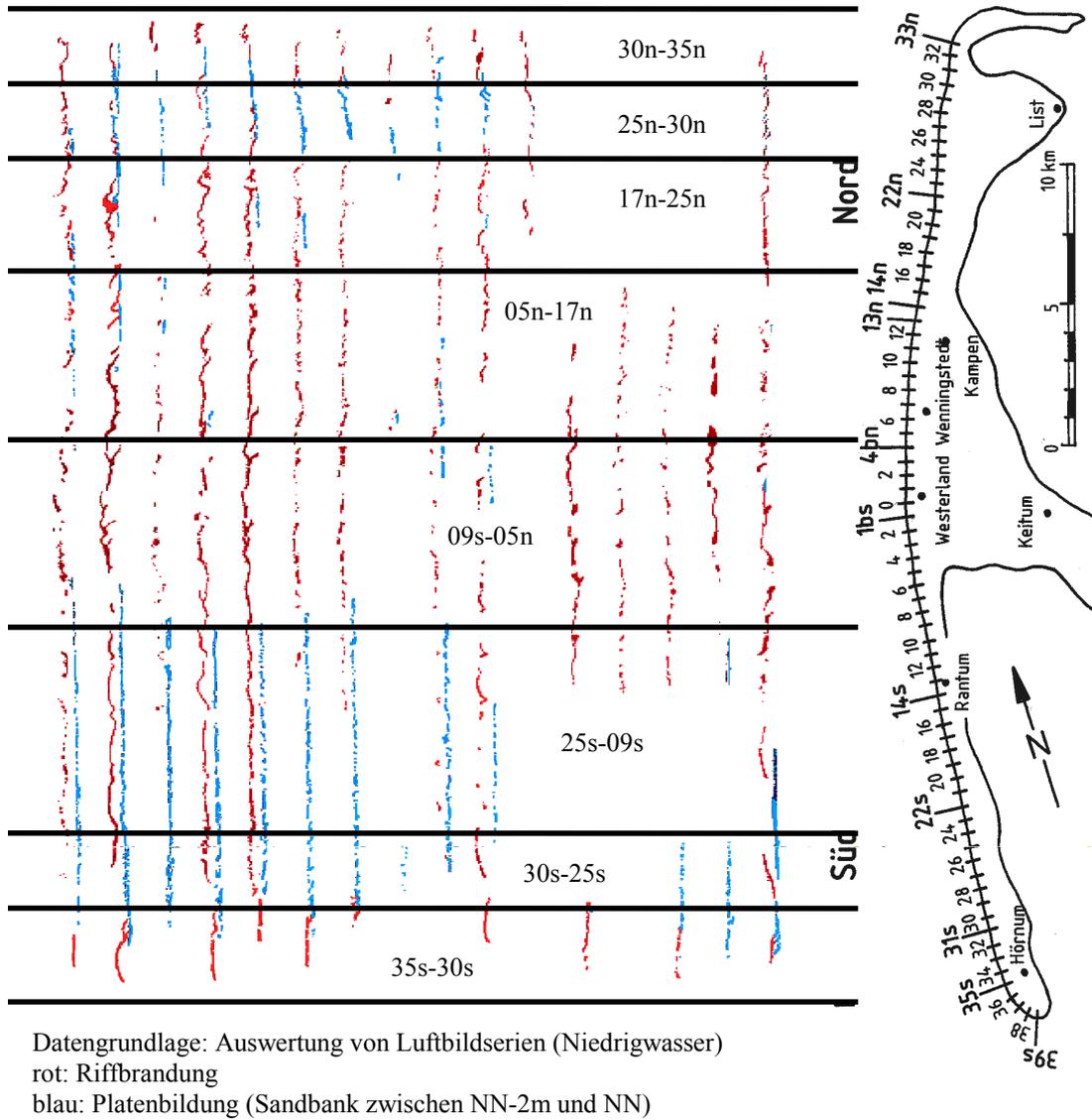


Abbildung 2: Auswertung der Luftbilder 1972 bis 1995 (blau: Sandplatten, rot: Riffbrandung)

### Höhe Riff (Abbildung 3)

Die Höhenlage des Riffes wird durch zwei grundsätzliche Muster beschrieben:

- Die tiefsten Riffe finden sich vor Rantum (14s), anschließend nach Norden (bis 32n) und Süden höher liegend, nördlich von 32n tiefer liegend.
- Überlagerung von obigem Muster durch große Schwankungen der Höhenlage, die z.T. mit der Häufigkeit von Riff - Öffnungen korrespondieren.

Zwischen 31s und 25s, 15n und 25n treten die größten Schwankungen der Riff - Höhen auf. Da in diesen Abschnitten Platenbildungen vorhanden sind, und bei fehlendem seewärtigen Riff z.T. das Kriterium für das Auftreten eines Riffes in Form der Platen z.T. erfüllt ist, ist zusätzlich der Abstand des Riffes zu berücksichtigen. In der Abbildung ist durch die rechte Ordinatenachse die beobachtete Riffwahrscheinlichkeit in Prozent angegeben.

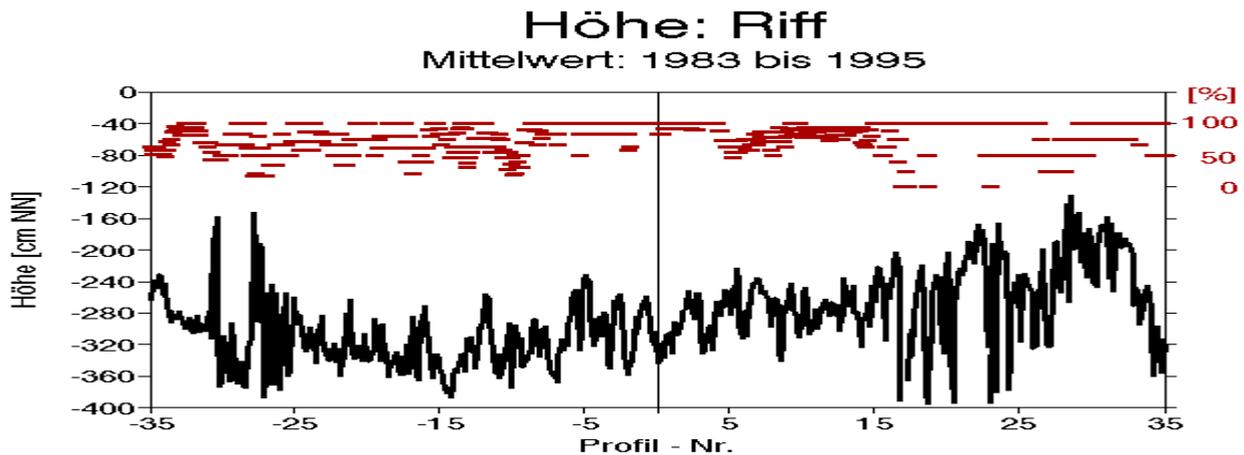


Abbildung 3: Mittlere Riffhöhe im Zeitraum 1983-1995

### Abstand Riff NN+3,75m (Abbildung 4)

Die Profile sind auf die jeweilige "fiktive Standlinie" bezogen, die zumeist jedoch keine morphodynamisch wirksame Bedeutung besitzt. Wegen der größeren hydrodynamischen Relevanz des Riffabstandes zu einem Element einer morphologischen Einheit (statt zur Standlinie) enthält die Abbildung den Abstand des Riffkammes zur NN+3,75m - Linie. Insgesamt ergibt sich:

Die Riffe zwischen 30s-4n liegen mit ca. 400m weiter seewärts (der NN+3,75m-Linie) als die Riffe im nördlichen Abschnitt 5n-34n mit dem Abstand von ca. 300m. Von 29s nach Süden (bis 35s) nimmt die Riffentfernung um ca. 175m ab. Zwischen 25s-28s wird die Riffentfernung von der Platenbildung und nördlich 33n durch die Nähe zum Lister - Landtief/Salzsand beeinflusst. Signifikant ist der abrupte Wechsel der Riffentfernung bei Profil 5n.

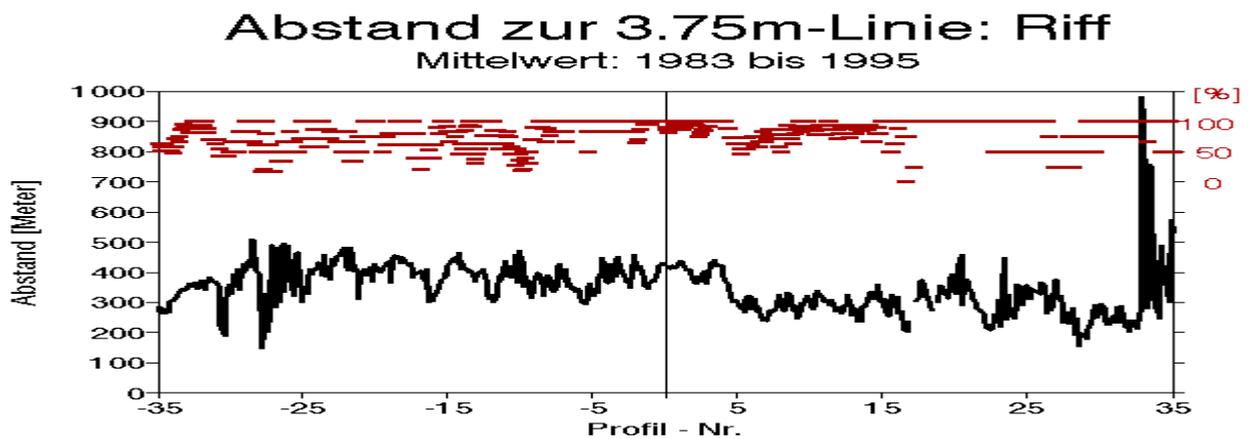


Abbildung 4: Mittlerer Abstand des Rifffes zur NN+3,75m - Linie im Zeitraum 1983-1995

### Höhe Rinne (Abbildung 5)

Rinne eine zusammengehörige Einheit darstellen.

Die Tiefe der Rinnensohle folgt im Verhalten der Höhe des Rifffkammes, so daß Riff und

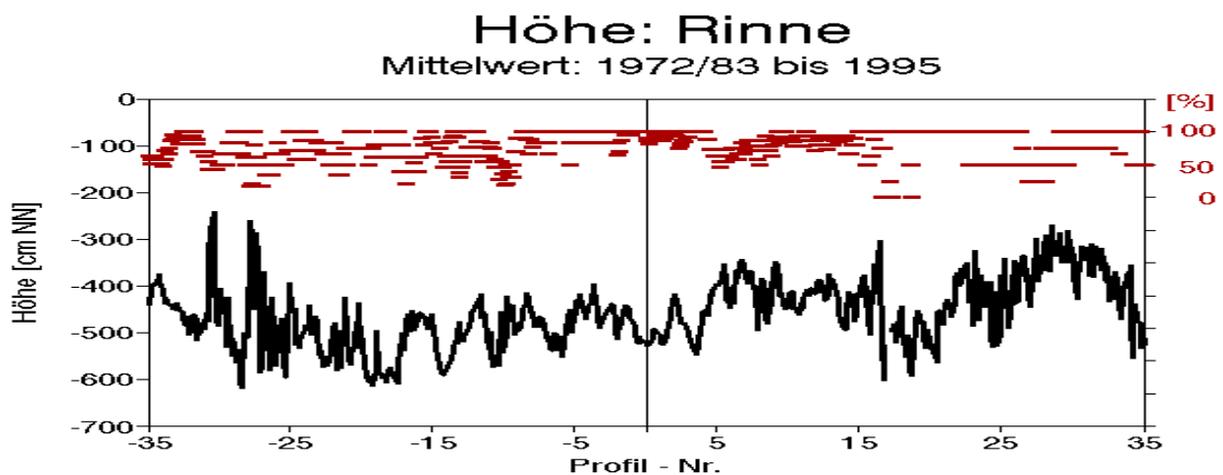


Abbildung 5: Mittlere Rinnentiefe im Zeitraum 1983-1995

### Abstand Rinne (Abbildung 6)

Ähnlich wie bei der Höhenlage von Riff und Rinne weisen die Abstände von Riff und Rinne zur NN+3,75m - Linie gleiche Muster auf.

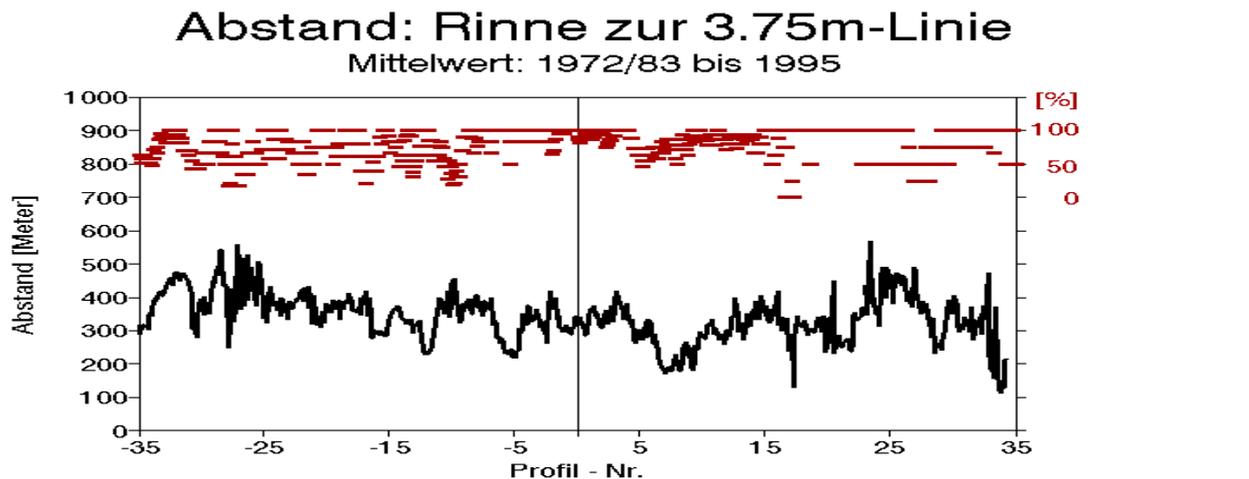


Abbildung 6: Mittlerer Abstand der Rinne zur NN+3,75m - Linie im Zeitraum 1983-1995

#### Abstand vom Riff zur Rinne (Abbildung 7)

Der Abstand von Riff und Rinne variiert zwischen 50m im Abschnitt 33n-20n und 150m im Abschnitt 5n-30s. Die Schwankungen des Riff - Rinne - Abstandes auf einer Strecke von ca. 500m sind beträchtlich und erreichen die

Schwankungsbreite der Gesamtküste (z.B. 10s, 28s, 20n). Dabei sind geringe Riff - Rinne - Abstände mit geringen Riff - Häufigkeiten verknüpft. Die Bedeutung der Riff - Situation für den Strandzustand wird nachfolgend dargestellt.

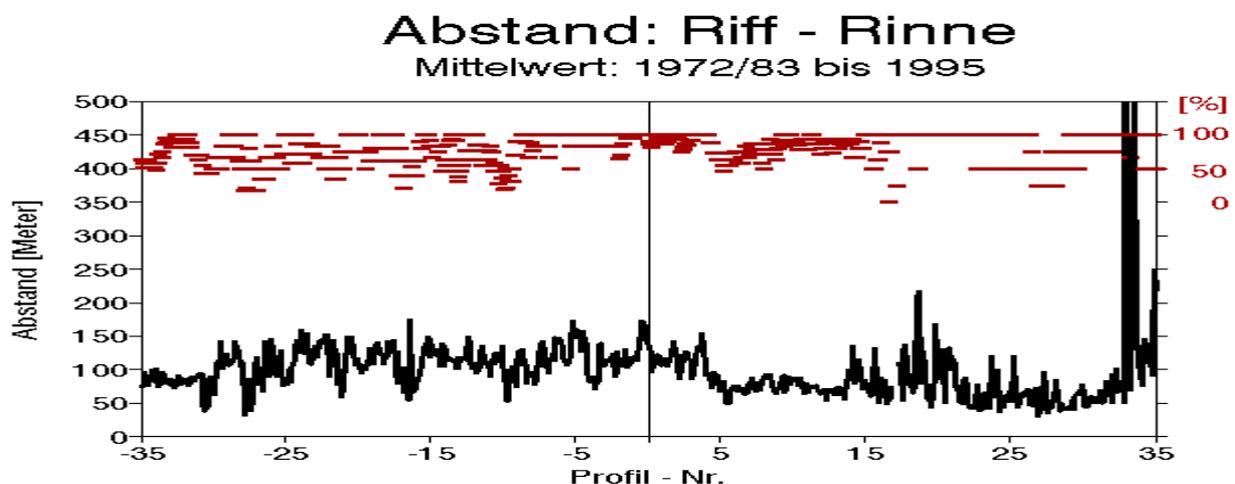


Abbildung 7: Mittlerer Abstand der Riffrinne zur Rinnenachse im Zeitraum 1983-1995

#### Strandbreite NN+3,75m/NN (Abbildung 8)

Durch den Einfluß der regelmäßig durchgeführten Sandaufspülungen im Zeitraum nach 1983 entsprechen die Strandbreiten nicht den natürlichen Verhältnissen. Dabei wird die Beziehung zwischen Strand - und Vorstrandentwicklung beeinflusst. Infolge der Mittelwertbildung dürften jedoch die charakteristischen Strandbreiten abzuleiten sein.

Die Plattenbildungen im Abschnitt 25n-26n führen zu den großen Schwankungen der Strandbreiten, während die Schwankungen südlich Profil 35s und nördlich 35n von den großen Veränderungen an der Hörnum-Odde und am Lister Ellenbogen herrühren. In den restlichen Abschnitten sind folgende Muster hervorzuheben:

- Breitere Strände (NN+3,75m/NN±0m) nördlich 9s (Dikjendeel) bis 27n (List), im Abschnitt 31s-34s (Hörnum)
- Geringere Strandbreiten mit überlagerten "kurzwelligen" Schwankungen im Abschnitt 15s-32s
- Große "kurzwellige" Schwankungen der Strandbreiten mit Abschnitt 20n-27n

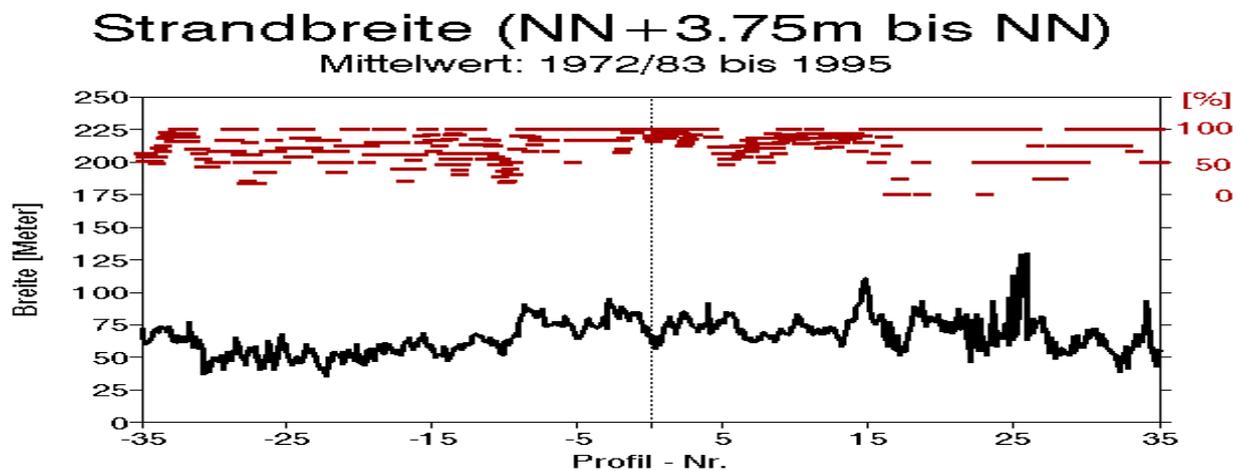


Abbildung 8: Mittlere Strandbreite NN+3,75m/NN im Zeitraum 1983-1995

#### Strandbreite (NN+1m/NN-1m) (Abbildung 9)

Der Einfluß der Plattenbildung auf die Breite der Wasserwechselzone (NN+1m/NN-1m) ist deutlich zu erkennen, indem die Platten zu

großen Schwankungen der Breiten in den Abschnitten 9s-32s und 21n-30n führen. Im Bereich 5s (Dikjendeel) ist die Wasserwechselzone relativ steil.

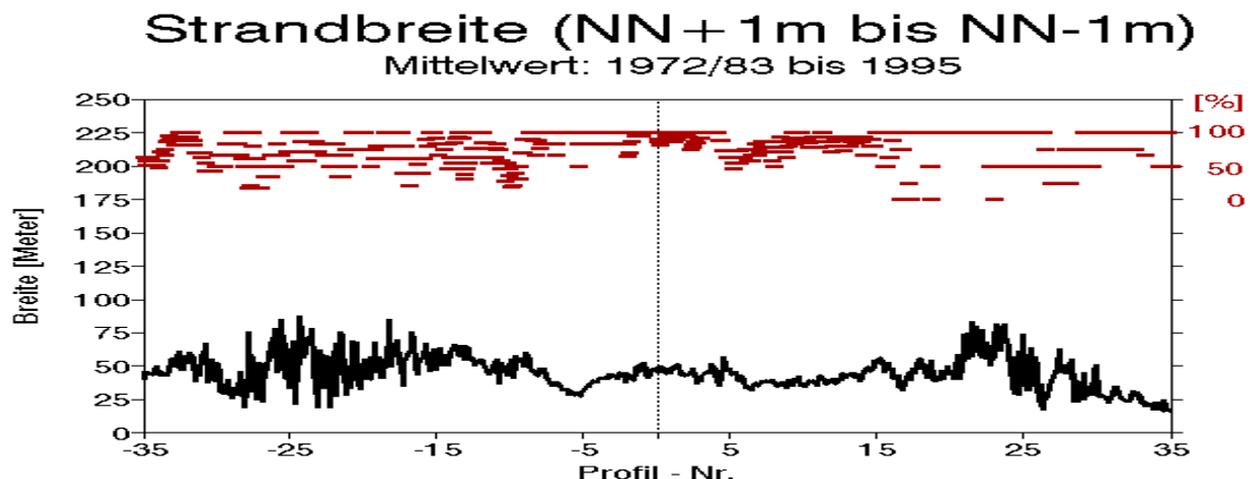


Abbildung 9: Mittlere Strandbreite NN+1m/NN-1m im Zeitraumes 1983-1995

#### Strandbreite (NN/NN-2m) (Abbildung 10)

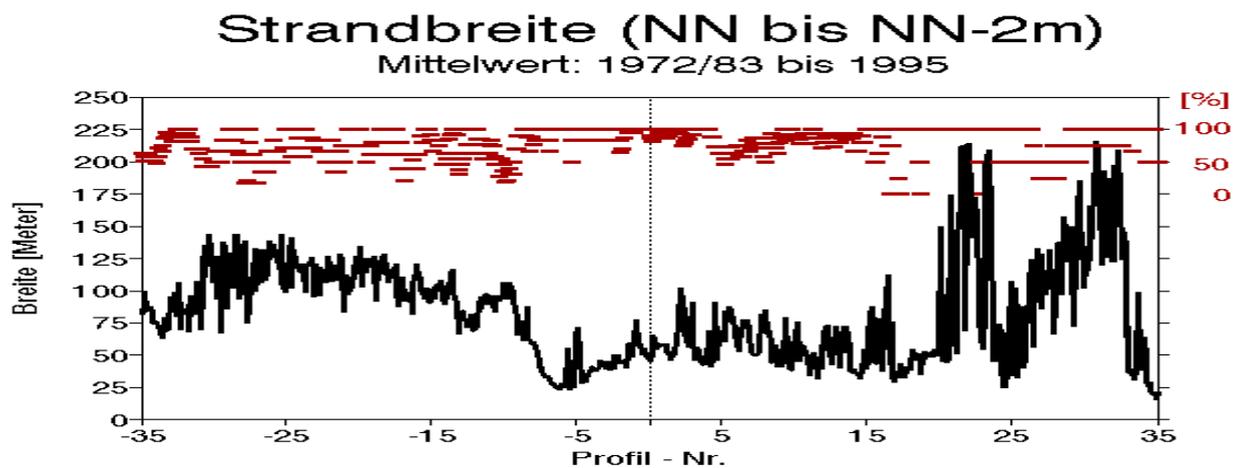
Der Höhenbereich NN±0m/NN-2m umfaßt i.d.R. die strandnahe Brandungszone, die von 5s in Richtung Süden bis 25s allmählich breiter wird; demgegenüber weist der Ab-

schnitt 5s-20n deutlich geringere Breiten auf. Im Abschnitt 21n-22n ist dieser Bereich breiter, zwischen 24n/25n tritt ein lokales Minimum auf, während von 25n nach 31n die Breiten wieder zunehmen; nördlich 31n werden die Breiten wieder geringer.

Eine Beziehung zwischen Riffabstand und Riffhöhe ist aufgrund der vorgenommenen Auswertung für alle Abschnitte nachzuweisen. Dabei gilt: Je weiter sich das Riff vor der Küste befindet, desto tiefer ist die Riffkrone gelegen. Diese enge Wechselwirkung zwischen Riffabstand und Riffhöhe ist bei der Planung weiterer Eingriffe im dynamischen System zu berücksichtigen. Für die Differenz zwischen Riffhöhe und Riffabstand sind folgende Beziehungen ableitbar:

- 35s-9s mit Beziehung: Riffhöhe [cm-NN] = Entfernung NN-2m [m] + 100 m

- 9s-5n mit Beziehung: Riffhöhe [cm-NN] = Entfernung NN-2m [m]
- 5n-15n mit Beziehung: Riffhöhe [cm-NN] = Entfernung NN-2m [m] + 75 m
- 9s-15s kontinuierliches Anwachsen der Differenz
- Überlagerung obiger Muster durch große "kurzwellige" Schwankungen, welche die gesamte Bandbreite der Differenzen umfassen



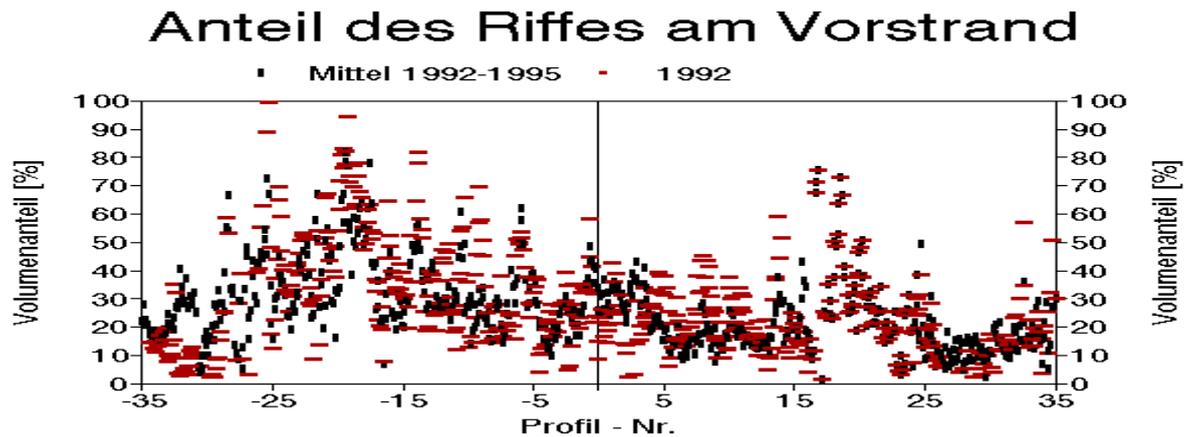
**Abbildung 10: Mittlere Strandbreite NN±0m/NN-2m im Zeitraumes 1983-1995**

Die wellendämpfende Wirkung des Riffes hängt von seiner Höhe, Lage und Fülligkeit ab. Die vorhandenen Unterlagen zeigen, daß mit zunehmendem Abstand des Riffes das Riff - Volumen geringer wird. Der Parameter Riff - Volumen ermöglicht die Bestimmung der Ausdehnung eines Riffkörpers in Küstenlängsrichtung. Der laterale Abstand zwischen einzelnen Riffkörpern liegt für den Zeitraum 1989 bis 1992 zwischen 500m und 1.500m. Die fülligsten Riffe befinden sich im Abschnitt 5n-25s, während die Riffe mit geringstem Riff - Volumen in den Abschnitten 35s-25s, 5n-17n und 23n-35s auftreten.

Der Anteil des Riff - Volumens am Gesamtvolumen des Vorstrandes (NN-2m/NN-6m)

ist in *Abbildung 11* dargestellt. Folgende Verteilung ergibt sich:

- In den Abschnitten 10s-25s und 17n-20n wird der Aufbau des Vorstrandes durch Riff - Rinne - Strukturen geprägt
- Im Abschnitt 9s-14n ist demgegenüber der relative Anteil des Riffes am Gesamtvolumen des Vorstrandes geringer, wobei der Vorstrand im Abschnitt 9s-5n insgesamt mehr Volumen enthält
- Der geringste Riff - Anteil am Vorstrand ist in den Abschnitten 35s-26s und 26n-32n vorhanden.



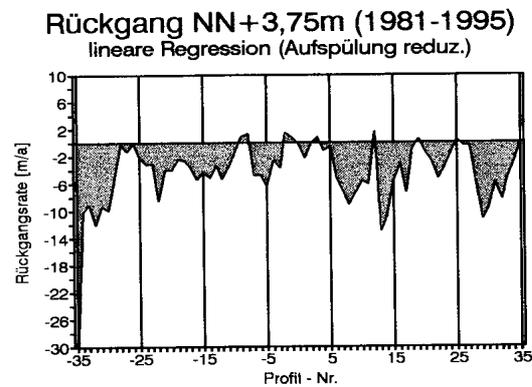
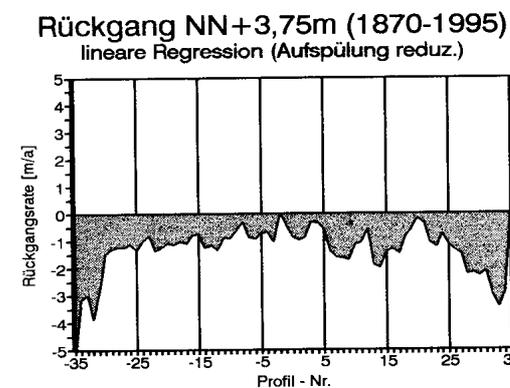
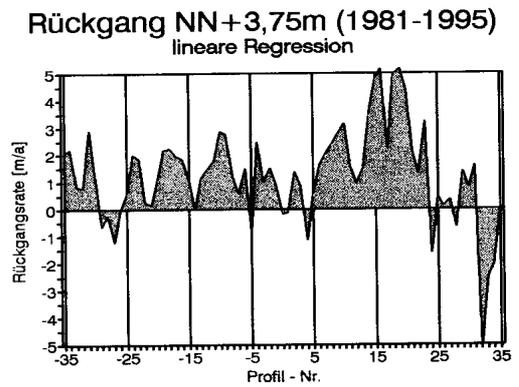
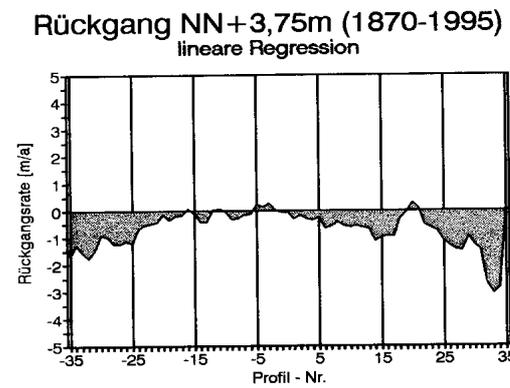
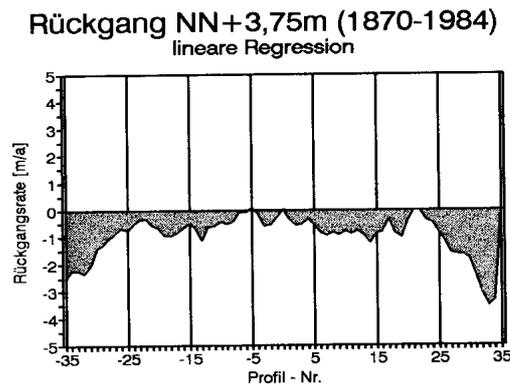
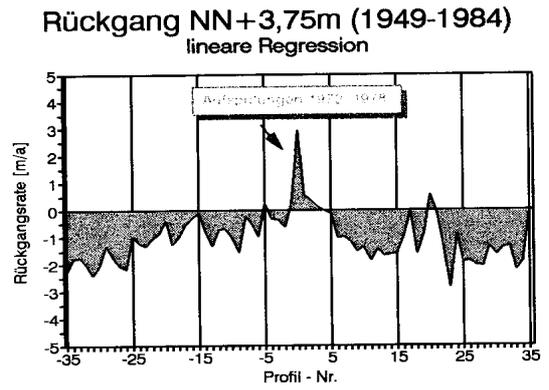
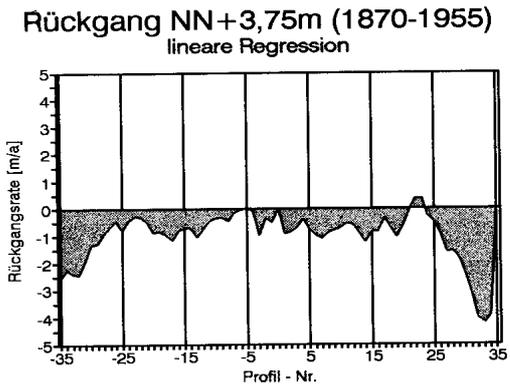
**Abbildung 11:** *Volumenanteil des Riffes am Vorstrand (NN-2m/NN-6m) im Jahre 1992 und als Mittelwert der Jahre 1989-1992 im Abschnitt 40s-35n*

Zwischen den Hangformen und der Seegangseinwirkung und der Kornzusammensetzung sind Wechselwirkungen vorhanden (VOLLBRECHT 1957, FIGGE 1976). Eine größere Wellenbelastung führt zu einer see-wärtigen Verlagerung der Konvergenzzone (Riff) und das Auftreten geringerer Wellentätigkeit bewirkt eine Bewegung des Riffes zum Strand hin. Dabei ändern sich die zugehörigen Neigungen und Fülligkeiten (ALW 1996b).

Anhand der Vermessungen der Hauptprofile (Profilabstand 500 m) kann die langfristige Rückgangsrates der NN+3,75m - Linie für unterschiedliche Zeiträume berechnet werden (Abbildung 12). Für den Küstenabschnitt Westerland ist zu berücksichtigen, daß 1972 und

1978 Aufspülungen erfolgt sind, die zum Anwachs führten. Um den Volumenverlust zu quantifizieren, wurde die Volumenrückgangsrates in der Höhenschicht NN+5m/NN±0m ermittelt (Abbildung 13).

Im Zeitraum nach 1972 bzw. 1983 sind die Rückgangsrates und Sandvolumenbilanzen durch die Aufspülmengen verändert, so daß für die Bestimmung des Volumenverlustes diese Zusatzmengen in der Bilanz zu eliminieren sind. Die Methode zur Ermittlung des Volumenverlustes besteht darin, die aufgespülten Sandmengen von den nachfolgenden Vermessungsdaten zu subtrahieren (Methode: reduziert um Aufspülmengen).



ALW Husum 09.05.1996

Abbildung 12: Küstenrückgangsraten der NN+3,75m - Linie für unterschiedliche Zeiträume im Abschnitt 35s-35n

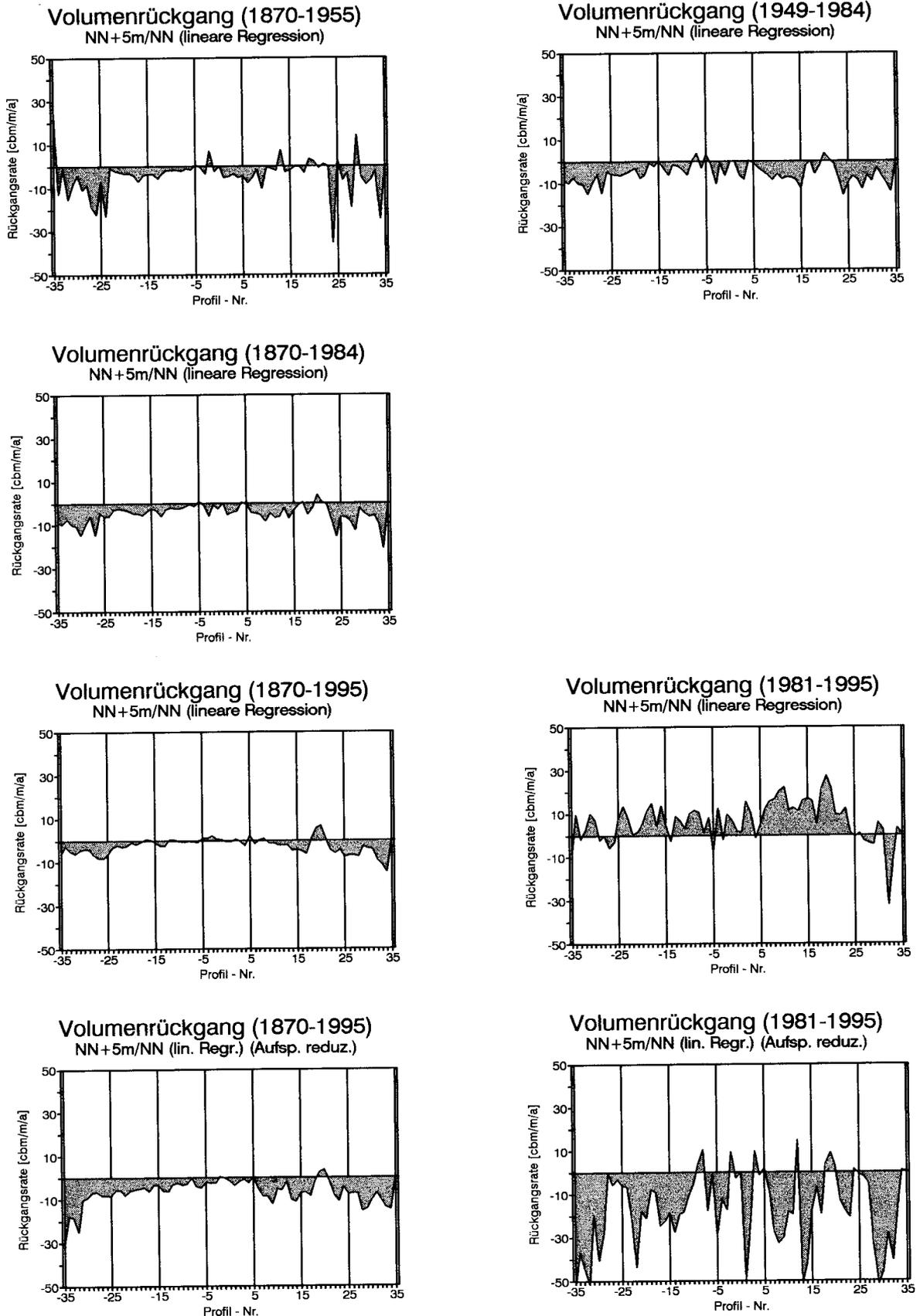


Abbildung 13: Volumenrückgangsraten im Höhenbereich NN+5m/NN±0m für unterschiedliche Zeiträume im Abschnitt 35s-35n

*Tabelle 1* gibt für die morphologischen Einheiten den mittleren Volumenbedarf in der Höhenschicht NN+5m/NN±0m für unterschiedliche Zeiträume an. Daraus ergibt sich im Zeitraum 1949-1995 ein mittlerer Volumenverlust für die Westküste (35s-35n) von 0,256 Mio. m<sup>3</sup>/a (Datenbasis Hauptprofile).

Da in dieser Aufstellung die Erosion des Vorstrandes nicht enthalten ist, wird der tatsächliche Volumenbedarf höher sein. Aus den Daten der Vermessungen von 1982-1995 läßt sich der Volumenverlust von Strand und Vorstrand (NN+6m/NN-8m) abschätzen (Datenbasis 50m - Profile) (*Tabelle 2*). Die Gesamtverlustmenge beträgt demnach 0,673 Mio. m<sup>3</sup>/a.

**Tabelle 1: Mittlerer Volumenrückgang in den morphologischen Einheiten (Hauptprofile) seit 1949**

| Bereich        | Profil  | Strecke<br>km | Volumenänderung NN+5m bis NN±0m [cbm/m/a] |       |                 |       |                 |       |
|----------------|---------|---------------|---|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                |         |               | vor Aufspülung                            |       | nach Aufspülung |       | gesamt          |       |
|                |         |               | Zeitraum                                  | +5/±0 | Zeitraum        | +5/±0 | Zeitraum        | +5/±0 |
| Hörnum         | 35s-30s | 2,500         | 1951-1982                                 | -11   | 1982-1995       | -44   | 1951-1995       | -18   |
| Puanklent      | 30s-25s | 2,501         | 1951-1989                                 | -7    | 1986-1995       | -12   | 1951-1995       | -8    |
| Puankl./Rantum | 25s- 9s | 8,083         | 1951-1981                                 | -2    | 1986-1995       | -21   | 1951-1995       | -3    |
| D'deel/W'land  | 9s- 5n  | 7,037         | 1951-1988                                 | -2    | 1986-1995       | -9    | 1951-1995       | -2    |
| W'stedt/Kampen | 5n-17n  | 5,997         | 1949-1984                                 | -9    | 1984-1995       | -20   | 1949-1995       | -7    |
| Klappholtal    | 17n-25n | 4,002         | 1949-1981                                 | -5    | 1986-1995       | -7    | 1949-1995       | -4    |
| K'tal/List     | 25n-30n | 2,514         | 1949-1988                                 | -9    | 1986-1995       | -25   | 1949-1995       | -11   |
| List           | 30n-35n | 2,272         | 1952-1988                                 | -8    | 1984-1995       | -26   | 1952-1995       | -13   |
| Gesamtküste    | 35s-35n | 34,906        | 1949-1989                                 | -5    | 1982-1995       | -18   | 1949-1995       | -7    |
|                |         |               | 0,174 Mio.cbm/a                           |       | 0,628 Mio.cbm/a |       | 0,256 Mio.cbm/a |       |

**Tabelle 2: Mittlere Volumenbilanz von Strand und Vorstrand (1982-1995)**  
**(Anwachsmengen NN+6m/NN-8m minus Aufspülmengen**  
**[aufgemessen im Höhenbereich NN+6m/NN-4m] in Einzelprofilen)**

| Bereich                       | Strecke | Bilanzrechnung:<br>Volumenanwachs NN+6m/NN-8m<br>(Virtuelle Regression)<br>minus<br>Aufspülmenge NN+6m/NN-4m |                     |
|-------------------------------|---------|--|---------------------|
|                               |         | A  | D                   |
| Profil                        | km      | Mio. m <sup>3</sup> /a   | m <sup>3</sup> /m/a |
| 36s-30s                       | 3,000   | -0,262   | -87,3               |
| 30s-25s <sup>1)</sup>         | 2,501   | -, -   | -, -                |
| 25s-09s                       | 8,083   | -0,060   | -7,4                |
| 09s-01s <sup>1)</sup>         | 4,063   | -, -   | -, -                |
| 01s-02n                       | 1,440   | -0,030   | -20,8               |
| 02n-15n                       | 6,531   | -0,093   | -14,2               |
| 15n-25n <sup>2)</sup>         | 5,002   | -0,073   | -14,5               |
| 25n-30n                       | 2,516   | -0,104   | -41,3               |
| 30n-35n                       | 2,270   | -0,051   | -22,5               |
| Gesamtbi-<br>lanz:<br>36s-35n | 35,406  | -0,673   | -19,0               |

<sup>1)</sup> Die Anwachsmengen in den Abschnitten 30s-25s und 09s-01s wurden auf die Nachbarabschnitte je zur Hälfte verteilt

<sup>2)</sup> Aus dem Abschnitt 25s-09s (-14,5 m<sup>3</sup>/m/a) linear interpoliert

Für die Planung und Ausführung weiterer Maßnahmen kann lediglich die Gesamtvolumenersatzmenge von 0,673 Mio. m<sup>3</sup>/a Verwendung finden, da in der Auswertung der vorhandenen Daten der Einfluß der bisherigen Sandaufspülungen zu erkennen ist. Die angegebene Gesamtmenge ist jedoch die Menge, welche die Küste an den offenen Rändern verliert. Nur durch großräumige synoptische Vermessungen kann der Verbleib dieser Verlustmengen dokumentiert werden.

Innerhalb des Beobachtungszeitraumes sind Sturmfluten aufgetreten. Die Sturmfluten vom Januar und Februar 1990 haben im Gesamtsystem NN+6m/NN-6m zu bedeutenden Sandakkumulationen geführt, wobei im Abschnitt 15s-15n ca. 100 m<sup>3</sup>/m im Winterhalbjahr eingetragen worden sind (*Abbildung 14*). Da diese Mengen die Volumenbilanz für den betrachteten Zeitraum beeinflussen, muß für die Angabe des tatsächlichen langfristigen Volumenbedarfes ein Sicherheitszuschlag gegeben werden. Mit den Wasserstandsdaten (jährliches HThw a.P. List im Zeitraum 1945-1994)

und einer Jenkinson D-Verteilung wird der Wasserstand von NN+3,58m (26. Januar 1990) alle 16 Jahre erwartet. Der mittlere Beobachtungszeitraum beträgt 8 Jahre, so daß die Hälfte der 1989/1990 akkumulierten Sandmengen als Sicherheitszuschlag zu addieren ist.

Insgesamt besteht für die Westküste einschließlich der Hörnum-Odde ein jährlicher Volumenbedarf von 0,894 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Aufgrund der aus dem Zeitraum 1949-1984 ermittelten Küstenrückgangsraten wurde - ausgehend vom Zustand 1995 - die Lage des Dünenfußes NN+3,75 m für das Jahr 2045 berechnet. Tabelle 3 gibt eine Übersicht der Werte, die beim Auftreten eines weiteren Küstenrückganges betroffen sind.

### Volumenbilanz NN+6m/NN-6m (04.90-08.89) Wirkung Sturmfluten Jan./Feb. 1990

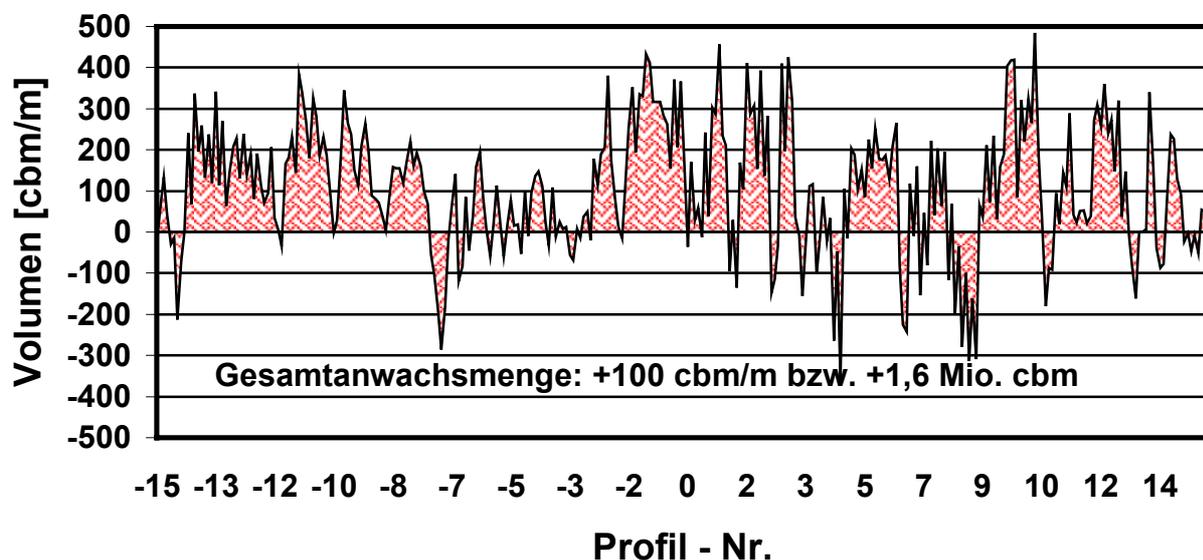


Abbildung 14: *Wirkung der Sturmfluten Januar/Februar 1990 auf die Volumenbilanz NN+6m/NN-6m*

Tabelle 3: Übersicht der Wertverluste bei einem Rückgang in 50 Jahren

| Profil-Nr.<br>von-bis | Länge<br>[km] | Küstenabschnitt  | Gebietsbezeichnung   | Character   | Wertverlust   |
|-----------------------|---------------|--|--|---|---|
| 35s-29s               | 3,00          | Südende Tetrapodenquerwerk Hörnum bis Hörnum Nord (Möskendeel) | LSG "Dünen- und Heidelandschaft auf Sylt"<br>Bebaute Ortslage Gemeinde Hörnum<br>LSG "Rantumer Dünen"  | Küstenschutzanlagen<br>Dünen, Heide<br>Verkehrsflächen<br>Gebäude | Erholungsheim Möskendeel, Wirtschaftsgebäude Campingplatz Haus Delphin, 14 Häuser Kersig-Siedlung, 1 Haus Sommerhaussiedlung, div. Kleinanlagen, Tetrapodenquer- und -längswerk, stellenweise Durchbruch der Randdünen und Überflutung von Binnendünentälern, Verkehrsflächen, Teile der bebauten Ortslage Hörnum |
| 29s- 8s               | 10,37         | Hörnum Nord (Möskendeel) bis Gemeindegrenze Rantum             | LSG "Rantumer Dünen"<br>LSG "Rantum"<br>Bebaute Ortslage Gemeinde Rantum<br>NSG "Baakdeel Rantum Sylt" | Dünen, Heide  | Stellenweise Durchbruch der Randdünen und Überflutung von Binnendünentälern, Verkehrsflächen, Landstraße I.O. Nr. 24  |
| 8s- 2s                | 3,21          | Gemeindegrenze Rantum bis Westerland Süd                       | NSG "Baakdeel Rantum Sylt"   | Dünen, Heide  |   |
| 2s- 2n                | 1,54          | Westerland Süd bis Seenot/W'land                               | Bebaute Ortslage Stadt Westerland  | Verkehrsflächen<br>Gebäude<br>Dünen<br>Küstenschutzanlagen        | Deckwerk Westerland Nord, Ufermauer Westerland, Kurpromenade, Kurmittelhaus, Wellenbad, Wohnanlage Kurzentrum, Hotel Miramar, Milchkurhalle, Wohnheim Kurverwaltung, stellenweise Durchbruch der Randdünen und Überflutung weiter Teile des Stadtgebietes von Westerland  |
| 2n- 5n                | 1,53          | Seenot/W'land bis Gemeindegrenze Westerland                    | Bebaute Ortslage Stadt Westerland  | Küstenschutzanlagen<br>Gebäude<br>Dünen                           | Tetrapodenlängswerk und Deckwerk Westerland Nord, Restaurant "Seenot"   |
| 5n- 7n                | 1,01          | Gemeindegrenze Westerland bis Wenningstedt                     | Bebaute Ortslage Gemeinde Wenningstedt   | Gebäude<br>Verkehrsflächen<br>Kliff                               | Gaststätte "Kliffkieker", Haus "Gosch"  |
| 7n-13n                | 3,15          | Wenningstedt bis Kampen - Kliffende                            | NSG "Dünenlandschaft auf dem Roten Kliff"  | Kliff<br>Verkehrsflächen<br>Gebäude<br>Dünen, Heide               | Gästehaus "Kliffende"   |
| 13n-34n               | 10,03         | Kampen - Kliffende bis Ellenbogen List                         | NSG "Nord Sylt"  | Verkehrsflächen<br>Dünen, Heide                                   | Stellenweise Durchbruch der Randdünen und Überflutung von Binnendünentälern, Abtrennung des Ellenbogens, Verlust der Ellenbogenstraße auf 400m Länge  |

### 2.1.2 Südliches Inselende und Küstenvorfeld

Die Entwicklung des Vortrapptiefs im Zeitraum 1585-1931 wurde von ZAUSIG (1939) beschrieben, wonach die Vertiefung des Vortrapptiefs im Wattgebiet zwischen Föhr, Amrum und Sylt seit ca. 400 Jahren zu beobachten ist. Die Außensände südwestlich von Sylt bzw. westlich von Amrum werden an ihrer Westseite vom Wellenangriff und an ihrer Ostseite von der Ebbströmung geprägt. Am Beginn der Beobachtungsreihe wurde der Ebbstrom südlich der Hörnum-Odde durch das "Fischers Gat" nach Westen und anschließend durch das "Sylter Diep" nach Süden geführt. Im Bereich des heutigen Jungnamensandes befand sich im 16. Jh. mit dem "Sylter Riff" ein Sand, der über eine Flachwasserzone an die Insel Sylt anschloß. Diese Sandbank war über 260 Jahre (1585-1848) etwa auf Höhe der heutigen Theeknobsrinne durch eine Öffnung nach Westen geteilt.

Im Jahre 1870 zeigt die Seekarte einen zusammenhängenden Sand, der erstmalig annähernd mit den heutigen Namen bezeichnet wurde (Theeknobs, Hörnum Sand, Holtknobs). Zwischen Holtknobs und Jungnamensand befand sich das Jungnamenloch.

Von 1695-1782 hat sich der Kniepsand, der südlich des Jungnamensandes lag, in östliche Richtung an die Insel Amrum angelegt und dabei das Vortrapptief zugeschüttet, so daß das Vortrapptief nach Westen hin offen war. Seine Lage von 1695 erreichte das Vortrapptief wieder zwischen 1814 und 1848.

Die Deutsche Admiralitätskarte Nr. 61 von 1931 zeigt eine Rinne, die den Theeknobsand auf etwa halber Länge teilt. Das Jungnamenloch teilt den Holtknobs von Jungnamensand.

Seit 1931 hat sich die Struktur der Knobssände deutlich verändert:

- 1959 wurden die Sände durch 3 Rinnen getrennt: Theeknobsrinne, Hörnumknobsloch und Jungnamenloch
- Verlagerung der Theeknobsrinne um ca. 1 km nach Süden
- Entstehung des Holtknobsloches und Neubildung des Jungnamenloches ca. 500m nördlich einer in den 30-er Jahren versandeten alten Rinne
- Vorhandensein einer deltaförmigen westlichen Öffnung des Vortrapptiefs durch die Rinnenbildungen (Ebbdelta)
- Erweiterung von Hörnumknobs und Holtknobs nach Westen an den Rinnenflanken
- Entlastung des südlichen Teils des Vortrapptiefs auf der Höhe des Jungnamensandes durch die Deltabildungen, wobei die Sohle von NN-20m um 10m auf NN-10m gefüllt worden ist; der Osthang des Jungnamensandes ist ca. 100m nach Osten in das Vortrapptief verlagert worden. Auf der gegenüberliegenden Hangseite (Osthang Vortrapptief) ist im Süden eine Vertiefung festzustellen, wobei insgesamt jedoch der Rinnenquerschnitt des Vortrapptiefs auf der Höhe des Jungnamensandes eingengt worden ist.

Die Basis der Knobssände und des dem Kniepsand vorgelagerten Flachwassergebietes bei der Tiefe von NN-10m ist größtenteils als stabil anzusehen, während der Bereich oberhalb NN-5m Erosion zeigt, so daß die Flächen innerhalb der einzelnen Höhenlamellen deutlich kleiner geworden sind (*Abbildung 15*).

Durch die Ausräumung der der Hörnum-Odde vorgelagerten Flachwassergebietes oberhalb NN-5m trifft auf die Hörnum-Odde eine größere hydrodynamische Belastung, wobei eine Trennung des Theeknobs von der Hörnum-Odde begünstigt wird.

# Veränderung der Knobssände von 1939 - 1991

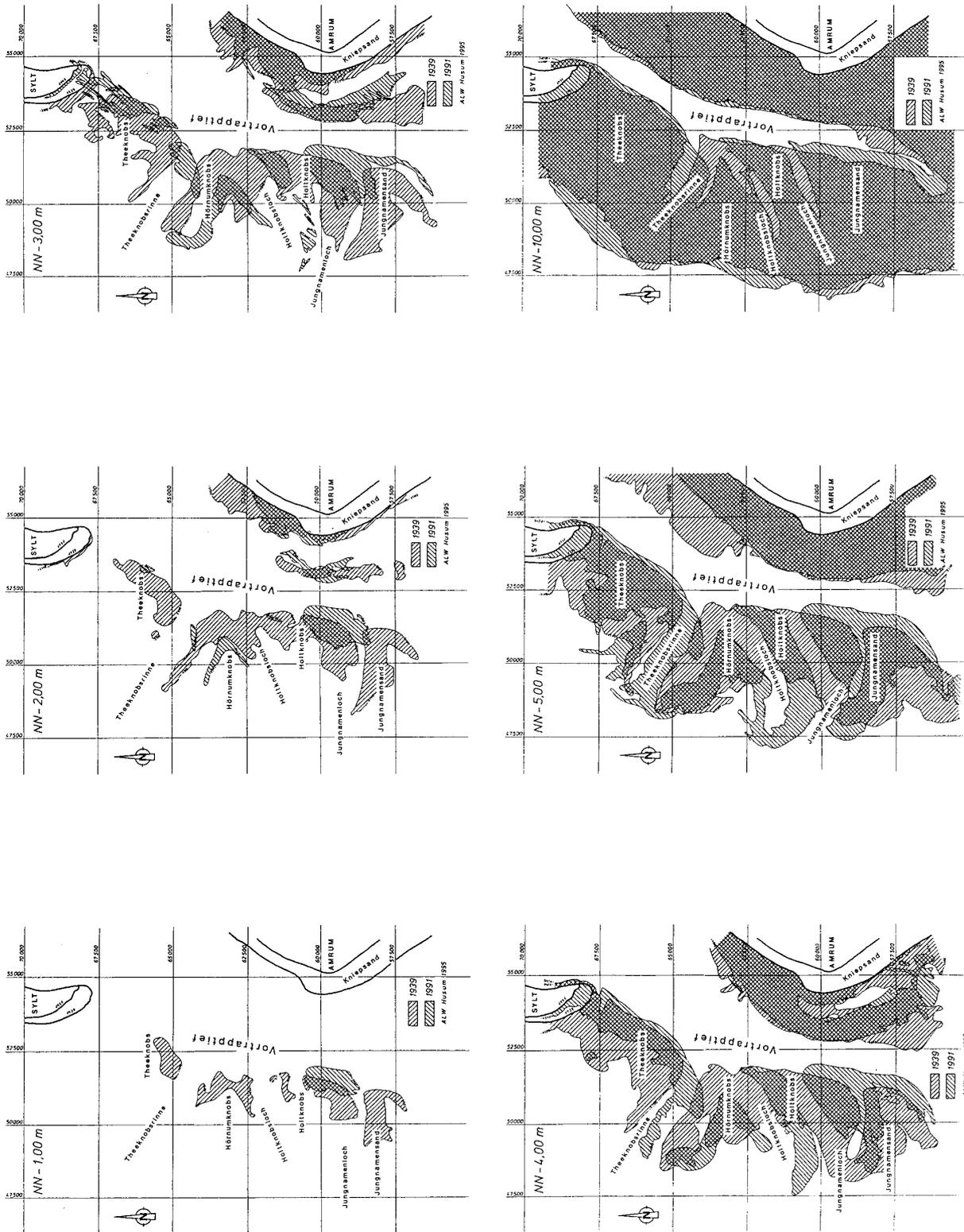


Abbildung 15: Veränderung der Knobssände von 1939 zu 1991

Der Erhalt der Hörnum-Odde ist durch Maßnahmen, die den Seegang normal zur Küste ausrichten, zu verbessern. Durch die Umlenkung der Westküste der Odde ist die Sedimenttransportkapazität hier gegenüber dem Südteil der Westküste angestiegen. Dadurch wird entlang der Odde bei mittleren Tide- und Seegangsverhältnissen mehr Sand transportiert, wobei der Strand nach Süden mehr Sand verliert als durch den Längstransport von Norden her ankommt, d.h. an der Odde wird zusätzlich Sediment mobilisiert. Die Transportwege zum Vortrapptief sind kurz, so daß die Verweilzeit des Sandes bei Aufspülungen ebenfalls kurz ist.

Die bisher durchgeführten Sandaufspülungen haben den Verlauf der NN-1m - Linie positiv beeinflusst, während die Erosion unterhalb der NN-2m - Linie nicht aufgehalten werden konnte.

### Naturschutzgebiet Hörnum-Odde/Sylt

Die Hörnum-Odde ist mit der Landesverordnung vom 02.12.1972 als Naturschutzgebiet "Hörnum-Odde/Sylt" ausgewiesen worden. Im Norden wird die Grenze des NSG durch die West- und Südgrenze des Flurstückes "Weiße Düne" und dem Weg, der die Sommerhaussiedlung im Süden Hörnums, erschließt, gebildet. An den übrigen Seiten bildet die MThw - Linie die Grenze des NSG. 1972 wurde das NSG mit ca. 157 ha ausgewiesen, wobei aufgrund der Sandverluste im Süden und Südwesten der Odde im Zeitraum 1972-1990 die Fläche um ca. 60 ha geschrumpft ist. Im NSG ist jede Veränderung und jeder Eingriff in die Natur und Landschaft verboten. Ausgenommen von dem Verbot sind das Betreten auf den Wegen, die ordnungsgemäße Ausübung der Jagd, notwendige Maßnahmen zur Sicherheit der Schifffahrt und des Küstenschutzes und der Betrieb der im Norden des Gebietes gelegenen Gastwirtschaft.

Die Hörnum-Odde weist auf engem Raum eine vielfältige Struktur mit Weiß-, Grau- und Braundünen, Strand und den dazugehörigen Pflanzenarten auf. Die Krähenbeerenbestände haben eine herausragende Bedeutung. Aufgrund der in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführten Halmpflanzungen mit Strandhafer sind keine unbewachsenen Dünen - mit Ausnahme von Resten der früher be-

nutzten Trampelpfade - mehr vorhanden. Bedeutsam sind die Vorkommen der Stranddistel, einer in Schleswig-Holstein stark gefährdeten Pflanzenart. Diese wächst bevorzugt auf neu aufgespülten Sand- und Kiesflächen, auf Strandwällen und in Graudünen, aber auch auf älteren Weißdünen.

Die Dünen werden von einigen Singvögeln (z.B. Feldlerche, Wiesenpieper) als Brutplatz genutzt. Vor dem Bau des Hindenburgdammes haben auf der Hörnum-Odde in großer Zahl Seevögel (z.B. Möwen) gebrütet. Wegen der Einwanderung des Fuchses und der touristischen Nutzung (Spaziergänger) sind heute in den Dünen der gesamten Insel im Gegensatz zu Amrum keine Kolonien brütender Seevögel zu finden. Das Muscheltal wird von einigen Sandregenpfeifern als Brutplatz genutzt. Das Hörnumer Wäldchen in den Dünen ist im Frühjahr und besonders im Herbst ein Konzentrationspunkt für rastende Singvögel, die von Blavand über Fanö, Röm und Sylt Richtung Südwesten fliegen.

Spezialisierte Landsäugetiere, die auf die Hörnum-Odde angewiesen wären, sind nicht vorhanden. Die Meeressäugetiere (z.B. Seehund, Kegelrobbe) nutzen die Sandflächen der Hörnum-Odde nur sporadisch zur Rast, da sie meistens von Spaziergängern vertrieben werden. Zeitweise rasten hier auch junge Kegelrobben kurz nach der Geburt. Der Strand wäre beim Fehlen der touristischen Nutzung (Spaziergänger) ein idealer Liegeplatz für Robben, da er sehr steil bis auf große Wassertiefen (NN-20m) abfällt. In früherer Zeit waren die Strände der Inseln Wurfplätze für einen großen Bestand der Kegelrobben. Sie wurden hier vom Menschen ausgerottet und finden z.Z. nur noch auf dem Jungnamensand einen vor dem Menschen sicheren Wurfplatz.

In den Dünentälern der Hörnum-Odde laicht die Kreuzkröte, eine nach der Roten Liste in Schleswig-Holstein gefährdete Amphibienart. Sie ist aber auch in anderen Dünen der Insel zu finden.

Aus der Sicht des Naturschutzes sollte die natürliche Dynamik an der Hörnum-Odde so weit wie möglich erhalten bleiben, jedoch wäre ein Verlust der Hörnum-Odde für den Naturschutz ungünstig (z.B. Verlust der Dünen und Liegeplätze der Robben). Durch ein Betretungsverbot von November bis Januar könnte die Hörnum-Odde ihre Bedeutung als

Wurfplatz für Kegelrobben wiedererlangen, zumal der Jungnamensand flacher wird.

### 2.1.3 Nördliches Inselende und Küstenvorfeld

Für Kartenmaterial aus dem Zeitraum 1878-1939 ist eine Beschreibung der Veränderungen der Lister Ellenbogenküste sowie des umliegenden Seegebietes von HUNDT (1957) vorgenommen worden. Darin wird eine Nordwärtsverlagerung des Lister Außentiefs und des Lister Landtiefs festgestellt.

Mit Hilfe neuerer Daten ist festzustellen, daß sich seit 1898 das Lister Tief - im Westen in das Lister Außentief übergehend - anders als das Lister Landtief entwickelt (*Abbildung 16*):

- Stabilität der Rinnen (R $\phi$ m $\phi$ -Tief, Hoyer Tief, Lister Ley) von 1889-1994
- Der Sand am Nordhang des Lister Tiefs (Lammelæger) ist ca. 900m nach Süden in das Lister Tief eingedrungen und engt diesen ein.
- Verschwenkung des Lister Tiefs um 40° nach Norden bei gleichzeitiger Verlagerung des Salzsandes nach Norden (1889: N-S-Ausdehnung Salzsand 3 km, E-W-

Ausdehnung 4 km und Verbindung zum Listland durch eine SKN-1,5 m tiefe Barre).

- Erosion des Salzsandes am Südhang
- Verlagerung des westlichen Salzsandes um ca. 3 km nach NW, wodurch der Rüstensand erodiert ist.
- Auffüllung des Westhanges (NN-6m, NN-10m) des Salzsandes
- Stärkere Schwankungen der Streichrichtung des Landtiefs (25°)
- Ausräumung des Lister Landtiefs auf i.M. NN-5m

Bei anhaltender Ausräumung des Lister Landtiefs und weiterhin nordwärts gerichteter Verlagerung des Salzsandes wird der Anteil des durch das Lister Landtief fließenden Wasservolumens gegenüber dem Lister Tief zunehmen.

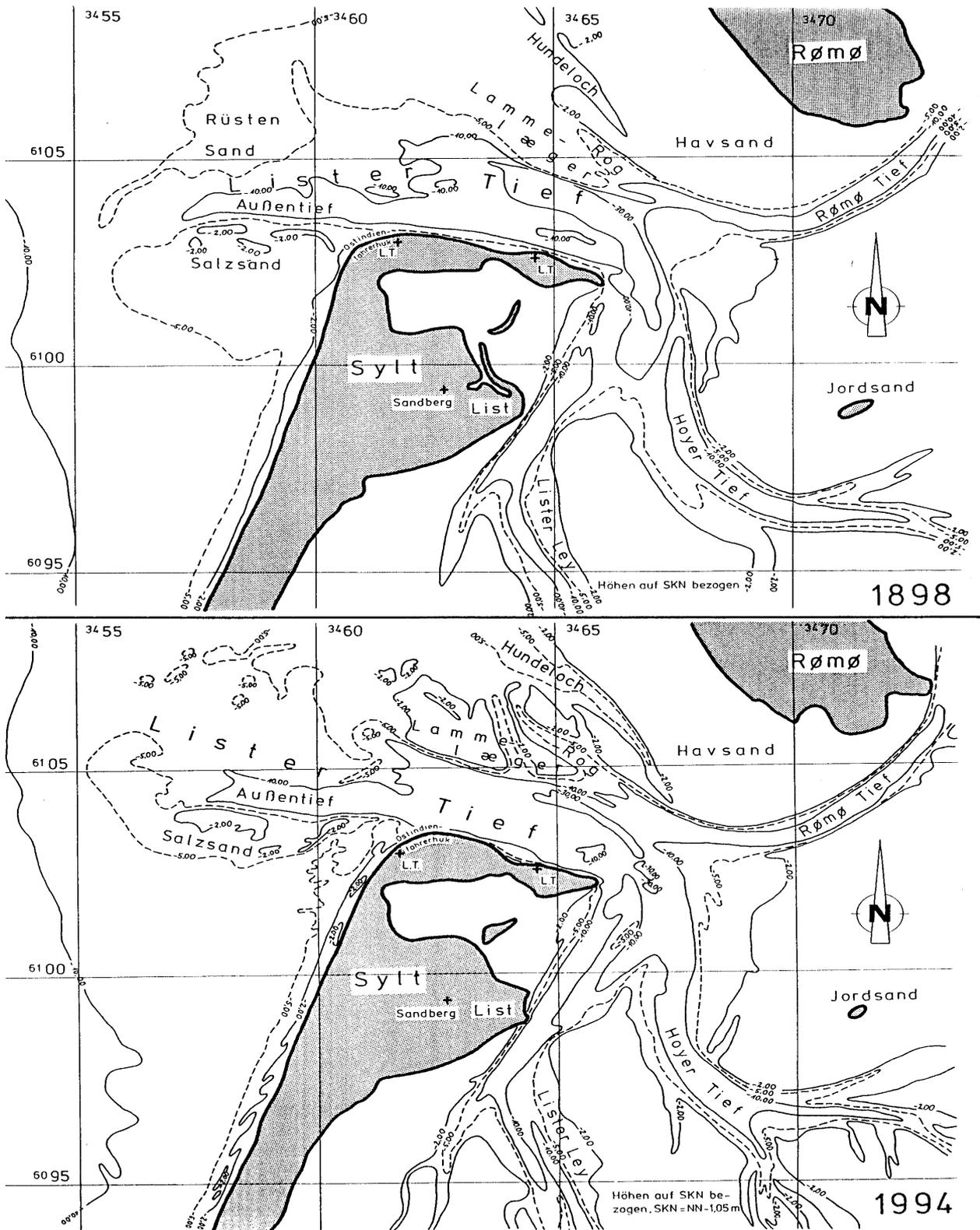


Abbildung 16: Zustände des Küstenvorfeldes am nördlichen Inselende der Jahre 1898 und 1994

## 2.2 Hydrologie und Meteorologie

### 2.2.1 Wasserstand

Umfangreiche Untersuchungen der Tideverhältnisse um Sylt wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II" vom Franzius - Institut Hannover durchgeführt (FI 1994).

Die Eintrittszeitdifferenzen bezogen auf den Meßpahl Westerland des Tidehoch- und Tideniedrigwasserstandes sowie des Tidenubs sind in (Abbildung 17) dargestellt.

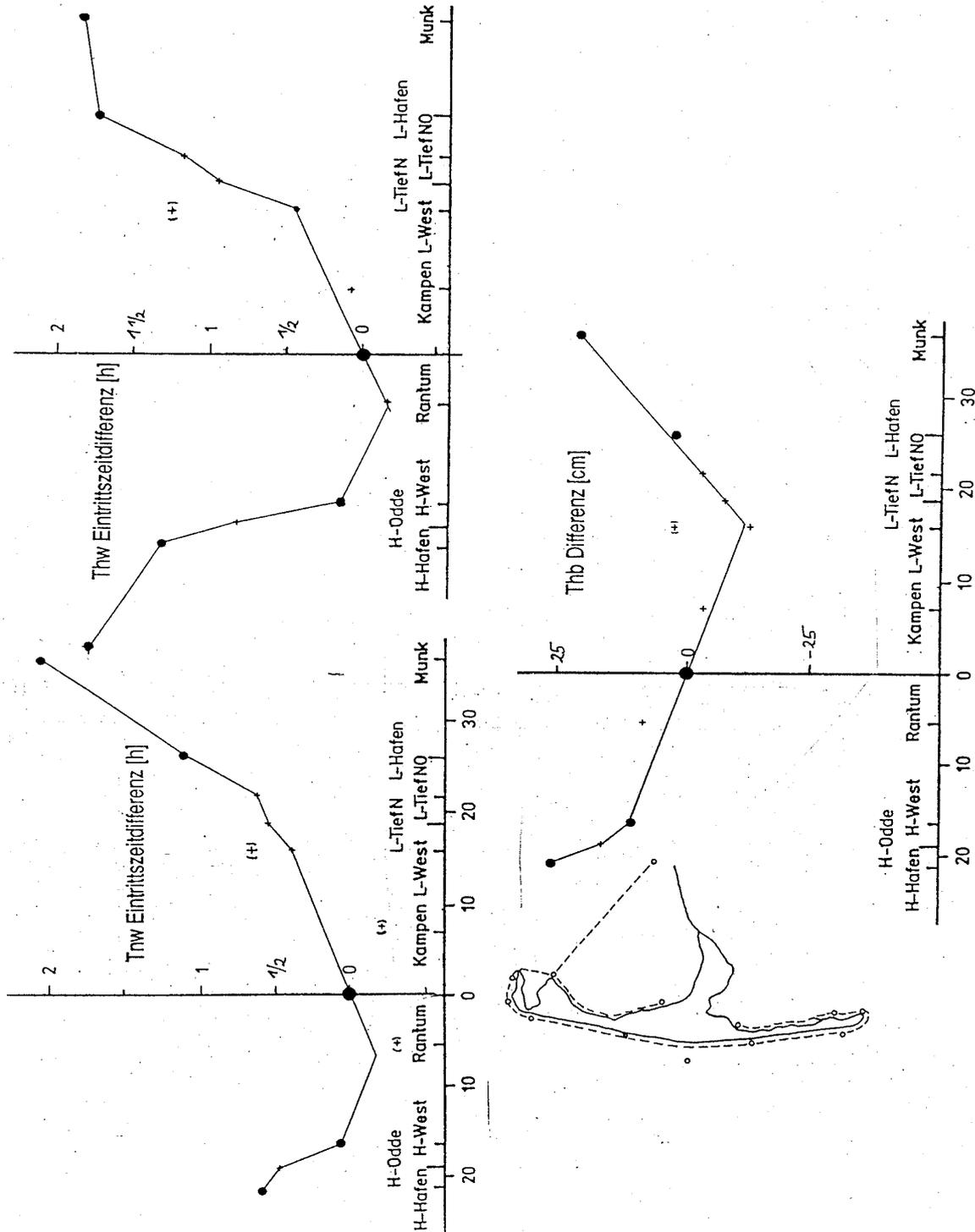
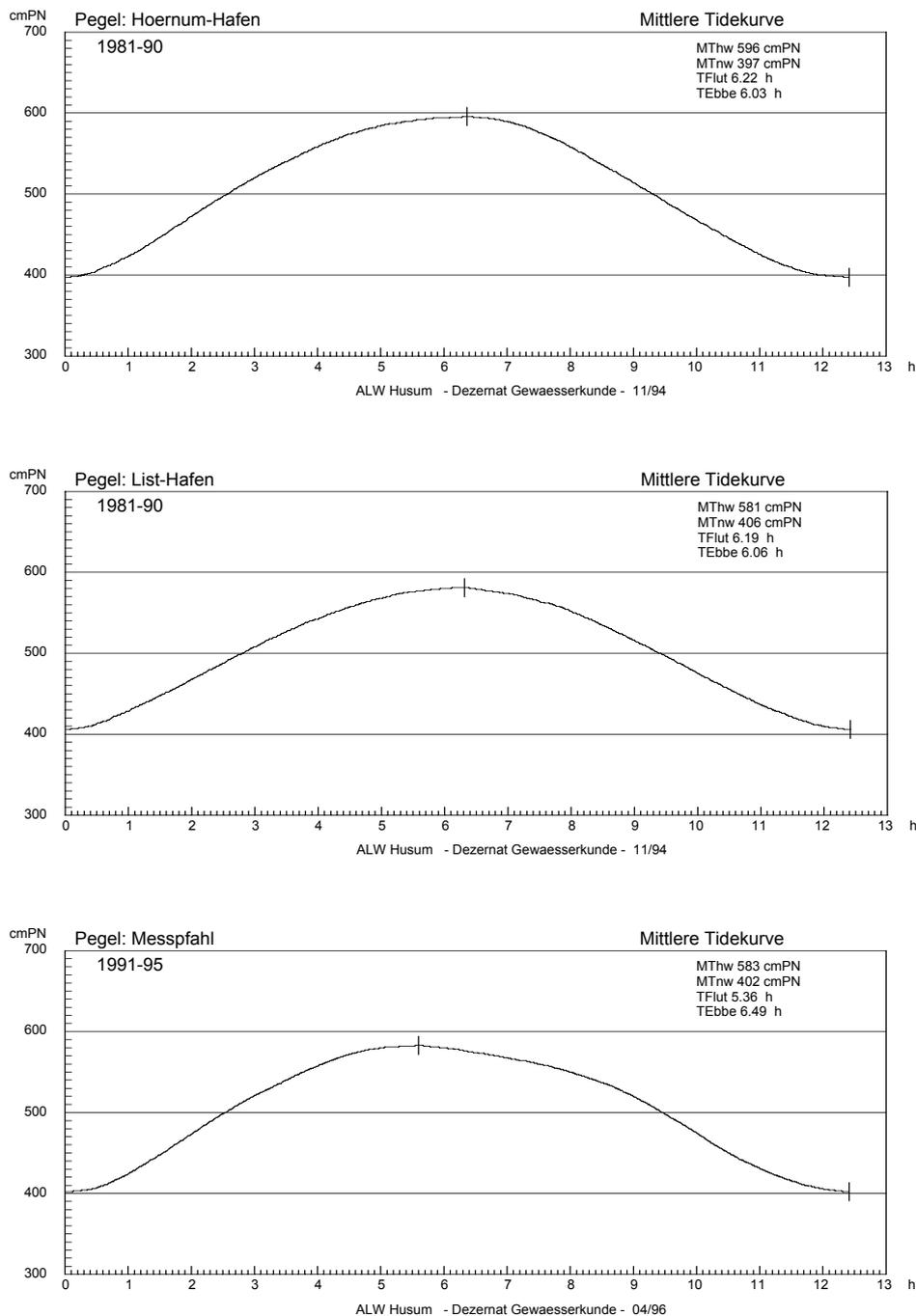


Abbildung 17: Differenzen der Eintrittszeiten von Thw und Tnw sowie des Thb bez. Westerland

Der für die Bemessung von Baumaßnahmen an der Westküste gültige Wasserstand wird mit NN+4,50 Meter angenommen. Das MThw a.P. W6 (Westerland) für den Zeitraum 1981-1990 beträgt NN+0,82 m, das MTnw beträgt NN-0,95 m, die  $MT_E$  beträgt  $6^h 53^m$  und die  $MT_F$  beträgt  $5^h 32^m$ . Die mittlere-

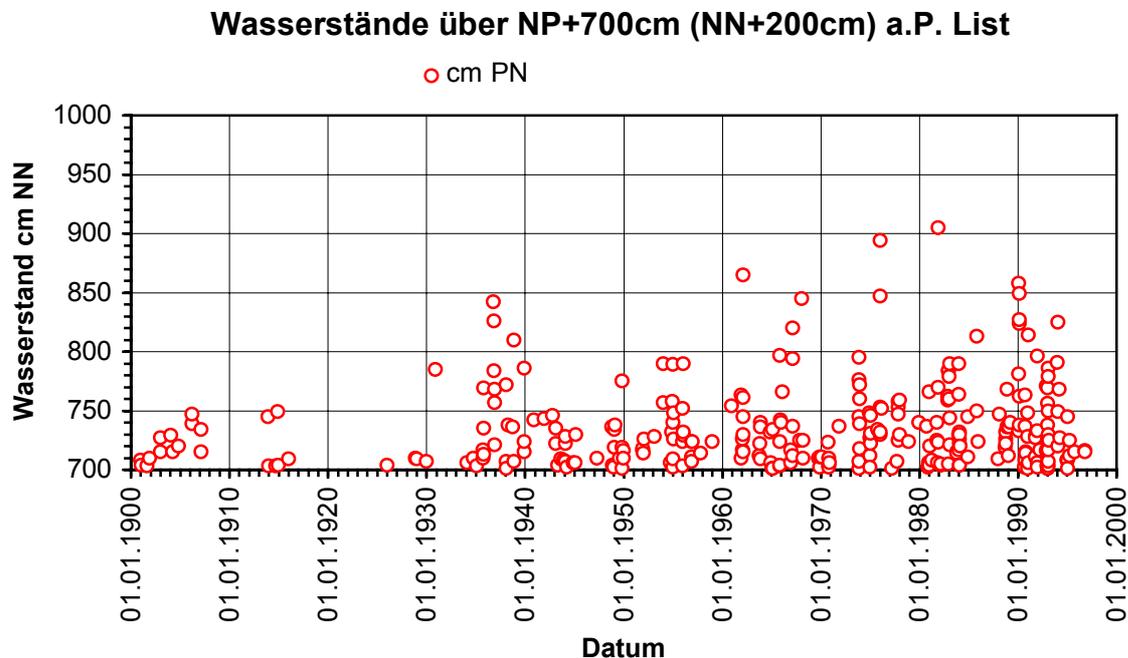
ren Tidekurven (1981-90) der Pegel Hörnum - Hafen und List sind in *Abbildung 18* angegeben. Das HHThw a.P. Hörnum - Hafen und a.P. List beträgt jeweils NN+4,05m (24.11.1981).



**Abbildung 18: Mittlere Tidekurven a.P. Hörnum - Hafen, a.P. List und Meßpfahl Westerland**

Abbildung 19 zeigt die im Zeitraum 1900 bis 1996 eingetretenen Sturmflutereignisse mit Wasserständen über NN+2m a.P. List. Tabelle

4 enthält die Werte für die zwanzig höchsten Sturmflutwasserstände.



**Abbildung 19: Wasserstände über NN+2m a.P. List (1900-1996)**

**Tabelle 4: Höchste Sturmflut - Wasserstände a.P. List (1900-1996)**

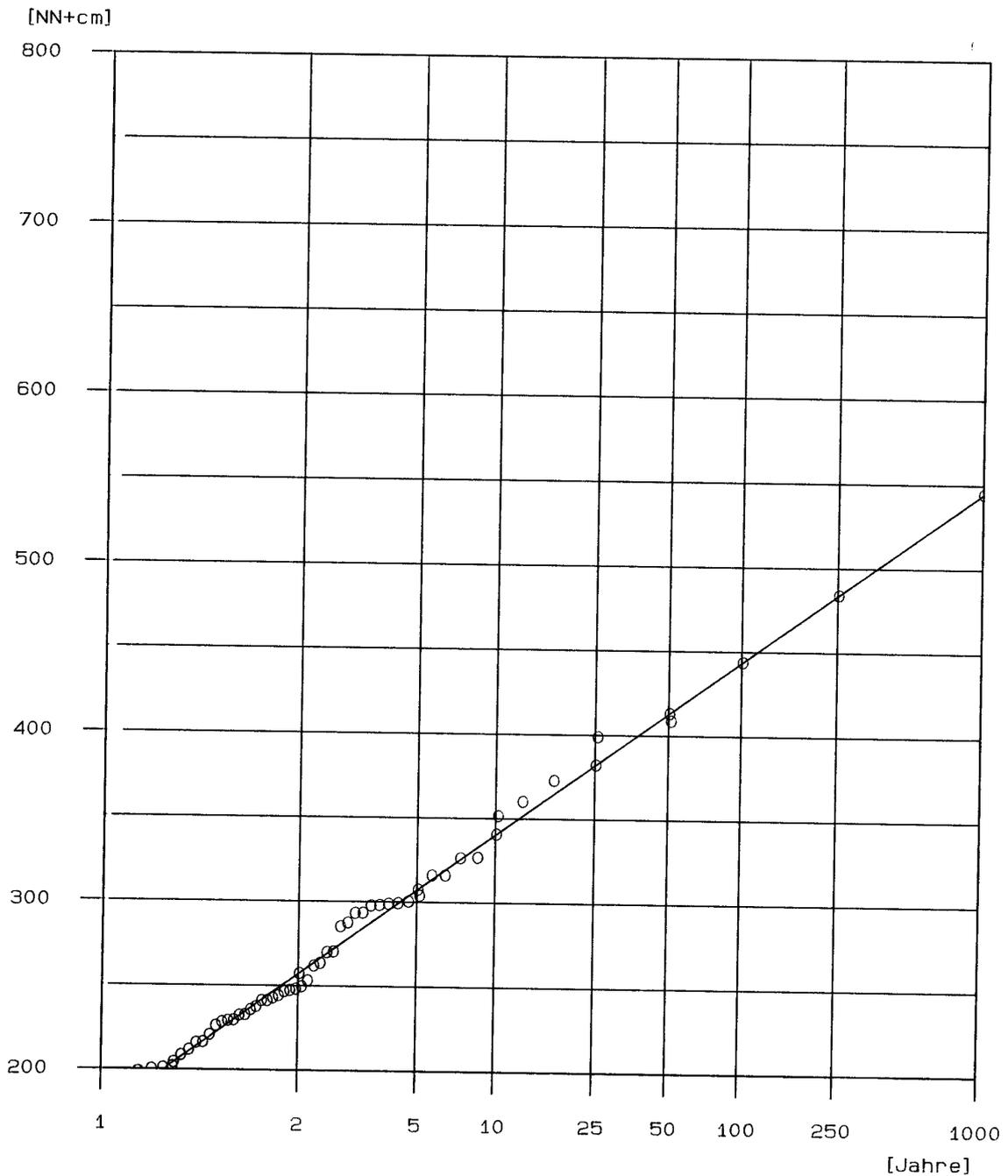
| Nr. | cm PN | TT.MM.JJJJ | Nr. | cm PN | TT.MM.JJJJ |
|-----|-------|------------|-----|-------|------------|
| 1   | 905   | 24.11.1981 | 11  | 825   | 28.01.1994 |
| 2   | 894   | 03.01.1976 | 12  | 824   | 26.02.1990 |
| 3   | 865   | 16.02.1962 | 13  | 820   | 23.02.1967 |
| 4   | 858   | 26.01.1990 | 14  | 814   | 09.01.1991 |
| 5   | 849   | 27.02.1990 | 15  | 813   | 06.11.1985 |
| 6   | 847   | 21.01.1976 | 16  | 810   | 24.11.1938 |
| 7   | 845   | 15.01.1968 | 17  | 797   | 02.11.1965 |
| 8   | 842   | 18.10.1936 | 18  | 796   | 20.12.1991 |
| 9   | 827   | 28.02.1990 | 19  | 795   | 19.11.1973 |
| 10  | 826   | 27.10.1936 | 20  | 794   | 01.03.1967 |

Die Eintrittswahrscheinlichkeit nach der Jenkinson-D - Verteilung für Wasserstände a.P. Pegel List (Zeitraum 1945-1994) ist in *Abbildung 20* dargestellt.

Die Verweildauern erhöhter Wasserstände am Meßpfahl Westerland sind für den 5-jährigen Zeitraum vom 01.07.1989 bis 30.06.1994 in

Tabelle 5 angegeben. Die Zunahme der Verweildauern erhöhter Wasserstände in der 2.

Hälfte dieses Jahrhunderts ist für den Pegel List in *Abbildung 21* dargestellt.

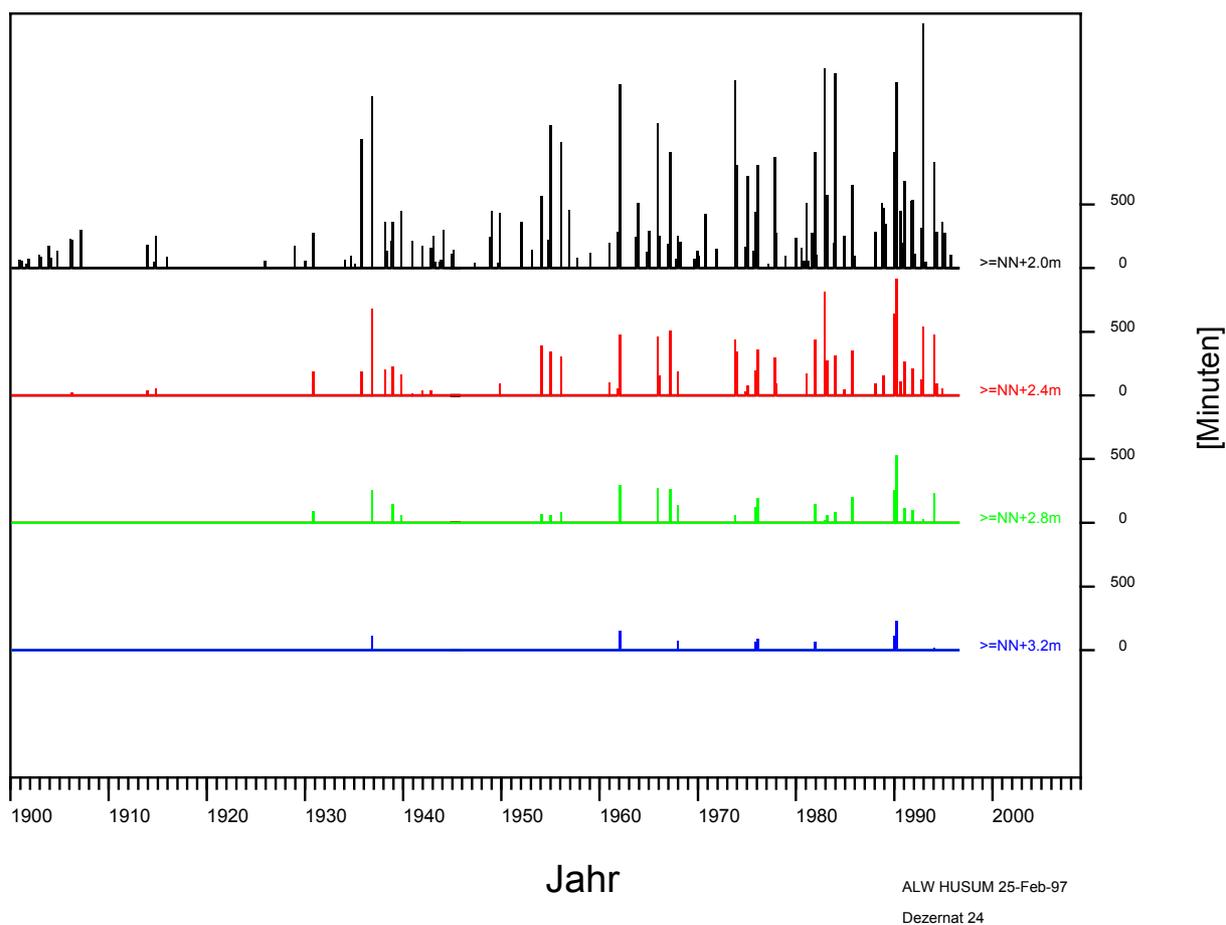


**Abbildung 20: Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wasserstandes nach Jenkinson-D - Verteilung für den Pegel List (Zeitraum 1945-1994)**

**Tabelle 5: Mittlere Verweildauern höherer Wasserstände a.P. Meßpfahl Westerland und List**

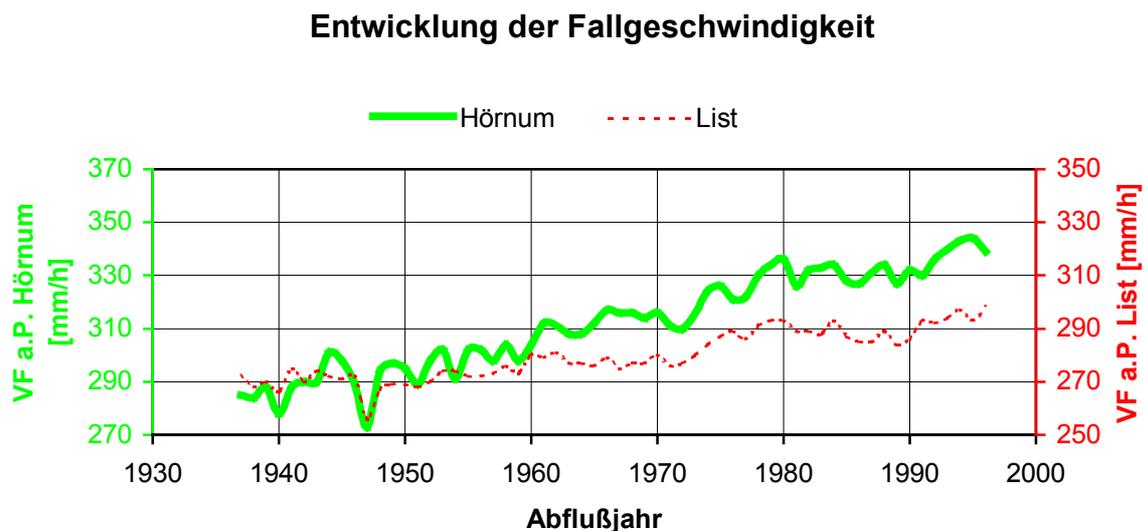
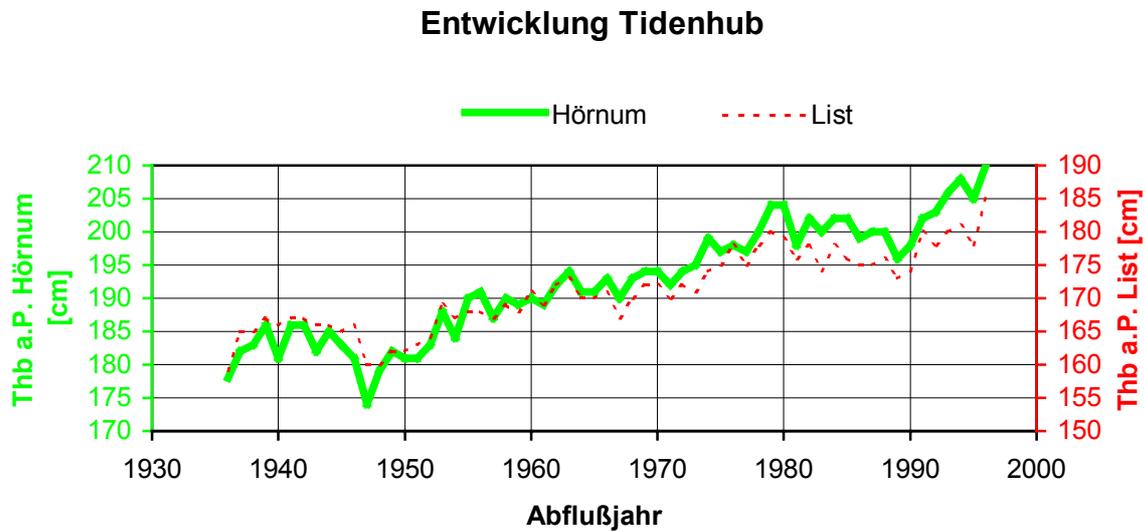
| Meßpfahl Westerland<br>bzw. W6 | Zeitraum:<br>01.07.1980-<br>30.06.1996 | Pegel List (Hafen)<br>Daten: WSA Tönning | Zeitraum:<br>01.07.1980-<br>30.06.1996 |
|--------------------------------|--|--|--|
| über NN+1,50 m                 | 81 Stunden/Jahr                        | über NN+2,00 m                           | 24 Stunden/Jahr                        |
| über NN+2,00 m                 | 16 Stunden/Jahr                        | über NN+2,40 m                           | 8 Stunden/Jahr                         |
| über NN+2,50 m                 | 215 Minuten/Jahr                       | über NN+2,80 m                           | 148 Minuten/Jahr                       |
| über NN+3,00 m                 | 33 Minuten/Jahr                        | über NN+3,20 m                           | 36 Minuten/Jahr                        |
| über NN+3,50 m                 | 0,2 Minuten/Jahr                       | über NN+3,60 m                           | 2 Minuten/Jahr                         |

Verweilzeiten a.P. List

**Abbildung 21: Verweildauern erhöhter Wasserstände a.P. List (1900-1996)**

Im Zeitraum 1936-1995 sind die kurzfristigen Schwankungen des Tidenhubs und der Tidefallgeschwindigkeiten von einer langfristigen

Trendentwicklung überlagert, die anhand der 5-jährig übergreifenden Mittelwerte zu erkennen ist (*Abbildung 22*).



**Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung des Tidenhubs und der Tidefallgeschwindigkeiten a.P. Hörnum - Hafen und a.P. List für den Zeitraum 1936-1995**

### 2.2.2 Strömung

Die vor Sylt gemessenen tide- bzw. brandungsinduzierten Strömungen sind örtlich und zeitlich sehr variabel, so daß Bemessungsströmungen aus den jeweils durchzuführenden Meßkampagnen abzuleiten sind. Für die Inselenden finden sich entsprechende Angaben in ALW (1994a,b). Im Riff - Rinne - System

wurden in Phase I und II des Forschungsvorhabens Meßkampagnen vor Rantum und Kampen durchgeführt (LWI 1994). Am Meßpfahl Westerland wird die Strömung in der Tiefe NN-8,5m seit 1987 kontinuierlich erfaßt.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten treten am südlichen Inselende im Vortrapptief zwischen Hörnum-Odde und Amrum während der Ebbströmung mit ca. 2 m/s auf. Am nördlichen Inselende sind maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Lister Tief auf Höhe des Salzsandes während der Ebbströmung mit ca. 1,5 m/s vorhanden.

Die Strömungsgeschwindigkeiten vor der Westküste Sylts sind seewärts der Brandungszone mit ca. 25 cm/s gering. Innerhalb der Brandungszone treten nur kurzfristig während energiereicher Zeiten mit ca. 100 cm/s größere Strömungsgeschwindigkeiten auf.

### 2.2.3 Seegang

Zur Ermittlung des Seegangsklimas wurden während des Forschungsvorhabens an mehreren Positionen Meßbojen ausgelegt. Eine ausführliche Dokumentation der Ergebnisse findet sich in FI (1994).

*Tabelle 6* gibt die entsprechenden Häufigkeiten der Seegangseignisse an der Referenzstation Westerland WAVEC (-13m Wassertiefe) für den Zeitraum 1986 bis 1993 an.

Aus den gemessenen Seegangsdaten wird der seegangserzeugte Energiefluß berechnet, wobei die angreifende Kraft in ihre Komponenten zerlegt wird (normal und tangential, d.i. parallel zur Küste). Bei dem küstenparallelen Energiefluß muß zwischen dem nach Norden und dem nach Süden gerichteten Energiefluß unterschieden werden. Die Ganglinien der Energieflußkomponenten, die 500 m seewärts der Küste im Abschnitt zwischen Rantum und

Kampen berechnet wurden, sind in *Abbildung 23* aufgetragen, so daß die Schwankungsbreite des Energieflusses (Sommer-, Winterhalbjahr) hervortritt.

Der fünfjährig - gemittelte Energiefluß, der an der NN-4m - Tiefenlinie vor Rantum und Kampen berechnet wird, ist in *Tabelle 7* aufgeführt.

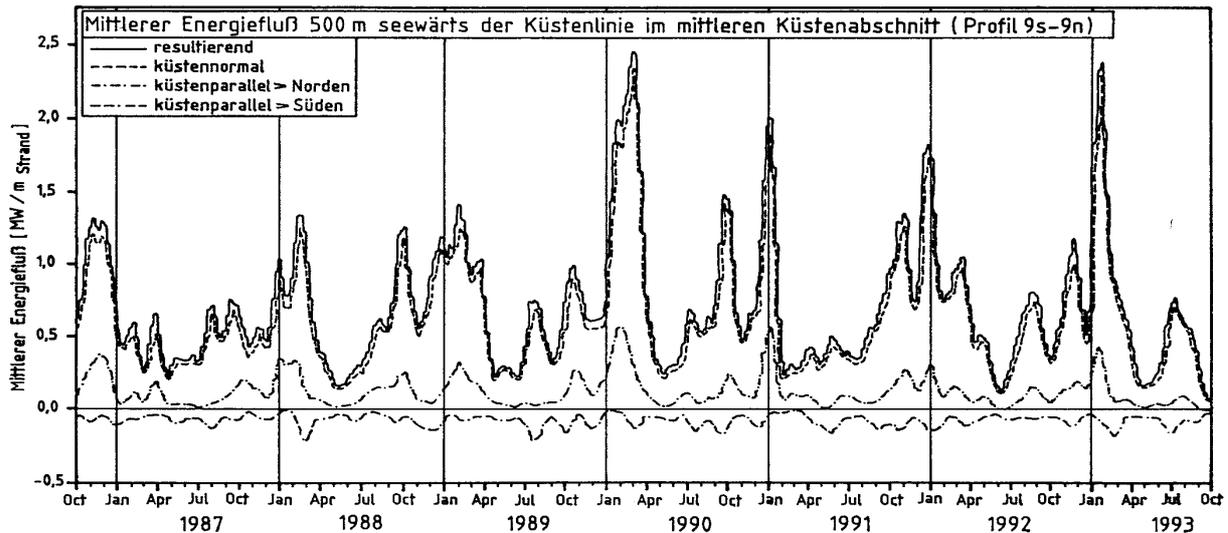
Im Rahmen des langfristigen Meßkonzeptes sind ergänzende maßnahmenbezogene Seegangsmessungen an den Inselenden erforderlich, um dort spezielle Seegangseffekte im Flachwasser- bzw. Rinnenbereich zu erfassen (ALW 1994a, SCHALLER & HINRICHSSEN 1994). Sie sollen dazu dienen, die Bemessungsgrundlagen für die funktionelle und konstruktive Planung von baulichen Maßnahmen an den Inselenden abzusichern.

Tabelle 6: Prozentuale Häufigkeiten der Seegangereignisse (10.1986-09.1993)

| a) prozentuale Häufigkeit | mittlere Wellenanlaufriechung [°]<br>Sektorbreite ± 15° |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Σ      |
|---------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           | 0   | 30     | 60     | 90     | 120    | 150    | 180    | 210    | 240    | 270    | 300    | 330    |        |
| Wellenhöhe [cm]           |   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 0-25                      | 0,1047  | 0,0654 | 0,0442 | 0,0245 | 0,0278 | 0,0196 | 0,0164 | 0,1276 | 0,2798 | 0,7134 | 0,9539 | 0,3289 | 2,706  |
| 25-50                     | 1,1895  | 1,2534 | 0,7428 | 0,4336 | 0,4123 | 0,4123 | 0,7265 | 1,4088 | 1,7213 | 2,7898 | 5,6286 | 3,0892 | 19,808 |
| 50-75                     | 0,7608  | 0,3583 | 0,2814 | 0,2209 | 0,1473 | 0,2323 | 0,7805 | 1,3123 | 2,5296 | 3,1939 | 5,8152 | 4,0022 | 19,635 |
| 75-100                    | 0,4221  | 0,1014 | 0,0622 | 0,0164 | 0,0131 | 0,0164 | 0,2258 | 0,9310 | 2,6180 | 3,1416 | 4,7467 | 2,2416 | 14,536 |
| 100-125                   | 0,2503  | 0,0065 | 0,0098 | 0,0082 | 0,0016 | 0,0131 | 0,0524 | 0,5743 | 2,7276 | 3,3166 | 3,8353 | 1,5364 | 12,332 |
| 125-150                   | 0,1293  | 0,0049 | 0,0049 | 0,0033 |        |        | 0,0033 | 0,2356 | 1,8604 | 2,4609 | 2,8912 | 1,2664 | 8,860  |
| 150-175                   | 0,0229  |        |        |        |        |        | 0,0016 | 0,2045 | 1,4841 | 2,0747 | 2,0093 | 0,7494 | 6,547  |
| 175-200                   | 0,0115  |        |        |        |        |        |        | 0,1064 | 0,9997 | 1,5217 | 1,5184 | 0,4369 | 4,595  |
| 200-225                   | 0,0016  |        |        |        |        |        |        | 0,0753 | 0,7674 | 1,2288 | 1,1928 | 0,2062 | 3,472  |
| 225-250                   |   |        |        |        |        |        |        | 0,0180 | 0,5498 | 0,8230 | 0,8917 | 0,1276 | 2,410  |
| 250-275                   |   |        |        |        |        |        |        | 0,0082 | 0,3452 | 0,6921 | 0,6021 | 0,0409 | 1,689  |
| 275-300                   |   |        |        |        |        |        |        | 0,0016 | 0,2438 | 0,4761 | 0,3714 | 0,0278 | 1,121  |
| 300-325                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,1260 | 0,3174 | 0,2389 | 0,0049 | 0,687  |
| 325-350                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,0720 | 0,2471 | 0,1685 | 0,0033 | 0,491  |
| 350-375                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,0654 | 0,1816 | 0,1734 |        | 0,421  |
| 375-400                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,0393 | 0,1325 | 0,1047 |        | 0,277  |
| 400-425                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,0164 | 0,0818 | 0,0834 |        | 0,182  |
| 425-450                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,0098 | 0,0818 | 0,0540 |        | 0,146  |
| 450-475                   |   |        |        |        |        |        |        |        | 0,0033 | 0,0327 | 0,0098 |        | 0,046  |
| 475-500                   |   |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0278 |        |        | 0,028  |
| 500-525                   |   |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0082 | 0,0016 |        | 0,010  |
| 525-550                   |   |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0033 |        |        | 0,003  |
| 550-575                   |   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Σ                         | 2,893   | 1,790  | 1,145  | 0,707  | 0,602  | 0,694  | 1,806  | 5,004  | 16,459 | 23,547 | 31,291 | 14,062 | 100    |

| b) zugehörige Periode T <sub>02</sub> [s] | Wellenanlaufriechung [°]<br>Sektorbreite ± 15° |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   | 0  | 30  | 60  | 90  | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| Wellenhöhe [cm]                           |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0-25                                      | 2,8  | 2,4 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,5 | 2,8 | 3   | 3,5 | 4,4 | 3,4 |
| 25-50                                     | 3,2  | 3   | 2,9 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,3 | 3,7 | 4,2 | 3,7 |
| 50-75                                     | 3,4  | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | 3,7 |
| 75-100                                    | 3,7  | 3,3 | 3,1 | 3,2 | 4   | 3,8 | 3,5 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | 4,2 | 3,9 |
| 100-125                                   | 3,9  | 4   | 3,3 | 3,2 | 4,1 | 4,2 | 3,9 | 4   | 4,2 | 4,3 | 4,3 | 4,1 |
| 125-150                                   | 4,2  | 4,3 | 3,8 | 3,5 |     |     | 4   | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,5 | 4,4 |
| 150-175                                   | 4,3  |     |     |     |     |     | 4,2 | 4,5 | 4,7 | 4,7 | 4,7 | 4,6 |
| 175-200                                   | 4,8  |     |     |     |     |     | 4,8 | 4,9 | 5   | 5   | 4,9 |     |
| 200-225                                   | 4,6  |     |     |     |     |     | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,2 |
| 225-250                                   |  |     |     |     |     |     | 5,4 | 5,4 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| 250-275                                   |  |     |     |     |     |     | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,8 | 5,8 | 5,8 |
| 275-300                                   |  |     |     |     |     |     | 5,9 | 5,9 | 6   | 6   | 6   | 6   |
| 300-325                                   |  |     |     |     |     |     |     | 6,1 | 6,2 | 6,3 | 6,6 | 6,6 |
| 325-350                                   |  |     |     |     |     |     |     | 6,3 | 6,4 | 6,6 | 6,5 |     |
| 350-375                                   |  |     |     |     |     |     |     | 6,7 | 6,7 | 6,9 |     |     |
| 375-400                                   |  |     |     |     |     |     |     | 6,9 | 7   | 7,1 |     |     |
| 400-425                                   |  |     |     |     |     |     |     | 7,1 | 7,2 | 7,4 |     |     |
| 425-450                                   |  |     |     |     |     |     |     | 7,5 | 7,5 | 7,5 |     |     |
| 450-475                                   |  |     |     |     |     |     |     | 7,6 | 7,8 | 7,6 |     |     |
| 475-500                                   |  |     |     |     |     |     |     |     | 7,9 |     |     |     |
| 500-525                                   |  |     |     |     |     |     |     |     | 8,2 | 8,2 |     |     |
| 525-550                                   |  |     |     |     |     |     |     |     | 8,1 |     |     |     |
| 550-575                                   |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

| c) Wasserstand [m PN] | Wellenanlaufriechung [°]<br>Sektorbreite ± 15° |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                       | 0  | 30   | 60   | 90   | 120  | 150  | 180  | 210  | 240  | 270  | 300  | 330  |
| Wellenhöhe [cm]       |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0-25                  | 4,74   | 4,65 | 4,85 | 4,46 | 4,31 | 4,83 | 4,96 | 4,64 | 4,78 | 4,70 | 4,74 | 4,75 |
| 25-50                 | 4,65   | 4,70 | 4,66 | 4,52 | 4,67 | 4,74 | 4,74 | 4,71 | 4,87 | 4,84 | 4,80 | 4,77 |
| 50-75                 | 4,64   | 4,46 | 4,37 | 4,46 | 4,60 | 4,70 | 4,73 | 4,87 | 4,92 | 4,89 | 4,90 | 4,80 |
| 75-100                | 4,50   | 4,20 | 3,87 | 3,96 | 4,12 | 4,40 | 4,57 | 4,88 | 5,04 | 4,99 | 4,98 | 4,91 |
| 100-125               | 4,49   | 4,63 | 3,05 | 2,97 | 3,76 | 3,76 | 4,63 | 4,92 | 5,10 | 5,12 | 5,04 | 4,93 |
| 125-150               | 4,46   | 4,95 | 4,12 | 3,86 |      |      | 5,36 | 5,04 | 5,17 | 5,23 | 5,15 | 4,90 |
| 150-175               | 4,82   |      |      |      |      |      | 5,08 | 5,02 | 5,25 | 5,30 | 5,19 | 5,09 |
| 175-200               | 4,72   |      |      |      |      |      |      | 5,01 | 5,29 | 5,44 | 5,30 | 5,17 |
| 200-225               | 4,67   |      |      |      |      |      |      | 5,11 | 5,48 | 5,53 | 5,38 | 5,21 |
| 225-250               |  |      |      |      |      |      |      | 5,01 | 5,57 | 5,67 | 5,46 | 5,27 |
| 250-275               |  |      |      |      |      |      |      | 5,17 | 5,53 | 5,76 | 5,57 | 5,41 |
| 275-300               |  |      |      |      |      |      |      | 6,26 | 5,61 | 5,82 | 5,71 | 5,46 |
| 300-325               |  |      |      |      |      |      |      |      | 5,75 | 5,89 | 5,84 | 5,76 |
| 325-350               |  |      |      |      |      |      |      |      | 5,99 | 6,14 | 6,02 | 5,62 |
| 350-375               |  |      |      |      |      |      |      |      | 6,31 | 6,24 | 6,17 |      |
| 375-400               |  |      |      |      |      |      |      |      | 6,23 | 6,47 | 6,42 |      |
| 400-425               |  |      |      |      |      |      |      |      | 6,43 | 6,56 | 6,56 |      |
| 425-450               |  |      |      |      |      |      |      |      | 6,48 | 6,73 | 7,00 |      |
| 450-475               |  |      |      |      |      |      |      |      | 7,45 | 7,07 | 7,12 |      |
| 475-500               |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 7,51 |      |      |
| 500-525               |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 7,24 |      |      |
| 525-550               |  |      |      |      |      |      |      |      |      | 7,59 |      |      |
| 550-575               |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



**Abbildung 23: Ganglinien der mittleren Energieflußkomponenten 500m seewärts der Küstenlinie im Küstenbereich zwischen Rantum und Kampen im Zeitraum Oktober 1986 bis September 1993**

**Tabelle 7: Mittlerer Energiefluß an der NN-4m - Linie vor Rantum und Kampen**

| mittlerer Energiefluß            | Zeitraum:<br>01.07.1988-30.06.1996<br>Ort: Rantum (12s)<br>[kW/m] | Zeitraum:<br>01.07.1988-30.06.1996<br>Ort: Kampen (12n)<br>[kW/m] |
|----------------------------------|---|---|
| Gesamtkomponente                 | 3,41 kW/m   | 3,36 kW/m   |
| Normalkomponente                 | 3,25 kW/m   | 3,17 kW/m   |
| Längskomponente<br>(nach Süden)  | 0,51 kW/m   | 0,26 kW/m   |
| Längskomponente<br>(nach Norden) | 0,35 kW/m   | 0,60 kW/m   |

## 2.2.4 Wind

Der Wind ist die Ursache für den auftretenden Seegang und den Windstau, so daß eine Beobachtung und Bewertung des Windes sinnvoll ist. *Abbildung 24* und *Tabelle 8* enthält die Häufigkeitsverteilung des Windes in einer Höhe von 10m über der veränderlichen Wasseroberfläche am Meßpfahl Westerland für den Zeitraum 01.01.1988 bis 31.12.1996. Im Zusammenhang mit der Bewertung der mor-

phologischen Veränderungen sind die aufgetretenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen von Bedeutung.

Die häufigsten Windrichtungen kommen aus SW bis NW, während die stärksten Windgeschwindigkeiten aus S bis NNW beobachtet werden.

## Windverteilung Meßfahl Westerland

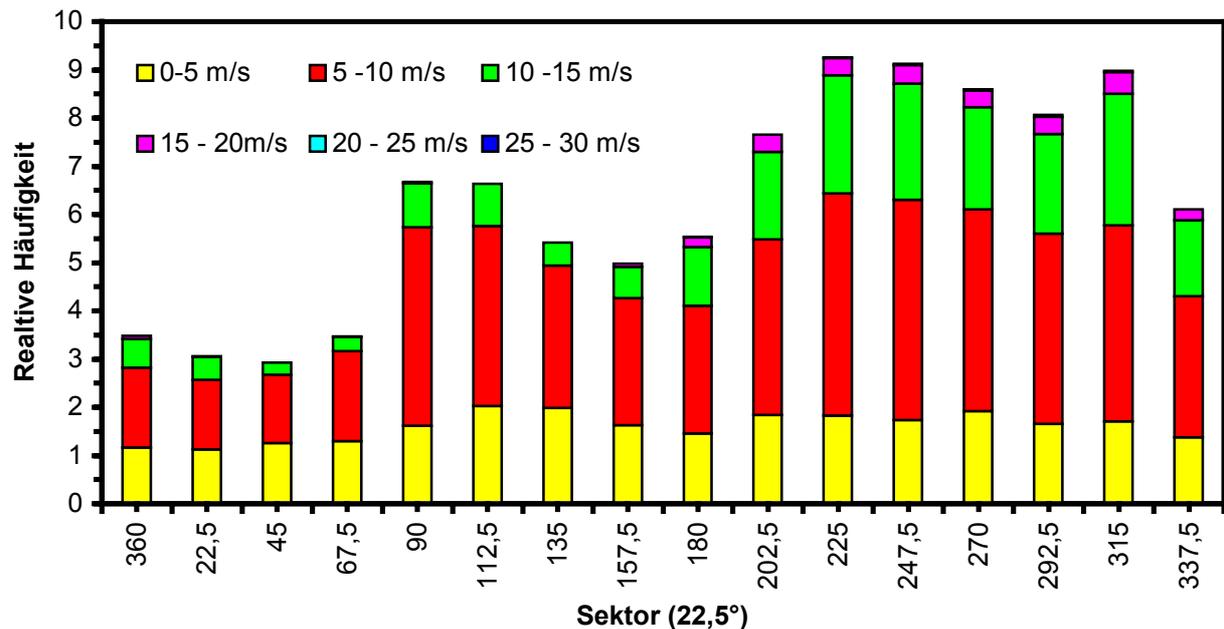


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung des Windes am Meßfahl Westerland (1.1.88-31.12.96)

Tabelle 8: Häufigkeitsverteilung des Windes am Meßfahl Westerland (1.1.1988-31.12.1996)

| Richtung | 22,5°-<br>Sektor   | 0-5<br>( m/s) | 5 -10<br>( m/s) | 10 -15<br>( m/s) | 15 - 20<br>( m/s) | 20 - 25<br>( m/s) | 25 - 30<br>( m/s) | Summe<br>( h ) | Anteil<br>( % ) |
|----------|--------------------|---------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| Nord     | 360                | 1,17          | 1,65            | 0,6              | 0,06              | 0                 |                   | 2671           | 3,5             |
|          | 22,5               | 1,13          | 1,44            | 0,47             | 0,02              |                   |                   | 2351           | 3,1             |
| Nordwest | 45                 | 1,26          | 1,41            | 0,26             | 0                 |                   |                   | 2249           | 2,9             |
|          | 67,5               | 1,3           | 1,87            | 0,29             | 0,01              |                   |                   | 2652           | 3,5             |
| Ost      | 90                 | 1,61          | 4,12            | 0,92             | 0,02              |                   |                   | 5107           | 6,7             |
|          | 112,5              | 2,02          | 3,74            | 0,87             | 0,01              |                   |                   | 5089           | 6,6             |
| Südost   | 135                | 1,99          | 2,95            | 0,48             | 0                 |                   |                   | 4157           | 5,4             |
|          | 157,5              | 1,63          | 2,63            | 0,65             | 0,07              |                   |                   | 3822           | 5               |
| Süd      | 180                | 1,46          | 2,64            | 1,22             | 0,2               | 0,01              |                   | 4240           | 5,5             |
|          | 202,5              | 1,84          | 3,65            | 1,81             | 0,35              | 0,01              |                   | 5861           | 7,7             |
| Südwest  | 225                | 1,83          | 4,61            | 2,45             | 0,35              | 0,02              | 0                 | 7095           | 9,3             |
|          | 247,5              | 1,74          | 4,56            | 2,41             | 0,39              | 0,03              | 0                 | 6995           | 9,1             |
| West     | 270                | 1,92          | 4,19            | 2,12             | 0,34              | 0,02              | 0                 | 6581           | 8,6             |
|          | 292,5              | 1,65          | 3,95            | 2,07             | 0,35              | 0,04              |                   | 6166           | 8,1             |
| Nordwest | 315                | 1,71          | 4,07            | 2,72             | 0,45              | 0,03              |                   | 6878           | 9               |
|          | 337,5              | 1,38          | 2,92            | 1,58             | 0,22              | 0                 |                   | 4672           | 6,1             |
|          | Summe<br>(Stunden) | 19639         | 38611           | 16020            | 2185              | 128               | 3                 | 76586          | -               |
|          | Summe<br>( % )     | 25,64         | 50,42           | 20,92            | 2,85              | 0,17              | 0                 | -              | 100             |
|          |                    |               |                 |                  |                   | Ausfall           |                   | 2326           | 2,9             |
|          |                    |               |                 |                  |                   | Gesamt            |                   | 78912          |                 |

Die für den Zeitraum 01.07.1989 bis 30.06.1994 berechnete Windwirkung, die sich

nach der Gleichung (S. 257) (ALW 1994a) ergibt, ist in *Tabelle 9* angegeben:

**Tabelle 9: Mittlere Windwirkung am Meßfahl Westerland und an der Station List**

|  |  |  |
|--|--|--|
| Windwirkung<br>gem. Gl. S.257<br>(ALW 1994a) | Station:<br>Meßfahl Westerland<br><br>Zeitraum:<br>01.01.1988-30.06.1996 | Station:<br>List<br><br>Daten:<br>Deutscher Wetterdienst<br><br>Zeitraum:<br>01.07.1980-30.06.1996 |
| West   | 811 Stunden/Jahr   | 931 Stunden/Jahr   |
| Nordwest                                     | 804 Stunden/Jahr   | 728 Stunden/Jahr   |
| Südwest                                      | 846 Stunden/Jahr   | 730 Stunden/Jahr   |
| Ost  | 727 Stunden/Jahr   | 727 Stunden/Jahr   |

Um die langfristige Veränderung der Häufigkeiten der Windrichtungen zu bestimmen, wurde die jährliche Häufigkeit von West- und Ostwindlagen berechnet, wobei die Trennung der Anteile durch die Nord - Süd - Achse der Windrose erfolgt. Die Darstellung der jährlichen Mittelwerte der Häufigkeiten im Zeitraum 1950-1995 zeigt eine Zunahme von Westwindlagen im Zeitraum Mitte der 70-er Jahre bis ca. 1990 (*Abbildung 25*). Diese Zunahme der meteorologischen Belastungen dürfte zu gewissen morphologischen Veränderungen geführt haben, die jedoch nicht mit

Hilfe der vorhandenen Vermessungen zu quantifizieren sind. Möglicherweise sind die Ausräumungen des Küstenvorfeldes an den Inselenden darauf zurückzuführen.

Aus den langfristigen Beobachtungen sind Hinweise vorhanden, die aufzeigen, daß die Kenngrößen des Wetter- und Klimageschehens größeren Schwankungen ausgesetzt sind. Daher besteht durchaus die Möglichkeit einer Verringerung der Wind- und Sturmbelastung für die Nordseeküste in den nächsten Dekaden.

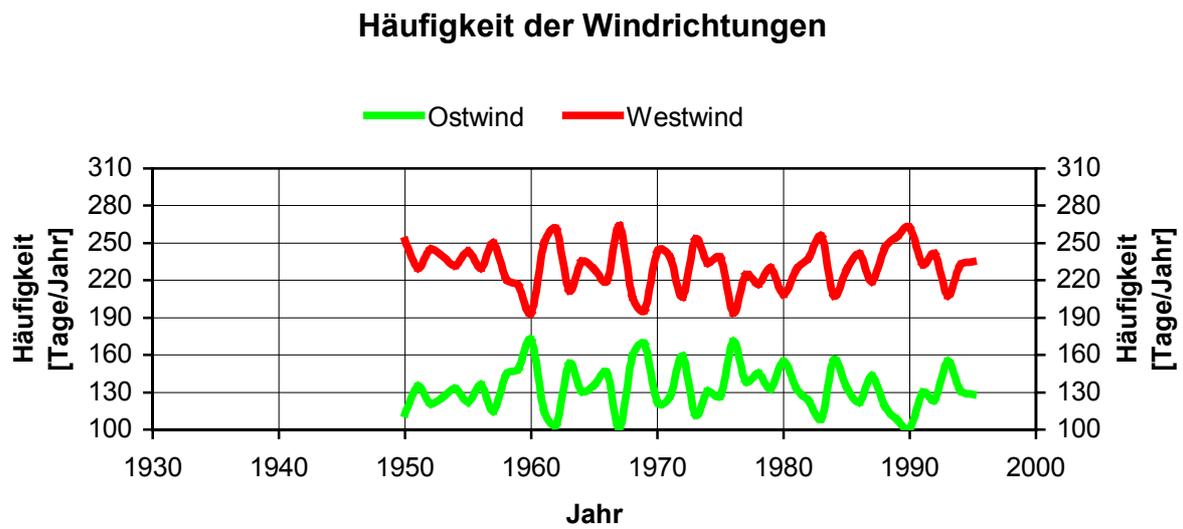


Abbildung 25: *Ganglinie der Häufigkeit von Winden aus den Ost- und Westsektoren an der Station List im Zeitraum 1950-1995 (Daten: Deutscher Wetterdienst, Offenbach)*

## 2.3 Untersuchung baulicher Maßnahmen (1986-1993)

### 2.3.1 Technische Kennblätter

Für eine Optimierung des Küstenschutzes standen verschiedene Lösungskonzepte zur Verfügung:

- Verzicht auf Küstenschutzmaßnahmen
- Erhalt der Küstenlinie in seiner heutigen Lage
- Teilweise Vorverlegung der Küstenlinie durch Errichtung von Festpunkten

Der Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein, Fortschreibung 1986 sieht für den Schutz der Sylter Westküste Sandaufspülungen vor. In dem am 1.1.1992 in Kraft getretenen, geänderten Landeswassergesetz wird in §63 die gesetzliche Grundlage für den Küstenschutz der Insel wie folgt benannt:

"Die Sicherung der Küsten, sowie der Watt-, Insel- und Halligsockel, die im Interesse des Wohls der Allgemeinheit erforderlich ist, ist eine öffentliche Aufgabe des Landes. ..."

Zur Küstensicherung ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Sandaufspülungen
- Sandaufspülungen mit ergänzenden baulichen Maßnahmen
- Maßnahmen im Küstenvorfeld

Für die Beurteilung wurden zunächst technische Kennblätter erarbeitet, in denen eine Konzeption und eine qualitative Bewertung möglicher baulicher Maßnahmen auf der Basis bislang vorliegender Fachkenntnisse vorgenommen wurde. Darin ist die grundsätzliche Schutzwirkung von Bauwerken unter Berücksichtigung bestimmter hydrologischer und baulicher Eingangsgrößen und ihre hydrodynamische Wirkungsweise beschrieben.

Tabelle 10 enthält das Inhaltsverzeichnis der Kennblätter, wobei die Kennblätter im Schlußbericht des ALW (1994a) aufgeführt sind. Einige Standardbauweisen sind bereits

im Fachplan Küstenschutz Sylt (ALW 1985) behandelt.

Es wurden Küstenschutzbauweisen im Offshore-, Riff-, Rinnen- und Strandbereich sowie an der Abbruchkante betrachtet und deren Wirkung bei maßgebenden Wasserständen (NN+4,50 m, NN+2,50 m, NN±0 m) in Verbindung mit der Bemessungswelle beschrieben.

Auf der Grundlage der in den Kennblättern enthaltenen vorläufigen geometrischen Konfigurationen wurden Massen- und Kostenermittlungen durchgeführt. Die Kostenbetrachtungen enthalten sowohl die Herstellungs- und Unterhaltungskosten als auch die Abschreibung und Verzinsung nach dem heutigen Stand.

Das Bearbeitungskonzept sah vor, daß auf der Basis der technischen Kennblätter und der Kostenermittlung eine Beurteilungsmatrix gebildet wird. Diese Matrix, die eine rein qualitative Bewertung der Baumaßnahmen darstellt, bildete die Grundlage für die Ermittlung derjenigen Baumaßnahmen, die in Modellstudien detailliert untersucht wurden. Anschließend war das Konzept für den Küstenschutz der Insel Sylt festzulegen (*Abbildung 26*).

Um die lokalen Besonderheiten der Sylter Westküste und der Inselenden besser erfassen und damit auch die für die jeweiligen Inselbereiche optimalen Baumaßnahmen bestimmen zu können, wurde in Abhängigkeit der Hochwassergefährdung, durch die Hauptwellenangriffsrichtung sowie den geologischen und anthropogenen Gegebenheiten, eine Aufteilung in einzelne Inselabschnitte vorgenommen (*Abbildung 27*).

Von der im Fachplan (ALW 1985) vorgenommenen Einteilung wurde somit unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse geringfügig abgewichen.

**Tabelle 10: Inhaltsverzeichnis der Kennblätter**

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| A.) Offshorebereich                            |                                   |
| I. Starrer Wellenbrecher                       |                                   |
| II. Schwimmender Wellenbrecher                 |                                   |
| B.) Riffbereich                                |                                   |
| III.   | a. Rifferhöhung                   |
|  | b. Riffergänzung                  |
| C.) Rinnenbereich                              |                                   |
| IV. Bühnen                                     | a. bis zum Riff                   |
|  | b. in der Rinne                   |
|  | c. T-Bühnen                       |
| V. Bodenschwellen                              | - Verbau der Rinne                |
|  | - Teilverbau der Rinne            |
| VI. Rauhigkeitselemente                        | a. am Strand                      |
|  | b. in der Rinne                   |
| VII. Auffüllen der Rinne (Aufspülen)           |                                   |
| VIII. Höftaufspülung                           |                                   |
| IX. Unterwasserdeckwerk                        |                                   |
| D.) Trockener Strand                           |                                   |
| X. Sandaufspülungen                            | - Längssandaufspülung             |
|  | - Depotsandaufspülung             |
| XI. Biotechnische Maßnahmen                    | - Sandfangzäune                   |
|  | - Halmpflanzungen etc.            |
| XII. Geotextile Sperre                         | a. im Vorspülkörper mit Sanddepot |
|  | b. als Objektschutz               |
| XIII. Verfestigung, chemisch oder physikalisch |                                   |
| E.) Düne und Kliff                             |                                   |
| XIV. Massive Bauweisen                         |                                   |
| XV. Dünenverstärkung                           |                                   |
| F.) Maßnahmen an den Inselenden                |                                   |
| XVI. Endschwellen                              |                                   |

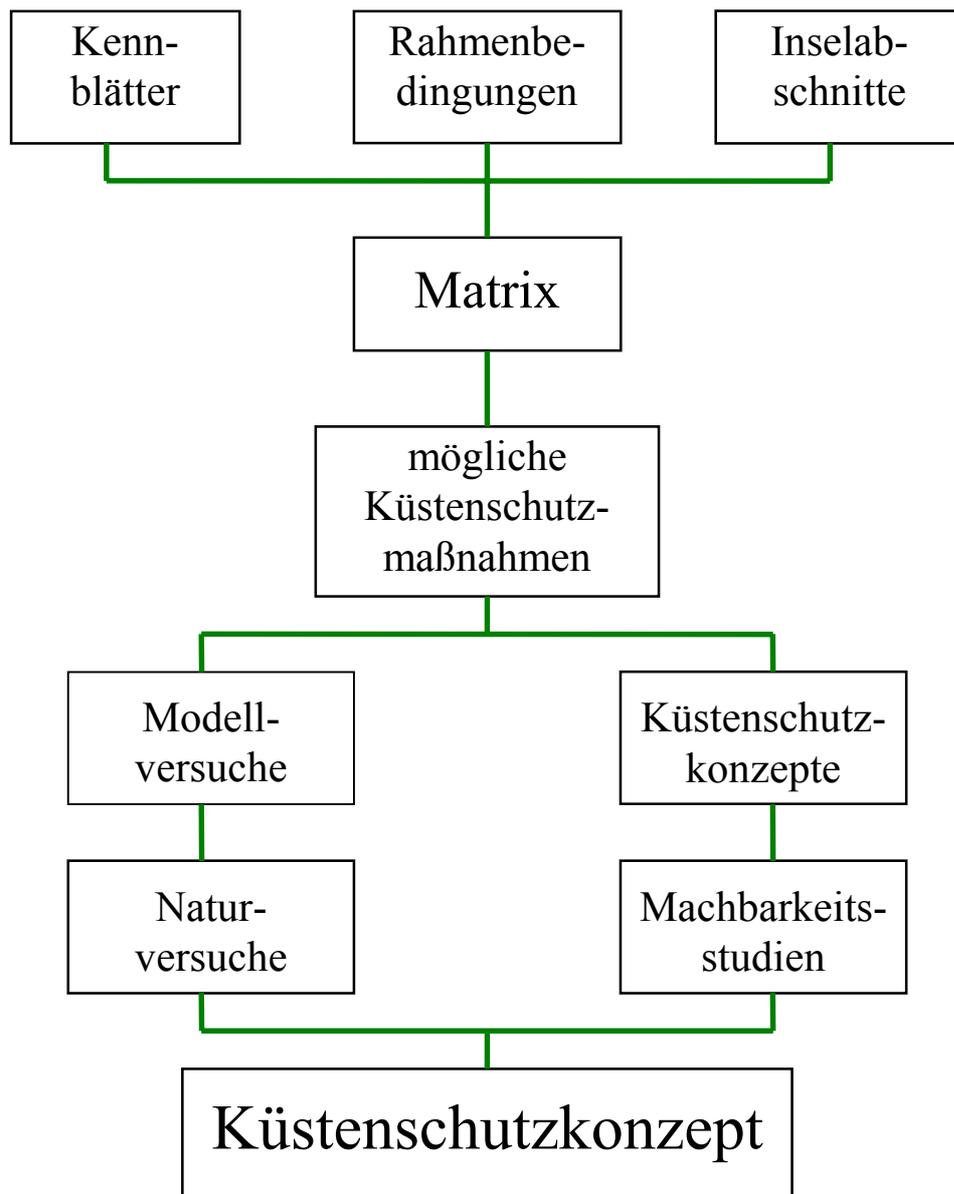


Abbildung 26: Bearbeitungsablauf zur Festlegung optimaler Küstenschutzmaßnahmen

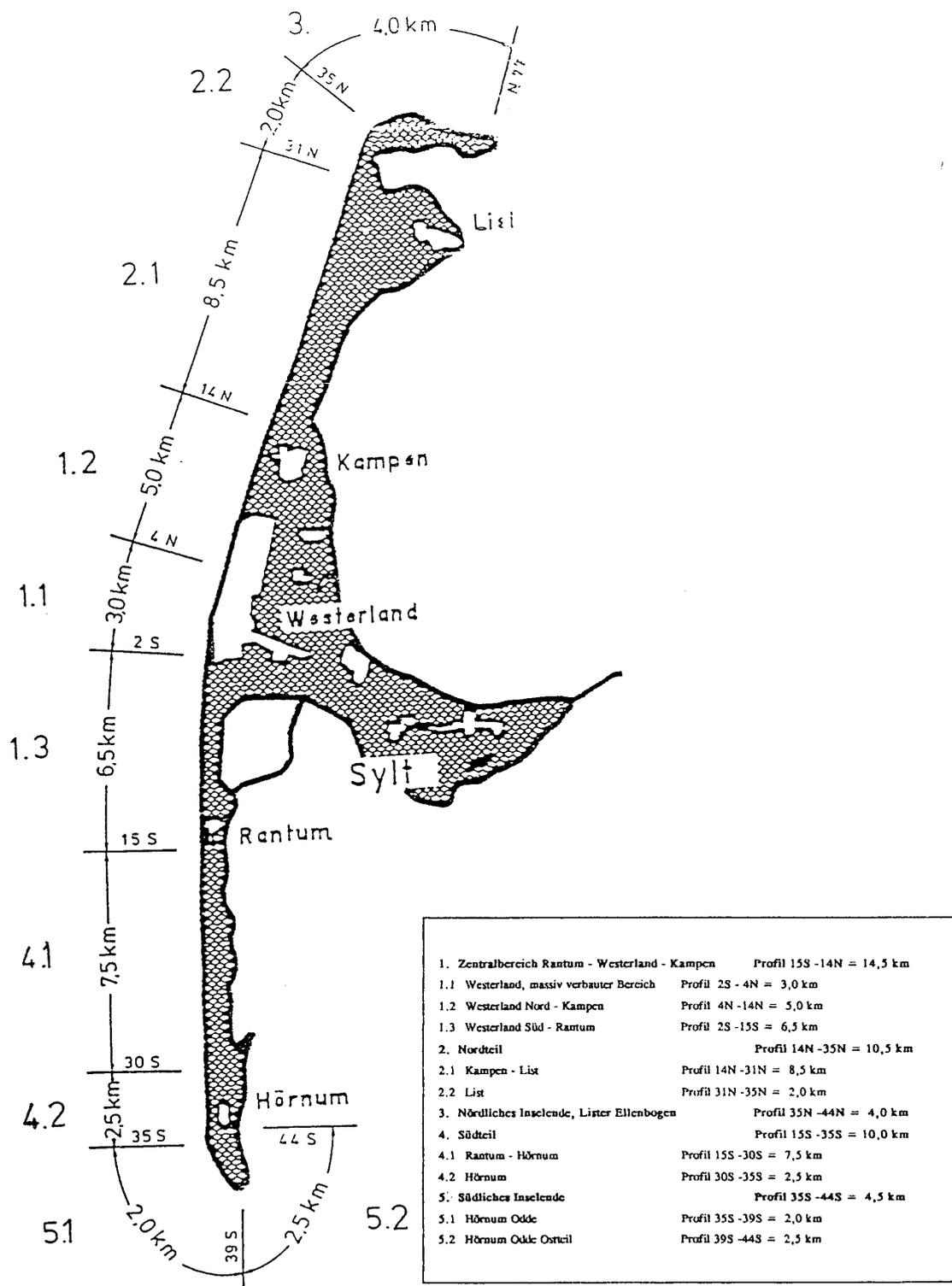


Abbildung 27: Einteilung der Westküste von Sylt und der Inselenden in Abschnitte

### 2.3.2 Bewertungsmatrizen

Die Überprüfung der Verwendbarkeit von Küstenschutzmaßnahmen in den jeweiligen Küstenabschnitten erfolgte an Hand von Rahmenbedingungen, die nachfolgend erläutert werden:

1. Erhalt der Küstenlinie in der Lage (1992)
  - Sicherung der Inselsubstanz und der Bebauung
  - Ein zeitlich begrenzter Rückgang der Küstenlinie ist tolerierbar, wenn die Möglichkeit, die bisherige Küstenlinie wiederherzustellen, bestehen bleibt
2. Vermeiden negativer Einflüsse auf die Nachbarbereiche
  - Durch Erosion
  - Durch Verminderung der Sedimentzufuhr
  - Erhöhung des Energieeintrages
3. Minimieren der Umweltbeeinflussung
  - Auftreten ökologischer Schäden
  - Verwendung ortsfremder Materialien
4. Erhalt des Sandstrandes
  - Als Energieumwandlungszone bei Sturmfluten
5. Akzeptanz für den Tourismus
  - Nutzungsmöglichkeiten für den Fremdenverkehr

Für jeden Inselabschnitt erfolgte eine gesonderte Wichtung der Rahmenbedingungen, um die Besonderheiten der Küstenabschnitte und die daraus resultierende unterschiedliche Bedeutung der Beurteilungskriterien zu berücksichtigen, wobei die jeweils betrachtete Küstenschutzmaßnahme möglichst jede dieser Rahmenbedingungen erfüllen sollte. Hierbei wurden auch Kombinationsmöglichkeiten von baulichen Maßnahmen aufgezeigt.

Die Überprüfung der Baumaßnahmen in der Matrix, die von den am Forschungsvorhaben beteiligten Instituten und dem ALW Husum vorgenommen wurde, führte zu einer einheitlichen Rangfolge der Baumaßnahmen.

In allen Inselabschnitten haben die Sandaufspülungen (Längssandaufspülung und Höftsandaufspülung) die beste Bewertung erhalten. Alle anderen betrachteten Baumaß-

nahmen wurden weniger hoch bewertet und sind nicht geeignet, als alleinige Baumaßnahmen die Sandaufspülungen zu ersetzen.

Auch folgende Baumaßnahmen wurden positiv beurteilt:

- Endschwellen
- Maßnahmen am Riff
- Geotextile Sperre im Vorspülkörper
- Geotextiler Objektschutz
- Bodenschwellen

Diese Baumaßnahmen sowie verschiedene Formgebungen für Sandaufspülungen wurden in Modellstudien weiter untersucht (SI 1994).

Die auch als positiv bewertete Baumaßnahme Dünenverstärkung ist als notwendige und sinnvolle Ergänzung zu einer Sandaufspülung in Profilen mit schmaler Randdüne zu betrachten und stellt kein Küstenschutzkonzept für komplette Inselabschnitte dar. Ebenso sind die Biotechnischen Maßnahmen als Ergänzung jeder Art von Aufspülung zu betrachten, deren Wirkung nicht gesondert in weitergehenden Studien belegt werden muß. Ihre sandfangende Wirkung und damit der Beitrag zum aktiven Küstenschutz ist bei den breiten Stränden infolge der Aufspülungen von besonderer Bedeutung (ALW 1994a).

Mit den betrachteten Maßnahmen steht eine Auswahl von Küstenschutzmöglichkeiten zur Verfügung, deren Anwendung nach den Rahmenbedingungen unter Abwägung der Vor- und Nachteile in der Matrix bewertet worden sind.

Sollten sich in Zukunft wirtschaftlich und technisch machbare Küstenschutzmaßnahmen als Lösung herausstellen, die den Rahmenbedingungen nicht genügen, so sind diese ggf. zu modifizieren.

Sonderbauweisen sind, sofern sie nicht mit den betrachteten Maßnahmen vergleichbar sind, gesondert behandelt worden (s. ALW 1994a).

### 2.3.3 Entwicklung von Instrumentarien

Ein Schwerpunkt der Phase II des Forschungsvorhabens lag in der Entwicklung und Anwendung von mathematischen Modellen. Die Modelle müssen dabei die natürlichen Vorgänge wie den Längstransport und Quertransport beschreiben. Z.T. besteht die Möglichkeit diese Vorgänge getrennt voneinander zu betrachten, so daß sich bei der Beschreibung auf eine (räumliche) Dimension beschränkt werden kann (Längs- bzw. Quertransport). Diese Modelle erfordern geringeren Rechenaufwand.

Für bauliche Maßnahmen und bei ausgeprägten Riff - Rinne - Strukturen sind diese Vorgänge jedoch nicht mehr isoliert voneinander zu betrachten, so daß ein gekoppeltes Strömungs- und Wellenmodell sowie ein dreidimensionales Strömungsmodell entwickelt worden ist. Diese (vollständigeren) Modelle sind hingegen rechenintensiv, so daß i.d.R. nur einzelne Zustände simuliert werden können. Mit Hilfe statistischer Verfahren sind die Ergebnisse der Modellrechnungen den Naturvorgängen zuzuordnen.

Der grundsätzliche Aufbau der Modelle ist jeweils gleich und besteht aus den Elementen

- Eingabe (Randbedingungen: z.B. Topographie, Wasserstand, Seegang, Kornverteilung)
- Modell (Berechnungsansätze: z.B. Gleichungen, Parameter, Konstanten)
- Ausgabe (Ergebnisse: z.B. Sedimenttransport, Strömung, Wasserstand)

Die Qualität der Modellergebnisse hängt dabei auch von der Wahl der entsprechenden Randbedingungen ab: Stimmt z.B. die Ausgangstopographie im Modell nicht mit der Natur überein, so werden die Ergebnisse entsprechend ungenau sein.

Folgende Modelle sind entwickelt worden:

- Längstransportmodell / Energieflußmodul
- Dünenabbruchmodell
- Strömungsmodell zur Kopplung von Tide und Welle
- Dreidimensionales Strömungsmodell
- gekoppeltes kleinräumiges Strömungs- und Wellenmodell

Das Wellenmodell zur Berechnung des langkämmigen Seegangs wurde um die iterative Kopplung mit der Tide (Strömung, Wasser-

stand) erweitert und für eine Anzahl von Baumaßnahmen angewendet. Aufgrund der für die Brandungszone notwendigen hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung war der Bearbeitungsaufwand groß, so daß das Modell für ingenieur - praktische Anwendungen z.Z. nur mit Hilfe von Relativbetrachtungen verschiedener idealisierter geometrischer Grundformen verwendbar ist. Aufgrund des hohen Rechenzeitbedarfes werden keine Spektren simuliert.

Das Modell wurde mit den zur Verfügung stehenden Daten aus Phase I verifiziert. Der Einsatz des gekoppelten Modells lieferte qualitative Informationen über die Wirkungsweise von Baumaßnahmen (Höft, Girlanden, Längssandaufspülung, Rifferhöhung und -ergänzung) (SI 1994).

Auf der Basis des gekoppelten kleinräumigen Strömungs- und Wellenmodells wurde ein Sedimenttransportmodell weiterentwickelt, das noch keine unterschiedlichen Korngrößenzusammensetzungen berücksichtigt. Quantitative Angaben über den Sandhaushalt sind damit z.Z. nicht möglich.

Die realen Vorgänge bei Eingriffen mit Baumaßnahmen im Küstenvorfeld müssen durch die gleichzeitige Betrachtung des Längs- und Quertransportes beschrieben werden. Dazu wurde ein Modell erstellt, das die durch die Wirkung von Tide und Welle hervorgerufenen Strömungen flächenhaft berechnet. Damit die grundsätzliche Wirkung von baulichen Eingriffen bestimmt werden konnte, wurden die zu untersuchenden Baumaßnahmen in einer idealisierten Topographie simuliert. Folgende Zustände wurden berechnet: Referenzzustand, Längssandaufspülung, Höft, Doppelhöft und Rifferhöhung/-verbreiterung

Mit dem gekoppelten Strömungs- und Wellenmodell wurde außerdem der Einfluß der Endschwelle auf das Strömungsregime der Hörnum-Odde simuliert, damit das Risiko der Folgen baulicher Eingriffe abgeschätzt werden kann.

#### vertikal geschichtetes Strömungsmodell

Für die Berechnung der komplexen dreidimensionalen Strömungssituation an den Inselenden wurde ein vertikal geschichtetes Strömungsmodell entwickelt. Das vertikal ge-

schichtete Modell lieferte plausible Ergebnisse hinsichtlich der im Vortrappief vorhandenen Strömungsverhältnisse.

Der Einsatz des vertikal geschichteten Strömungsmodells wurde für die Baumaßnahme "Endschwelle Hörnum-Odde" eingesetzt. Die Ermittlung der vertikalen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten ermöglicht Aussagen zur Hangstabilität des Vortrappiefs.

### **Küstenlängstransportmodell / Energiefluß**

Die Weiterentwicklung des in Phase I eingesetzten Modells zur Berechnung des Küstenlängstransportes bestand in der Berücksichtigung unterschiedlicher Transportansätze für ein Riff - Rinne - Profil.

Das Längstransportmodell berechnet die Sedimentkonzentration in einem Küstenquerprofil, wobei die ermittelte Sedimenttransportmenge entscheidend vom zugrunde gelegten Ansatz zur Berechnung der Suspensionsverteilung abhängt. Der Vergleich von gemessenen und berechneten Sedimentkonzentrationen (Suspension) im Testfeld Rantum ergab z.T. plausible Werte.

Die Berechnung des Sedimenttransportes bei erhöhten Wasserständen zeigt, daß die Transportrate am Riff stark abnimmt und am Strand große Werte erreicht. Bei mittleren Tideverhältnissen findet ein größerer Längstransport auf dem Riff statt.

Zur Berechnung der Energieumwandlung im Riff - Rinne - Bereich wurde ein Energiefluß - Modul erstellt, das kontinuierlich den Energiefluß für ein Querprofil liefert.

Die Verknüpfung zwischen dem Energiefluß und den beobachteten Veränderungen des Sandangebotes zeigt gute Übereinstimmungen.

### **Dünenabbruchmodell**

Aus Naturbeobachtungen ist bekannt, daß der Küstenabbruch bei Sturmfluten am größten ist, wobei sich das Material aus dem Dünen- bzw. Kliff - Abbruch in der Wasserwechselzone und im Vorstrand wiederfindet. Daher wurde ein numerisches Modell zur Simulation des Dünenabbruchs bei Sturmereignissen erstellt. Diesem Modell ist die Annahme zugrunde gelegt, daß das Küstenquerprofil jederzeit bestrebt ist, sich einem Gleichgewichtsprofil anzupassen. Die Form des Gleichgewichtsprofils wurde aufgrund langjähriger Untersuchungen bestimmt. Während der Sturmfluten ist die Abweichung vom Gleichgewichtsprofil am größten, und enorme Sandmengen werden küstenquer verlagert.

Die Berechnungen mit dem Dünenabbruchmodell zeigen z.T. recht gute Übereinstimmungen zu den beobachteten Abbruchmengen. So waren die Küstenrückgänge im Februar 1990 geringer als im Januar 1990, da das natürliche Profil dem Gleichgewichtsprofil bereits ähnlich war. Breite und flache Strände werden bei Sturmfluten weniger stark abgetragen.

Aufgrund der Vermessungen im Herbst eines Jahres wird das am Strand vorhandene Puffervolumen durch das Dünenabbruchmodell ermittelt, wobei der Verzicht oder die Notwendigkeit von Strandaufspülungen belegt werden kann.

Im Dünenabbruchmodell und im Längstransportmodell wird die Küste als unendlich ausgedehnt (eindimensional) betrachtet, wobei die Tiefe eine zweite Dimension ist (quasi - zweidimensional). Infolge dieser Einschränkungen und der Notwendigkeit, den Quer- und Längstransport zu verknüpfen, ist die Anwendbarkeit dieser Verfahren zur Ermittlung genereller Prognosen hinsichtlich der Wirkungs- und Funktionsweise baulicher Maßnahmen z.Z. noch nicht gegeben.

### 2.3.4 Wirkungsweise ausgewählter Maßnahmen

#### Längssandaufspülung

Die Volumenentwicklung der vor Sylt ausgeführten Sandaufspülungen wurden durch die Auswertungen von Vermessungsdaten untersucht (ALW 1994a). Aufgrund der Umlageungsvorgänge innerhalb der ersten Jahre nach einer Aufspülung, die hohe Anfangsverluste im Strandbereich zur Folge hatten, ergab sich ein Volumenverlust von 1,4 Mio. m<sup>3</sup>/a für die Westküste im Höhenbereich NN+5m/NN-1m.

Die Auswertungen im Rahmen der Machbarkeitsstudie Sandaufspülungen (ALW 1996b) zeigen einen langfristigen Volumenverlust des Strandes (NN+5m/NN±0m) von 0,256 Mio. m<sup>3</sup>/a (Datenbasis Hauptprofile 1949-1995). Wird die Erosion des Vorstrandes berücksichtigt, ergibt sich eine Verlustrate von 0,673 Mio. m<sup>3</sup>/a, die sich unter Berücksichtigung der eingetretenen Sturmfluten auf 0,894 Mio. m<sup>3</sup>/a erhöht. Die Differenzmenge von 0,5 Mio. m<sup>3</sup>/a (1,4-0,894) stellt die Menge dar, die zukünftig reduziert werden kann.

Durch die Aufspülungen in der Südhälfte der Insel ist ein wirksamer Küstenschutz betrieben worden, so daß im gesamten Bereich von Westerland bis zum Querwerk Hörnum mehr Sand im System als vor Beginn der Aufspülungen ist.

In der Nordhälfte stellen sich andere Verhältnisse ein, da die nördlich von Westerland um etwa 22° abknickende Ufer- und Küstenlinie von Bedeutung ist. Die dadurch geänderten hydrodynamischen Randbedingungen bewirken im Mittel eine Erhöhung der küstenparallelen Komponente der Wellenenergie

und damit verstärkte Transportvorgänge insbesondere im Vorstrand (FÜHRBÖTER & DETTE 1992). Möglicherweise kann das Abbauverhalten des trockenen Strandes durch eine Stabilisierung des Vorstrandes (Riffaufspülung, Riffergänzung) verlangsamt werden. Die bisherigen Beobachtungen sowie Versuche im „Großen Wellenkanal“ in Hannover (GWK) haben die positive Wechselbeziehung zwischen einem gut ausgebildetem Vorstrand und dem Aufspülprofil gezeigt (DETTE 1986, 1991).

An den Inselenden sind Aufspülungen zu bevorzugen, bei denen weniger Material in den Vorstrand gegeben wird, da hier die Wechselwirkung zwischen Strand und Vorstrand nicht mehr so ausgeprägt ist.

Mit dem gekoppelten Strömungs- und Wellenmodell wurde die Wirkung einer Längssandaufspülung in einer idealisierten Topographie untersucht (SI 1994). Die Längssandaufspülung führt danach zu erhöhten Strömungen zwischen Riff und Strand, wobei die Aufspülung in Längsrichtung einem zügigen Abtrag ausgesetzt ist, das Material verbleibt im wesentlichen jedoch zwischen Strand und Riff.

Der Rückgang der Hörnum-Odde im Abschnitt 37s bis 38s ist durch die Sandaufspülungen (1986, 1990, 1993 und 1995) aufgehalten worden. Aufgrund der Vermessungen der Abbruchkante wurde die Fläche der Hörnum Odde berechnet (*Abbildung 28*). Seit 1990 findet kein wesentlicher Rückgang der Substanz der Hörnum Odde mehr statt.

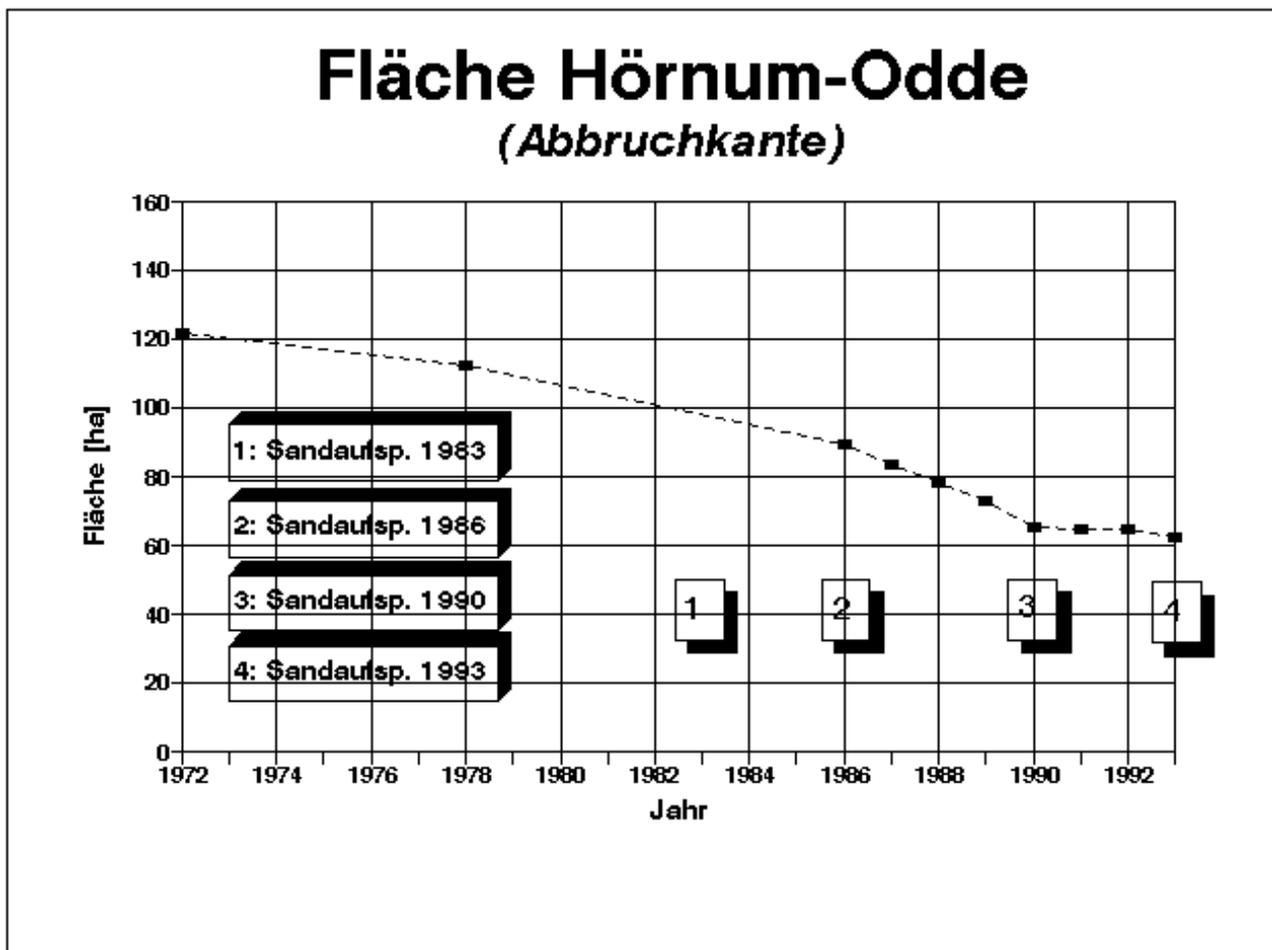


Abbildung 28: Ganglinie der Fläche landwärts der Abbruchkante Hörnum-Odde von 1972 bis 1993

### Höft- und Girlandenaufspülung

Die Wirkung von Höft- und Girlandenaufspülungen konnte in folgenden Naturversuchen dokumentiert werden:

- Westerland (1984): Längssandaufspülung mit 3 Höften
- Westerland (1990): Längssandaufspülung mit 3 Höften
- Kampen (1992): Depotaufspülung mit Höft

Das Material der Höftaufspülungen im Bereich Kampen wurde relativ schnell umgelagert und den Nachbarbereichen zugeführt. Eine darüber hinausgehende Schutzwirkung besteht nicht, wobei jedoch die Versorgung des Vorstrandes durch Höftaufspülungen gegeben ist. Eine Beschreibung des Verhaltens der Höftaufspülungen vor Westerland findet sich auch bei FÜHRBÖTER & DETTE (1992).

Im Rahmen der numerischen Modellierungen wurden Höfte und Doppelhöfte (Girlanden) mit einem gekoppelten Strömungs- und Wellenmodell simuliert (SI 1994)

Wenn das **Höft** hinter einem Riff plaziert wird, so unterliegt das Höft einem schnellen seitlichen Abtrag durch die sich bildenden Walzensysteme, die wie "Schleifscheiben" das aufgespülte Material abtragen. Das Riff ist dabei einer erhöhten Belastung ausgesetzt.

Wird das Höft hingegen hinter einer Rifföffnung angeordnet (**Doppelhöft**), so ist mit einer gleichmäßigen Strömungsverteilung zu rechnen.

### Rifferhöhung und Riffergänzung

Das Franzius Institut hat sich in einer Studie mit der wellendämpfenden Wirkung des Riffs befaßt (FI 1990). Infolge der Abnahme der Brandungsenergie durch eine Rifferhöhung ist eine Schutzwirkung für den Strand zu errei-

chen, so daß die Aufspülintervalle - bei unverändertem Energieeintrag - verlängert werden können.

Anhand einer idealisierten Topographie wurde eine Rifferhöhung und -ergänzung mit dem mathematischen Modell vom SI simuliert (SI 1994). Die Maßnahme **Rifferhöhung / -verbreiterung** bewirkt eine starke Zunahme der Strömungsbelastung im Bereich des Rifffes. Der Strand hinter dem Riff erfährt dagegen eine deutliche Strömungsentlastung. Maßnahmen am Riff haben diesem Umstand Rechnung zu tragen (hohe Erosionsfestigkeit und starke Mobilität).

Maßnahmen im Riffbereich, um Riffklüften zu schließen oder die Riffkrone anzuheben, lassen sich z.B. in geotextiler Bauweise herstellen (Kampen - Kliffende 1990).

### **Bodenschwellen als Rauheitselemente**

Durch die Verringerung der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten und der damit verbundenen Sohl Schubspannungen wird ein Teil des transportierten Sedimentes zur Ablagerung gebracht. Dies kann z.B. durch Unterwasserbuhnen, Bodenschwellen oder auch durch Einzelelemente (ZANKE 1991) erfolgen. An der Mecklenburgisch - Vorpommerschen Ostseeküste ist z.B. ein offenes Buhnensystem vorhanden, das den bodennahen Sedimenttransport verzögert (EAK 1993).

### **Geotextile Sperre**

Erhöhte Wasserstände und Sturmfluten lagern in Abhängigkeit der vorherrschenden Brandungsintensität große Sandmengen aus dem hohen Strand, der Düne bzw. dem Kliff in den Vorstrandbereich um. Von diesen Mengen wird ein Teil durch die Küstenlängsströmung zu den Inselenden verfrachtet und dort in die Haupttiderinnen abgegeben, so daß sie der Westküste verloren gehen.

Die Erhaltung der Strände in der derzeitigen Lage erfordert den Ersatz des Sandverlustes. Eine Verringerung des Sandverlustes bei erhöhten Wasserständen kann durch die Verlängerung der Verweilzeit des Sandes oder Minderung des Energieeintrages im jeweiligen Küstenabschnitt erreicht werden.

Die geotextile Sperre soll die Sandverluste minimieren. Das Konzept der Membran als

Geotextile Sperre ist in Abs. 3.3.4 beschrieben.

### **Endschwellen**

Die Sände an den Inselenden unterliegen einer Abtragung, wodurch die Küste durch den Seegang stärker belastet wird. An der Hörnum-Odde ist die Transportkapazität durch die Umlenkung der Odde erhöht worden. Der damit verbundene Sandverlust führt zu einem deutlich größeren Küstenrückgang, wobei die durch einen hohen Rücken gegebene Verbindung des Theeknobs zur Hörnum-Odde verloren geht.

Die Endschwellen sollen die Inselenden stabilisieren und den Sedimenttransport den Sänden zuführen. Das Konzept der Endschwellen wird in Abs. 3.3.2 und Abs. 3.3.3 behandelt.

Zur Simulation großräumiger Vorgänge und damit zur Simulation der Auswirkung des Baus einer Endschwelle wurden mathematische Modelle herangezogen. Untersucht wurden einige Varianten für den Bau einer etwa 4 km langen Schwelle, die sich von der Hörnum-Odde bis auf die Theeknobssände erstreckt. Die Kronenhöhe wurde etwa auf dem Niveau des Tidemittelwassers angenommen, bei Tidehochwasser wäre sie überströmt. Die Berechnungen mit einer Tiefwasserwellenhöhe von 1.70 Metern und einer Anlaufriechung aus West bei ablaufendem Wasser (3 Stunden nach Thw) zeigen ausgeprägtes 'Kabelwasser' über den flachen Bereichen der Theeknobs. Ohne Endschwelle laufen die Wellen über die Sände hinweg in das Hörnum - Tief ein, mit der Schwelle werden sie an dieser gebrochen und enden hier. Weiterhin fallen Unterschiede im Verlauf der Wellenfronten über den Sänden auf. Diese ergeben sich aus den durch die Endschwelle umgelenkten Tideströmungsmustern, die auch die Wellenlaufriechungen beeinflussen.

Die Ergebnisse aus dem gekoppelten Strömungs- und Wellenmodell sind für die Beurteilung einer entsprechenden Baumaßnahme allein nicht ausreichend. Wegen der starken Tiefengradienten zum Vortrapptief / Hörnumtief in unmittelbarer Nähe der Schwelle sind Betrachtungen der dreidimensionalen Strömungsstruktur unerlässlich.

Daher ist außerdem mit einem geschichteten Modell der Bau einer Endschwelle simuliert worden.

Nach Bau einer Endschwelle an der Hörnum-Odde zeigt das Modell dort eine gleichmäßigere und flächige Strömungsverteilung, die zu einer längeren Verweilzeit des von Norden zur Odde transportierten Sandes führt. Der Bereich der hangaufwärts gerichteten Ebbe- und Flutströmung wandert demgegenüber zur Endschwelle hin, wodurch die Stabilität des Hanges bei nicht ausreichendem Sedimentangebot gefährdet sein kann.

### Dambbauten

Im Zusammenhang mit dem Küstenschutz auf Sylt wurde der Einfluß des Hindenburgdammes und möglicher Sicherungsdämme "Festland - Föhr" und "Amrum - Föhr" auf die Tidenströmungen und Wasserstände mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodelles untersucht (MELFF 1992).

Die Ergebnisse zeigten, daß die Beseitigung des Hindenburgdammes den Hochwasserspiegel am Pegel List bis zu 10 cm erhöhen würde. Die Durchflussmengen im Lister Tief würden sich von 558 Mio. m<sup>3</sup>/Tide auf 523 Mio. m<sup>3</sup>/Tide während der Flut verringern (-6%). Die Ebbwassermengen nehmen nach Beseitigung des Hindenburgdammes von 558 Mio. m<sup>3</sup>/Tide auf 569 Mio. m<sup>3</sup>/Tide zu (+2%). Im Querschnitt zwischen Sylt und Amrum würden sich die Flutwassermengen von 513 Mio. m<sup>3</sup>/Tide auf 532 Mio. m<sup>3</sup>/Tide erhöhen (+4%) und die Mengen während der Ebbe von 592 Mio. m<sup>3</sup>/Tide auf 576 Mio. m<sup>3</sup>/Tide verringern (-3%).

Die Beseitigung des Hindenburgdammes würde aufgrund der ermittelten geringen Durchflußdifferenzen von wenigen Prozenten zu keinen meßbaren Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten führen. Die denkbaren Dämme zwischen dem Festland und Föhr bzw. Amrum und Föhr würden den Tideraum des Hörnum Tiefs in ein geschlossenes Becken umwandeln, wobei mit einer Durchflußmenge von 536 Mio. m<sup>3</sup>/Tide zu rechnen wäre, d.h. bei Flut erhöhen sich die Durchflussmengen um 4,5 % und bei Ebbe verringern sie sich um 9,5 %. In der Norderaue würden sich die Geschwindigkeiten geringfügig erhöhen. Südlich dieser Dämme wäre mit morphologischen Veränderungen zu rechnen.

### Historische Zustände

Folgende historische morphologische Zustände wurden mit dem Strömungsmodell des SI untersucht:

- Istzustand 1988
- Zustand 1793 mit und ohne Dämme
- Zustand 1878 mit und ohne Dämme

Im Vergleich zum Istzustand ergaben die Modelle für sämtliche historische Zustände eine Entlastung des Durchflusses auf den Flachwassergebieten, wenn die Rinnen deutlich ausgeprägt sind. Der Einfluß der Dämme führt zur Verringerung der Ebbwassermengen im Hörnumtief und zur Reduzierung der Geschwindigkeiten im Vortrapptief.

### Sonderbauweisen

Die wesentlichen Sonderbauweisen wurden im Fachplan Küstenschutz Sylt (13.01.1985) behandelt. Eine erneute Beurteilung auf der Basis der inzwischen gewonnenen Erkenntnisse ist erfolgt. Dabei waren auch Sonderbauweisen, die als Vorschläge während des Forschungsvorhabens eingebracht wurden, betrachtet. Eine kurze Bewertung dieser näher diskutierten Sonderbauweisen wird im folgenden wiedergegeben.

#### Bogenriff (Schutz der Hörnum-Odde)

Die funktionelle Konzeption des Bogenriffs beinhaltet das Prinzip eines starren Wellenbrechers, der gleichzeitig als Großbuhne wirkt. Infolge Wellenreflexionen und Strömungskonzentrationen sind starke Erosionen an den Flanken und am Kopf des Bauwerkes zu erwarten, die das Bauwerk selbst und den Sockel der Hörnum-Odde gefährden. Die vorgeschlagene Bauweise des Bogenriffs beinhaltet eine Kombination von Materialien (Sand, Schotter, Geotextilien, Betonschalen), eine Mischung von flexiblen und starren Bauelementen, deren Konstruktion für den schweren Seebau noch nachgewiesen werden muß. Infolge der Seegangbeanspruchung besteht die Gefahr von Umlagerung, Verschleiß und einer schnellen Zerstörung des Bauwerkes.

#### Unterwasserwellenbrecher an der Hörnum-Odde

Im Zusammenhang mit der Diskussion des Bogenriffs wurde die Wirkung eines Unterwasserwellenbrechers an der Hörnum-Odde untersucht. Der Unterwasserwellenbrecher weist nach den Untersuchungen mit dem Strömungs- und Wellenmodell am Strand gegenüber dem Bogenriff eine größere Schutzwirkung auf.

#### Henkelriff (Schutz der Westküste)

Die Konstruktion des Henkelriffs entspricht einem starren Unterwasserwellenbrecher aus Fertigteilen, wobei die Riffelemente durch ihre besondere Formgebung einen Quertransport des bodennahen Sedimentes in Richtung Küste bewirken sollen. Die Wirkung als ein auf die sohnahen Strömungen hin optimiertes Strömungselement ist nicht belegt. An einer Tideküste mit offenem Sandsystem ist eine mögliche positive Wirkung begrenzt. Die vorgeschlagene Kronenhöhe auf NN-2,5m reduziert die Wellenenergie gegenüber dem natürlichen Riff mit einer angenommenen Kammhöhe von NN-3m nur gering.

#### Schwimmender Wellenbrecher

Die Wellendämpfung schwimmender Wellenbrecher ist abhängig von der Bauart und dem Seegangsspektrum. Problematisch ist eine sichere Verankerung. Eine optimale Anpassung der Anordnung von schwimmenden Wellenbrechern vor Sylt ist durch die unterschiedlichen maßgebenden Seegangsrichtungen erheblich eingeschränkt.

#### Stranddränung

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren wird der Grundwasserspiegel im Strandbereich kontinuierlich abgesenkt, wodurch der Rücklauf des mit den Wellen auf den Strand transportierten Wassers reduziert werden soll. Hierdurch und durch verbesserte Konsolidierung des Strandbodens ist beabsichtigt, das mit der ablaufenden Welle transportierte Material teilweise zurückzuhalten. Eine erfolgversprechende Wirkung ist an der Sylter Westküste nicht zu erwarten, weil der stark schwankende Wasserspiegel eine gleichbleibende Effektivität für Sturmflutzustände und Normalwetterlagen nicht zulässt. Die erforderliche ortsfeste Anordnung der Dränanlage verhindert darüber hinaus eine Anpassung an die Sandumlagerungen in küstennormaler Richtung.

## 2.4 Möglichkeiten und Auswirkungen der Sandentnahmen

Sandvorkommen für Küstenschutz Zwecke im Großraum Sylt sind vom Geologischen Landesamt Schleswig-Holstein untersucht worden (TEMMLER 1994a,b). Geeignete Sande stehen westlich der Insel, in den Sandbänken vor den Inselenden und der Rantumer Bucht an.

### *Sandvorkommen westlich der Insel*

Die Hauptuntersuchungen zur Sicherung der Spülsandressourcen konzentrierten sich auf das Seegebiet im Westen der Insel Sylt, wo zur Erkundung der gegenwärtig genutzten Sandentnahme "Westerland II" auf der Basis der Untersuchungsergebnisse von KÖSTER (1974) im Jahre 1982 vier bis zu 40m tiefe Kernbohrungen den Kaolinsand unter einer unregelmäßigen Überdeckung aus holozänen und pleistozänen Sanden in typischer Ausbildung, partiell mit dm- bis m-starken Zwischenlagen aus Tonen, Mudde und Torf (pollenanalytisch von MENKE als Pliozän datiert) tiefgründig nachgewiesen haben (TEMMLER 1983).

Bei seeseismischen Untersuchungen wurden zahlreiche Rinnenstrukturen von sehr unterschiedlicher Breite (200 bis ca. 3.000 m) festgestellt, deren Basis häufiger bis in 10m Tiefe, örtlich bis in ca. 21m Tiefe unter Seegrund herabreicht. Der Verlauf dieser Rinnen ist außerordentlich uneinheitlich und zeigt nach den bisherigen Erkenntnissen keine Beziehung zu den großräumigen geologischen Strukturen (KÖSTER 1974). Die jüngsten, in den Boomer-Profilen sicher unterrepräsentierten Rinnen sind vermutlich mit holozänen Sanden wechselnder, überwiegend feiner bis mittlerer Körnung gefüllt, während die in den Boomer-Seismogrammen überwiegenden, eiszeitlichen Rinnen neben Sanden örtlich auch Beckenschluffe enthalten (TEMMLER 1994a, THEILEN et al. 1993).

Eine für die Spülsandgewinnung geeignete Lagerstätte im Seegebiet W von Sylt sollte die folgenden Kriterien erfüllen (TEMMLER 1994b):

- (1) Hochlage des Kaolinsandes
- (2) Hochlage des relativ grobkörnigen Pleistozäns
- (3) Vorkommen deutlicher Internstrukturen zwischen (1) und (2) als Hinweis auf grobkörnige Einlagerungen im eiszeitlichen Sand

- (4) Lage außerhalb der Rinnen mit mariner Eemfüllung
- (5) Lage außerhalb nachgewiesener Stauungszonen mit Geschiebemergelagerungen (Pisa-Moräne und Amrumbank-Moräne)

Optimal wäre darüber hinaus

- (6) eine nicht allzu große Wassertiefe
- (7) eine relativ geringmächtige Holozänbedeckung
- (8) eine möglichst rollige Ausbildung der aufliegenden holozänen und pleistozänen Sedimente und
- (9) das Fehlen ausgeprägter Rinnenstrukturen

Die unregelmäßige Verbreitung der Rinnen zeigt im allgemeinen keine Beziehung zu den vermuteten geologischen Einheiten. Besonders tiefe Senken wurden im nordwestlichen Untersuchungsgebiet im Bereich der Pisa-Moräne beobachtet; normal tiefe Rinnen fanden sich im Bereich der Amrumbank-Moräne im Süden sowie im Gebiet zwischen den vermuteten ehemaligen Hochgebieten. Im Nordosten deutet sich eine Rinne unmittelbar seewärts des von KÖSTER (1974) angenommenen ehemaligen Randes des Westerländer Geestkernes an.

Die derzeit genutzte Sandentnahme "Westerland II" erfüllt nahezu alle vorgenannten Kriterien. Im Norden und Süden des Bewilligungsfeldes bestehen für eine Gewinnung von grobkörnigem Spülsand sehr gute Voraussetzungen, wobei besonders im Norden das pliozäne-pleistozäne Hochgebiet in Verbindung mit einer nur mäßigen Tiefe des Seegrundes von max. NN-16m weit nach Westen reicht und die Holozänüberdeckung i.a. recht gering ist.

In den Randzonen im Norden, Westen und Süden sowie in einzelnen Rinnenbereichen muß gebietsweise mit dem Vorkommen kornanalytisch weniger geeigneter Deckschichten (Feinsande, Beckenschluffe) in teilweise größerer Mächtigkeit gerechnet werden, welche beim Tiefeinschnitt die durchschnittliche Korngröße des Spülgutes herabsetzen. Bei dem gegenwärtigen Kenntnisstand werden deshalb die in der *Abbildung 29* dargestellten Grenzen des für die Spülsandentnahme geeigneten Gesamtgebietes vorsichtig angesetzt und innerhalb dieses Bereiches zwei unter-

schiedliche Flächen mit guter bzw. bedingter Eignung ausgedehnt.

Die für die Spülsandgewinnung geeignete Fläche beträgt insgesamt ca. 252 km<sup>2</sup>, davon 103 km<sup>2</sup> gut bis sehr gut und 149 km<sup>2</sup> unter Einschränkungen geeignet. Bei einer durchschnittlichen Abbautiefe von 15m unter Seegrund entspricht dies einem Gesamtvorrat (anstehend in mitteldichter bis dichter Lagerung) von 3,78 Mrd. m<sup>3</sup> Sand, davon 1,54 Mrd. m<sup>3</sup> gut bis sehr gut geeignet.

Für Sandaufspülungen geeignete Mittel- und Grobsande stehen westlich der Insel Sylt bis in große Tiefen an, wobei die Sande nach Westen zunehmend abtauchen. Im 42,5 km<sup>2</sup> großen Sandentnahmegebiet Westerland II

stehen bei einer Lage des Meeresbodens von im. NN-14m ab ca. NN-17m bis in große Tiefe (=80m) geeignete Sande an. Bei einer Entnahmetiefe von NN-30m und unter Berücksichtigung einer 1:20 geneigten Böschung sowie der bis einschließlich 1993 entnommenen Sandmenge von 12,8 Mio. m<sup>3</sup>, beträgt das rechnerische Sandvorkommen noch 600 Mio. m<sup>3</sup>. Eine etwa gleich große Menge könnte durch die Erweiterung der Entnahme nach Norden erschlossen werden. Diese theoretische Betrachtung zeigt ein großes zusammenhängendes Sandvorkommen, das mit der zur Verfügung stehenden Technik wirtschaftlich ausgebeutet werden könnte.

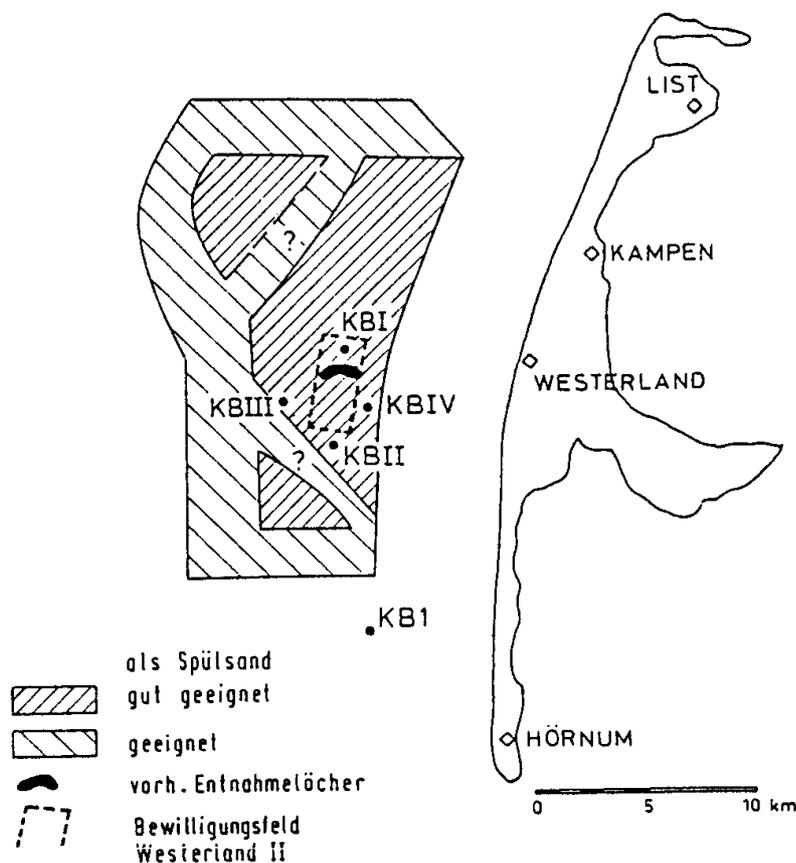


Abbildung 29: Fläche der wirtschaftlich gewinnbaren Spülsandvorkommen

Der erweiterte Inselsockel ist vor übermäßigen Sandentnahmen zu schützen, wobei die Entnahmemenge und -art auf das für den Erhalt der Meeresgeographie und -ökologie verträgliche Maß zu beschränken ist. Dabei wird davon ausgegangen, daß maximal 10% der errechneten Menge für Küstenschutz zwecke entnommen werden können.

Die einzelnen Positionen der Sandentnahmen sind seit 1987 erfaßt, so daß mit Hilfe der Vermessungsdaten ein vollständiges Bild des von der Entnahme beeinflussten Meeresbodens gewonnen werden kann. Die Entwicklung der Sandentnahmelocher zeigt, daß die Wiederauffüllung der tieferen Bereiche bei ca. 0,75 m pro Jahr liegt, wobei das Füllmaterial zum größten Teil aus Schlick besteht.

Die Auffüllung der Entnahmetrichter erfolgt in den ersten Monaten durch Schlick, der auf der sandigen bis grobsandigen Sedimentbasis aufliegt. In den geringen Wassertiefen (10 m - 15 m) ist eine felderartige Verteilung unterschiedlicher Oberflächenstrukturen mit abrupten Wechseln der Kleintopographie (Rippen, Steinansammlungen, strukturlöse Oberflächen) zu beobachten.

Die Akkumulation von feinkörnigen Anteilen ist dagegen nur in den Entnahmetrichtern und vertieften Entnahmezonen mit herabgesetzter Strömungsenergie anzutreffen.

In der oberflächlichen Schlickschicht sind nur geringe grobkörnige Anteile enthalten, so daß eine Verfrachtung größerer Mengen sandiger Kornfraktionen kaum stattfinden dürfte.

Die Sedimentparameter werden sich durch die Schlickablagerungen in Richtung kleinerer Medianwerte und höheren organischen Gehalten verändern. Dadurch ist eine langfristige Veränderung im Artenspektrum der sich neu etablierenden benthischen Populationen zu erwarten.

### ***Sandentnahme aus dem Theeknobssand***

Nach den Ergebnissen der im Jahre 1989 beiderseits des Hörnumtiefs ausgeführten Untersuchungsbohrungen schließt sich an das Gebiet mit hoch aufragendem, oberhalb von NN-4m von Wattsedimenten und Geschiebelehm abgedecktem Kaolinsand im Süden eine glaziale Stauchungszone an, in welche Schmelzwassersande von sehr unterschiedlicher Körnung, Geschiebemergel in wechselnder petrographischer Ausbildung, Kaolinsan-

de in der typischen grobkörnigen Fazies sowie obermiozäne schluffreiche Feinsande mit Schluffzwischenlagen auf kurze Entfernung rasch wechseln (AHRENDT & DIETHELM 1990). Diese Stauchungszone wird von einer nach Westen einfallenden, von interglazialen marinen Schluffen ausgefüllten Senke sowie einzelnen, teilweise bis auf NN-28m eingetieften und später mit schillführenden Wattensanden wieder aufgefüllten holozänen Rinnen durchzogen, deren Verlauf im einzelnen auch durch die intensive seeseismische Vermessung dieses Gebietes (AHRENDT & DIETHELM 1990, TEMMLER 1994) nicht geklärt werden konnte.

Die Untersuchungen der Entwicklung des Theeknobssandes haben von 1939 bis 1991 einen Substanzverlust oberhalb NN-5m von ca. 45% (35,6 Mio. m<sup>3</sup> auf 19,5 Mio. m<sup>3</sup>) ergeben. In diesem Zeitraum hat sich der Hang des Theeknobssandes zum Vortrapptief um i.M. 300 m nach Osten verlagert. 1983, 1986 und 1990 sind aus dem Hang des Theeknobssandes zum Vortrapptief insgesamt 2,6 Mio. m<sup>3</sup> Sand für Aufspülungen im Bereich der Gemeinde Hörnum entnommen worden. Die Entnahmegebiete haben sich durch die Schüttungsprozesse in das Vortrapptief weitgehend wieder aufgefüllt.

Der anstehende Sand besteht aus für Sandaufspülungen geeigneten Mittelsanden.

Über weitere Sandentnahmen aus diesem Gebiet ist in Abhängigkeit der zukünftigen Entwicklung der Hörnum-Odde, Knobssande und Kniepsand zu entscheiden. Untersucht wird die Sandentnahme aus der Barre des Vortrapptiefs, wobei mit einer minderen Sandqualität zu rechnen ist.

Obwohl in den Flachwassergebieten südlich der Hörnum-Odde nach den Ergebnissen einiger Bohrungen an der Südspitze der Odde sowie der Theeknobsrinne holozäne Mittelsande mit nennenswerten Fein- und Grobsandanteilen sowie geringen Kiesbeimengungen in großer Mächtigkeit anstehen (TEMMLER 1987) und damit ein qualitativ durchaus geeignetes Spülmaterial zu erwarten ist, scheidet eine Sandentnahme in diesem Gebiet wegen der hier sehr labilen morphodynamischen Situation mit gegenwärtiger Tendenz zu flächenhafter und rinnenförmiger Ausräumung des Flachwassergebietes aus.

### ***Sandentnahme aus dem Salzsand***

Zur Küstensicherung des Lister Weststrandes am nördlichen Inselende wurde bislang zweimal (1988 und 1993) mit dem Hopperbagger erfolgreich Spülsand von der Nordflanke des Salzsandes (insgesamt 1,64 Mio. m<sup>3</sup> Mittelsande) entnommen. 1995 wurde ebenfalls aus dem Nordhang des Salzsandes Sand für die Aufspülungen vor List entnommen. Die vorangegangenen Untersuchungen des Geologischen Landesamtes (TEMMLER 1988) ergaben sehr gut sortierte, feinsandige Mittelsande in der Sandbarre vor dem Ausgang des Lister Tiefs im Westen. Weiter östlich überwiegen in einem ca. 2,5 km langen Streifen gemischt-körnige, teilweise kies- und steinhaltige Sande mit einzelnen Schlick-, Klei- und Torfzwischenlagen sowie Holzresten von unregelmäßiger Verbreitung und meist nur geringer Mächtigkeit. Mit Annäherung an das Lister Landtief, wo sich aus morphodynamischen Gründen eine Spülsandentnahme verbietet, überwiegen wiederum feinsandige Mittelsande. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist im Bereich der 1988 und 1993 genutzten Entnahmeflächen noch ausreichend Sand für einige Aufspülungen des Lister Weststrandes vorhanden (3 - 5 Mio. m<sup>3</sup>).

Der Nordhang des Salzsandes folgt von 1937 bis 1974 i.M. 200 m der nördlichen Verlagerung des Lister Tiefs. Dabei hat sich die Rinne-sole um bis zu 12 m vertieft. Der Südhang des Salzsandes zeigt eine stabile Lage. Küstennah bildet das Lister Landtief ein neues Bett, wobei eine westwärtige Verlagerung erwartet werden kann. Die Entwicklung des Lister Tiefs läßt eine beginnende südlich gerichtete Verlagerung erkennen.

### ***Sandentnahme aus der Rantumer Bucht***

Bei den ersten Sandaufspülungen vor Westerland 1972 und 1978 wurde der Spülsand mit jeweils 1,0 Mio. m<sup>3</sup> aus einem seegangsgeschützten Gebiet östlich des Rantumbekens entnommen, wo qualitativ sehr geeigneter pliozäner Kaolinsand, ein Mittelsand mit jeweils ca. 20 % Fein- und Grobsandanteilen und geringen Kiesbeimengungen, unter einer

weniger als 2 m mächtigen Überdeckung aus schluffarmen Wattenfeinsanden nahezu bis an die Wattoberfläche heraufreicht. Wenig östlich des alten, bisher nur wenig verschlickten Baggerloches wird das sandige Pliozän von einer Deckschicht aus geringmächtigen holozänen Sanden über >2m saaleiszeitlichem Geschiebelehm/-mergel überlagert, wobei die Moräne wegen ihres Steingehaltes und ihrer relativ festen, im bodenmechanischen Sinne steifplastischen Beschaffenheit eine Gewinnung des tiefer gelegenen Kaolinsandes sehr erschwert. Südlich des Baggerlochs taucht der Kaolinsand unter einer Abfolge holozäner, teilweise stark schluffiger Wattenfeinsande mit bis zu m-starken Kleizwischenlagen sowie einem weit verbreiteten, teilweise an Holzresten reichen Basaltorf (HOFFMANN 1980) über pleistozänen Schmelzwassersanden, Geschiebelehm und -mergel ab. Diese teilweise mächtige Überdeckung führt zu einer erheblichen Verschlechterung der Qualität des Spülgutes wie der Entnahmebedingungen.

Die Menge der anstehenden und geeigneten Sande in der Rantumer Bucht betragen ca. 8,0 Mio. m<sup>3</sup>.

### ***Sandentnahme aus der Keitumer Bucht***

Auch in der Keitumer Bucht reicht die im Morsumkliff aufgeschlossene, saaleiszeitliche Schuppungszone, in nordwestliche Richtung ins Wattenmeer streichend und von ≈8m holozänen Wattsanden (uferfern) bzw. Kleischichten (ufernah) abgedeckt, bis auf 100m an die Küstenlinie zwischen Keitum und Kampen heran (TEMMLER 1981). Unter den gegenwärtigen Entnahmebedingungen scheidet somit der gesamte Wattenbereich im Osten der Insel Sylt mit Ausnahme einer kleinen Fläche rund um das Baggerloch am Rantumbecken für eine Spülsandgewinnung aus.

Das langfristige Meßkonzept sieht jährliche Kontrollvermessungen der Entnahmegebiete vor, die z.T. in Amtshilfe durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) vorgenommen wird.

## 3 Bisherige Küstenschutzmaßnahmen

### 3.1 Küstenschutzmaßnahmen bis 1972

#### 3.1.1 Biotechnische Maßnahmen

Der systematisch betriebene, staatliche Dünenbau begann in Deutschland am Ende des 18. Jh. im Bereich der Ostseeküste Ostpreußens, nachdem dort erhebliche Probleme durch unkontrollierten Sandflug auftraten. Auf der Insel Sylt oblag der Dünenbau in der Zeit vor 1864 den Anliegergemeinden. Diese besaßen jedoch nicht die wirtschaftlichen Mittel, um die Dünen gegen die Angriffe des Meeres und des Windes zu schützen.

Nach der Übernahme der Insel in die preußische Verwaltung (1864) erfolgte eine grundsätzliche Neuregelung des Dünenbaus. Durch ein System von Sandfangzäunen und durch Bepflanzung mit Strandhafer wurden die Randdünen an ihrer Seeseite (Luvseite) festgelegt, und durch den Bau künstlicher Vordünen sollten sie vor den Angriffen geschützt werden. Diese Verfahren werden heute noch angewandt und sind durch das Sandangebot aus den Sandaufspülungen eine wichtige begleitende Maßnahme zur Küstensicherung.

Die biotechnischen Küstenschutzmaßnahmen an den Küstendünen haben zusammen mit den Sicherungsarbeiten der Gemeinden an den Binnendünen dazu geführt, daß der äolische Sandtransport über die Insel zum Stillstand gekommen ist und die Dörfer nicht mehr durch Sandflug gefährdet werden. Eine Ausnahme bilden die Lister Wanderdünen, die als Naturdenkmäler erhalten bleiben sollen.

Ein eindrucksvolles Beispiel für die Wirksamkeit von biotechnischen Maßnahmen ist das Schließen der während der Sturmflut Februar 1962 durchbrochenen Dünen vor Hörnum. Innerhalb von zwei Jahren wurde auf einer Länge von 250 m wieder eine ausreichend Schutz bietende Randdüne, bestehend aus einer abgelagerten Sandmenge von ca. 50.000 m<sup>3</sup>, aufgebaut.

#### 3.1.2 Buhnenbauten

Um den Küstenabbruch zu verringern oder gar zu verhindern, wurden an der Westküste Sylts 1867 die ersten Buhnen gebaut. *Tabelle 11* gibt eine Übersicht der insgesamt errichteten Buhnen.

Eine entscheidende Verringerung des Küstenabbruchs durch Buhnen der unterschiedlichsten Bauformen ist nicht nachzuweisen. Die anfänglichen Sandakkumulationen ver-

schwinden wieder in der Folgezeit, so daß mittel- und langfristig die Küstenform einer Ausgleichsküste mit ihrer negativen Sandbilanz hergestellt ist.

Von den errichteten Buhnen stellen die Spundwandbuhnen nach Ablauf ihrer Lebensdauer eine große Gefahr für Mensch und Tier dar, indem die Korrosion scharfkantige (und wirkungslose) Buhnenfragmente hervorruft.

**Tabelle 11: Übersicht der vor der Westküste Sylts errichteten Buhnenbauwerke**

| Jahr          | Ort   | Bauweise  |
|---------------|---|---|
| 1867          | Rotes Kliff   | 3 leichte Pfahlbuhnen   |
| 1872          | Westerland  | 3 Steinbuhnen   |
| 1873          | Ellenbogen  | 5 Pfahlbuhnen   |
| 1875          | Wenningstedt  | 3 Pfahlbuhnen   |
| 1878 bis 1887 | 4 km südlich bis<br>7 km nördlich Westerland                                | 30 Steinbuhnen<br>7 Pfahlbuhnen   |
| 1889 bis 1898 | Rantum bis Ellenbogen (NW-Küste)  | 17 Steinbuhnen<br>70 Pfahlbuhnen<br>Verlängerung der nördlichen 12 Buhnen |
| 1913          | Westerland  | 1 Buhne aus Eisenbetonpfählen   |
| 1923          | Westerland  | Erneuerung Pfahlbuhnen  |
| 1924          | Westerland  | Instandsetzung Pfahlbuhnen  |
| 1925          | Westerland  | 3 Eisenbetonbuhnen  |
| 1927          | Westerland / Wenningstedt   | 1 Spundwandbuhne (1.)   |
| 1928          | Westerland / Wenningstedt   | 2 Spundwandbuhnen (2. und 3.)   |
| 1929 bis 1938 | Westerland bis Ostindienfahrerhuk,<br>Nordseite Ellenbogen, Ostseite Hörnum | ca. 130 Spundwandbuhnen   |
| 1949          | Westerland bis nördlich Wenningstedt  | 35 vorgespannte Betonpfahlbuhnen  |
| 1957          | Westerland  | 1 Flachbuhne (1.) aus Asphalt   |
| 1958          | Westerland  | 1 Flachbuhne (2.)   |
| 1962 bis 1963 | Westerland  | 1 Flachbuhne (3.)   |
| 1966 bis 1967 | Westerland  | 1 Flachbuhne (4.)   |
| 1968          | Querwerk Hörnum<br>Stummelbuhnen am Längswerk                               | Tetrapoden (6 t)  |

### 3.1.3 Deckwerke Westerland und List

#### Westerland

Zum Schutz der Randdünen und ihrer Bebauung wurden 1907 bis 1954 vor Westerland Längswerke von einer Gesamtlänge von 3 km im Form einer Strandmauer und schräg geneigter Deckwerke errichtet.

Aufgrund der Erfahrungen mit der Ufermauer, den ausreichenden Platzverhältnissen und der

Erkenntnis, daß der Wellenangriff an einer Böschung erheblich geringer als an einer senkrechten Mauer ist, wurde 1937 ein 510 m langes Basaltsäulendeckwerk mit einer Neigung von 1:4 einschließlich einer Fußvorlage gebaut. 1946 brach ein Teil der nördlichen Ufermauer ein und wurde durch ein Deckwerk ersetzt, das 1954 verlängert wurde. Die Strecke vor Westerland, die durch ein Deckwerk geschützt wird, beträgt nunmehr 875 m.

**List**

An der Westseite des Ellenbogens wurde 1938 ein Basaltdeckwerk errichtet, wobei der ursprünglich geplante Bau von Bühnen - zum

Fernhalten der Strömung - unterblieb. Der südliche Teil des Deckwerkes wird seit 1946 von Süden nach Norden fortschreitend zerstört, während der nördliche Teil weiterhin vorhanden ist.

**3.1.4 Ufermauer und Fußsicherungen Westerland**

1907 wurde vor Westerland mit dem Bau einer Ufermauer von 68 m Länge zum Schutz der Randdüne und damit des dahinter liegenden Hotels "Miramar" durch den Eigentümer des 1903 errichteten Hauses begonnen.

Durch die zunehmende strandnahe Bebauung und weitere Erosion der schmalen Randdüne wurde 1912 auf Betreiben der Stadt Westerland die Ufermauer um ca. 506 m nach Norden verlängert. Wegen der vorhandenen guten Strandverhältnisse erfolgte zunächst ein Verzicht auf die Errichtung der vorgesehenen Fußvorlagen. Durch die Ausräumungen bei nachfolgenden Sturmfluten wurde die Ufermauer 1916 auf 50 m Länge zerstört, so daß diese erneuert und mit einer Fußvorlage versehen wurde.

Eine Sturmflut (Nov. 1920) führte zur Ausräumung des Strandes und zur Zerstörung der Fußvorlage, wobei vor dem Hotel Miramar die Ufermauer unterspült wurde. Aufgrund weiterer Zerstörungen der Ufermauer infolge von Sturmfluten (1921) wurde vor die gesamte Ufermauer eine Spundwand eingebracht und der Zwischenraum mit Beton aufgefüllt. Außerdem erhielt die Spundwand eine 5 m breite Fußvorlage aus einer Steinpackung auf Buschwerk.

1923 erfolgte eine Verlängerung der Ufermauer um 90 m nach Süden und die Verblendung der gesamten Mauer mit Klinkersteinen; 1924 wurde die Mauer um 143 m nach Norden ausgebaut. Damit betrug die Gesamtlänge 807 m.

Während der Sturmflut im Oktober 1936 brach die ohnehin schmale Randdüne nördlich der Ufermauer um über 10 m ab, so daß Maßnahmen zur langfristigen Sicherung der Randdünen untersucht wurden (Verlängerung Ufermauer, Bau eines Deckwerkes). 1937 wurde wegen der günstigeren Reflexionseigenschaften einer geneigten Fläche ein 510 m langes Basaltsäulendeckwerk gebaut.

Im Januar 1946 brach das nördliche Ende der Ufermauer auf 50m Länge ein; sie wurde im gleichen Jahr durch ein 125m langes Deckwerk ersetzt. 1954 wurde das Deckwerk um 365 m verlängert.

Die erheblichen Turbulenzen beim Brechen der Wellen an der Ufermauer bewirken anhaltende Probleme mit der Fußvorlage durch den Verlust des trockenen Strandes.

1950 wurde die Fußvorlage der nördlichen Ufermauer erneuert und dabei auf 10 m verbreitert.

1961 wurde eine 108 m lange Tetrapodenschüttung plaziert, die 1967 bis zum Nordende der Mauer auf 243 m verlängert wurde. Die Fußvorlage mußte 1970 vor dem Nordteil auf 20 m erweitert und mit 4 t bis 6 t schweren Granitblöcken abgedeckt werden. Die Tetrapoden haben die Klinker z.T. erheblich beschädigt.

**3.1.5 Tetrapodenquerwerk und -längswerk Hörnum**

Als Sonderfall von Bühnenbauwerken ist die Kombination eines Quer- und Längswerkes mit zusätzlichen Stummelbühnen, die 1968 vor Hörnum gebaut wurden, anzusehen. Das kombinierte Längs- und Querwerk wurde aus 6 t schweren Tetrapoden errichtet.

Das Querwerk wies eine anfängliche Länge von 270 m auf, wobei am seewärtigen Ende mit einer Länge von 40 m 2 Tetrapoden pro Meter und auf der restlichen Länge von 230 m 6 Tetrapoden pro Meter auf mit Sand gefüllten Gewebesläuchen bzw. doppelten Gewebelagen gesetzt wurden. Das Querwerk

band bei der Höhe NN+3,80 m in den vorhandenen Strand ein.

Das Querwerk hat lediglich für etwa zehn Jahre die erwartete Wirkung gezeigt, indem auf der Nordseite eine Sandanlagerung zum Schutz der Dünen auftrat. Seit ca. 1979 läßt die Wirkung des Querwerkes nach, wobei der Strand schmaler wird, und die Tetrapoden Setzungen zeigen. Das Maß der Setzungen (1968-1983) wurde zu 15 cm/a ermittelt (*Abbildung 30*).

Auf der Südseite des Querwerkes sind infolge Lee - Erosion und/oder Veränderungen im Küstenvorfeld in den 80-er Jahren große Abbrüche aufgetreten. Die Errichtung des Tetrapodenquerwerkes hat die natürliche Entwicklung des Küstenverlaufes entscheidend ge-

stört, wobei die Bauwerksunterhaltung einen steigenden Aufwand erfordert.

Nördlich und südlich des Querwerkes wurde in den vorhandenen trockenen Strand ein Längswerk auf Nylongewebematten zu 4 Tetrapoden pro Meter mit einer Oberkante von NN+5,99 m angeordnet.

Das nördliche Längswerk erhielt auf der see-wärtigen Seite und senkrecht zum Längswerk Stummelbuhnen aus 1,7 Tetrapoden pro Meter, die auf sandgefüllten Nylongewebematten gelegt wurden. Die Anbindung an das Längswerk lag mit der Oberkante auf NN+2m. Die Stummelbuhnen haben in ihrer unmittelbaren Umgebung starke Turbulenzen erzeugt, so daß auch am Längswerk Setzungen aufgetreten sind.

### 3.1.6 Tetrapodenlängswerke Westerland

Zum Schutz der Randdünen vor Westerland wurden 1961-1967 Tetrapodenlängswerke nördlich des Deckwerkes und südlich der Ufermauer errichtet. Die Länge beträgt im Norden 1070 m und im Süden 270 m. Die Tetrapoden (6 t Gewicht) wurden auf einer stabilen Unterlage (Bongossi, Asphalt, Gewebe) verlegt oder mit ihr vergossen. Daher und aufgrund der Sandaufspülungen nach 1972 weisen die Tetrapoden wenig Setzungen auf. Eine Ausnahme bilden die nördlichsten 50 m vor der Bioklimatischen Station, wo die Tetrapoden direkt auf den Sand gesetzt wurden.

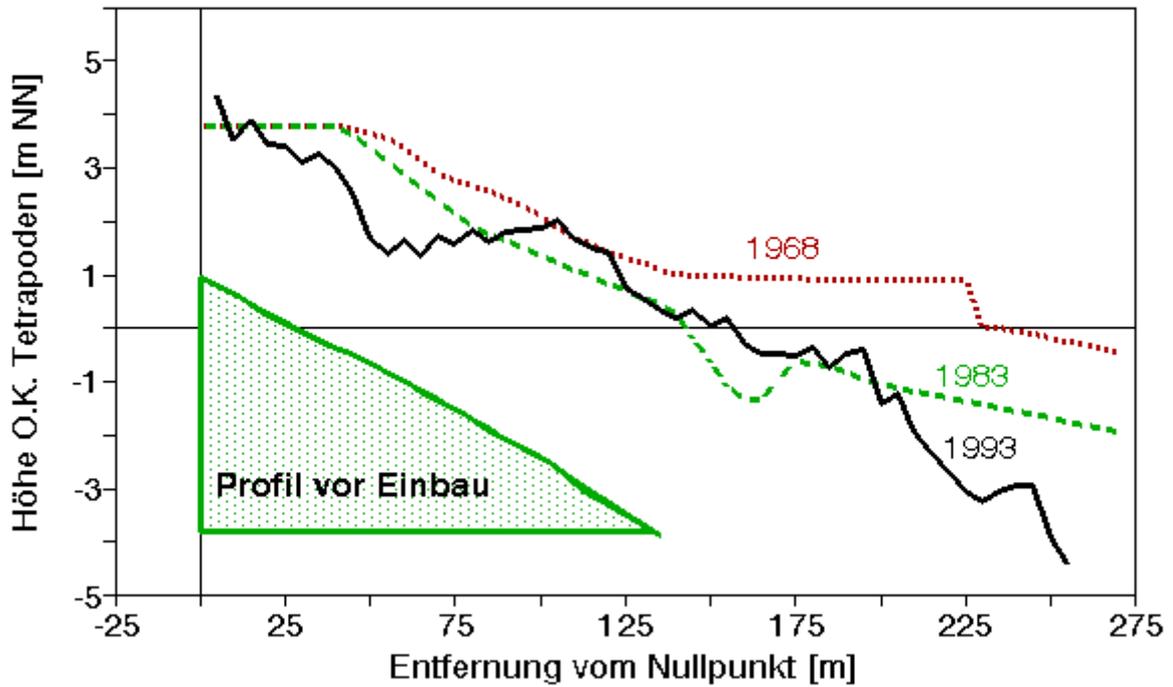
Während der Sturmflut 1968 sackten dort die Tetrapoden um max. 2,5 m direkt neben der Steinaspalt - Fußsicherung ab.

Es wurden 4,5 Tetrapoden pro Meter mit einer Fußbreite von 7,5 m und Lage der Oberkante bei NN+5,65 m bis NN+4,50 m eingebaut.

Die Tetrapodenbauwerke, die z.T. stark wasser-durchlässig sind, können die Reflexion der Wellen nicht unterbinden, so daß eine weitere Ausräumung des Strandes weiterhin stattfinden kann.

# Tetrapoden-Querwerk Hörnum

## Querprofile im Längsschnitt



# Tetrapoden-Querwerk Hörnum

## Setzungen im Längsschnitt

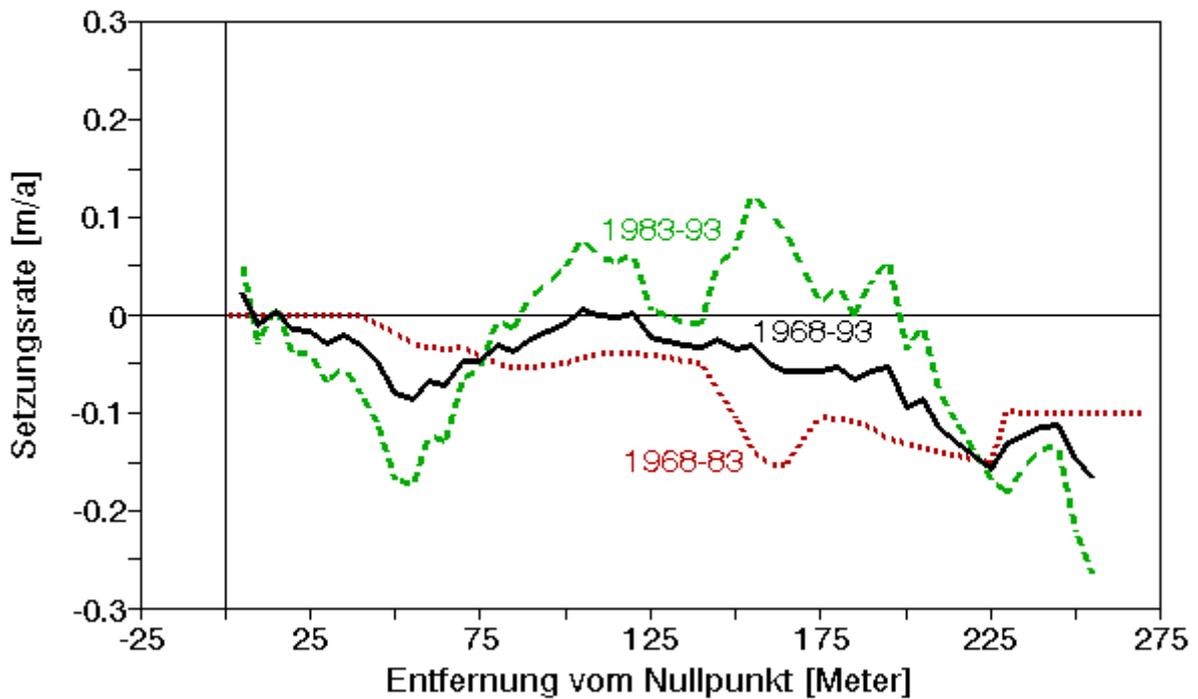


Abbildung 30: Setzungen am Tetrapodenquerwerk Hörnum

## 3.2 Küstenschutzmaßnahmen von 1972 bis 1996

### 3.2.1 Sandaufspülungen

Die erste Sandaufspülung auf Sylt erfolgte 1972 vor Westerland zur Sicherung der dort vorhandenen Küstenschutzanlagen. In der Folgezeit wurden vor Westerland im Abstand von sechs Jahren Wiederholungsaufspülungen vorgenommen. Die regelmäßige Durchführung von Aufspülungen zum Erhalt der Dünen und Kliffs der übrigen Küstenstrecken geschieht seit 1983. *Tabelle 12* zeigt eine Zusammenstellung der Mengen und Kosten und *Abbildung 31* eine Übersicht der von 1972-1996 durchgeführten Sandaufspülungen vor Sylt.

Ausführliche Darstellungen zum Verhalten der Sandaufspülungen finden sich z.B. in WENZEL (1979), DETTE & GÄRTNER (1987), FÜHRBÖTER (1991), STACKELBERG et al. (1994), ALW (1994a). Im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu den Sandaufspülungen wurde eine eingehende Auswertung der Strand- und Vorstrandveränderungen vorgenommen (ALW 1996b).

*Abbildung 32* verdeutlicht den Verlauf der Sandmengen in  $m^3/m$  seit der Ausgangsvermessung 1971 für die Höhenbereiche NN+5m bis NN-1m und NN-1m bis NN-7m. Es ist deutlich zu erkennen, daß durch die Sandaufspülungen im Vergleich zu 1971 wesentlich mehr Sand im Strand und Vorstrand vorhanden ist.

Das von FÜHRBÖTER & DETTE (1992) beobachtete Verhalten der Sandaufspülungen vor Westerland, deren Abnahmetendenz einer Exponentialfunktion entsprach, werden für den Strand gut wiedergegeben. In den ersten zwei Jahren ist ein schneller Rückgang der Sandvolumina im Bereich des Strandes festzustellen, wobei anschließend eine Phase der langsameren Umlagerung einsetzt. Die Auswertungen haben keinen Hinweis dafür gegeben, die eine oder andere Form des Spülkörpers zu favorisieren.

Die Ergebnisse der Vermessungen der Sandaufspülung Hörnum 1983 zeigen dagegen ein

etwas anderes Verhalten (*Abbildung 33*). Im Bereich des Strandes (NN+5m bis NN-1m) tritt eine geringe Abnahme auf. Im Bereich des Vorstrandes kommt es infolge der Aufspülung und der unmittelbar darauf einsetzenden Umlagerungen zu einer leichten Auffüllung des Vorstrandes. Von 1985 bis 1986 verliert der Vorstrand im Bereich Hörnum viel Material.

*Abbildung 34* zeigt die Differenzen der Sandvolumina für die Sandaufspülungen nach 1985 innerhalb der Höhenbereiche NN+5m bis NN-1m und NN-1m bis NN-7m. Das Verhalten im Strand ist für alle betrachteten Aufspülungen im Südteil der Insel sehr ähnlich. Die Phase des beschleunigten Umbaus des Spülkörpers liegt zwischen 14 (Puanklent) und 38 (Rantum) Monaten, anschließend ist die Bilanz nahezu ausgeglichen. Lediglich im Bereich Hörnum sind auch 5 Jahre nach der Aufspülung noch deutliche Verluste festzustellen.

Für die Nordhälfte ergibt sich ein weitgehend uneinheitliches Verhalten der Sandumlagerungen. Für die Aufspülungen im Nordteil ist außer dem nahezu kontinuierlichen Volumentrückgang des Strandes keine Systematik erkennbar. Die Umlagerungen im Bereich des Strandes sind im Abschnitt List am größten.

Der Einfluß unterschiedlicher Aufspülprofile ist in der Südhälfte der Insel nicht deutlich nachweisbar. Die zeitliche Entwicklung zeigt jedoch, daß im Mittelteil der Insel bis Rantum mit dem "normalen" Längssandaufspülprofil (60m breites Depot anschl. Böschung 1:10) gute Erfahrungen vorliegen. Im Bereich der Inselenden deuten die Auswertungen darauf hin, daß die ausgeprägte Wechselwirkung Strand - Vorstrand nicht mehr in dem Maße vorhanden ist. Hier sind evtl. Aufspülprofile vorteilhafter, bei denen weniger Material direkt in den Vorstrand eingebracht wird.

**Tabelle 12: Zusammenstellung der Aufspülmengen und Aufspülkosten (1972-1996)**

|    |                        |      | von     | bis     | Strecke | Menge (Hopper)      | Menge             | d <sub>50</sub> | Kosten  | Gebiet der Sandentnahme |
|----|------------------------|------|---------|---------|---------|---------------------|-------------------|-----------------|---------|-------------------------|
|    | Bereich der Aufspülung | Jahr | Station | Station | km      | Mio. m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> /m | mm              | Mio. DM |                         |
| 1  | Westerland             | 1972 | 50+690  | 01+050  | 1,740   | 1,000               | 575               | 0,440           | 6,100   | Rantum-Ost              |
| 2  | Westerland             | 1978 | 50+740  | 00+950  | 1,690   | 1,000               | 592               | 0,440           | 5,200   | Rantum-Ost              |
| 3  | Hoernum                | 1983 | 67+187  | 65+987  | 1,200   | 0,640               | 533               | 0,380           | 3,200   | Theeknobssand           |
| 4  | Westerland             | 1984 | 50+340  | 01+050  | 1,390   | 1,030               | 741               | 0,350           | 4,900   | Westerland II           |
| 5  | Kampen                 | 1984 | 05+482  | 05+582  | 0,100   | 0,036               | 365               | 0,350           | 0,300   | Westerland II           |
| 6  | Rantum                 | 1984 | 57+235  | 55+396  | 1,839   | 0,320               | 174               | 0,290           | 2,100   | Westerland II           |
| 7  | Wenningstedt-Kampen    | 1985 | 02+237  | 07+040  | 4,803   | 1,974               | 411               | 0,497           | 14,400  | Westerland II           |
| 8  | Hoernum                | 1986 | 67+587  | 64+087  | 3,500   | 1,600               | 457               | 0,434           | 7,700   | Theeknobssand           |
| 9  | Kampen-Kliffende       | 1987 | 06+433  | 06+954  | 0,521   | 0,303               | 582               | 0,535           | 2,800   | Westerland II           |
| 10 | Rantum                 | 1987 | 57+385  | 54+503  | 2,882   | 1,440               | 500               | 0,420           | 10,200  | Westerland II           |
| 11 | List                   | 1988 | 13+609  | 16+412  | 2,803   | 1,210               | 432               | 0,450           | 6,500   | Salzsand                |
| 12 | Dikjendeel             | 1988 | 53+599  | 51+466  | 2,133   | 1,000               | 469               | 0,558           | 5,700   | Westerland II           |
| 13 | Puan Klent             | 1989 | 61+686  | 57+285  | 4,401   | 1,966               | 447               | 0,530           | 10,300  | Westerland II           |
| 14 | Westerland             | 1990 | 50+440  | 01+050  | 1,490   | 1,200               | 805               | 0,500           | 7,700   | Westerland II           |
| 15 | Kampen                 | 1990 | 05+131  | 07+040  | 1,909   | 0,990               | 519               | 0,400           | 7,800   | Westerland II           |
| 16 | Wenningstedt           | 1990 | 03+028  | 03+639  | 0,611   | 0,260               | 426               | 0,500           | 1,900   | Westerland II           |
| 17 | Hoernum                | 1990 | 68+237  | 67+087  | 1,150   | 1,020               | 887               | 0,630           | 5,700   | Theeknobssand           |
| 18 | Wenningstedt-Kampen    | 1991 | 03+439  | 05+081  | 1,642   | 0,860               | 524               | 0,580           | 6,200   | Westerland II           |
| 19 | Hoernum                | 1991 | 66+487  | 64+137  | 2,350   | 1,160               | 494               | 0,520           | 9,200   | Westerland II           |
| 20 | Klappholtal            | 1992 | 06+535  | 11+537  | 5,002   | 2,080               | 416               | 0,460           | 19,100  | Westerland II           |
| 21 | List                   | 1993 | 14+137  | 15+547  | 1,410   | 0,840               | 596               | 0,450           | 7,700   | Salzsand                |
| 22 | Puan Klent             | 1993 | 62+636  | 61+036  | 1,600   | 0,610               | 381               | 0,460           | 5,600   | Westerland II           |
| 23 | Hoernum                | 1993 | 68+337  | 66+187  | 2,150   | 0,760               | 353               | 0,460           | 7,000   | Westerland II           |
| 24 | Hoernum                | 1995 | 67+887  | 64+587  | 3,300   | 1,003               | 304               | 0,670           | 11,400  | Westerland II           |
| 25 | List Süd               | 1995 | 12+783  | 14+137  | 1,354   | 0,236               | 174               | 0,450           | 2,700   | Salzsand                |
| 26 | List Nord              | 1995 | 15+449  | 17+275  | 1,826   | 0,300               | 164               | 0,450           | 3,000   | Salzsand                |
| 27 | Westerland             | 1996 | 50+890  | 01+250  | 2,140   | 0,744               | 348               | 0,510           | 7,100   | Westerland II           |
| 28 | Kampen Riff            | 1996 | 04+979  | 06+131  | 1,152   | 0,240               | 208               | 0,510           | 2,200   | Westerland II           |
| 29 | Rantum                 | 1996 | 57+934  | 54+996  | 2,938   | 0,400               | 136               | 0,510           | 3,100   | Westerland II           |
| Σ  |                        |      |         |         | 61,026  | 26,221              |                   |                 | 186,8   |                         |

Aufspülmengen: 26,221 Mio. m<sup>3</sup> (Hoppermaß)

21,051 Mio. m<sup>3</sup> (feste Masse)

Umrechnungen:

feste Masse=0,8028\*Hoppermenge, bzw.

Hoppermenge=1,2456\*feste Masse

Aufspülkosten: 186,800 Mio. DM 7,12 DM pro m<sup>3</sup> (Hoppermaß)

8,87 DM pro m<sup>3</sup> (feste Masse)

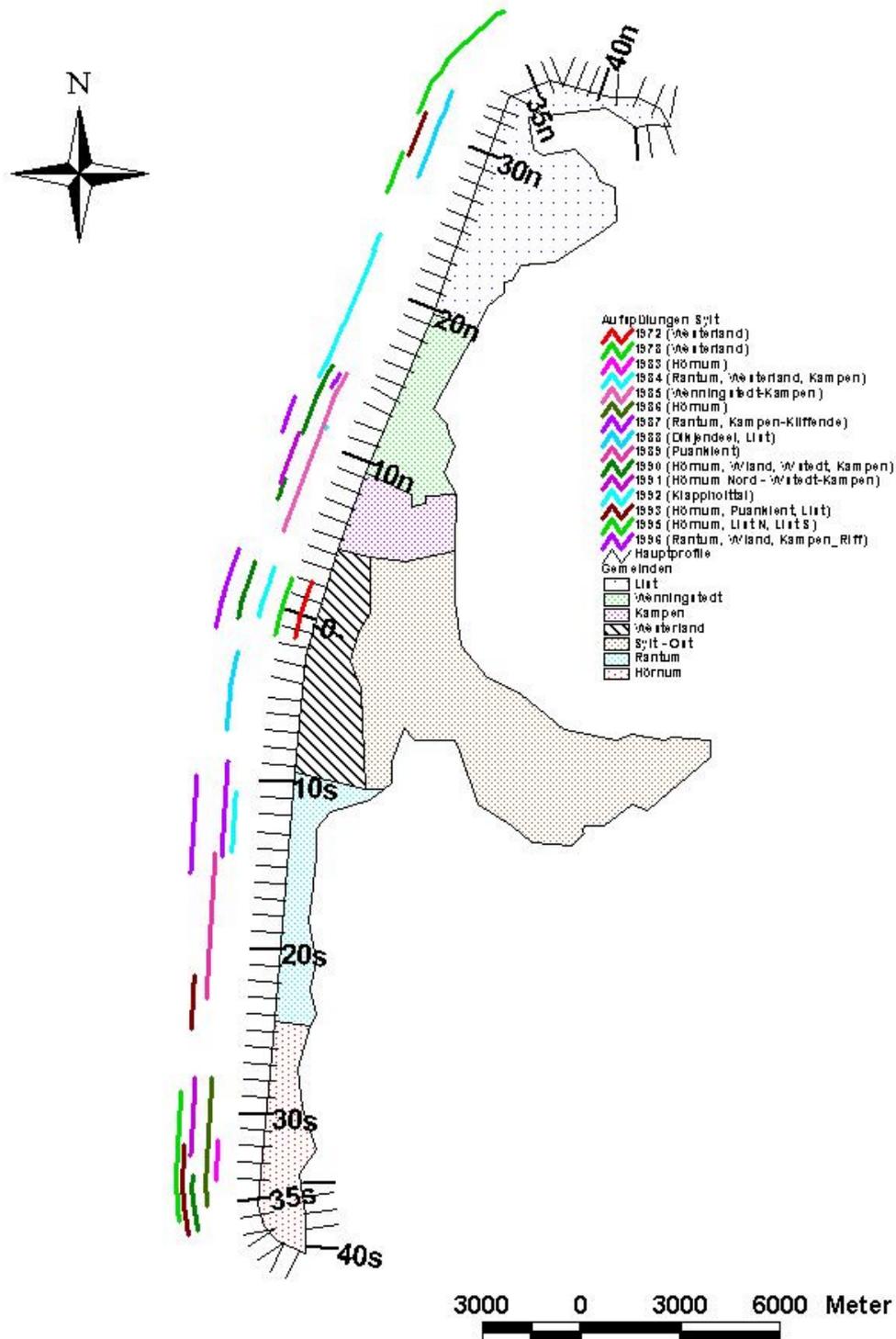
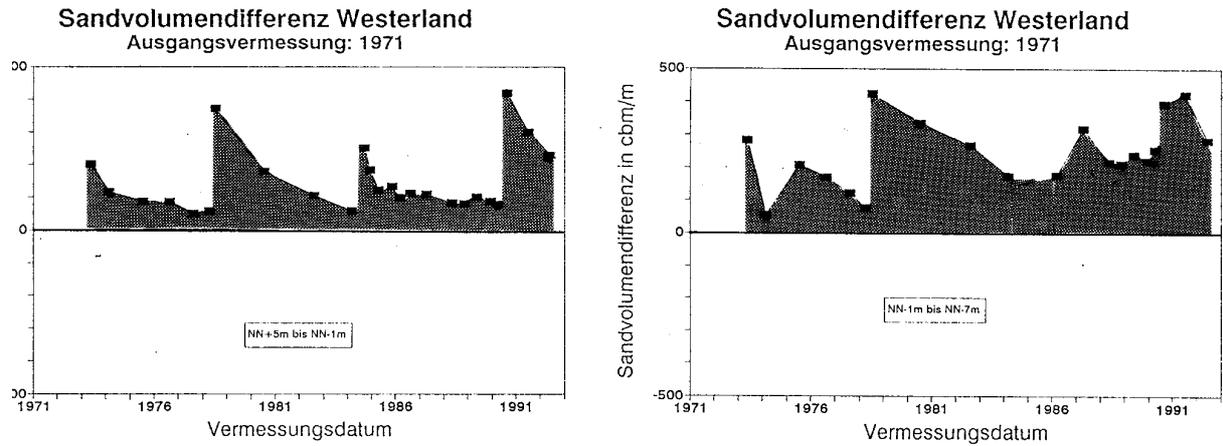
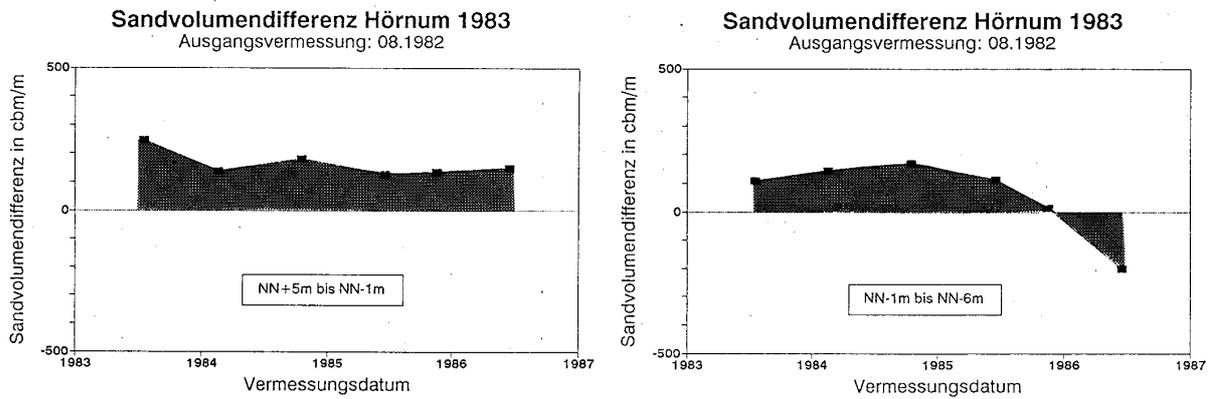


Abbildung 31: Übersicht der Sandaufspülungen 1972-1996



**Abbildung 32: Ganglinien der Sandvolumen für die Aufspülungen im Bereich Westerland in den Höhenschichten NN+5m/NN-1m und NN-1m/NN-7m (bezogen auf die Vermessung 1971)**



**Abbildung 33: Ganglinien der Sandvolumen für die Aufspülungen im Bereich Hörnum in den Höhenschichten NN+5m/NN-1m und NN-1m/NN-6m (bezogen auf die Vermessung 1982)**

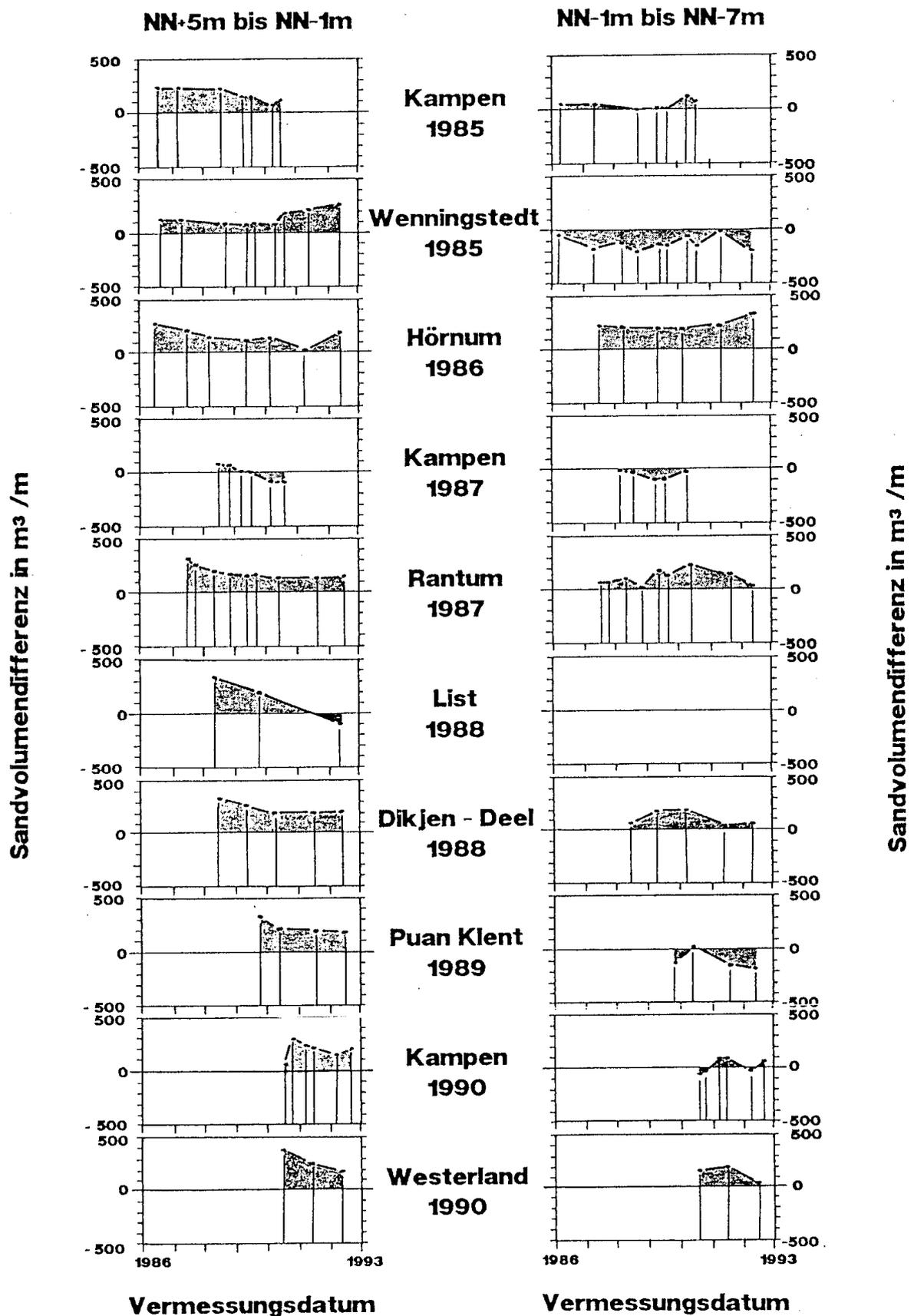


Abbildung 34: Ganglinien der Sandvolumen für die Aufspülungen von 1985 bis 1990 in den Höhenschichten NN+5m/NN-1m und NN-1m/NN-6m (bezogen auf die jeweilige Ausgangsvermessung)

In der Nordhälfte stellen sich nicht in gleicher Weise stabile Verhältnisse ein. Neben der 1985 gewählten Form des Spülkörpers, die evtl. zu geringeren Anfangsverlusten geführt hat und damit eine schlechtere Versorgung des Vorstrandes bewirkt hat, könnte auch die nördlich von Westerland um etwa 22° abknickende Ufer- und Küstenlinie von Bedeutung sein. Die dadurch geänderten hydrodynamischen Randbedingungen bewirken im Mittel eine Erhöhung der küstenparallelen Komponente der Wellenenergie und damit verstärkte Transportvorgänge insbesondere im Vorstrand (FÜHRBÖTER & DETTE 1992). Möglicherweise kann das Abbauverhalten des trockenen Strandes durch eine Stabilisierung des Vorstrandes (Riffaufspülung, Riffergänzung) verlangsamt werden. Die bisherigen Beobachtungen sowie Versuche im „Großen Wellenkanal“ in Hannover (GWK) haben die positive Wechselbeziehung zwischen einem gut ausgebildetem Vorstrand und dem Aufspülprofil gezeigt (DETTE 1986, 1991).

Die optimale Profilform ist aus den vorliegenden Untersuchungen nur schwer abzuleiten. Die Umlagerung des Spülkörpers Kampen 1990 hat sich bislang positiv verhalten, so daß für diesen Küstenabschnitt das "normale" Längsaufspülungsprofil (60m breites Depot, OK NN+5,0m, Böschung 1:30 - 1:10) gespült werden sollte. An den Inselenden sind dem-

gegenüber eher Profile zu bevorzugen, bei denen weniger Material in den Vorstrand gegeben wird, da hier die Wechselwirkung zwischen Strand und Vorstrand nicht mehr so ausgeprägt ist.

*Abbildung 35* zeigt die Entwicklung der Küstenlinie für die Höhenkoten NN+5m, NN+3,75m und NN±0m als Vergleich des Zustandes vor den kontinuierlichen Sandaufspülungen (1984/86) mit dem heutigen Zustand (1993/94). Von 26s bis 13n (Kampen-Kliffende) sind der trockene Strand und die Wasserwechselzone in den 6 Jahren um ca. 10 m bis 30 m seewärts verlagert worden. Im Abschnitt 10s bis 16s wurde der Strand schmaler, indem die NN±0m um einige Meter zurückgegangen und der trockene Strand (NN+3,75m, NN+5m) seewärts verlagert ist. Durch die 1992 und 1993 erfolgten Sandaufspülungen in den Abschnitten (14n-23n, 28n-31n, 32s-36s, 22s-25s), ist die seewärtige Verlagerung der Küstenlinie noch besonders ausgeprägt. In den Abschnitten, in denen bislang keine Sandaufspülungen durchgeführt worden sind, ist ein Rückgang des trockenen Strandes festzustellen (26s-30s, 4n, 26n-29n und 32n-34n). Nördlich des Deckwerkes List (35n) bis 39n hat sich der gesamte trockene Strand verbreitert. Ostwärts von Profil 39n sind Rückgänge aufgetreten.

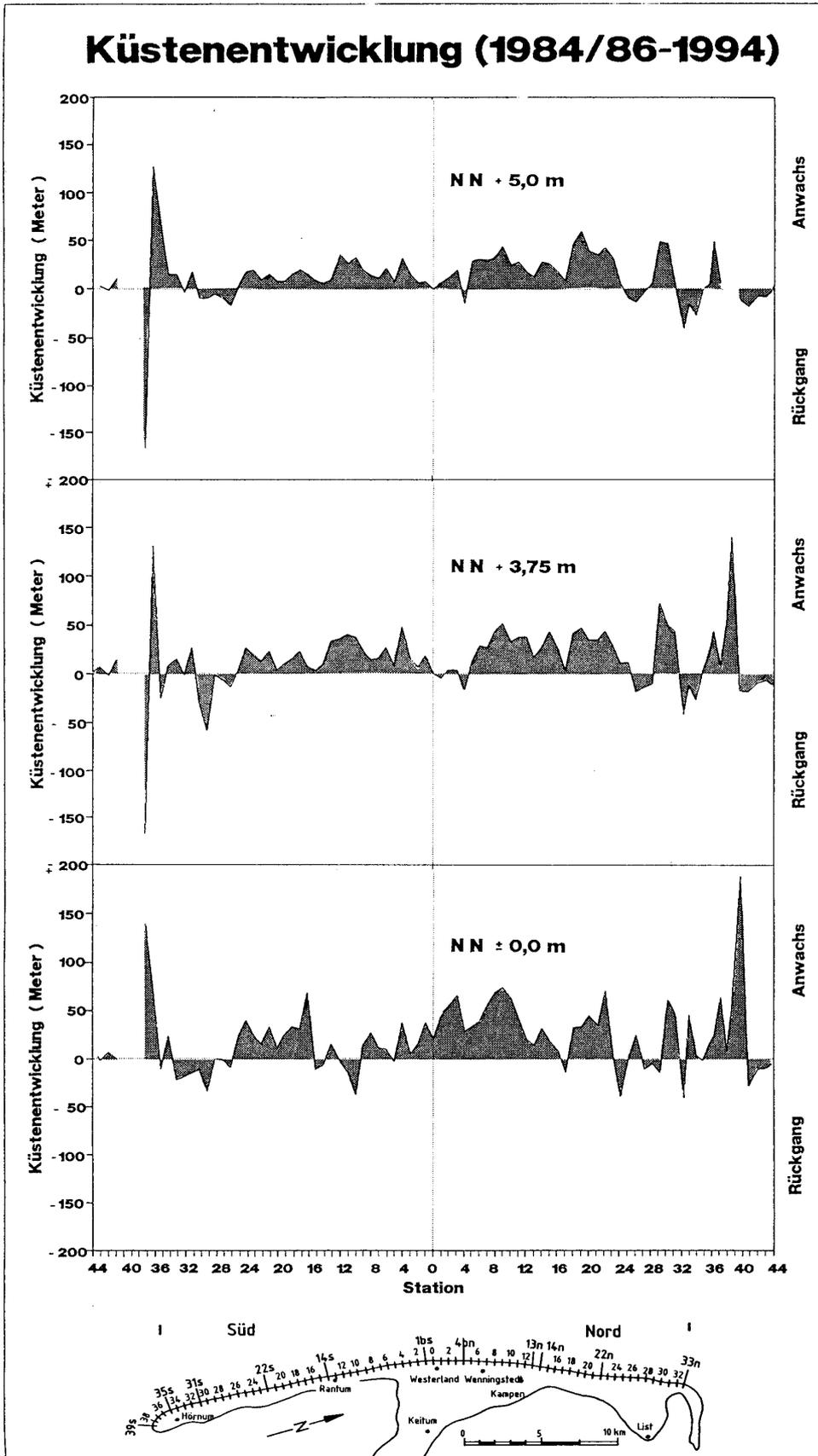


Abbildung 35: Küstenentwicklung (außer Hörnum-Odde) zwischen 1984/86 und 1993/94 für die Höhenkoten NN+5m, NN+3,75m und NN±0m

### 3.2.2 Biotechnische Maßnahmen

Für den Zeitraum 1985 bis 1994 wurden die Aufwendungen für biotechnische Maßnahmen in einem Erfahrungsbericht zusammengestellt (ALW 1996a). Nachdem auf der Grundlage des 1985 aufgestellten Fachplanes (ALW 1985) an der Westküste regelmäßig Sand aufgespült wurde, erhöhte sich das Sandangebot in den aufgespülten Strandabschnitten und deren Nachbarbereichen deutlich.

Die Aufgabe biotechnischer Maßnahmen bestand darin, den aufgespülten Sand vor der Randdüne festzulegen, damit er eine möglichst lange Zeit als künstlich aufgespültes Sanddepot den Schutz der Randdüne gewährleisten konnte. Vor allem durch seegangsbedingte Umlagerungen waren ständig Sandmengen mobilisiert und dem äolischen Transport ausgesetzt, so daß dieses Material als Vordüne und zur seeseitigen Verstärkung der Randdüne aufgefangen werden sollte.

Der Erfolg der biotechnischen Maßnahmen kann aufgrund der Sedimentation in den Sandfangzäunen (120 km/a) und auf den Halmpflanzungen (13 ha/a) abgeschätzt werden. Die Auswertungen der tachymetrischen

Vermessungen belegen den Sandanwachs, der zum großen Teil durch die Halmpflanzungen bedeckt wird. Die sandfangende Wirkung der Sandfangzäune wird mit 240.000 m<sup>3</sup>/a und die der Halmpflanzungen mit 90.000 m<sup>3</sup>/a angegeben, so daß eine Gesamtmenge von 330.000 m<sup>3</sup>/a auf einer 30 km langen Strecke durch biotechnische Maßnahmen zur Ablagerung am Dünenfuß gebracht wird (entspr. 11 m<sup>3</sup>/m/a).

Für biotechnische Maßnahmen im Abschnitt Tetrapodenquerwerk (35s) und Deckwerk List (35n) wurde vor 1984 ein jährlicher Betrag von rd. 1,0 Mio. DM/a aufgewendet. Im Zeitraum 1985-1994 sind jährlich 1,4 Mio. DM/a für Maßnahmen des biotechnischen Küstenschutzes aufgewendet worden, wobei zwischen Eigenanteil (1,2 Mio. DM/a) und Fremdvergabe (0,2 Mio. DM/a) zu unterscheiden ist.

Insgesamt entspricht die akkumulierte Sandmenge einem Wert von 2,8 Mio. DM/a (bei 8,50 DM/m<sup>3</sup>), so daß bei der Aufwendung von 1,4 Mio. DM/a für biotechnische Maßnahmen durch den Einsatz von 1 DM ein Wert von 2 DM erwirtschaftet worden ist.

### 3.2.3 Riffergänzung Kampen - Kliffende

Im Bereich Kampen-Kliffende wurden 1985 und 1987 Sandaufspülungen zur Sicherung der Küste durchgeführt. Die schweren Sturmfluten im Jahre 1990 hatten die Reste der Aufspülungen vollständig abgetragen und zusätzlich ca. 8m des Moränenkernes ausgewaschen. Zum Schutz des Objektes "Haus der Deutschen Bank" hat der Eigentümer auf einer Strecke von 60m aus Eigenmitteln eine Sicherung aus geotextilen sandgefüllten Einheiten hergestellt. Dieses Bauwerk wurde durch die im Sommer 1990 durchgeführte Sandaufspülung überdeckt, wobei im Januar 1994 erstmals diese Einheiten z.T. freigelegt worden sind.

Im Zuge der Sandaufspülungen 1990 wurde vor Kliffende ein Naturversuch mit unterschiedlichen Geotextilien in Form von 10 m<sup>3</sup> Sandsäcken vorgenommen. Aufgrund der Peildaten wurde erkannt, daß sich vor Kliffende zwischen 13n und 14n eine tiefere Riffücke (bis zu NN-6m im Mai 1990) ausgebildet hatte. Diese Riffücke wurde mit Hilfe der geotextilen Sandsäcke (416 Stück) von Juni-Oktober 1990 auf 350 m geschlossen.

Die Kosten dieser Maßnahme betragen (incl. Kosten der Beweissicherungen) 1,2 Mio. DM (ALW 1992). Die wissenschaftliche Begleitung erfolgte durch das Geologisch-Paläontologische Institut und Museum der Universität Kiel (KÖSTER & AHRENDT 1991).

Die morphologischen Auswertungen vor Kampen zeigen, daß die eingebrachten geotextilen Sandsäcke durch die Vorgänge im Vorstrand überdeckt worden sind. Die Sturmfluten des Januar und Februar 1990 haben den Vorstrand deutlich aufgefüllt, wobei das Sandriff seewärts verlagert worden ist. In der Folgezeit fand z.T. ein strandwärtiger Transport des Vorstrandmaterials statt, so daß eine Übersandung der eingebrachten Sandsäcke beobachtet wurde. Die Qualität des Materials hat sich bisher bewährt, so daß keine Elemente zerstört worden sind.

### 3.2.4 Beseitigung der Spundwandbuhnen

Auf der Grundlage eines Entwurfes vom 08.04.1971 mit einer Anschlagssumme von 0,950 Mio. DM wurden im Zeitraum 1971 bis 1993 in insgesamt 13 Bauabschnitten die Reste der Spundwandbuhnen abgebrannt.

Die bisherigen Baukosten betragen rd. 0,852 Mio. DM, wobei Spundwände mit einer Gesamtlänge von 5.210 m abgebrannt worden sind; unter MThw betrug die Länge rd. 3.360 m, über MThw rd. 1.850 m.

### 3.2.5 Sicherung des Deckwerkes am Lister Ellenbogen

Aufgrund des anhaltenden Küstenrückganges am Lister Weststrand bietet das Deckwerk einen Schutz vor der weiteren Abtragung der Randdünen. Auf der Grundlage eines Entwurfes vom 18.01.1993 mit einer Anschlagssumme von 0,175 Mio. DM wurde vom 03.06.1993 bis 23.09.1993 das südliche Deckwerksende durch einen halbkreisförmigen Böschungskegel (Neigung 1:4) mit Ba-

saltsteinen, die auf einem 0,20 m dicken Schotterbett und einer Filtervliesmatte lagern, festgelegt. Der landseitige Abschluß wurde durch Keilfalzplatten (60/80/8 cm) gebildet. Die Fußsicherung erfolgte mit einer 2 m langen Pfahlreihe.

Die Kosten dieser Maßnahme betragen 215.096,79 DM brutto.

### 3.3 Bearbeitung möglicher Küstenschutzkonzepte

Die Sylter Westküste ist einer hohen Belastung durch Wellenenergie ausgesetzt. Der mittlere jährliche Energiefluß in die Brandungszone beträgt rd. 30 000 kWh pro Meter Küstenlänge. Der küstenparallele Energiefluß nach Norden ist im Nordteil der Insel etwa doppelt so groß wie nach Süden. Die Insel Sylt stellt ein offenes Sandsystem dar, d.h. das Sediment, das an den Inselenden ankommt, wird dort in die Haupttiderinnen verfrachtet und über die Inselenden heraus nach Norden und Süden verteilt. Da wenig von dem Sand wieder an die Sylter Westküste zurückkommt, hat die Insel über Jahrhunderte an Substanzverlust gelitten. Die Größenordnung des mittleren Sandverlustes aus der Sylter Westküste liegt zwischen 0,7 und 1,4 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Die Erosionsvorgänge an der Sylter Westküste werden durch das Zusammenspiel der mittleren Verhältnisse und einzelner Extremereignisse (Sturmfluten) bestimmt. Die alltäglichen Vorgänge fördern den Wiederaufbau des Strandes, der bei Sturmfluten im gewöhnlich trockenen Strand und dem Dünen- bzw. Kliffbereich erodiert wird. Energiereiche Perioden ermöglichen außerdem die Akkumulation von Material im Vorstrand aus den Tiefen des Seegrundes.

Ein konstanter Seegang führt zu einer Gleichgewichtsform des Unterwasserprofils der Brandungszone. Auf diesem Profil geht der küstennormale Sandtransport zu Null und die Menge des Sandes, die durch den Seegang mobilisiert wird, erreicht ein Minimum. Dies hat zur Folge, daß auf dem Gleichgewichtsprofil auch der küstenparallele Sandtransport durch die wellen- und tideerzeugten Strömungen (Advektion des Sand - Wasser - Gemisches) ein Minimum erreicht. Das eigentliche Profil der Brandungszone ist durch einen jährlichen Mittelwert charakterisiert, wovon die momentanen Profile etwas abweichen, d.h. das Profil wird eine Schwankungsbreite aufweisen. Bei anhaltender Erosion des Gesamtprofils ist diesem Vorgang eine stete Ostwärtsverlagerung überlagert.

Die Sturmfluten führen zur Querverlagerung des Sandes in die Brandungszone. Für die Sturmfluten des Jahres 1990 wurde z.B. die querverlagerte Menge mit 1,8 Mio. m<sup>3</sup> (NN+7m/NN+1m) ermittelt. Diese Sandmenge führt zu einem Ungleichgewicht des Unterwasserprofils, so daß der Seegang einer erhöhten Mobilisation reagiert. Dabei werden durch die überlagerten wellen- und tideer-

zeugten Strömungen erhöhte Sandmengen in den Vorstrand akkumulieren und zu den Inselenden transportiert. Ein Teil des querverlagerten Sandes wird durch den Seegang an den Strandhang zurückgeführt und kann mit biotechnischen Maßnahmen am Strand gehalten werden.

Für die Entwicklung der Küstenschutzkonzepte wurden folgende Rahmenbedingungen zugrunde gelegt (s. Abs. 2.3.2 und ALW 1994a,b):

- Erhalt des Küstenlinie
- Vermeiden negativer Einflüsse auf die Nachbarbereiche
- Minimieren der Umweltbeeinflussung
- Erhalt des Sandstrandes
- Akzeptanz für den Tourismus

Der Ausgangspunkt war der "Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein" (MELFF 1986), worin folgendes festgelegt ist:

⇒ "Grundsätzlich sollen sandige Küsten von massiven Bauwerken frei bleiben..."

Diese Rahmenbedingungen hatten zur Folge, daß die Sandaufspülung als Küstenschutzmaßnahme die höchste Bewertung erhielt. Positiv beurteilt wurden auch die geotextile Sperre im Aufspülkörper, geotextiler Objektschutz, Maßnahmen am Riff und Endschwellen.

Die folgenden Küstenschutzkonzepte wurden als Ergebnis des Forschungsvorhabens "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt" für detaillierte Untersuchungen empfohlen (ALW 1994b):

- ausschließlich Strandaufspülungen
- Endschwellen und Strandaufspülungen
- Endschwellen, Membran, Aufspülungen und Maßnahmen am Riff

Mit Hilfe von Machbarkeitsstudien, die Angaben zu der Qualität und den Kosten enthalten, ist eine gegenseitige Bewertung der Konzepte vorgenommen worden, die ein jeweils gleiches Schutz- und Sicherheitsniveau aufweisen.

Die Kostenabschätzung muß die Herstellungskosten und die Unterhaltungskosten berücksichtigen. Die Bedeutung eines breiten trockenen Strandes und von gesicherten Dünen bzw. Kliffs ist zu beschreiben; volkswirt-

schaftliche Kosten - Nutzen - Analysen werden hierbei jedoch nicht aufgestellt.

Die durchschnittliche Nutzungsdauer der Küstenschutzmaßnahmen beträgt 35 Jahre (Amortisierungsperiode) (LAWA 1994).

### 3.3.1 Machbarkeitsstudie Sandaufspülungen

Von 1972 bis 1996 sind an der Sylter Westküste ca. 21 Mio. m<sup>3</sup> Sand aufgespült worden, so daß praktische Erfahrungen über Verfahren und Wirkung vorliegen.

Bei dem Konzept "ausschließlich Sandaufspülungen" ist eine Optimierung der für die Brandungszone erforderlichen Sandmengen nicht möglich, da der Sandeintrag in die Brandungszone von den Sturmfluten abhängig ist. Die Optimierung ist nur auf die Form der Sandaufspülungen auf dem trockenen Strand und die Häufigkeit der Wiederherstellung der Aufspülkörper beschränkt. Diese Methode vernachlässigt die seewärtige Erosion des Inselsockels.

Drei Varianten des Küstenschutzes durch Sandaufspülungen sind zu erwägen:

- a) Wiederherstellung der Dünen nach Sturmfluten und des Strandes und
- b) Wiederherstellung eines breiten trockenen Strandes, der einen Aufspülkörper, der mit einer flachen seewärtigen Neigung (rd. 1:25) auf rd. NN+6m ansteigt, aufnehmen kann
- c) Kombination von Strand- und Vorstrandaufspülung

Die Alternative (a) ist im Prinzip eine Schadensbehebungsmaßnahme. Sie sieht einen minimalen Aufbau des trockenen Strandes vor und nimmt den Substanzverlust aus der Düne während einer Sturmflut in Kauf. Da der Strand vor den Dünen meistens sehr niedrig, im Verhältnis zum Bemessungswasserstand von NN+4,50 m, ist, muß die gesamte Energie der Bemessungsturmflut von der Düne aufgefangen werden. Es sind daher große Sandverluste aus der Düne bzw. dem Kliff zu erwarten, die in den nachfolgenden Zeiten z.T. zum Wiederaufbau des Strandes zur Verfügung stehen.

Durch diese Vorgehensweise können die Kosten bis zum Auftreten der Schäden hinausgeschoben werden, die Endkosten werden aber

höher sein, da die Sandverluste aus der Düne höher als aus einem vorgelagerten hohen Strand sind. Zusätzlich sind noch die Kosten der Dünenwiederherstellung, die Dünenbepflanzung, die Folgekosten möglicher Dünen durchbrüche, die Kosten des Kliffverlustes, der nicht wiederherstellbar ist, zu berücksichtigen.

Bei dieser Methode besteht auch die Gefahr, daß der trockene Strand "laufend" schmaler wird.

Die Alternative (b) ist schon teilweise im Abschnitt Rantum - Kampen angewandt worden, indem durch die Aufspülungen ein breiter trockener Strand hergestellt worden ist. Auf so einem Strand läßt sich ein Aufspülkörper herstellen, der mit einer flachen seewärtigen Neigung bis auf ca. NN+6m ansteigt. Die flache Neigung wird das Auflaufen der Wellen bei Sturmfluten ermöglichen und die Bildung eines Erosionskliffes vermeiden, d.h. die Sandverluste aus dem Aufspülkörper werden reduziert. Der trockene Strand, der mit einer stetigen Neigung zur Düne ansteigt, wird der Düne bzw. dem Kliff während der Sturmflut Schutz bieten und die Mengen, die querverlagert werden, reduzieren. Um diesen "Ausgangszustand" für die gesamte Sylter Westküste zu verwirklichen, ist eine beachtliche Initialmenge von Sand erforderlich.

Da der Volumenverlust für breite flache Strände mit einem vorgelagerten fülligen Vorstrand am geringsten ist, kann die Alternative (c) in Form einer kombinierten Strand- und Vorstrandaufspülung aus folgenden weiteren Gründen vorgeschlagen werden:

- direkte Kompensation der Erosionsraten des Vorstrandes seewärts der NN-4m - Tiefenlinie (Riffbereich)
- geringere Störung des Strandbetriebes (Lärm, Abgase), geringere Kosten durch weniger Baustelleneinrichtung
- Reduzierung der Anfangsverlusten am Strand durch Verringerung der Aufspülmengen am Strand

### 3.3.2 Machbarkeitsstudie Sicherung des südlichen Inselendes

Der Küstenrückgang am südlichen Inselende, der in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, wirkte sich in der Form aus, daß die Küstenlinie südlich des Tetrapodenquerwerkes abknickt und an der Südspitze die größten Werte annimmt. Diese Verschwenkung der Küstenlinie in Südost Richtung bewirkt, daß nahezu alle anlaufenden Wellen einen Sedimenttransport nach Süden verursachen. Das Sediment wird unmittelbar in die Haupttiderrinne eingetragen. Der Vorgang wird noch unterstützt durch den Fluttidestrom, der ebenfalls zu hohen südöstlich gerichteten Strömungsgeschwindigkeiten führt.

Durch eine Rückverschwenkung der Hörnum-Odde auf eine weitgehende Nord - Süd - Ausrichtung wird erreicht, daß die Küstenlinie weitgehend rechtwinklig zu den mittleren Wellenanlaufrichtungen ausgerichtet wird. Infolgedessen wird der Küstenlängstransport und damit der Sedimentaustrag in das Vortrappief reduziert.

Die Rückverschwenkung der Hörnum-Odde war durch die nachfolgend beschriebenen Baumaßnahmen herzustellen und auf Dauer zu sichern. Hierbei die Nord - Süd - Ausrichtung der Hörnum-Odde durch einen Fixpunkt auf 60.68150 N und 34.53750 E vorgegeben.

Alle geplanten Baumaßnahmen waren in bezug auf die Funktion und Konstruktion zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Es wurde so vorgegangen, daß zunächst die grundsätzliche Wirkungsweise einer Baumaßnahme beschrieben und Hinweise zur Konstruktion gegeben wurden. Anschließend wurden die einzelnen Varianten beschrieben und die Vor- und Nachteile aufgeführt. Abschließend wurde in einer Diskussion die optimale Variante hinsichtlich Kosten und Wirkung für jede Baumaßnahme ermittelt.

Alle Varianten beinhalten, daß nach Fertigstellung der Bauwerke eine Sandaufspülung erfolgt, mit der die weitgehende Nord - Süd - Ausrichtung der Odde erreicht wird. Die Kosten dieser Sandaufspülung sind jeweils gesondert in den Kostenschätzungen aufgeführt.

In der Mengenermittlung sind die benötigten Mengen der Sandaufspülung für jede betrachtete Variante zusammengestellt. Die Ermittlung der Mengen erfolgte anhand des digitalen Datensatzes der Vermessung von Juli 1995 in Profilen mit einem Abstand von 50 m. Es

wurden drei unterschiedliche Formgebungen von Aufspülkörpern berücksichtigt:

1. Vorderkante Aufspülung entlang der definierten Nord - Süd - Ausrichtung mit einer Höhe von NN+2,50m (NN+3,75m bei Variante E II) und seeseitig eine mit 1 : 10 abfallende Böschung
2. Vorderkante Aufspülung wie vor mit einem von West nach Ost von NN+2,50m (bzw. NN+3,75m) auf NN+4,50m ansteigenden Spülkörper
3. Vorderkante Spülkörper entlang der zu erwartenden Küstenlinie, im weiteren Verlauf wie 1.

Die Ermittlung der Aufspülmenge wurde für die Varianten E I bis E VI durchgeführt. Für die Varianten mit Buhnen, Wellenbrechern und Alternativen wurden die Mengen entsprechend zu den bisherigen Berechnungen ermittelt. Die resultierenden Sandmengen sind naturgemäß bei der Formgebung 2 am größten. Die Differenz zu Form 1 beträgt je nach Variante rd. 20 bis 25 %. Durch eine Aufspülung nach Form 3 entlang der zukünftig zu erwartenden Küstenlinie wird eine Reduzierung des Sandbedarfs von rd. 55 bis 60 % im Vergleich zu Form 1 erreicht. Diese Bandbreite in der Mengenermittlung ist bei der Betrachtung der benötigten Sandmengen zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Untersuchungen für den zukünftigen Küstenschutz am südlichen Inselende werden die folgenden Lösungen betrachtet:

- Endbefestigung mit ergänzenden Schwellen
- Buhnengruppen
- Offshore Wellenbrecher
- Alternative Lösungen.

Bei einer Ausführung dieser Baumaßnahmen werden die im Schlußbericht zum Forschungsvorhaben (ALW 1994b) formulierten Randbedingungen nicht vollständig eingehalten. Bei allen Lösungen wurde versucht, die Randbedingungen möglichst weitgehend zu erfüllen. Varianten, die in starkem Widerspruch zu den Randbedingungen stehen, wurden nicht berücksichtigt.

In Abbildung 36 und Abbildung 37 sind skizzenhafte Darstellungen aller Varianten enthalten, die sowohl die Kosten für die Bauwerke

ke wie auch für die notwendige, begleitende Sandaufspülung enthalten.

Allen Varianten gemeinsam ist, daß die Bauwerke mit Landanbindung für Unterhaltungszwecke befahrbar ausgebildet wurden. Weiterhin wurden alle Varianten, die eine Wellenbrecherfunktion erfüllen, als Schüttsteinwellenbrecher auf einer geotextilen Sinkmatte ausgebildet. Das Gewicht der Steine in der Deckschicht sollte 3,0 bis 4,0 t erreichen. Bei der Ausbildung der Bauwerke mit Landanbindung wurde auf eine sanddichte Ausführung geachtet.

Die Vorgabe einer Nord - Süd - Ausrichtung der Küstenlinie wurde bei den zuerst betrachteten Varianten eingehalten. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung der Studie wurden jedoch zusätzlich Varianten betrachtet, mit denen ein verringerter Sedimentaustrag am südlichen Inselende verbunden mit geringeren Auswirkungen für die südlich vorgelagerten Flachgebiete erreicht werden kann, ohne daß die vorgegebene Küstenlinie eingehalten wird.

Bei der Bewertung derartiger Varianten, die durch die geringeren Bauwerksabmessungen auch zu geringeren Baukosten führen, ist diesen veränderten Eingangsvoraussetzungen Rechnung zu tragen.

Die Ermittlung der Mengen und Kosten für die begleitende Sandaufspülung erfolgte so, daß die Sandaufspülung bis zu einer gedachten Nord - Süd - Ausrichtung ausgeführt wurde und von dort mit einer Höhe von NN+2,50 m in den Dünengürtel ausläuft. Durch eine Ausbildung des Aufspülkörpers entlang einer zu erwartenden Küstenlinie, sind bei annähernd gleichem Effekt teilweise deutlich geringere Aufspülvolumen nötig.

Bei der Bewertung der Varianten ist grundsätzlich festzustellen, daß eine Reduktion des Sedimentaustrages am südlichen Inselende erreicht werden kann. Die Gefahren mögli-

cher Erosionen in angrenzenden Bereichen wurden durch verschiedene Maßnahmen reduziert. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden für das komplexe System, wie es die Hörnum-Odde mit den vorgelagerten Sänden darstellt, keine abschließenden Aussagen über mögliche Erosionszonen mit der Angabe unterschiedlicher Kolkstiefen getroffen.

Im folgenden wird eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Lösungen vorgenommen.

Die betrachteten Lösungen mit Bühnenbauwerken stellen nach heutigem Kenntnisstand kein erfolgversprechendes Konzept für den Küstenschutz dar:

- Bühnen führen nicht zu einer Anbindung des Strandes an die vorgelagerten Knobsände
- Bühnen führen zu Kolkbildungen und zusätzlichen Erosionen
- Bühnen verlagern das vorgelagerte Riffband weiter seewärts

Von den Lösungen mit einer Endbefestigung und begleitenden Schwellen wurden die Var. E III und E VI positiv bewertet. Beide Varianten stellen einen sehr großen Eingriff in das System dar, wobei die angestrebte Nord - Süd - Ausrichtung erreicht wird und die nach Süden abwandernden Sedimentmengen deutlich reduziert werden. Bei beiden Varianten ist nicht auszuschließen, daß südöstlich des Kopfes der Endbefestigung flächenhafte Erosionen auftreten werden.

Durch die gewählte Geometrie ist diese Tendenz bei der Var. E VI geringer, mit der durch eine südlichere Lage der Endbefestigung auch ein Anschluß an die vorgelagerten Sände erreicht wird. Eine vergleichbare Wirkung ist auch der Var. A II zuzuschreiben, die als Weiterentwicklung zur Var. E III zusätzlich den Bereich südlich des Tetrapodenquerwerkes durch einen Offshore - Wellenbrecher vor Lee - Erosion schützt.

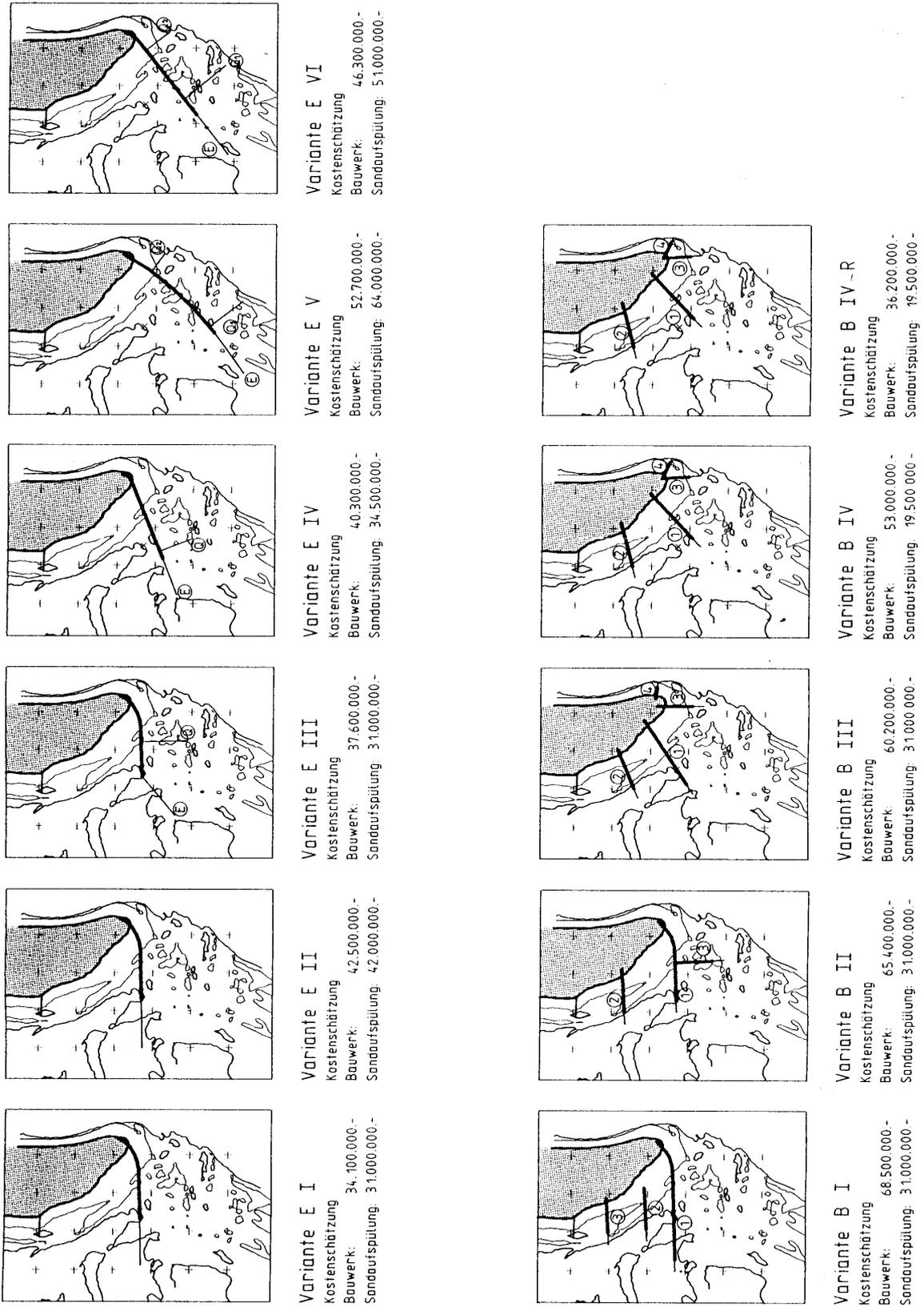


Abbildung 36: Varianten zur Sicherung des südlichen Inselendes

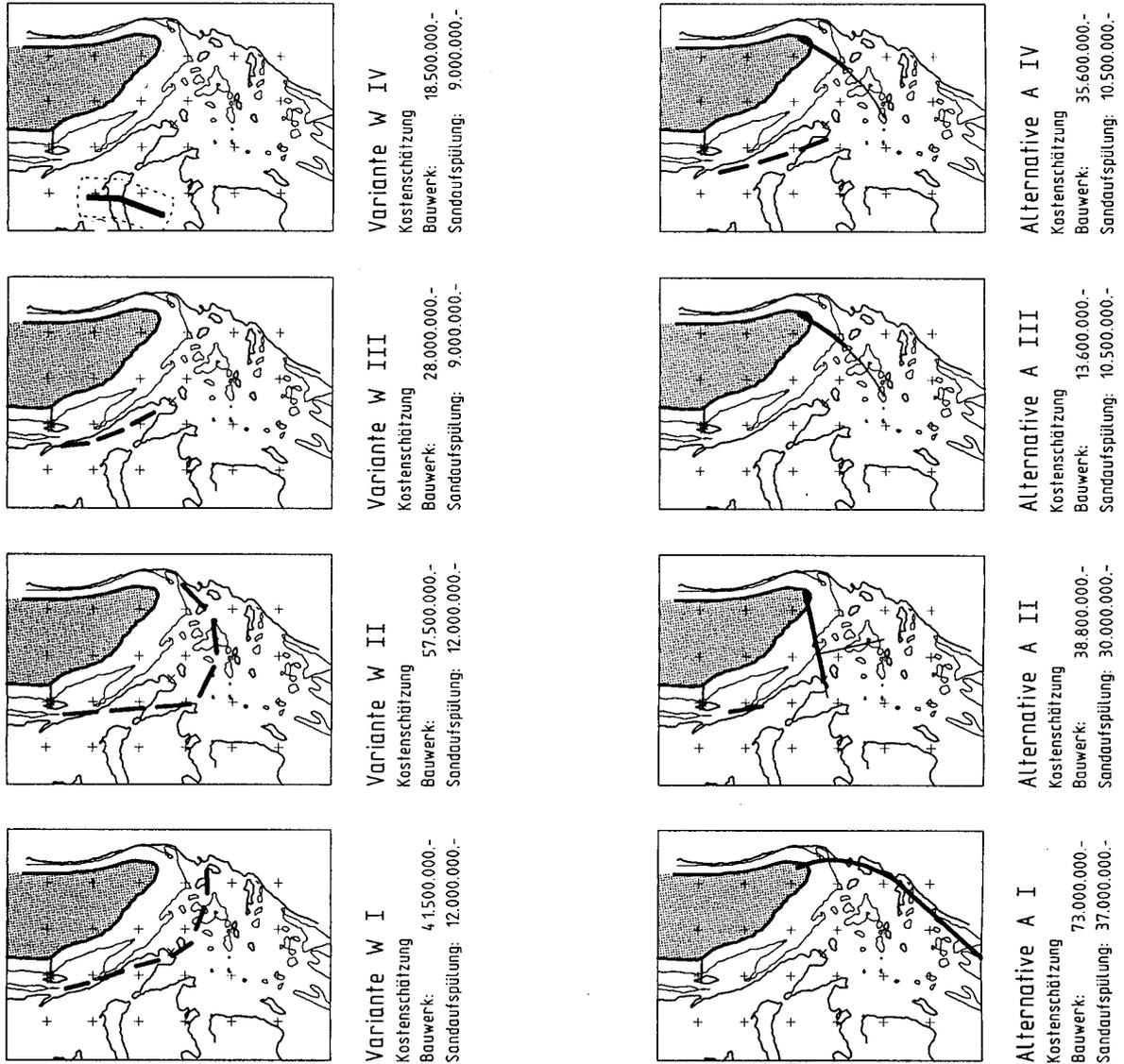


Abbildung 37: Varianten zur Sicherung des südlichen Inselendes

Positiv bewertet wurden auch die folgenden Varianten:

- Var. W III mit einem Schutz für den Nordteil der Hörnum-Odde
- Var. A III mit einer sehr kurzen Endbefestigung
- Var. A IV als Kombination aus den Var. W III und A III.

Diesen Varianten ist gemeinsam, daß der vorgegebene Punkt nicht gehalten und nur eine abgeschwächte Nord - Süd - Ausrichtung angestrebt wird. Durch das Heranführen des Transportbandes wird bei diesen Varianten eine maßvolle Reduktion des Sedimentaustrages erreicht. Infolgedessen sind die zu erwartenden negativen Auswirkungen auf die südlich und östlich angrenzenden Bereiche geringer als bei den zunächst angesprochenen Varianten.

Bei der Var. W III wird zunächst ein weiterer Rückgang der Südspitze Sylts zugelassen, bis die Spitze den Schutzbereich der vorgelagerten Wellenbrecher erreicht.

Mit der Var. A III wird mit verhältnismäßig geringem finanziellen Aufwand eine Festlegung der Südspitze erreicht, wobei die Erosion südlich des Tetrapodenquerwerkes nicht beeinflußt wird und zukünftig weitere Aufspülungen im Bereich des Querwerkes notwendig sind.

Mit der Var. A IV als Kombination der beiden vorgenannten wird sowohl ein Schutz für die Südspitze als auch für den Bereich südlich des Querwerkes erreicht. Diese Variante ist nach heutigem Kenntnisstand als diejenige vorzuschlagen, die für ein Küstenschutzkonzept in Frage kommt, da durch die Wirkung auf den Gesamtbereich südlich des Querwerkes weitere Aufspülungen in diesem Abschnitt nur in einem erheblich vergrößerten Zeitraster notwendig werden.

Im Verhältnis zu der Var. E VI, die ebenfalls positiv zu bewerten ist, stellt die Var. A IV einen geringeren Eingriff in das System dar, so daß nicht von gravierenden morphologischen Umlagerungen auszugehen ist.

Vor einer Festlegung auf eine Variante sind Wirtschaftlichkeitsüberlegungen anzustellen. Es ist davon auszugehen, daß durch die Var. E VI im Vergleich zur Variante A IV ein größerer Teil an Sediment zurückgehalten werden kann. Gleichzeitig können hierdurch evtl. in

der Folge Unterhaltungsmaßnahmen notwendig werden, die zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abschätzbar sind. Ein Wirtschaftlichkeitsnachweis ist nur so zu führen, daß die Baukosten der Ersparnis für die heute aufzuwendenden Aufspülungen im Bereich des Querwerkes gegenübergestellt werden (MOHN 1996). Nördlich des Querwerkes ist der Einfluß der Baumaßnahme für den Sedimenttransport gering.

Bei allen untersuchten Baumaßnahmen sind Kosten für zukünftige Unterhaltungsarbeiten zu berücksichtigen. Bei der gewählten Dimensionierung der **Endbefestigung** und **Wellenbrecher** ist nicht auszuschließen, daß bei den ersten Sturmfluten nach der Erstellung einzelne Steine umgelagert werden, bis sich die Konstruktion in sich gesetzt hat, ohne daß das Bauwerk insgesamt versagt. Eine Dimensionierung, bei der Schäden vollständig auszuschließen sind, würde jedoch zu einer deutlichen und unwirtschaftlichen Kostenerhöhung führen.

Die einmaligen Kosten zur Wiederherstellung des notwendigen Regelprofils sind mit insgesamt rd. 10 bis 15 % der Baukosten zu veranschlagen. Erfahrungsgemäß wird bei derartigen Bauwerken an der deutschen Nordseeküste (z. B. L-Bühne auf Helgoland) nach diesen Anfangsumlagerungen im weiteren Verlauf der Nutzungsdauer des Bauwerkes der Unterhaltungsaufwand deutlich geringer. Infolgedessen ist der o.a. Betrag als Gesamtunterhaltungsaufwand für die ersten 15 Jahre anzusetzen. Für die nächsten 15 Jahre ist ein weiterer einmaliger Betrag von 5 bis 8 % der Baukosten anzusetzen.

Für die **Endschwelle** wird eine Konstruktion vorgeschlagen, bei der geotextile Säcke unabgedeckt auf den Seeboden gelegt werden. Die Unterhaltungsaufwendungen sind in den ersten Jahren zur Wiederherstellung des Regelprofils nach lokalen Setzungen in der gleichen Größenordnung anzusetzen wie bei der Endbefestigung.

Über die Nutzungsdauer einer geotextilen Endschwelle können keine detaillierten Aussagen getroffen werden, da bis heute noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen. Im positiven Fall ist von einer Einsandung der obersten Schicht und dadurch von einem zusätzlichen Schutz auszugehen, im negativen Fall von einem verstärkten Sandschliff und schnellem Abnutzen der Oberflächen. In letzterem Fall müßte die oberste Lage der

Säcke ersetzt werden, wobei Kosten in der Größenordnung von 30 bis 50 % der Neubaukosten für die Endschwelle entstehen würden. Es ist in jedem Fall zu empfehlen, daß im Bereich des Bauwerkes regelmäßig gepeilt

wird. Zusätzlich sollten an den Säcken Materialproben befestigt werden, so daß bei späteren Taucheruntersuchungen der Zustand der Geotextilien überprüft werden kann.

### 3.3.3 Machbarkeitsstudie Sicherung des nördlichen Inselendes

Die Situation am nördlichen Inselende wird ausführlich von HUNDT (1939) beschrieben. In Teilbereichen gelten die dort getroffenen Aussagen auch heute noch. Zwei Gesichtspunkte haben jedoch dazu geführt, daß in jüngster Zeit wieder verstärkt über Maßnahmen zur Sicherung des nördlichen Inselendes nachgedacht wurde. Zum einen ist festzustellen, daß der Küstenrückgang südlich des Basaltdeckwerkes fortschreitet (ALW 1994b). Zum anderen haben neuere Vermessungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) im Jahre 1991 und 1994 und des ALW Husum im Jahre 1995 und 1996 gezeigt, daß sich im Lister Landtief die Tiefenlinien oberhalb von NN -7,0 m nach Norden verschoben haben. Die Rinne zwischen dem Salzsand und dem Ellenbogen (Lister Landtief) weist teilweise Tiefen von > NN -10,0 m auf und ist nur noch durch einen schmalen Rücken (NN -5,0 m, b < 200 m) vom Lister Tief getrennt.

Gleichzeitig wurde festgestellt (ALW 1994b), daß der Sandtransport in Richtung Norden rd. doppelt so groß ist wie der in Richtung Süden, so daß in diesem Bereich durch bauliche Maßnahmen der regionale Sedimenthaushalt gravierend beeinflußt werden könnte.

Bevor mögliche bauliche Maßnahmen im einzelnen untersucht werden, sind im folgenden die Verhältnisse an der Nordwest Spitze Sylts vereinfacht wiedergegeben:

- Bei den Strömungsverhältnissen im Lister Landtief sind die Tideströmungen vorherrschend. Durch unterschiedliche Seegangsverhältnisse wird die tideerzeugte Strömung verstärkt bzw. abgeschwächt; die grundsätzliche Tendenz der mit der Tide alternierenden Strömung bleibt jedoch bestehen. Die von HUNDT (1939) beschriebene überwiegende Flutstromdominanz konnte mit Hilfe von Strömungsmessungen und Modellrechnungen z.T. belegt werden (ALW 1996c). In unmittelbarer Küstennähe ist der Flutstrom stärker ausgeprägt, während im Lister Landtief die Ebbströmung größere Beträge aufweist.

- Der Salzsand und das Lister Tief unterliegen einer langsamen, aber stetigen Nordverlagerung. Hierdurch vergrößert sich der Anteil der Tide, der bei Flut durch das Lister Landtief einströmt, gegenüber dem Anteil des Lister Tiefs. Hierzu wurde bei HUNDT (1939) festgestellt, daß der Bestand des Salzsandes und der Landtieffarbe solange nicht gefährdet ist, wie zum einen ein ausreichendes Sedimentangebot von Süden zur Verfügung steht und zum anderen die Strömungsverteilung zwischen Landtief und Lister Tief erhalten bleibt. Die zunehmende Erosion im Landtief kann somit ihre Ursache in der geänderten Strömungsverteilung haben.
- Eine weitere Zunahme der Wassermengen wird durch die seit einigen Jahrzehnten zu beobachtende Vergrößerung des Tidenhubs verursacht (ALW 1994a).
- Theoretische Überlegungen zu den Strömungen an der Nordspitze Sylts (ALW 1994b) deuten darauf hin, daß sich bei den heutigen Verhältnissen eine hangstabilisierende Aufwärtsströmung am Südhang des Lister Tiefs einstellt. Hierdurch würde auch die Ausbildung als Schütthang begünstigt.

Im folgenden werden bei der Beurteilung der verschiedenen Varianten die Auswirkungen dieser Bauwerke auf die Strömungsverhältnisse untersucht. Über eine Beeinflussung der Strömungsverhältnisse (Strömungsreduktion in Landnähe südlich der Schwelle) ist es möglich, auch Einfluß auf den Küstenschutz in diesem Bereich zu nehmen, da langfristig betrachtet die durch die Strömung verursachten Effekte gegenüber durch den Seegang erzeugten Effekten dominieren. Die Beeinflussung der Tideströmung durch ein Bauwerk hat somit direkte Auswirkungen auf die sedimentbildenden Kräfte an der Küste.

Es waren verschiedene Varianten zur Sicherung des nördlichen Inselendes zu untersuchen, wobei Endschwellen aber auch alternative Bauverfahren berücksichtigt wurden (MOHN 1996). Für die Bauwerke wurde keine besondere Formgebung vorgegeben. Bei allen Varianten wurden keine zusätzlichen Sandaufpülungen vorgesehen.

Für das nördliche Inselende werden folgende Baumaßnahmen untersucht (*Abbildung 38*):

- Endschwellen
- Alternativen

Für den Aufbau der Endschwellen gelten prinzipiell die Aussagen, die auch für das südliche Inselende aufgestellt werden. Auch hier ist mit einem weitgehend locker gelagerten Seegrund zu rechnen, so daß zusätzliche Mengen für Setzungen einzurechnen sind.

Die Endschwelle wird so ausgebildet, daß sie an das bestehende Deckwerk anschließt und von dort nordwestlich bis zum Salzsand verläuft.

Der Höhenverlauf im Längsschnitt sieht vor, daß die Schwelle bei NN +1,0 m an das Deckwerk anschließt, mit einer Neigung von 1 : 30 bis auf NN -2,00 m abfällt und mit dieser Kronenhöhe bis zum Salzsand durchläuft.

Ein derartiger Höhenverlauf der Schwelle stellt für einen Wasserstand von NN -0,50 m eine Querschnittseinengung von rd. 65 % und bei einem Wasserstand von NN +0,50 m noch eine Einengung von rd. 50 % dar. Aus diesem Grund wurde exemplarisch eine Variante (L III) untersucht, bei der die Schwelle kontinuierlich von NN -2,00 m auf NN -4,00 m in der Mitte des Landtiefs abfällt und zum Salzsand wieder auf NN -2,00 m ansteigt. Die Querschnittseinengung beträgt dann noch rd. 45 % bei einem Wasserstand von NN -0,50 m und rd. 35 % bei einem Wasserstand von NN +0,50 m. Gleichzeitig kommt es zu einer "Führung" der Strömung in der Mitte der Endschwelle, so daß mögliche Erosionsten-

denzen an dem angrenzenden Salzsand verringert werden.

Bei allen Endschwellenvarianten wird eine vollständige Durchdämmung des Lister Landtiefs erreicht und die Schwellen schließen an den Salzsand an. Der Sandaustrag aus dem Lister Landtief in das Lister Tief findet vor allem während der Flutphasen statt. Infolgedessen werden sich bei einer weitgehend gleichmäßigen Überströmung der Schwelle zunächst südlich davon Sedimente ablagern und so zu einer Verbreiterung der Schwelle beitragen.

Diese Auffüllung umfaßt, bei einer angenommenen Neigung des Sandes von 1 : 50 rd. 500.000 m<sup>3</sup>, d. h. bereits rd. 1/2 Jahr nach dem Bau der Schwelle ist der Ablagerungsvorgang abgeschlossen und die überschüssigen Sandmengen werden wie vorher ins Lister Tief transportiert. Eine flachere Neigung des Sedimentkörpers ist bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten und den bei Ebbe südlich gerichteten Strömungen nicht zu erwarten.

Der angestrebte Effekt einer Verlängerung der Verweilzeit des Sandes wird für die zunächst abgelagerten rd. 500.000 m<sup>3</sup> erreicht. Darüber hinaus ist davon auszugehen, daß während der Flutphase Sedimente südlich der Schwelle abgelagert werden, die in der Ebbphase erneut gelöst und dann südwärts transportiert werden. Nach dem heutigen Verständnis ist davon auszugehen, daß dieses Material zumindest teilweise zu einer Erhöhung des Vorstrandes beitragen wird und auf diese Weise der Energieeintrag auf die Küste verringert werden kann.

Gleichzeitig bleiben jedoch die grundsätzlichen, tidebedingten Strömungsverhältnisse bestehen, d.h. die gleiche Wassermenge strömt bei jeder Tide durch einen verkleinerten Querschnitt, so daß auf der Schwelle mit einer Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeiten zu rechnen ist.

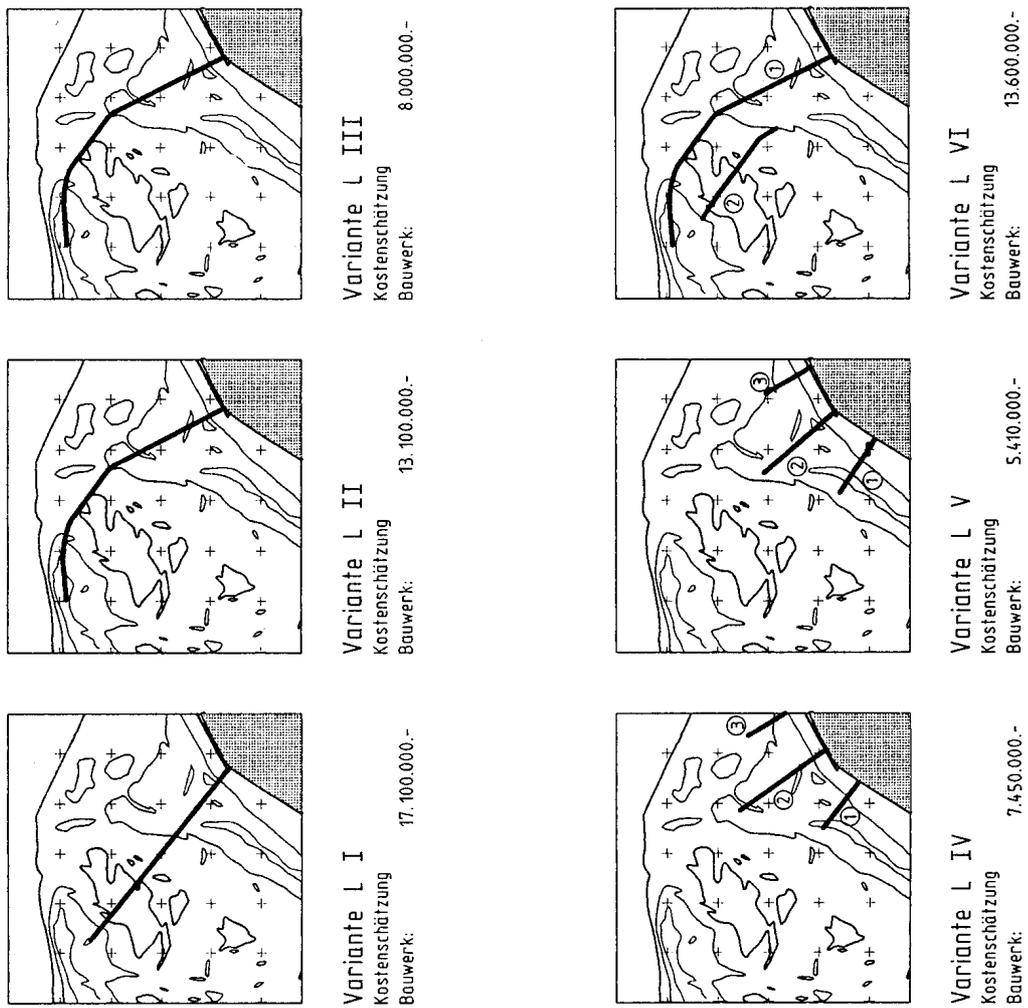


Abbildung 38: Varianten zur Sicherung des nördlichen Inselendes

Inwieweit hierdurch bei einem um ein bestimmtes Maß reduzierten Sedimentangebot Erosionstendenzen im angrenzenden Salzsand und am Schütthang des Lister Tiefs auftreten werden, ist nur schwer vorherzusagen. Bei der angesprochenen lockeren Lagerung der Sedimente auf dem Salzsand können derartige Tendenzen jedoch nicht ausgeschlossen werden. Die Endschwelle ist an der Wurzel bis zu einer Tiefe von NN -2,0 m in Schüttsteinbauweise zu erstellen, im weiteren Verlauf der Schwelle (d. h. unterhalb von NN -2,00 m) kann diese auch in geotextiler Sackbauweise erstellt werden.

Bisherige Erfahrungen mit geotextilen Sackbauweisen deuten darauf hin, daß die Säcke bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von  $v = 2,5$  m/s erosionsstabil sind. Diese Erfahrungen wurden auch bei Modellversuchen im Leichtweiss-Institut (Prof. Römisch) bestätigt.

Die Schwellen werden in Wassertiefen von NN -3,0 bis NN -8,0 m gebaut, so daß sie eine Höhe von 1,0 bis 6,0 m über Grund aufweisen.

Die Varianten L IV bis L VI sind bereits als Alternativen zu den Endschwellenvarianten ausgewählt worden, so daß an dieser Stelle eine Gesamtdiskussion erfolgt.

Bei der Variante L VI wurde durch eine zweite Schwelle mit niedrigerer Kronenhöhe eine flächenhafte Aufhöhung des Lister Landtiefs angestrebt. Durch den Bau dieser zweiten Schwelle im ausgeräumten Teil des Landtiefs sind jedoch die Baukosten erheblich höher als bei nur einer Endschwelle (Var. L III). Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, daß bei der zweiten Schwelle, die nur den ausgeräumten Teil des Landtiefs durchdämmt und nicht an das Deckwerk anbindet, Randkolke auftreten.

Insgesamt betrachtet, weist die Variante gegenüber der positiv bewerteten Variante L III mehr Nach- als Vorteile auf, so daß sie im folgenden nicht weiter betrachtet wird.

Der Vergleich der betrachteten Alternativvarianten L IV und LV fällt zugunsten der Variante L V aus, bei der die Schwellen weitgehend auf den vorhandenen Höhenrücken geplant wurden. Bei der Variante L IV wurde dagegen versucht, einen möglichst großen Bereich des vorgelagerten Flachgebietes durch die Schwellen zu stabilisieren. Die

hierdurch benötigten höheren Materialmengen verursachen jedoch deutlich höhere Kosten, so daß diese Variante nicht weiter verfolgt werden sollte.

Bei der Planung der Schwellen ist vor allem auf ein ausgewogenes Verhältnis der Längen zum Abstand zu achten, so daß die endgültige Lage der Schwellen in den weiteren Planungsschritten festgelegt werden sollte. Sowohl die Lage wie auch die jeweilige Länge der Schwellen sollte erst kurz vor Baubeginn anhand der dann aktuellen Morphologie festgelegt werden.

Positiv an den eigentlichen Endschwellenvarianten ist, daß die Landtiefbarre langfristig gesichert wird, während es bei der Variante L V zu einer weitergehenden Ausräumung des Landtiefs kommt. In der Folge würde sich bei einer Ausführung gemäß Variante LV die Landtiefbarre weiter abflachen, wobei die Aussagen von HUNDT (1939) darauf hindeuten, daß sich die Barre auf einem niedrigeren Niveau erneut einstellt und nicht vollständig zurückgeht.

Positiv an den Alternativvarianten L IV und LV ist, daß durch die Anordnung von je drei Schwellen eine mehr flächenhafte Aufhöhung des Küstenvorfeldes geschaffen und dadurch der eigentliche Ufernabebereich stärker geschützt wird. Gleichzeitig ist der Querschnittsverbau deutlich geringer als bei den Endschwellenvarianten. Infolgedessen ist von geringeren Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse auszugehen.

Bei allen untersuchten Varianten werden die Ursachen für die verstärkte Tideströmung im Lister Landtief nicht berührt. Infolgedessen ist damit zu rechnen, daß auch nach Erstellung eines Bauwerkes weitgehend vergleichbare Wassermengen durch das Landtief strömen.

Die Entscheidung über die zu favorisierende Variante muß den angestrebten Effekt berücksichtigen. Wenn die Landtiefbarre langfristig gehalten werden soll, ist der Variante L III der Vorzug zu geben. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß keine Aussagen über die Fortdauer der hangstabilisierenden Strömung im Lister Tief bei den geänderten Randbedingungen getroffen werden können. Weiterhin ist durch ergänzende Untersuchungen sicherzustellen, daß sich infolge des Querschnittsverbaus keine Entlastungsrinne auf dem locker gelagerten Salzsand bildet.

Wird der Schwerpunkt darauf gelegt, daß ein größerer Anteil des küstennah transportierten Materials zurückgehalten werden soll, ist die Alternative L V zu bevorzugen. Bei dieser Variante ist jedoch eine weitergehende Nordverlagerung der Tiefenlinien im Landtief zu erwarten, mit einem Abflachen der Landtiefbarre. Ein Küstenrückgang im heutigen Anwachsgebiet östlich der dritten Schwelle ist nicht vollständig auszuschließen. In diesem Bereich könnten bei deutlich verringerter Sedimentzufuhr mittelfristig Probleme auftreten, da die Küste für Seegang aus Nord bis nordwestlichen Richtungen verhältnismäßig ungeschützt liegt.

Eine Verlängerung der Verweilzeit des aufgespülten Sandes wird bei beiden Varianten erreicht, wobei der zurückgehaltene Sedimentanteil bei der Variante L V durch die größere Anzahl der Schwellen höher ist.

Bei einer gegenseitigen Bewertung der Varianten ist letztendlich der Variante L III der Vorzug zu geben, da durch einen Rückhalt

von Sediment eine Verlängerung der Verweilzeiten erreicht wird und zusätzlich weiterhin noch soviel Sediment über die Schwelle tritt, daß nach heutigen Erkenntnissen keine negativen Auswirkungen im Nordosten des Ellenbogens zu erwarten sind.

Nach dem Bau der Endschwelle ist das Bauwerk und die Entwicklung in den angrenzenden Bereichen intensiv zu beobachten. Wenn in Zukunft der Sedimentaustrag noch über das erreichte Volumen hinaus reduziert werden soll, besteht die Möglichkeit, eine zweite kürzere Schwelle, wie bei Variante L V vorgeschlagen, südlich der Endschwelle zu bauen und auf diese Weise den südlichen Sedimentationsbereich zu vergrößern.

Bei allen Varianten ist ein zukünftiger Vermessungsaufwand zu berücksichtigen, der den Bereich des Bauwerkes mit der Landtiefbarre den angrenzenden Bereich des Salzsandes sowie der heutigen Anwachsgebieten im Nordosten umfassen sollte.

### 3.3.4 Machbarkeitsstudie Verringerung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten

Die Membran ist eine "Schadensbegrenzungsmaßnahme", die nur für ein oder zwei Tage im Jahr in Anspruch genommen wird und den großen Sandverlust bei Sturmfluten verhindert. Das bedeutet auch, daß die Kosten der Wiederherstellung eines durchgehenden trockenen Strandes effektiv nur einmal aufzubringen sind und nicht nach jeder schweren Sturmflut. Ebenfalls erhalten die Düne und das Kliff einen positiven Schutz.

Mit der eingebauten Membran sind die Querlagerungen des Sandes während der Sturmflut auf die Mengen seewärts der Membran beschränkt. Die Membran, wenn sie durch Sturmfluten freigelegt wird, muß wieder mit Sand aus der Wasserwechselzone abgedeckt werden, wodurch ein zusätzlicher Unterhaltungsbedarf (Raupeneinsatz) entsteht. Die Lage der Membran im Strand ist durch eine Optimierung zu bestimmen. Wenn sie zu nahe der Wasserlinie liegt, kann sie zu oft freigelegt werden und die Unterhaltungskosten durch das Abdecken mit Sand steigen an. Wenn die Membran zu weit vor die Wasserlinie eingebaut wird, steigen die Sandmengen, die aus dem Bereich des trockenen Strandes bei Sturmfluten querverlagert werden, an und damit die Sandverluste, wodurch die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme leidet.

Die Anwendung der Membran ermöglicht auch eine Optimierung der Sandzufuhr in die Brandungszone, indem die Sandzufuhr nach Bedarf bemessen werden und im zentralen Bereich der Insel der Brandungszone zugeführt werden kann. Damit wird der Sand den längsten Weg zu den Inselenden und die maximale Verweilzeit an der Küste haben. Die Brandungszone wird in Richtung der Inselenden durch den küstenparallelen Transport versorgt, wie die Erfahrungen in den Strandbereichen, wo nicht aufgespült worden ist, zeigen.

Der Sandbedarf zur Aufrechterhaltung der Brandungszone muß der Küste zugeführt werden. Wenn die Membran bei Normalwetterlagen freigelegt wird, ist das ein Zeichen, daß die Sandzufuhr den Sandverlust aus der Brandungszone nicht deckt, und die Brandungszone verschiebt sich ostwärts. Durch die Membran wird die periodische Überfrachtung der Brandungszone mit querverlagertem Sand vermieden, wodurch der mittlere jährliche Sandbedarf für die Aufrechterhaltung der Brandungszone reduziert wird.

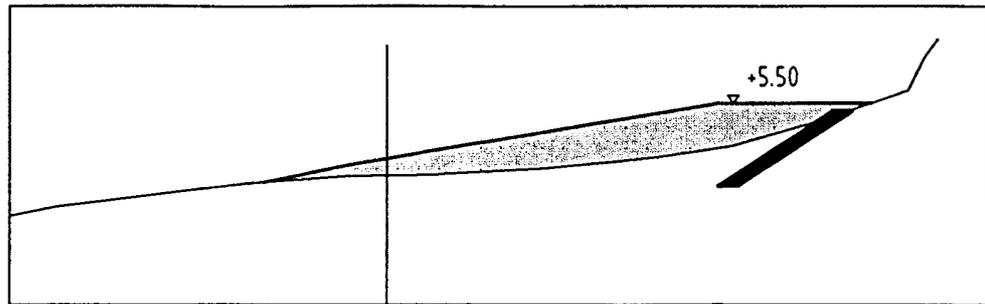
Es wurden drei grundsätzliche Varianten zur Verhinderung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten untersucht (*Abbildung 39*). Die untersuchten Varianten unterscheiden sich in

der Lage im Profil und in der Höhenlage des Einbaus. Die Beurteilungskriterien waren das Ausmaß einer möglichen Reduzierung des Spülkörpers, die Größenordnung des bei einer Sturmflut zurückgehaltenen Materials sowie die Unterhaltungsaufwendungen für das Bauwerk (MOHN 1996).

Die Bewertung ergab, daß die Variante G I (Objektschutz) positiv bewertet wurde. Bei dieser Variante bestehen zusammen mit einem schmal dimensionierten Spülkörper Möglichkeiten von Einsparungen gegenüber den bis heute durchgeführten Sandaufspülungen. Gleichzeitig ist weiterhin ein Schutz vor Dünen - oder Kliffabbrüchen während Sturmfluten gegeben. Ein weiterer Vorteil dieser Variante ist, daß auch ein bei einer Sturmflut

abgedecktes Geotextil nach der Sturmflut noch einen gewissen Schutz durch den breiten flachen Strand erfährt und während Normalwetterlagen nicht durch Seegang beansprucht wird. Der Unterhaltungsaufwand ist somit im Vergleich zu den exponierter liegenden Varianten geringer.

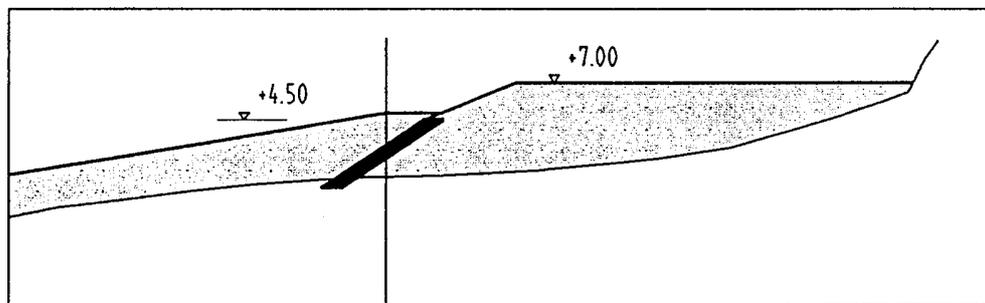
Außerdem wurden noch zwei weitere Varianten untersucht. Bei der Variante G II (Sperrre mit Sanddepot) sind jedoch höhere Unterhaltungskosten zu erwarten und durch die exponierte Lage im Profil sind größere Umlagerungsraten seeseitig der Sperre zu erwarten. Aus diesem Grund sind die Möglichkeiten Sediment zurückzuhalten eher gering, so daß die Variante nicht positiv beurteilt wurde.



### Variante G I Objektschutz

Kostenschätzung/m Strandbreite:

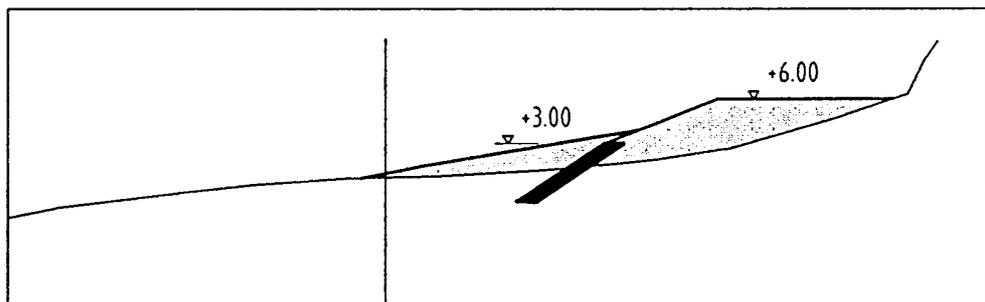
|              |               |
|--------------|---------------|
| Bauwerk      | 2.200,- DM    |
| Aufspülung   | 1.950,- DM    |
| Unterhaltung | 420,- DM/Jahr |



### Variante G II Sperre mit Sanddepot

Kostenschätzung/m Strandbreite:

|              |               |
|--------------|---------------|
| Bauwerk      | 2.000,- DM    |
| Aufspülung   | 7.000,- DM    |
| Unterhaltung | 925,- DM/Jahr |



### Variante G III Reduzierte Höhenlage

Kostenschätzung/m Strandbreite:

|              |               |
|--------------|---------------|
| Bauwerk      | 1.750,- DM    |
| Aufspülung   | 1.650,- DM    |
| Unterhaltung | 600,- DM/Jahr |

**Abbildung 39: Untersuchungsvarianten zur Verringerung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten**

Bei der Variante G III (reduzierte Höhenlage) wurde versucht, den großen Spülkörper see-seitig der Sperre zu verkleinern, der während einer Sturmflut zunächst umgelagert wird, ohne daß dabei Material zurückgehalten werden kann. Hierfür wurde die Sperre nur bis zu einer Höhenlage von NN +3,00 m erstellt. Landseitig entsteht dabei ein kleines Sanddepot. Der Nachteil der Variante ist, daß sie bei extremen Sturmfluten überspült wird und das Sanddepot dann unkontrolliert abgetragen wird. Gleichzeitig ist durch die im Vergleich zu Variante G I exponierte Lage im Profil ein höherer Unterhaltungsaufwand zu berücksichtigen.

Bei Abwägung der Vor- und Nachteile ist einer Ausführung nach Variante G I der Vorzug vor den anderen untersuchten Varianten zu geben.

Weiterhin wurden die Einbaumöglichkeiten entlang der Küste und die Möglichkeiten des Sandersatzes untersucht, und es wurden Hinweise zur Wahl des Geotextils und zur Ausbildung der Sperre gegeben. Bei der positiv beurteilten Variante G I wird davon ausgegangen, daß ein Großteil des benötigten Materials aus dem Strandbereich seewärts der Sperre durch Umlagern gewonnen werden kann. Insofern ist die Variante dort erfolgreich einzusetzen, wo ein breiter, flacher Strand vorhanden ist. Gleichzeitig ist die Seegangbelastung nach einer Sturmflut in diesen Küstenabschnitten geringer, so daß die geotextile Sperre eine längere Nutzungsdauer hat.

Auf der anderen Seite ist festzuhalten, daß die Seegangbelastung und damit der Küstenrückgang in den Bereichen mit schmalen Stränden teilweise größer ist, so daß hier eine stärkere Notwendigkeit zum Einbau zusätzlicher Schutzmaßnahmen besteht. In diesen

Bereichen werden die besten Möglichkeiten des Sandersatzes in einer erneuten Aufspülung gesehen. In einigen Bereichen kann der Sandersatz durch Umlagern von Sand aus Nachbarbereichen bzw. an den Inselenden durch Umlagern von Sand aus sogenannten Depots gewonnen werden, die auf hochliegenden Strandflächen angeordnet werden können. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß Kosten durch das Erstellen des Depots und durch das anschließende Umlagern des Materials vor das Geotextil entstehen.

Bei den Überlagerungen zur Ausbildung der geotextilen Sperre wurde eine Sack- bzw. Containerlösung empfohlen, bei der jeweils zwei Container durch einen Quersteg miteinander verbunden werden. Bei einem derartigen Verfahren ist die Stabilität des Bauwerkes auch bei dem Versagen einzelner Säcke gegeben. Als Geotextil wird Vliesstoff empfohlen, das Vorteile aufgrund der besseren Dehnungseigenschaften und der Filterstabilität besitzt.

Insgesamt wird empfohlen, daß der Einbau einer geotextilen Sperre als Objektschutz an den Stellen sinnvoll ist, an denen ein Küstenrückgang unter keinen Umständen zu tolerieren ist.

In den Bereichen, in denen ein gewisses Maß an Küstenrückgang hingenommen werden kann, wird die angestrebte Verringerung der Anfangsverluste durch ein ausgemagertes Aufspülprofil erreicht. Der Effekt der zusätzlichen Verringerung der Ausräumung im Sturmflutfall wird als eher gering eingeschätzt, so daß hieraus keine wirtschaftliche Begründung für den Einbau einer geotextilen Sperre herzuleiten ist.

### 3.3.5 Bewertung der Konzepte

#### Sandaufspülungen

Die Westküste von Sylt weist einen jährlichen Sandverlust im Höhenbereich NN+5m/NN±0m von 0,256 Mio. m<sup>3</sup>/a (Tabelle 1) auf. Wenn die Erosion des Vorstrandes berücksichtigt wird, erhöht sich die Verlustmenge auf 0,673 Mio. m<sup>3</sup>/a (NN+6m/NN-8m) (Tabelle 2). Da diese Menge einen erheblichen Anteil der Vorstrandauffüllung infolge der Wirkungen der Sturmfluten Januar/Februar 1990 beinhaltet, wird ein Sicherheitszuschlag von 0,221 Mio. m<sup>3</sup>/a addiert.

Damit ergibt sich ein jährlicher Gesamtvolumenbedarf von 0,894 Mio. m<sup>3</sup>/a (Tabelle 13).

Da nur ein Teil der gesamten Erosion im Strand erfolgt (ca. 1/2 bis 1/3) und die Strandauffüllungen nur bis zur Tiefe NN-4m reichen, sind Aufspülungen im Vorstrand für den Mittelteil der Insel sinnvoll. Die Kosten der Vorstrandaufspülungen sind geringer als die der Strandaufspülungen, so daß jährlich Kosten von 10,8 Mio. DM zum Schutz der Westküste einschließlich der Hörnum-Odde entstehen (Tabelle 14).

Die weitere Entwicklung des Küstenvorfeldes an den Inselenden kann mit den Sandaufspülungen nicht entscheidend beeinflusst werden, so daß dieser Bereich weiterhin zu beobachten ist. Der Schutz der Hörnum-Odde (mit Ausnahme der äußersten Südspitze, Profil 39s) ist mit Sandaufspülungen vor Hörnum mit einer jährlichen Menge von 0,350 Mio. m<sup>3</sup> (entspr. 4,33 Mio. DM/a für Aufspülungen im Bereich Hörnum als Sicherung der Hörnum-Odde) möglich.

Der Volumenbedarf am nördlichen Inselende beträgt 0,206 Mio. m<sup>3</sup>/a (entspr. 2,57 Mio. DM/a für Aufspülungen im Bereich List).

Die übrige Westküste weist im Gesamtprofil erheblich geringere Verlustmengen auf, wobei in diesen Abschnitten ein Wechsel von Strand- und Vorstrandaufspülungen erfolgen muß.

### **Sicherung des südlichen Inselendes**

Für die Sicherung des südlichen Inselendes wird in der Machbarkeitsstudie empfohlen, eine kurze Endbefestigung mit anschließender Schwelle und drei abgelösten Wellenbrechern zu errichten (Variante A IV). Mit dieser Variante erfolgt sowohl eine Festlegung der südlichen Inselspitze, ein Heranführen des Sedimenttransportbandes an die Insel und eine Stabilisierung des Bereiches südlich vom Tetrapoden - Querwerk. Durch den maßvollen Eingriff in das System ist nicht von gravierenden morphologischen Umlagerungen auszugehen. Die Kostenschätzung für die Variante beträgt rd. 13.100.000,- DM brutto für die Endbefestigung und Endschwelle sowie rd. 22.000.000,- DM brutto für die Wellenbrecher und rd. 500.000,- DM brutto für eine Verkürzung des Tetrapoden - Querwerkes. Für eine begleitende Sandaufspülung sind 10.500.000,- DM anzusetzen. Damit betragen die Gesamtkosten 46,1 Mio. DM zur Sicherung des südlichen Inselendes. Als Nutzungsdauer dieses Bauwerkes wird 35 Jahre angenommen, so daß sich - bei einer entsprechenden Finanzierung über eine Laufzeit von 35 Jahren - ein jährlicher Finanzbedarf von ca. 2,8 Mio. DM/a ergibt. Hinzu kommen die Unterhaltungskosten, die mit 1% der einmaligen Herstellungskosten angenommen werden können (0,5 Mio. DM/a). Somit erfordert die Sicherung des südlichen Inselendes für die Laufzeit von 35 Jahren jährlich Mittel in Höhe von ca. 3,3 Mio. DM/a.

Da die Errichtung o.g. Bauwerke den Küstenabtrag nördlich des Tetrapodenquerwerkes nicht entscheidend beeinflussen kann, muß dieser Bereich zusätzlich gesichert werden. Die in diesem Abschnitt aufgespülten Sandmengen haben zu einer deutlichen Stabilisierung der Hörnum - Odde (seit 1990) beigetragen. Um die Auswirkungen fester Bauwerke im Vergleich zu Sandaufspülungen müssen die baulichen und funktionalen Risiken, die mit einer Endschwelle verbunden sind, beachtet werden.

### **Sicherung des nördlichen Inselendes**

Für die Sicherung des nördlichen Inselendes wird vorgeschlagen, eine Endschwelle bis zum Salzsand zu errichten, mit einer Kronenhöhe, die von NN-2,00 m auf NN-4,00 m abfällt (Variante L III). Bei einer Ausführung gemäß dieser Variante wird eine Reduzierung des Sedimentaustrages am nördlichen Inselende erreicht. Gleichzeitig bleibt die Anbindung des Salzsandes an den Ellenbogen durch die Landtieffbarre erhalten, und die Ausbildung von Entlastungsrinnen auf dem Salzsand ist durch die gewählte Form der Endschwelle nicht zu erwarten. Die Kosten für eine derartige Ausführung werden zu rd. 8.000.000,- DM brutto abgeschätzt. Sollte sich nach Erstellung des Bauwerkes zeigen, daß die Sedimentanlagerung südlich der Schwelle noch verstärkt werden kann, ohne daß nördlich irreparable Schäden zu erwarten sind, besteht die Möglichkeit, eine weitere deutlich kürzere Schwelle südlich der ersten zu erstellen.

Die jährlichen Kosten zur Sicherung des nördlichen Inselendes betragen rd. 0,6 Mio. DM/a.

Durch die Maßnahme wird erwartet, daß die Verlustraten im Abschnitt List reduziert werden. Die Größe dieser Mengen kann z.Z. mit keinen Verfahren sicher abgeschätzt werden. Wenn der mittlere Rückgang von 0,206 Mio. m<sup>3</sup>/a innerhalb des Zeitraumes von 35 Jahren um ein Drittel reduziert werden kann, ergibt sich eine mittlere Einsparung von rd. 0,07 Mio. m<sup>3</sup>/a bzw. 0,68 Mio. DM/a. Durch die Errichtung der Endschwelle soll gleichzeitig die Tiefenerosion im Lister Landtief begrenzt werden.

### **Verringerung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten**

Für die Verringerung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten wird vorgeschlagen, in den

Abschnitten, in denen ein Küstenrückgang nicht zu tolerieren ist (z. B. Wenningstedt Strandstraße, Rantum) eine geotextile Sperre als Objektschutz (Variante G I) in den Spülkörper einzubauen. Bei einer derartigen Ausführung kann die begleitende Sandaufspülung im Vergleich zu heutigen Aufspülungen deutlich weniger  $m^3/m$  Strand enthalten, so daß sich die Anfangsverluste verringern. Gleichzeitig bleibt ein vollständiger Schutz für die landseitig gelegenen Objekte erhalten. Die Kosten für eine derartige Baumaßnahme werden je m Strand für die geotextile Sperre zu rd. 2.200,- DM und für die Sandaufspülung zu rd. 1.950,- DM abgeschätzt. Der Unterhaltungsaufwand ist durch regelmäßige Aufspülungen, die in einem größeren zeitlichen Abstand erfolgen, gegeben.

Der Einbau einer geotextilen Sperre bewirkt eine Verringerung der hohen Abbruchraten an den Dünen und am Kliff bei Sturmfluten. Eine Anpassung der Sperre an die wechselnden Belastungen erfolgt nicht. Bei einer deutlichen Übersandung der Sperre wird diese unwirtschaftlich. Bei einer Strandausräumung vor der Sperre, ist eine Sandersatzmaßnahme erforderlich, um den Baukörper wieder abzudecken.

In den Bereichen, in denen ein gewisser temporärer Küstenrückgang hingenommen werden kann, ist nach heutigem Kenntnisstand eine Sandaufspülung mit einem angepaßten Spülkörper die technisch und wirtschaftlich zu favorisierende Variante.

## 4 Gesamtkonzept Küstenschutzmaßnahmen 1997 bis 2007

### 4.1 Strandaufspülungen, Aufspülungen im Vorstrand und Sicherung des nördlichen Inselendes

#### 4.1.1 Strandaufspülungen

##### Vorbemerkung

Die Hochwassergefährdung der Küste, die Lage zur Hauptwellenangriffsrichtung, die anthropogene Beanspruchung, sowie die geologischen Verhältnisse bedingen für die Sylter Westküste unterschiedliche Küstenschutzanforderungen.

Die Geest der Insel Sylt zwischen Rantum im Süden und Kampen im Norden bildet durch die Besiedlung, die Nutzung und die natürliche Vielfalt den Kernbereich mit der Stadt Westerland als Zentrum. Dem lagern sich nach Norden und Süden die Dünenküsten mit den Orten List und Hörnum an.

Die Inselenden unterliegen unterschiedlichen intensiven hydrodynamischen Belastungen. Vorrangig sind die bebauten Ortslagen gegen Hochwasser zu schützen.

Sandaufspülungen haben sich zum Schutz der Küste bewährt. Die Aufspülmenge ist abhängig von der Höhenlage und dem Zustand des Strandes und Vorstrandes, sowie dem vorgesehenen Aufspülkörper und der energetischen Belastung. Maßnahmen zur Verlängerung der Verweildauer des eingebrachten und in Umlagerung befindlichen Sandes sowie zur Verringerung des Energieeintrages, z.B. im Vorstrand, verbessern den Schutz der Küste.

Zentralbereich zwischen Rantum und Kampen

##### Westerland (4n bis 2s, 3,0 km)

Die Existenz der Stadt wird wesentlich vom Erhalt der Küstenschutzanlagen (Ufermauer, Deckwerk, Tetrapodenlängswerke) bestimmt. Seit 1972 wird die Standsicherheit der Längswerke durch Sandaufspülungen gewährleistet. Dazu wird vor die Ufermauer und dem nördlich anschließenden Deckwerk auf ca. 1,5 km Länge i.M. 1 Mio. m<sup>3</sup> Sand im zeitlichen Abstand von ca. 6 Jahren als Strand (Fußvorlage) aufgespült. Dieser verteilt sich u.a. durch den Küstenlängstransport nach

Norden und Süden und schützt so auch die angrenzenden Strände.

Seit 1972 sind Küstenschutzmaßnahmen (außer biotechnische Maßnahmen) in den Strandabschnitten 2n-4n (1 km) und 1s-3s (1 km) nicht notwendig geworden, so daß durch die Sandaufspülungen vor der Ufermauer Westerland ein ca. 3,5 km langer Strandabschnitt unmittelbar gesichert werden kann. Weiterreichende Sandverdriftung nach Norden und Süden verbessern die Sandbilanz im Vorstrand und in der Wasserwechselzone.

Das vor der ersten Sandaufspülung 1972 vor der Ufermauer fehlende Riff hat die Strand- und Vorstrandausräumung begünstigt. Das vorgespülte Höft füllte mit zunehmender Umlagerung die Riffücke auf und ließ ein natürliches Riff entstehen, welches bislang erhalten ist. Ein gut ausgebildetes Riff als "Wellenfilter" ist für die Erhaltung der Sylter Westküste ein wesentlicher Bestandteil.

Die Aufspülintervalle, bislang sechs Jahre, sollen nach dem Zustand des Strandes und Vorstrandes zum Erhalt der Standsicherheit der Uferschutzanlagen, sowie dem Energieeintrag bemessen werden. Die Bemessungen sollen mit Hilfe des empirisch und numerisch bestimmten Minimalprofils durchgeführt werden.

##### Westerland bis Rantum (2s bis 10s, 4,0 km)

Der Küstenabschnitt weist eine gute Dünen-substanz auf. Im mittleren Bereich (6s-7s) befindet sich in den Dünen das Ferienlager Dikjendeel. Zur Erhaltung der Randdüne und eines ausgeglichenen Verlaufes der Küstenlinie in der heutigen Lage sollte bei Bedarf eine Trockenstrandaufspülung ausgeführt werden. Sturmflutbedingte Randdünenverluste sind dabei zu ergänzen und ggf. Dünen zu verstärken. Dieser Küstenabschnitt wird mit zunehmender Entfernung von den Sandaufspülungen vor Westerland abnehmend beeinflusst.

**Rantum (10s bis 15s, 2,5 km)**

Die Ortslage von Rantum wird durch einen größtenteils bebauten Dünengürtel unterschiedlicher Breite gegen Hochwasser geschützt. Im Norden der Gemeinde ist die bebauter Düne 80 m breit. Die Gesamtbreite südlich von Rantum erreicht Werte von ca. 450 m. Ein Verlust der Dünen kann zum Abtrennen des südlichen Inselteiles führen. Der Bestand der Randdüne ist zum Hochwasserschutz der Gemeinde Rantum zu erhalten.

Ein hoher, breiter Strand mit breiter Brandungszone zur flächenhaften Energieumwandlung und ein gut ausgebildetes Riff vermindern hochwasserbedingte Dünenabträge.

**Wenningstedt - Kampen (4n bis 14n, 5 km)**

Das Rote Kliff ist in Teilbereichen der Gemeinden Wenningstedt und Kampen bis an die Kliffkante bebaut. Ein Rückgang des Kliffes ist in diesen Gebieten mit Verlust der Bebauung und Infrastruktur verbunden. Eine Kompensation des Kliffrückganges durch Wiederauffüllung ist nicht möglich, da zwar die Substanz aber nicht das Erscheinungsbild des unter Naturschutz stehenden Roten Kliffes ersetzt werden kann. Zur Stabilisierung des Klifffußes ist eine Depotsandaufspülung geeignet. Ein gut ausgebildetes Riff vermindert den Strandabtrag.

Der Übergangsbereich zwischen dem Roten Kliff und der nördlich angrenzenden Kliffküste ist ein besonders erosionsgefährdeter Küstenabschnitt. Der in den Untergrund abtauchende Geschiebelehm bildet für Wellen und Strömung einen Meeresboden, der durch Abtragung gekennzeichnet ist.

Der Geschiebelehm des Roten Kliffs wird kontinuierlich durch die Einwirkung von Oberflächenwasser aufgeweicht. Zur Erhaltung des Kliffs ist ein Graben- und Leitungssystem zur geordneten Abführung des Wassers anzulegen.

Südteil zwischen Rantum und Hörnum

**Rantum - Hörnum (15s bis 30s, 7,5 km)**

Die Dünenküste südlich von Rantum weist unterschiedliche Dünenbreiten und -höhen auf. Bei 17s+300 ("Samoa") liegt das Brunnenfeld der "Sylter Quellen". Im Bereich Puanclent (23s-24s) ist die Randdüne mehr-

fach abgetragen und das dahinterliegende Tal bei Sturmfluten bis an die Landstraße nach Hörnum (LIO 24) überschwemmt worden. Bei "Bunker Hill" (26s+300) erreicht die Randdüne eine Höhe von NN+21,30 m.

Der Schutz und die Erhaltung der Natur, der Landstraße und der Parkplätze vor Hochwasser ist in diesem Küstenabschnitt wesentlich, wozu die Randdünen zu erhalten sind.

Die Ausbildung des Riff - Rinnen - Systems und des trockenen Strandes werden durch den Sedimenttransport von Norden und Süden beeinflusst.

Die Randdüne kann bei Verlust durch Sandauffüllung wiederhergestellt werden. Der Strand sollte als Sandpolster zum Schutz des Dünenfußes hoch und breit sein, das bei Bedarf durch eine Strandauffüllung erfolgen kann.

**Hörnum (30s bis 35s, 2,5 km)**

Seit dem Bau der Sommerhaussiedlung wurde die südliche Ortslage von Hörnum bis an die Odde erweitert und mit der Kersig - Siedlung die Erschließung des westlichen Dünengürtels bis an die Randdüne begonnen. Appartmentshäuser und Kurmittelhaus stehen, nur durch eine schmale Randdüne gegen Hochwasser geschützt, unweit der Hörnum Westküste.

Das 1967/68 zum Schutz der Bebauung errichtete Tetrapodenlängs- und -querwerk ist erheblich abgesackt und hat weitgehend seine Funktion verloren. Die nördlichen und südlichen Enden des Längswerkes liegen durch den Küstenrückgang exponiert auf dem Strand, so daß dort der Abtrag beschleunigt wird.

Zum Erhalt der Dünen sollte eine Depot- oder Trockenstrandaufspülung durchgeführt werden. Das Tetrapodenlängswerk kann größtenteils aufgenommen werden, wobei die Tetrapoden ggf. anderen Küstenschutz Zwecken zugeführt werden könnten.

Nordteil zwischen Kampen und List

**Kampen - List (14n bis 27n, 6,5 km)**

Im Küstenabschnitt von Kampen bis List ist die dünen spezifische Vegetation und Tierwelt zu erhalten. Mittag (19n-21n) befindet sich das Gebäude des Jugendheimes der Stadt

Kassel und die Anlage der Heimvolkshochschule Klappholttal.

Zur Sicherung des Dünenfußes soll ein hoher breiter Strand erhalten werden. Dies kann bei Bedarf durch eine Strandauffüllung erfolgen. Ein begrenzter Rückgang der Randdüne kann, soweit dieser wieder aufgefüllt und auszugleichen ist, hingenommen werden.

Intensivere, lokal begrenzte Dünenrückgänge sollten zur Vermeidung von exponierten Dünenlagen und zur Erhaltung eines ausgeglichenen Küstenverlaufes kurzfristig mit Sand aufgefüllt werden. Dazu müssen Sanddepots angelegt werden. Die dem Strand vorgelagerte Energieumwandlungszone im Riffbereich ist zu erhalten.

### **List (27n bis 31n, 2 km)**

Der Strandbereich List unterliegt einem anhaltenden Sandabtrag. Strandauffüllungen durch den Küstenlängstransport sind kurzfristiger Natur. Bei höheren Wasserständen kann die Randdüne erreicht und abgetragen werden. Durch Depotaufspülung ist die Randdüne vor Abtrag zu schützen, wobei die Sandentnahmen aus dem Nordhang des Salzsandes erfolgen sollte.

### **List - Nord (31n bis 35n, 2 km)**

Die Westküste des Ellenbogens befindet sich im Rückgang. Zur Kompensation des Rückganges sollten die Mengen für die Sandaufspülungen aus dem Nordhang des Salzsandes entnommen werden.

Das Basaltdeckwerk am Ostindienfahrerhuk - 35N- ist 1993 geschlossen worden und bildet so einen Festpunkt.

Im Küstenvorfeld bildet sich zeitweilig eine Sandbarre der sogen. Ellenbogensteert aus (HUNDT 1957). Das Lister Landtief hat sich bis NN-10 m und das Lister Tief bis NN-25 m vertieft.

Zum Schutz dieses Strandabschnittes ist neben der Sandaufspülung der Bau einer Endschwelle vorzusehen, so daß der Vorstrand aufgefüllt wird. Als Begleitmaßnahme sollten Holzpfahlbuhnen die Strömungsbelastungen an der Westseite des Ellenbogens verringern.

Die Straße zum Ellenbogen liegt z.Z. auf Höhe des Königshafens nahe an der Abbruchkante, so daß eine Sicherung der Straße vor Zerstörung mit Hilfe von geotextilen Sandsäcken, die an den Dünenfuß gelegt werden, sinnvoll ist.

### **Hörnum-Odde (35s bis 44s)**

Der zunehmende Küstenrückgang der Westküste der Hörnum-Odde ist durch die fortschreitende Ausräumung des Küstenvorfeldes und des damit einhergehenden Wellen- und Strömungsangriffes bedingt. Eine Trennung der Hörnum-Odde vom Theeknobssand durch Abtrag des Theeknobssandes und die verstärkte Ausbildung des Hörnum Loches schafft eine nordwestliche Öffnung zwischen dem Vortrapptief und der Westküste, die zu einer höheren Belastung am südlichen Inselende führen wird.

Die Leitdammfunktion der Hörnum-Odde für das Strömungsregime am südlichen Inselende und die Lage des Rinnenbettes des Vortrapptiefes ist zu erhalten. Dazu sollte die Westküste der Hörnum-Odde in einen, dem nördlich des Tetrapodenquerwerkes angepaßten, Küstenverlauf angeglichen und erhalten werden.

Das Tetrapodenlängswerk nördlich und südlich des Querwerkes weist z.Z. keine erkennbare Funktion mehr auf, so daß eine Aufnahme der Tetrapoden aus heutiger Sicht vorgenommen werden könnte. Eine Verlegung der Tetrapoden in Form eines weiteren Querwerkes nördlich des bereits vorhandenen Tetrapodenquerwerkes ist im Rahmen von durchzuführenden Sandaufspülungen möglich.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudien wurden unterschiedliche Varianten von Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der Hörnum - Odde untersucht:

- Buhnen
- Wellenbrecher
- Endschwellen
- Sandaufspülungen
- Kombinationen o.a. Maßnahmen

Von diesen Maßnahmen wurden Sandaufspülungen, die Errichtung einer Endschwelle (Variante A III) und eines Wellenbrechers (Variante W III) (s. Abbildung 37) am positivsten bewertet. Bei der Errichtung von Wellenbrechern bzw. einer Endschwelle besteht die Notwendigkeit der Bauwerksunterhaltung, da die exakten Auswirkungen der Maßnahmen nicht vorhersehbar sind. Aufgrund der Bauwerkskosten und der funktio-

nenalen Risiken wird der Schutz der Hörnum - Odde mit ausschließlich Sandaufspülungen erfolgen.

Sandaufspülungen stabilisieren zeitlich begrenzt die Westküste der Hörnum-Odde, wobei der Abtrag der Odde Spitze durch Sandaufspülungen nicht verhindert werden kann.

Die Bühnen an der Ostküste (42s-44s) werden im Nordbereich zunehmend ausgeräumt. Zur Erhaltung des Strandes ist das Bühnensystem zu unterhalten und der Strand zu ergänzen.

### **Lister Ellenbogen (35n bis 44n, 4,5 km)**

Das nördliche Inselende unterliegt mit seiner West- und Nordküste dem Strömungsgeschehen des Lister Landtiefs und des Lister Tiefs.

Die Westküste beim Ellenbogensteert weist einen Küstenrückgang auf. An der Nordküste erstreckt sich ein nach Osten zunehmender breiter Sandstrand, welcher durch den Sedimenttransport der Westküste versorgt wird.

Am Ostindienfahrerhuk befindet sich der Rest des 1939 fertiggestellten 2,5 km langen Basaltdeckwerkes. Das im Abbruch befindliche südliche Ende ist 1993 wieder befestigt worden.

Die Dünen an der Westküste sind schmal. Die 1968 abgetragene Randdüne mit Wassereintritt über die Listlandstraße ist durch biotechnische Maßnahmen geschlossen worden. Die Straße mußte nach Osten verlegt werden.

Zum Schutz der Ellenbogenwurzel und der Erhaltung einer ausgeglichenen Küstenlinie sind die Randdünen zu erhalten. Dazu kann - in Abhängigkeit vom Zustand des trockenen Strandes - Sand als Außendünenverstärkung aufgebracht werden. Der Strand wird durch Sandumlagerungen aus dem Bereich List versorgt.

Der Dünenanschluß an das Basaltdeckwerk muß erhalten bleiben und ggf. mit Sand aufgefüllt werden.

Mit Hilfe einer Endschwelle wird eine Verringerung der Abbruchraten in diesem Küstenabschnitt erwartet.

Um die Standsicherheit von Deckwerken und Ufermauern zu gewährleisten bzw. Dünen und Kliffs zu erhalten, dürfen gewisse Strandbreiten nicht unterschritten werden.

### Gesamtbereich

Die Vermessung der Westküste Sylts vom Mai/Juni 1992 stellt für das nachfolgende Küstenschutzkonzept die Ausgangsvermessung dar. Diese Vermessung wurde aus folgenden Gründen als Ausgangsvermessung gewählt:

- Komplettervermessung Sylts
- Novelle des Landeswassergesetzes (LWG) (gültig seit 1992)

*Tabelle 13* gibt die Mengen und Kosten für die Methode des Küstenschutzes mit "ausschließlich Sandaufspülungen" an.

Eine ausschließliche Versorgung der Westküste Sylts mit Sandaufspülungen erfordert einen mittleren jährlichen Volumenbedarf von 1,114 Mio. m<sup>3</sup> Sand, der im Hopper aufgemessen wird. Als "feste Masse" am Strand muß die Menge von 0,894 Mio. m<sup>3</sup> im jährlichen Mittel profiliert werden. Die Kosten der Sandaufspülungen betragen jährlich 11,14 Mio. DM. Dabei ist ein Sicherheitszuschlag für das Auftreten von Sturmfluten von 33% enthalten. Da die Wetterverhältnisse im Planungszeitraum mit keinen zuverlässigen Methoden abgeschätzt werden können, stellt der Sicherheitszuschlag eine Sandmenge dar, die eventuell in Abhängigkeit des Wettergeschehens nicht aufzubringen ist.

Mit Hilfe dieser Sandmengen erfolgt eine Stabilisierung der Küste (NN+3,75m - Linie) und der strandnahen Brandungszone, wobei die Anfangsverluste z.T. in Kauf genommen werden, damit der Bereich bis NN-4m vom Strand aus versorgt wird. Der Bereich des Riffes und seewärts der NN-4m erfährt durch die Seegangseinwirkung während Sturmfluten eine deutliche morphologische Überprägung.

**Tabelle 13: Mengen und Kosten des Sandersatzes (ausschließlich Strandaufspülungen)**

| Bereich                       | Strecke | Volumenbedarf Westküste Sylt     |                             |                           |                                    |                               |
|-------------------------------|---------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
|                               |         | <i>Höhenbereich: NN+6m/NN-8m</i> |                             |                           |                                    |                               |
|                               |         |                                  | Sicherheitszuschlag<br>33 % | Summe:<br>C + D           | Hoppermenge<br>(Faktor:<br>1,2456) | Kosten<br>10,-/m <sup>3</sup> |
| A                             | B       | C                                | D                           | E                         | F                                  | G                             |
| Profil                        | km      | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a        | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a   | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a          | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a     |
| 36s-25s                       | 5,501   | 0,262                            | 0,086                       | 0,348                     | 0,433                              | 4,33                          |
| 25s-01s                       | 12,146  | 0,060                            | 0,020                       | 0,080                     | 0,099                              | 0,99                          |
| 01s-02n                       | 1,440   | 0,030                            | 0,010                       | 0,040                     | 0,050                              | 0,50                          |
| 02n-15n                       | 6,531   | 0,093                            | 0,031                       | 0,124                     | 0,154                              | 1,54                          |
| 15n-25n                       | 5,002   | 0,073                            | 0,024                       | 0,097                     | 0,121                              | 1,21                          |
| 25n-30n                       | 2,516   | 0,104                            | 0,034                       | 0,138                     | 0,172                              | 1,72                          |
| 30n-35n                       | 2,270   | 0,051                            | 0,017                       | 0,068                     | 0,085                              | 0,85                          |
| Gesamt-<br>bilanz:<br>36s-35n | 35,406  | 0,673                            | 0,222                       | 0,894                     | 1,114                              | 11,14                         |

Anmerkung: Die Aufteilung der Sandersatzmengen in einzelne Küstenabschnitte dient ausschließlich der Mengen- und Kostenabschätzung für die gesamte Westküste.

#### 4.1.2 Aufspülungen im Vorstrand

Eine flächige Umwandlung der Wellenenergie an der Sylter Westküste vermindert die Umlagerungsvorgänge und damit die ostwärtige Küstenverlagerung gegenüber einer linienartigen Brandungszone vor dem Strand.

Zur Sedimentversorgung des Vorstrandes und Initialisierung der Sandriffbildung sind Aufspülungen im Vorstrand vorzunehmen, wobei die Charakteristik des Vorstrandes (Riff - Rinne - System) zu berücksichtigen ist. Dabei sollten die Vorstrandaufspülungen hauptsächlich im Mittelteil der Insel (25s bis 25n) erfolgen, da an den Inselenden die Verweildauern der eingebrachten Aufspülmengen zu kurz sind.

Die Auswertungen der Vermessungen von 1988 bis 1992 zeigen vor der nördlichen Inselküste (5N-34N) geringe bis keine Riff - Rinne - Strukturen. Das unterschiedliche Umlagerungsverhalten ist z.T. darauf zurückzuführen.

Die Entfernung der Vorstrandaufspülung von der Strandlinie (NN±0 m) sollte zwischen 250 m bis 300 m liegen, und die Kronenhöhe der Vorstrandauffüllung muß mindestens NN-3,0 m und höchstens NN-2,50m betragen.

Die Maßnahmen am Riff bzw. Vorstrand sind im Zusammenhang mit Strandaufspülungen vorzunehmen, damit eine Verlängerung der

Verweilzeit des Spülsandes erreicht wird. Außerdem sind Maßnahmen am Riff in den Küstenbereichen vorzusehen, wo wegen Fehlen des Riffes und des schmalen Unterwasserstrandes der Wellenangriff den Strand lokal stärker erodiert. Die Maßnahmen im Vorstrand bzw. am Riff werden als künftige Ergänzungen zur Strandaufspülung betrachtet.

Tabelle 14 gibt die Mengen und Kosten einer kombinierten Strand- und Vorstrandaufspülung an.

Durch die Mengeneingabe von 1,114 Mio. m<sup>3</sup>/a wird der Dünenfuß (NN+3,75m) und die Strandbreite NN+3,75m/NN±0m stabilisiert und die Erosion des Vorstrandes möglichst kompensiert. Die Kostenersparnis gegenüber der alleinigen Strandaufspülung ergibt sich aus der Spültechnik, indem eine Teilmenge von 0,169 Mio. m<sup>3</sup>/a (feste Masse) bzw. 0,211 Mio. m<sup>3</sup>/a (Hoppermenge) nicht auf den Strand gespült und profiliert werden muß, die zu geringen Spülkosten führt. Die Kosten der jährlichen Einsparungen betragen rd. 0,3 Mio. DM.

Daneben ist davon auszugehen, daß sich das Wiederholungsintervall der Strandaufspülungen durch die gezielte Sandeingabe in den Vorstrand verlängert. Insbesondere ist in den Fällen, in denen eine stärkere Erosion der strandnahen Brandungszone zu beobachten ist (z.B. NN-1m - Linie) und das Strandprofil

(NN+5m/NN+1m) eine genügende Fülligkeit aufweist, eine Vorstrandaufspülung vorzunehmen. In den Fällen jedoch, in denen die Vordünen stärker erodiert worden sind, müssen Strandaufspülungen erfolgen.

Durch eine regelmäßige Strandvermessung der Hauptprofile (500m - Abstand) im Herbst jeden Jahres im Höhenbereich NN+6m/NN-1,5m, so daß der Höhenbereich NN+5m/NN-1m in jedem Fall vollständig ausgewertet werden kann, kann der Handlungsbedarf ermittelt werden. Zusätzlich sollte während der Vermessungen der Hauptprofile eine Luftbildaufnahme erfolgen, damit der Zustand des Vorstrandes (Riff - Strukturen) abgeleitet werden kann. Anschließend ist die genaue Festlegung der Spülbereiche möglich.

Durch die Hinzunahme des Sicherheitszuschlages für das Wettergeschehen (33%) liegt die jährlich notwendige Sandersatzmenge eher zu hoch, so daß infolge der nicht kalkulierbaren zukünftigen Wetterverhältnisse partielle Einsparungen möglich sind.

Die Abschnitte und Mengen einer Vorstrandaufspülung ergeben sich aus den Vermessungen der Hauptprofile und der Luftbildauswertungen. Sinnvoll ist darüber hinaus eine synoptische Vermessung der gesamten Westküste von NN+5m bis NN-8m, die in Zukunft mit den Methoden der Fernerkundung möglich und finanzierbar ist.

**Tabelle 14: Mengen und Kosten des Sandersatzes (Strand- und Vorstrandaufspülungen)**

| Bereich  | Strecke | Volumenbedarf Westküste Sylt<br><i>Höhenbereich: NN+6m/NN-8m</i> |                             |                                |   |  |
|--|---------|--|-----------------------------|--------------------------------|---|--|
|  |         |  | Mengen                      |                                | Kosten                                      |  |
|  |         | Hopper-<br>menge<br><br>lt.<br>Spalte F<br>(Tab. 13)             | Aufspülung<br>Strand<br>1/2 | Aufspülung<br>Vorstrand<br>1/2 | Aufspülung<br>Strand<br>10,-/m <sup>3</sup> | Aufspülung<br>Vorstrand<br>8,50/m <sup>3</sup> |
| A  | B       | C  | D                           | E                              | F   | G  |
| Profil   | km      | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a  | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a   | Mio.<br>m <sup>3</sup> /a      | Mio.<br>DM/a                                | Mio.<br>DM/a                                   |
| 36s-25s  | 5,501   | 0,433  | 0,433                       | .-                             | 4,330                                       | .-   |
| 25s-01s  | 12,146  | 0,099  | 0,050                       | 0,049                          | 0,500                                       | 0,417  |
| 01s-02n  | 1,440   | 0,050  | 0,025                       | 0,025                          | 0,250                                       | 0,213  |
| 02n-15n  | 6,531   | 0,154  | 0,077                       | 0,077                          | 0,770                                       | 0,655  |
| 15n-25n  | 5,002   | 0,121  | 0,061                       | 0,060                          | 0,610                                       | 0,510  |
| 25n-30n  | 2,516   | 0,172  | 0,172                       | .-                             | 1,720                                       | .-   |
| 30n-35n  | 2,270   | 0,085  | 0,085                       | .-                             | 0,850                                       | .-   |
| Gesamt-<br>bilanz:<br>36s-35n  | 35,406  | 1,114  | 0,903                       | 0,211                          | 9,030                                       | 1,795  |
| <i>Die Aufteilung der Sandersatzmengen in einzelne Küstenabschnitte dient ausschließlich der Mengen- und Kostenabschätzung für die <u>gesamte Westküste</u>.</i> |         |  |                             |                                | Gesamtkosten:<br>10,825 Mio. DM/a           |  |

#### 4.1.3 Endschwelle List

Aufgrund der fortschreitenden Erosion südlich des Basaltdeckwerkes, die von einer Ausräumung des Lister Landtiefs begleitet wird, und der Abschätzung des langfristigen Sedimenttransportes, in dem der größte Teil des Abbruchmaterials nach Norden gelangt, ist für das nördliche Inselende eine zusätzliche

Maßnahme zur Beeinflussung des regionalen Sedimenthaushaltes vorgesehen.

In der Machbarkeitsstudie zu Maßnahmen an den Inselenden (MOHN 1996) wird die Errichtung einer Endschwelle vorgeschlagen. Dieses Bauwerk soll eine Länge von 1,35 km und am Deckwerk bei NN-2m einbinden. Die

Höhe in der Achse des Lister Landtiefs beträgt NN-4m (mittlere Höhe NN-3m). Die Querschnittseinengung erfolgt mit einem mittleren Volumen von 32 m<sup>3</sup>/m, so daß sich Gesamtkosten von 8 Mio. DM für dieses Bauwerk ergeben, wobei die jährlichen Kosten bei 5 Prozent Zinszahlung 470.000 DM betragen.

Bei der Errichtung von festen Bauwerken sind die Vorteile mit gewissen Nachteilen verknüpft, wobei die Argumente gegeneinander abzuwägen sind. Am Ende der Betrachtung müssen die Kosten dem erwarteten Nutzen gegenübergestellt werden.

Vorteile:

- ⇒ Einbindung der Schwelle in den Salzsand
- ⇒ Stabilisierung des südlich vorgelagerten Vorstrandes
- ⇒ Trasse verläuft weitgehend parallel zum heutigen Verlauf des Südhangs des Lister Tiefs, d.h. geringerer Materialeinsatz durch Ausnutzung vorhandener Höhenlinien
- ⇒ Durch die Ausbildung der Schwelle (Neigung 1:300) ist von einer langsamen Zunahme der Überströmung von Land nach See auszugehen
- ⇒ Im Nahbereich vom Deckwerk wird eine Reduktion der Strömung mit entsprechender Sedimentation erwartet

Nachteile:

- ⇒ Durch ergänzende Untersuchungen ist sicherzustellen, daß die hangstabilisierende Strömung im Lister Tief erhalten bleibt, damit keine Standsicherheitsprobleme für die Schwelle auftreten
- ⇒ Einschränkung der Führung des Lister Landtiefs, das in der Vergangenheit wechselnde Rinnenachsen aufgewiesen hat

Bei der Endschwelle gelingt es, das Lister Landtief zu durchdämmen, die Landtiefbarre zu stabilisieren und den Anschluß an den Salzsand herzustellen. Gleichzeitig wird jedoch an den Ursachen der Ausräumung des Lister Landtiefs nichts verändert. Da die prozentualen Anteile der Tidewassermengen, die durch das Lister Landtief und Lister Tief ein- und ausfließen, weitgehend gleich bleiben, ist - in Abhängigkeit vom Grad des Querschnittsverbaus - mit der Ausbildung von Entlastungsrinnen auf dem Salzsand und einer Geschwindigkeitszunahme über der Endschwelle zu rechnen. Aufgrund der hohen Strömungs-

geschwindigkeiten wird keine großräumige Auffüllung des Lister Landtiefs erwartet.

Die mögliche Auswirkung der Strömungsführung auf die Morphodynamik des Südhangs des Lister Tiefs ist in einer Entwurfsphase noch im Detail zu untersuchen. Im Vorwege wurde bereits mit einem hydrodynamisch-numerischen zweidimensionalen Strömungsmodell (Auflösung 100m \* 100m) (HARTKE 1991) der Zustand mit und ohne Endschwelle untersucht. Die Ergebnisse weisen auf eine deutliche Strömungsentlastung im Süden der Endschwelle hin, die zu allen Tidephasen wirksam ist. Die Auswirkung nach Süden reicht demnach zwei bis drei Kilometer, wobei die größten Reduzierungen 1-2 Stunden vor Niedrigwasserzeit mit Werten von 10 - 20 cm/s auftreten. Über der Schwelle und an deren seeseitigen Kopf erhöhen sich die Geschwindigkeiten deutlich (>20 cm/s bzw. 10-20 cm/s).

Die Strömungsführung im Querschnitt des Lister Landtiefs entlang der Trasse der Endschwelle ist unterschiedlich: 800 m und 3 km westlich des Deckwerkes befinden sich Stellen, wo die Strömungsführung Änderungen erfährt.

Der Wassertransport in Westost - Richtung wird während der Flut auf den Bereich 800m - 3000m westlich des Deckwerkes stärker konzentriert; auf dem Salzsand ist der Transport weniger stark und westlich wieder stärker. Durch den Bau einer Endschwelle verringern sich die Transporte nach Osten in das Lister Tief in Küstennähe bis ca. 1,2 km nach Westen hinaus; lediglich weiter westlich und direkt über der Endschwelle treten Erhöhungen auf. Während der Ebbe findet eine ähnliche Konzentrationsbildung des Transportes wie bei der Flut statt.

Der Wassertransport in Nordsüd - Richtung wird während der Flut und Ebbe deutlich an die Küste herangeführt und nimmt allmählich nach Westen hin ab, wo auf Höhe des Salzsandes ein lokales Minimum erreicht wird (ähnlich wie beim West - Ost - Transport). Nach Einbau einer Endschwelle verringert sich deutlich der Transport im Abstand 600m - 1500m seewärts vom Deckwerk. Während der Flut vergrößert sich jedoch der nördlich gerichtete Transport nördlich des Deckwerkes. Dieser Transport dürfte den Nordwestteil des Ellenbogens weiterhin - trotz geringerem Sedimentangebot - mit Sediment versorgen.

Vor einer Bauausführung sind die Strömungsverhältnisse entlang der Trassenführung im aktuellen Naturzustand zu messen.

Der Effekt einer Verringerung der Sedimentzufuhr nach Norden ist für den Bereich des jetzigen Anwachsgebietes am Ellenbogen durch nachfolgende Vermessungen zu kontrollieren. Ein Küstenrückgang hätte in diesem Bereich zunächst keine unmittelbaren Folgen, da der Strand sehr breit ist. (Die Strandbreite NN+5m/NN±0m im Abschnitt 36n-41n beträgt mehr als 100m.) Bei einem Rückgang bei der schmalsten Stelle des Ellenbogens (ca. Profil 41n) wären gesonderte Maßnahmen zu ergreifen.

Nach dem Bau der Endschwelle sind das Bauwerk und die Entwicklung in den angrenzenden Bereichen intensiv zu beobachten. Wenn der Sedimentaustrag über das erreichte Volumen hinaus reduziert werden soll, be-

steht die Möglichkeit, eine zweite, kürzere Schwelle südlich der Endschwelle zu bauen, so daß der südliche Sedimentationsbereich vergrößert wird.

Bevor ein baureifer Entwurf der Endschwelle aufgestellt wird, müssen Baugrunduntersuchungen und Strömungsmessungen im Schwellenbereich durchgeführt werden.

#### Unterhaltungsaufwand

Wegen der nicht sicher abschätzbaren weiteren Tideentwicklung, ist ein zusätzlicher Unterhaltungsaufwand im Kopfbereich der Endschwelle möglich. Der gesamte Unterhaltungsaufwand wird mit 1 Prozent der einmaligen Herstellungskosten, d.h. 80.000 DM/Jahr, angenommen.

#### 4.1.4 Holzpfahlbuhnen List

Unmittelbar vor der Westküste des Lister Ellenbogens überwiegt die Flutströmung, die zusätzlich zum seegangsbedingten nach Norden gerichteten Brandungsstrom das Sediment von nach Norden in Lister Tief transportiert. Ein Teil der mobilisierten Sandmengen versorgen den nördlichen Teil des Ellenbogens. Zur Stabilisierung des in Erosion befindlichen Vorstrandes westlich des Ellenbogens soll die Endschwelle errichtet werden. Zur Auffüllung des Strandes sind Buhnen vorgesehen.

Die Buhnen sollen als einreihige Holzpfahlbuhnen mit einem Pfahldurchmesser von ca. 20 cm mit einer Höhe von ca. 1,0 bis 1,5m über Grund so angelegt werden, daß sie vom Dünenfuß ca. 100m in dichter Ausführung

und dann seewärts in zunehmend durchlässiger Bauweise (Abstand i.M. 15 cm) erstellt werden. Diese Ausführung verringert die Bildung von Kopfkolken.

Die längste Buhne ist vom südlichen Basaltdeckwerk aus -35n- in einer Trasse der Endschwelle vorgesehen. Nach Süden -31n- wird ein Buhnensystem aus fünf Buhnen mit abnehmender Länge und Abstand angelegt. Eine Buhne am nördlichen Ende des Basaltdeckwerkes soll den Anschluß an das noch vorhandene Buhnensystem der Nordküste herstellen. Die Kosten für die Herstellung des Buhnensystems betragen 1,5 Mio. DM, so daß die jährlichen Kosten 90.000 DM betragen.

## 4.2 Biotechnische Maßnahmen

Unter biotechnischen Maßnahmen werden das Setzen von abgelängten Laubholzfäschinen, das Auslegen von Durchforstungsbusch und pflanzlichen Ballen (Stroh und Heu), sowie das Pflanzen von Strandhafer an der Sylter Westküste bezeichnet. Die im äolischen Transport bewegten Sande werden mit Hilfe von biotechnischen Maßnahmen zum Vordünenaufbau und zur Dünenverstärkung zur Ablagerung gebracht. Der Sandflug ist abhängig von der Korngröße des Sandes, der Strandbreite und der Strandhöhe, wobei trockener Sand ab 3 Bft und nasser Sand ab 7 Bft fliegt. Zum Vordünenaufbau muß der Strand eine ausreichende Breite ( $\geq 60$  m) und Höhe ( $\geq \text{NN}+3,0$  m) haben.

### Sandfangzäune

Sandfangzäune werden z.B. aus Laubfaschinen (Reisigbüschel) gesetzt. Die größte Wirkung wird erreicht, wenn die Sandfangzäune senkrecht zur Sandflugrichtung stehen. Die Anzahl der Sandfangzaunreihen und deren Höhe ist abhängig von der für die Entwicklung des Sandfluges verfügbaren Strandbreite. Bei küstenparallelem Zaunverlauf haben sich Zaunabstände von 10 Metern bewährt. Quer- und Diagonalzäune unterbinden erneuten äolischen Transport in Küstenlängsrichtung von bereits abgelagerten Sanden. Die Zaunhöhe liegt zwischen 0,50 m und 1,20 m über Strandniveau; Zaunhöhen von  $\geq 1,60$  m sind nur bei großer Sandablagerungsintensivität zu verwenden. Bei der Ausrichtung der Sandfangzäune ist zu beachten, daß ein „ärodynamisches Profil“ hergestellt wird, indem von der Randdüne ausgehend die Sandfangzäune so gesetzt werden, daß ein allmählicher Übergang zum Strand entsteht.

In der Regel werden 1 bis 2 Reihen Sandfangzäune parallel zur Randdüne in Reihenabständen von 4 m bis 10 m vor den Dünenfuß gesetzt; der Abstand wird individuell in Abhängigkeit von den verwendeten Zaunhöhen gewählt und sollte etwa das 4- bis 6-fache der Zaunhöhe betragen. Dabei werden die Faschinen - je nach Zaunhöhe - 20 cm bis 40 cm tief in den Sand eingegraben (manuell oder maschinell) (Tabelle 15). Die Eingrabetiefe richtet sich ausschließlich nach der Standfestigkeit der Zäune, so daß auch bei stürmischen Winden der Zaun standfest bleibt. Die Sandfangzäune sind außerdem möglichst senkrecht zur Hauptwindrichtung anzuordnen (Südwest bis Nordwest).

**Tabelle 15: Eingrabetiefen und Zäunhöhen für Sandfangzäune**

| Faschinenlänge [cm] | wirksame Zaunhöhe [cm] | Eingrabetiefe [cm] |
|---------------------|------------------------|--------------------|
| 50                  | 30                     | 20                 |
| 70                  | 50                     | 20                 |
| 130                 | 100                    | 30                 |
| 160                 | 120                    | 40                 |

Um den Sandflug längs zur Küste und Auswehungen innerhalb der Reihen zu unterbinden, werden Quer- oder Diagonalzäune gesetzt. Damit schädliche Windwirbel vor den Zäunen vermieden werden, müssen die Sandfangzäune so gesetzt werden, daß sie eine Winddurchlässigkeit von rd. 50% erhalten.

Beim Herstellen der Sandfangzäune ist zu beachten, daß sie horizontal abgeglichen gesetzt werden, damit eine gleichförmige Sandablagerung erreicht wird.

Sind die Zäune bis auf ca. 20 cm eingesandet, ist ihre sandfangende Wirkung gering. Durch neue Sandfangzäune auf bzw. vor den eingesandeten Flächen kann weiterer Sand abgelagert werden. Diese Arbeiten werden wiederholt, bis der Hang der Randdüne mit der Vordüne in einer sanft konkaven Form vom oberen Dünenrand bis auf den Strand abfällt.

Auf diese Weise können mit einer zweireihigen Zaunreihe bei einer wirksamen Höhe von 80 cm in einem Jahr rd. 8 m<sup>3</sup> Sand pro Meter Küstenlänge gefangen werden.

Künstliche Sandfangzäune wie Kunststoffmatten, Netzwerke aus synthetischen Geweben, Flechtwerke aus Reisig, Schilfrohr und Holzkonstruktionen haben sich auf Sylt nicht durchgesetzt.

Bei Einbrüchen in Dünen (z.B. Windrisse) läßt sich Sand außer mit Sandfangzäunen auch durch Auslegen mit Durchforstungs-

busch oder Strohballen zur Ablagerung bringen. Im Bereich des Lister Ellenbogens und der Kersigsiedlung in Hörnum sind bei Sturmfluten vollständig abgetragene Randdünen ausschließlich durch biotechnische Maßnahmen wieder aufgebaut worden.

### Halmpflanzungen

Die Sandoberflächen lassen sich durch Halmpflanzungen festlegen. Da der auf Sylt heimische Strandhafer (*Ammophila arenaria*) zum wachsen Silikatzufuhr aus dem Flugsand benötigt, wächst er mit der Sandablagerung und bildet armierungsartige Wurzeln im Boden. Aus dem übersandeten Halmknoten bilden sich jeweils neue Wurzeln, wobei die Pflanzhalm eine Einsandung von bis zu 90 Prozent ihrer Länge vertragen. Die übersandeten Pflanzen wachsen nicht durch, so daß Nachpflanzungen erforderlich sind.

Der Strandhafer kann in allen frostfreien Monaten, die ein "r" im Monatsnamen haben (September - April), gepflanzt werden. Dabei werden aus jungen, zwei- bis dreijährigen Strandhaferbeständen die Stecklinge mit mindestens zwei Halmknoten etwa 10 bis 15 cm tief ausgestochen und am neuen Standort zu je fünf bis sieben Pflanzen pro Pflanzloch in langen Reihen mit Abständen von 30 bis 50 cm eingepflanzt. Die Besatzdichte beträgt in Abhängigkeit der Lage und Sandzufuhr vier bis acht Pflanzbüschel pro Quadratmeter.

Weitere Sandgräser, die in den Dünen häufig angetroffen werden, sind u.a. die Strandgerste (*Elymus arenarius*), der auch Strandroggen genannt wird und das Silbergras (*Corinephorus conescens*), die jedoch für den Vordünenaufbau und die Bepflanzung der Randdüne nicht verwendet werden.

Wenn der luvseitige Dünenhang der Randdüne durch dünenbautechnische Maßnahmen eine entsprechend flache und aerodynamische Form angenommen hat, und der seeseitige Dünenfuß durch eine entsprechend hohe Vordüne gegen höhere Wasserstände geschützt ist, beginnt die Festlegung des seeseitigen Dünenhanges von Rand- und Vordüne mit Strandhafer. Dabei sind Böschungsneigungen von 1:3 bis 1:5 (oberer Dünenhang bis Vordüne) optimal. Halmpflanzungen wirken als Windberuhigungsflächen, in denen sich die mit dem Wind transportierten Sandkörner ablagern. Die aufrecht stehenden Halme, die sich elastisch den wechselnden Windrichtun-

gen anpassen, verhindern ein Auswehen der Sandflächen.

Durch menschliche Einwirkungen, Übersandung durch Flugsand, Kaninchenfraß bei frisch angelegten Pflanzungen, Witterungseinwirkungen oder Nichtanwachsen mangelhafter Pflanzlinge können Beschädigungen oder Verluste bei den Pflanzungen auftreten. Bei sachgemäßer Ausführung einer Neupflanzung mit ausreichender Sandzufuhr liegt der Anwacherfolg bei 80 bis 90 Prozent. Eine besondere Nachbehandlung von Halmpflanzungen mit Handelsdünger ist - aufgrund des hohen Nährstoffanteils, der im Flugsand enthalten ist - nicht erforderlich.

Der für die Pflanzungen geeignete Halm ist in der Randdüne und z.T. in den Vordünen ausreichend vorhanden.

Die Festlegung von Dünenabbruchhängen ist wenig sinnvoll, da diese meist steiler als der natürliche Böschungswinkel des Strandes verlaufen (Abrutschgefährdung), die in der Horizontalen zu schützende Fläche im Verhältnis zur geneigten Hangfläche klein ist, und somit der erforderliche Aufwand für die beschwerliche Arbeit im Hang in einem ungünstigen Verhältnis zum erreichten Schutzeffekt steht.

### Windrisse

Randdünen können unterschiedliche Zerstörungsformen zeigen: Windmulden und Kuppen, die aus pfeilerartigen Restdünen bestehen. Dazu gehören die Dünenüberwegungen, wenn deren bewachsene Seitenhänge durch Sandablagerungen stetig höher und dadurch immer steiler werden, während die Höhenlage der Überwegung gleich bleibt. Auf diese Weise entstehen Windschleusen, in denen die Windgeschwindigkeiten erheblich verstärkt werden, wo als Folge Ausblasungen der Dünenflächen und Zerstörung der Strandhaferpflanzung entstehen.

Kleinere Windrisse können in der Regel durch Abdecken mit Durchforstungsreisig gegen weiteres Auswehen gesichert werden, wobei das Reisig mit der Zeit einsandet und schließlich mit Strandhafer bepflanzt wird. Ähnliches gilt für Dünenüberwegungen, in denen sich das Auslegen der Trittsflächen mit Altheu, der - zu Rundballen gepreßt - in einer flachen Lage ausgerollt wird, bewährt hat.

Sind größere Windrisse vorhanden, müssen diese Dünenbereiche zunächst mit Hilfe einer Planierdrape in eine aerodynamisch günstige Form gebracht werden; anschließend erfolgt die Bepflanzung der Flächen mit Strandhafer.

### Dünenverwaltung

Das Schließen von Dünendurchbrüchen nach Sturmfluten ist durch das Herstellen von Dünenverwallungen möglich. Dabei können kleinere Dünendurchbrüche allein durch biotechnische Maßnahmen geschlossen werden, indem ein System von Sandfangzäunen errichtet wird. Dieser Vorgang wird so häufig wiederholt bis der Dünenwall die vorgesehene Höhe erreicht hat.

Die Neigung der Außenböschung einer Dünenverwallung ist - in Abhängigkeit der Strandbreite und Strandhöhe - so flach wie möglich herzustellen. Im Regelfall sind Böschungsneigungen von 1:6 bis 1:8 ausreichend, worauf dann der Strandhafer gepflanzt werden kann.

Die gleiche Wirkung, wie mit den Sandfangzäunen als Basis für die Dünenverwallung, kann mit Durchforstungsreisig erzielt werden. Die mit Reisig ausgelegten Wälle in den Durchbruchstellen werden mit Flugsand gefüllt, und die Lücke füllt sich auf.

Der Erfolg dieser Maßnahmen ist vom vorhandenen Sandangebot und der Form des Flugsandes abhängig. Bei den regelmäßig durchgeführten Aufspülungen sollte der Sand für die Dünenverwallungen direkt aus dieser Menge mittels LKW transportiert und Planierdrape eingebaut werden.

### Dünenverstärkung

Eine schwache, im Abbruch befindliche, durchbruchgefährdete Randdüne kann durch eine Sandanschüttung seewärts (Außendünenverstärkung) oder landwärts (Innendünenver-

stärkung) der Düne verstärkt werden. Die Strandaufspülungen dienen z.T. einer gezielten Außendünenverstärkung, so daß kein Sand aus dem Binnendünenbereich entnommen werden muß.

### Leistung und Kosten

Der zukünftige Bedarf an biotechnischen Küstenschutzarbeiten kann abgeschätzt werden, wenn folgende Rahmenbedingungen erhalten bleiben:

- ⇒ Sandangebot bleibt erhalten
- ⇒ Verringerung des Abbruches der Vor- und Randdünen als Folge kontinuierlicher Sandaufspülungen und damit abnehmender Unterhaltungsaufwand
- ⇒ Zunahme dichter, geschlossener Strandhaferpflanzungen im Vor- und Randdünenbereich, wodurch weniger Sandfangzäune erforderlich werden
- ⇒ Verwendung von Sandfangzäunen mit einer Zaunhöhe von 1,00 m aus Faschinen mit einer Länge von 1,30 m
- ⇒ Bedarf von 63 km Sandfangzäunen pro Jahr (Mittelwert 1994/95), wobei auf rd. 25 km Küstenlänge jährlich Maßnahmen durchgeführt werden (2.500 m/km)
- ⇒ Strandhaferpflanzungen auf einer Fläche von 5 - 10 ha/a

Die Arbeiten zu den biotechnischen Maßnahmen werden vom Personal des ALW Husum in Eigenregie und mit Hilfe von Firmen durchgeführt. Dabei sind in den vergangenen 10 Jahren jährlich ca. 110 km Sandfangzäune gesetzt (entspr. 3,600 m pro Kilometer Küstenlänge) und ca. 12 ha Dünen bepflanzt worden. Die Kosten dieser Maßnahmen betragen 0,07 Mio. DM pro Kilometer. Der Anteil der Maßnahmen, der durch Dritte ausgeführt werden soll, erfordert 200.000 DM/a, wogegen der Eigenanteil 1,2 Mio. DM/a beträgt.

### 4.3 Unterhaltung bestehender Bauwerke

Die errichteten festen Bauwerke erfordern z.T. einen Unterhaltungsaufwand. Im Falle der Längswerke vor Westerland und Hörnum entsteht der Unterhaltungsaufwand im wesentlichen durch die Fußsicherung mit Sandaufspülungen. Die Ufermauer vor Westerland und das Deckwerk am Lister Ellenbogen bedürfen einer Grundinstandsetzung. Die weiteren Bauwerke sind z.T. abgängig (Buhnen) oder müssen beseitigt werden.

Tabelle 16 liefert eine Übersicht der Kosten für die Unterhaltung der an der Westküste der Insel Sylt vorhandenen Küstenschutzanlagen. Dabei sind die Maßnahmen zur Instandsetzung der Ufermauer Westerland und Verstärkung des Deckwerksfußes am Ellenbogen berücksichtigt. Die Kosten der jährlichen Unterhaltung umfassen das Abtrennen der Spundwandbuhnen im Abschnitt Kampen - List und das Ausbessern kleiner Schäden an den Deckwerken Westerland und List sowie der Ufermauer Westerland.

**Tabelle 16: Übersicht Unterhaltungskosten vorhandener Küstenschutzanlagen**

| lfd. Nr. | bestehende Küstenschutzanlagen                  |           |                                 |                  | jährliche Unterhaltungskosten<br>[DM/a] | Grundinstandsetzung                     |                                   |
|----------|---|-----------|---------------------------------|------------------|---|---|-----------------------------------|
|          | Bauwerk   | Länge [m] | Herstellungskosten<br>[Mio. DM] | Eigentümer       |   | Maßnahme                                | geschätzte Baukosten<br>[Mio. DM] |
| 1        | Uferdeckwerk Ellenbogen                         | 520       |                                 | Land S.-H.       | 5.000                                   | Verstärkung Deckwerksfuß auf 100m Länge | 0,300                             |
| 2        | Tetrapodenlängswerk Westerland N<br>4.838 Stück | 1.070     | 3,825                           | Stadt Westerland | -.-                                     |   | -.-                               |
| 3        | Deckwerk Westerland                             | 853       |                                 | Stadt Westerland | 10.000                                  |   | -.-                               |
| 4        | Ufermauer Westerland                            | 774       |                                 | Stadt Westerland | 15.000                                  | Verstärkung Ufermauer                   | 3,000                             |
| 5        | Tetrapodenlängswerk Westerland S<br>1.200 Stück | 270       | 1,336                           | Stadt Westerland | -.-                                     |   | -.-                               |
| 6        | Tetrapodenlängswerk Hörnum<br>5.591 Stück       | 1.270     | 2,302                           | Gemeinde Hörnum  | -.-                                     |   | -.-                               |
| 7        | Tetrapodenquerwerk Hörnum<br>270 Stück          | 270       | 0,767                           | Land S.-H.       | -.-                                     |   | -.-                               |
| 8        | Strandbuhnen                                    |           |                                 | Land S.-H.       | -.-                                     |   | -.-                               |
|          | Stahlbetonbuhnen (35 Stück)                     | 2.585     |                                 |                  | -.-                                     |   | -.-                               |
|          | Stahlspundwandbuhnen (36 Stück)                 | 3.370     |                                 |                  | 50.000                                  |   | -.-                               |

#### 4.4 Meßkonzept

Der Küstenschutz an sandigen Küsten erfordert die regelmäßige Bestimmung des Sandangebotes im Strand- und Vorstrandbereich. Angaben über das zugehörige langfristige Meßkonzept finden sich bei ALW (1994a) und SCHALLER & HINRICHSSEN (1994).

Um die Wirkungsweise der geplanten Maßnahmen weiterhin beurteilen zu können, müssen folgende Messungen durchgeführt werden:

- ⇒ Vermessungen der Hauptprofile im Herbst eines jeden Jahres (synoptisch)
- ⇒ Vor- und Nachvermessung der Aufspülbereiche mit ausreichender Erfassung der Nachbarbereiche

- ⇒ Kontinuierliche Erfassung des Richtungsseegangs vor Westerland (Meßpfahl)
- ⇒ Kontinuierliche Erfassung der Windgeschwindigkeit und -richtung vor Westerland (Meßpfahl)
- ⇒ Erfassung der Wasserstände vor Westerland und an den Inselenden (auch Westseite) zur Beschickung von Vermessungsdaten und Berechnung des Energieeintrages (Verweildauer erhöhter Wasserstände)

#### 4.5 Forschungs- und Untersuchungsbedarf

Im Hinblick auf die zunehmenden Erkenntnisse bei den Prozessen, welche die Morphodynamik bestimmen, muß auch für den Bereich Sylt von einem weiteren Untersuchungsbedarf ausgegangen werden. Insbesondere müssen die Umlagerungsbedingungen im Vorstrand aus der Wechselwirkung Strand - Vorstrand - Seegrund untersucht werden, da in diesem Bereich die Erosion des Inselsockels ansetzt. Dabei sind auch ältere - noch nicht digital vorliegende - Daten heranzuziehen.

Weiterhin müssen die Abbauvorgänge der Außensände und des Küstenvorfeldes an den

Inselenden in kausale Zusammenhänge mit äußeren Einflußgrößen gebracht werden.

An der hydrodynamisch-numerischen Beschreibung des flächenhaften Sedimenttransportes in Abhängigkeit der Tiefenverteilungen, Zeitreihen von Tide, Seegang und Wind wird weiterhin zu forschen sein. Das Ziel ist die Aufstellung eines morphodynamischen Modells. Dazu sind Grundlagenuntersuchungen notwendig, die eine weitere Gewinnung von Naturdaten beinhalten muß, damit das Modell verifiziert werden kann.

#### 4.6 Kosten (incl. Unterhaltungskosten)

Nachfolgend werden die Grundlagen der Kostenschätzung im Rahmen der Vorplanung gem. LAWA (1994) zusammengestellt. Für die Durchführung der vorgenannten Einzelmaßnahmen sind jeweils Einzelentwürfe aufzustellen, die genaue Kostenberechnungen enthalten. Anschließend erfolgt die Ausschreibung, die zur Berechnung von Kostenanschlägen durch die Anbieter führt. Nach der Vergabe der Arbeiten ist eine Kostenfeststellung vorzunehmen, so daß die Höhe der tatsächlich entstandenen Kosten nachgewiesen werden kann. Für die nachfolgenden Kostenschätzungen im Rahmen der Vorplanung wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Preisstand: 01.01.1997
- Einheitspreis Strandaufspülung: 10 DM/m<sup>3</sup>
- Einheitspreis Vorstrandaufspülung: 8,50 DM/m<sup>3</sup>
- Untersuchungszeitraum und Kalkulationsperiode: 35 Jahre (1997-2032)
- Zinssatz: 5 % (3 %)
- Realbewertung zum Zeitpunkt der Berechnung
- Keine akkumulierenden Kosten (keine Aufzinsungen) sind zu berücksichtigen
- Bauwerke sind innerhalb eines Jahres herzustellen
- Kosten werden als Jahreswerte und Barwerte angegeben
- Funktion der Bauwerke für 35 Jahre gleichwertig
- Die Umrechnung von gleichförmigen Kostenreihen in Kostenbarwerte erfolgt mit dem Diskontierungsfaktor, DFAKR (i,n),

mit i: Zinssatz und n: Untersuchungszeitraum. Hierbei kann sowohl ohne einer Preissteigerungsrate als auch mit einer Rate von  $t=2\%$  gerechnet werden (s.u.).

- Die Umrechnung von Einzelkosten in jährliche Kosten erfolgt mit dem Kapitalwiedergewinnungsfaktor, KFAKR(i,n) (s.u.).

| n    | i   | t   | DFAKR   | KFAKR   |
|------|-----|-----|---------|---------|
| 35 a | 5 % | 0 % | 16,374  | 0,06107 |
| 35 a | 5 % | 2 % | 21,6729 |         |
| 35 a | 3 % | 0 % | 21,487  | 0,04654 |
| 35 a | 3 % | 2 % | 29,5058 |         |

Aufgrund der Kostenangaben in den Machbarkeitsstudien und der Kostenschätzungen für den weiteren Forschungsbedarf sowie der Kosten für begleitende hydrologische und morphologische Messungen sind in Tabelle 17 die Gesamtkosten angegeben. Diese Aufstellung beinhaltet jedoch nicht die Personal- und Sachkosten der Verwaltung, die sich mit der Ausschreibung und Bewertung der Maßnahmen sowie der Erfassung morphologischer, hydrologischer und meteorologischer Daten befaßt.

**Tabelle 17: Kosten der geplanten Küstenschutzmaßnahmen Westküste Sylt**

| geplante Maßnahmen                  | jährliche Kosten | Kostenbarwerte     |
|-------------------------------------|------------------|--------------------|
|                                     | Mio. DM/Jahr     | Mio. DM (35 Jahre) |
| Strandaufspülung                    | 9,030            | 147,82             |
| Vorstrandaufspülung                 | 1,795            | 29,39              |
| Endschwelle List                    | 0,489            | 8,00               |
| Unterhaltung Endschwelle List       | 0,080            | 1,31               |
| Holzpfaahlbuhnen List               | 0,092            | 1,50               |
| Unterhaltung bestehender Bauwerke   | 0,330            | 5,40               |
| Biotechnische Maßnahmen             | 0,200            | 3,27               |
| Naturmessungen                      | 0,500            | 8,19               |
| Forschungs- und Untersuchungsbedarf | 0,100            | 1,64               |
| <b>Gesamtkosten</b>                 | <b>12,616</b>    | <b>206,52</b>      |

*Annahme: Zinssatz 5%, keine Preissteigerungsrate, Untersuchungszeitraum: 35 Jahre*

Durch die Errichtung einer Endschwelle und einreihiger Holzpfaahlbuhnen wird eine allmähliche Verringerung des Volumenbedarfes im Bereich List (29n-35n) erwartet, so daß die Aufspülmengen und -kosten mittel- bis langfristig geringer werden. Dabei kann die weitere Entwicklung der Tide- und Seegangsdynamik, die zu Mehr- oder Mindermengen führen kann, noch mit keinen Methoden sicher prognostiziert werden. Aus heutiger Sicht besteht die Möglichkeit mit einem jährlichen Mittelbedarf von 12,616 Mio. DM eine Sicherung der Sylter Küste zu ermöglichen, dabei sind die notwendigen begleitenden Untersuchungen eingeschlossen.

Eine Kosten-/ Nutzenrechnung unter Berücksichtigung der Maßnahmen zur Küstensicherung und der volkswirtschaftlichen Bedeutung des Strandes und der diversen Anlagen und Objekte soll an dieser Stelle nicht durchge-

führt werden, da die volkswirtschaftliche Bedeutung Sylts z.Z. allgemein anerkannt wird.

#### **4.7 Träger und Finanzierung**

Die Maßnahmen zum Schutz der Westküste der Insel Sylt vor weiterem Abbruch durch Sandaufspülungen, Sicherung nördliches Inselende, Biotechnik) werden vom Land Schleswig-Holstein getragen, da sie der Sicherung des Inselsockels dienen. Eine Beteili-

gung der durch die Maßnahmen Begünstigten ist lt. Landeswassergesetz möglich.

Die Finanzierung erfolgt aus Mitteln im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe des Bundes und der Länder (GA), wenn die Förderungsgrundsätze eingehalten werden.

## 5 Zusammenfassung

Die Westküste Sylts befindet sich in einem ständigen Abbruch. Das Material aus dem Küstenabbruch wird seewärts und durch den Längstransport zu den Inselenden transportiert, wo die Haupttiderinnen die Sedimentmengen von der Insel forttragen, so daß die Sandbilanz negativ ist. Der Abbruch der Dünen- und Kliffküsten erfolgt im wesentlichen bei Sturmzeiten.

In der Wasserwechselzone und dem Bereich des Vorstrandes herrscht infolge der Tide- und Wellendynamik ein hohes Maß an Mobilität des Sediments vor.

Der trockene Strand erfährt auch durch den äolischen Transport, der insbesondere bei trockenen Wetterlagen stattfindet, Veränderungen; die biotechnischen Maßnahmen fördern den Schutz und Aufbau des hohen und trockenen Strandes.

Nach starken Regenfällen kommen im Bereich des Kliffs Rutschungen und Abbrüche vor, die das Erscheinungsbild des Kliffs trotz einer Küstensicherung von See her ändern. Die größten Verluste an der Westküste von Sylt werden von hydrodynamischen Kräften verursacht, wobei der Vorstrandbereich für den Sedimenttransport und die Energieumwandlung eine wesentliche Bedeutung besitzt.

Die Küstenschutzmaßnahmen müssen folgende Umstände berücksichtigen:

- an der Westküste ist eine stete Mobilisation von Sediment vorhanden, wobei durch den brandungsinduzierten Längsstrom Material zu den Tiderinnen an den Inselenden transportiert wird (offenes System)
- die Sandmengen werden in Abhängigkeit des Energieeintrages querverlagert, wobei während energiereicher Perioden im Vorstrand Material akkumuliert; diese Mengen stehen für den Wiederaufbau des Strandes zur Verfügung

Das vorgeschlagene Küstenschutzkonzept sieht vor, die intensiver besiedelten Westküstenbereiche im jetzigen Zustand zu erhalten. In den Zwischenbereichen ist ein ausgeglichener Küstenverlauf anzustreben; dabei kann ein begrenzter Rückgang der Randdünen hingenommen werden, wenn dieser wieder ersetzt wird.

Der Schutz der Randdüne erfolgt durch eine Depotaufspülung oder Außendünenverstär-

kung. Strandauffüllungen sind zur Erhöhung und Verbreiterung des trockenen Strandes geeignet.

In den Bereichen, in denen der trockene Strand eine ausreichende Fülligkeit aufweist und die strandnahe Brandungszone landwärts erodiert, sind Aufspülungen im Vorstrand vorzunehmen.

Der Aufspülbedarf, das Aufspülprofil und die Aufspülmenge sind vom Zustand des Strandes und Vorstrandes im Aufspülbereich und den Nachbarbereichen abhängig. Hierzu wird der Strandzustand aufgrund der jeweiligen Herbstvermessung der Hauptprofile (500m - Abstand) mit dem Zustand 1992 verglichen und der mögliche Küstenrückgang unter Annahme schwerer Sturmfluten abgeschätzt.

Eine besondere Bedeutung kommt dem vorgelagerten Riff - Rinnen - System zu. Zur Beeinflussung des Küstenlängstransportes sind Maßnahmen zur Erhöhung der Verweildauer des transportierten Sedimentes von Bedeutung. Auf die Erhaltung des Riffsystems als Wellenfilter vor dem trockenen Strand ist zu achten. Dazu muß der Vorstrand regelmäßig vermessen werden (synoptisch, komplett).

Um die Küstenlinie in der Lage von 1992 zu halten (Rahmenbedingung für bauliche Maßnahmen und Paragraph 63 LWG, ab 01.01.1992 gültig), werden Sandaufspülungen im Strand und Vorstrand und die Errichtung einer Endschwelle vor List vorgeschlagen.

Sandaufspülungen werden dabei in Abhängigkeit des Energieeintrages vorzunehmen sein. Der Einsatz eines Dünenabbruchmodells ermöglicht die Abschätzung der vom Abbruch gefährdeten Küstenabschnitte. Die Aufspülstrecken werden demnach wie folgt festgelegt:

- ⇒ Strandzustand im Herbst jedes Jahres (Istzustand) im Vergleich zum Referenzzustand 1992 (Sollzustand)
- ⇒ Erwarteter Küstenrückgang für Istzustand bei schweren Sturmfluten (Dünenabbruchmodell)
- ⇒ Auswertung der Luftbilder betr. Vorstrandsituation
- ⇒ Abschließende Festlegung in Absprache mit den betroffenen Stellen nach Bereisung im Frühjahr, der dem Istzustand folgt

Die Anwendung von Sandaufspülungen wird dabei als die geeignetste Methode des Küstenschutzes bewertet, die den gestellten Rahmenbedingungen genügt:

- Erhalt der Küstenlinie in der Lage von 1992
- Vermeiden negativer Einflüsse auf die Nachbarbereiche
- Minimieren der Umweltbeeinflussung
- Erhalt des Sandstrandes
- Akzeptanz für den Tourismus

Damit werden folgende Maßnahmen für den Zeitraum 1997-2007 vorgesehen:

- ⇒ Errichtung einer Endschwelle und begleitend Holzpfahlbuhnen im Bereich List, um die Ausräumung des Lister Landtiefs zu begrenzen und den Sedimentaustrag ins Lister Tief zu reduzieren
- ⇒ Reduzierung der Aufspülmengen am Strand zur Verringerung des Ungleichgewichtes im Profil
- ⇒ Verringerung des Energieeintrages auf den Strand durch Aufspülungen im Vorstrand
- ⇒ Der jährliche Abbruch vor Kliffs, Dünen und Bauwerken ist durch Sandauf-

spülungen in Form von Außendünenverstärkungen oder als Depot in Abhängigkeit des Gefährdungsgrades auszugleichen, wobei die Gefährdung von Art und Lage des Objektes (Ufermauer, Deckwerk, Längswerk, Bühnen, Bebauung, Verkehrswege, wirtschaftliche Nutzung) abhängt.

Die Beurteilung der Zeitpunkte von notwendigen Sandaufspülungen wird durch die Berücksichtigung der eingetragenen Energie erfolgen, wobei die Lage der Küstenlinie (NN+3,75m) des Zustandes von 1992 zu halten ist.

Die jährlichen Kosten gemäß Tabelle 14 sind Mittelwerte. Die jährlich durchzuführenden Maßnahmen hängen von den jeweils aktuellen Strandsituationen ab. Außerdem ist die Mittelbereitstellung im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes von Bedeutung. Eine vorübergehende Verringerung der Jahreskosten gemäß Tabelle 14 ist in Zeiten mit geringeren Sturmflutaktivitäten vertretbar. Eine dauernde Verringerung dieses Ansatzes kann langfristig zur Veränderung der o.g. Rahmenbedingungen führen, ohne daß der Bestand der Insel gefährdet ist.

Für längerfristige Zeiträume (größer 35 Jahre) muß gelten, daß die Bebauung in Ufernähe zurückgenommen wird, damit an der Westküste ein mindestens 100 Meter breiter Dünen- und Kliffschutzstreifen entsteht.

Im Bereich des südlichen Inselendes an der Hörnum-Odde ist in den vergangenen Jahrzehnten ein starker Rückgang der Oddespitze von Süden und Südwesten her erfolgt. Die Ortslage Hörnum ist z.Z. nicht gefährdet. Ein weiterer Rückgang der Oddespitze soll dennoch im Rahmen der Möglichkeiten verhindert werden. Die Küstenlinie der Odde kann durch Sandaufspülungen im Bereich Hörnum stabilisiert werden; dabei ist die Herstellung einer weitgehenden Nord - Süd - Ausrichtung sinnvoll, so daß die Transportkapazität für das ausgetragene Sediment reduziert wird.

## 6 Quellenangaben

- AHRENDT, K., DIETHELM, R. & KÖSTER, R.: "Bericht zum Vorhaben Sicherung der Hörnum-Odde",  
- Teil I (1989): Auswertung historischen Kartenmaterials, 15 S., 23 Abb., 10 Anlg.  
- Teil II (1990): Auswertungen von Bohrungen und geophysikalischen Profilen, 7 S., 7 Anlg.  
- Teil III (1990): Zusammenfassende Auswertung und Abschätzung zukünftiger Entwicklung, 8 S., Kiel  
(alle unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Fachplan Küstenschutz Sylt", 13.01.1985 (unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Bericht über den Naturversuch mit Geotextilien vor Kampen - Kliffende 1990", Januar 1992 (unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Schlußbericht Untersuchungen zum Küstenschutz auf Sylt - Phase II (1991-1993)", 19. Mai 1994 (unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Schlußbericht Phase II", Forschungsbericht Bundesminister für Forschung und Technologie (MTK 0534 0), 31. August 1994 (unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Biotechnische Küstenschutzmaßnahmen auf der Insel Sylt - Ein Erfahrungsbericht über die Jahre von 1985-1994", 25 Seiten, 25. März 1996 (unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Machbarkeitsstudie Sandaufspülungen", 225 Seiten, 13. Juni 1996 (unveröffentlicht)
- ALW (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM): "Modell- und Naturuntersuchungen zur Sicherung des nördlichen Inselendes der Insel Sylt", 52 Seiten, 01. November 1996 (unveröffentlicht)
- ANDRESEN, F.H., H.H. DETTE & J. GÄRTNER: Schutz sandiger Küsten durch Sandvorspülungen am Beispiel der Insel Sylt Jahrbuch der Hafenbautechn.Ges., 42. Bd., Springer Verlag Berlin, 1988
- BRESSAU, S. (1971): Gutachten des GLA Nr. 71/31 für eine Spülsandentnahme am Rantumbecken (unveröffentlicht)
- BRUUN, P.: "Coast erosion and the development of beach profiles", Technical Memorandum, No.44, BEACH EROSION BOARD, 1954
- BMFT (BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE): "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt", Statusseminar Kiel, März 1991
- BMFT (BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE): "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Schlußbericht Phase I", Forschungsbericht Bundesminister für Forschung und Technologie (MTK 0374), Februar 1992 (unveröffentlicht)
- BMFT (BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE) (Hrsg.): "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II", Statusseminar in Husum, November 1994
- CHRISTIANSEN, H.: "Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten", Hamburger Küstenforschung H. 35, S. 37-72, 1976

- DETTE, H.H.: "Effectiveness of Beach Deposit Nourishment", Proc. Symposium on Coastal Sediments and Structures, Coastal Sediments 77, Charleston, South Carolina, USA, 1977
- DETTE, H.H.: "Untersuchungen über Dünenabbrüche und Stranderosionen im großen Wellenkanal", Die Küste, H. 43, S. 247-282, 1986
- DETTE, H.H.: "Energetische Betrachtungen zu seegangserzeugten Änderungen der Küstenmorphologie", Statusseminar Kiel 1991
- DETTE, H.H. & J. GÄRTNER: "Erfahrungen mit der Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahr 1983", Die Küste, H. 45, 2. 209-258, 1987
- EAK 1993: "Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuß für Küstenschutzwerke", Die Küste, H. 55, 1993
- FI (FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER): "Untersuchungen zur wellendämpfenden Wirkung des Riffs vor der Westküste der Insel Sylt", Forschungsbericht des Franzius-Instituts Hannover, 1990 (unveröffentlicht)
- FI (FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER): "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Schlußbericht Phase II", Februar 1994 (unveröffentlicht)
- FÜHRBÖTER, A.: "Vorschläge für eine Wiederholungsvorspülung vor Westerland Sylt", Einzelgutachten für ALW Husum, Braunschweig, Jan. 1984 (unveröffentlicht)
- FÜHRBÖTER, A.: "Empfehlungen für eine Strandvorspülung vor Kampen/Sylt", Einzelgutachten für ALW Husum, Braunschweig, Mai 1984 (unveröffentlicht)
- FÜHRBÖTER, A.: "Vorschläge für eine Optimierung der Vorspülungen von Wenningstedt bis Kliffende", Einzelgutachten für ALW Husum, Braunschweig, Feb. 1985 (unveröffentlicht)
- FÜHRBÖTER, A.: "Strandvorspülungen vor der Westküste von Sylt - Beurteilungen und Optimierungsmöglichkeiten", Braunschweig, April 1991 (unveröffentlicht)
- FÜHRBÖTER, A.: "Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen", Die Küste, H. 52, S. 241-254, 1991
- FÜHRBÖTER, A. & H.H. DETTE: "Strandaufspülungen vor der Westküste von Sylt", Die Küste, H.53, 51-126, 1992
- GPI (GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT KIEL): "Schlußbericht des Forschungsvorhabens Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Phase II", Januar 1994 (unveröffentlicht)
- HARTKE, D.: "Numerisches Modell des Sylter Wattenmeeres", unveröffentlicher Abschlußbericht zur Vorlaufphase des Projektes Sylter Wattenmeer Austauschprozeß (SWAP), Institut für Meereskunde, Universität Hamburg (unveröffentlicht)
- HOFFMANN, D.: "Küstenholozän zwischen Sylt und Föhr", Römisch-germanische Forschungen, Bd. 39, S. 85-130, 16 Abb., 8 Beil., Mainz, 1980
- HUNDT, C.: "Die Abbruchursachen an der Nordwestküste des Ellenbogens auf Sylt", Die Küste, H.2, 1957

- IHF (INSTITUT FÜR HYDROBIOLOGIE UND FISCHEREIWISSENSCHAFT DER UNIVERSITÄT HAMBURG): "Meeresbiologische Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt"  
- (1991): Zwischenbericht für den Zeitraum Mai 91 bis Okt. 91  
- (1992a): Zwischenbericht für den Zeitraum Okt. 91 bis März 92  
- (1992b): Zwischenbericht für den Zeitraum März 92 bis Okt. 92  
(alle unveröffentlicht)
- KAMP, W.-D. & A. HINRICHSSEN: "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt", HANSA, Nr. 9, S. 72-77, 1995
- KOHLHASE, S.: "Gutachterliche Stellungnahme zum Henkelriff für einen Einsatz als Küstenschutzmaßnahme für die Sylter Westküste", Juli 1993 (unveröffentlicht)
- KÖSTER, R.: "Geologie des Seegrundes vor den nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum", Meyniana Bd. 24, S. 27-41, Kiel, 1974
- KRIEBEL, D.L. & R.G. DEAN: "Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion", Coastal Engineering, Vol.9, 221-245, 1985
- KUNZ, H. & STEPHAN, H.-J.: "Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney", Die Küste, H. 54, S. 23-52, 1992
- LARSON, M.: "Quantification of beach profile change", Report No.1008, Dep. of Water Resources Engineering, Lund University, Institute of Science and Technology, Lund, 1988
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser): "Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen", 1994
- LWI (LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG): "Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt -Phase II-", 1994 (unveröffentlicht)
- LWI (LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG): "Untersuchungen zur Begrenzung der Ausräumung des hohen Strandes vor Dünen über die Dauer von Sturmfluten", Bericht Nr. 721, Oktober 1991
- MBA (Marschenbauamt Husum, Küstenausschuß "Nord- und Ostsee"- Arbeitsgruppe Küstenschutz - Abschnitt Nordfriesland): "Technischer Bilanzbericht über den Küstenschutz auf der Insel Sylt", Husum 25.02.1951
- MELFF (Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei des Landes Schleswig-Holstein): "Generalplan Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein", Fortschreibung 1986
- MELFF (Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei des Landes Schleswig-Holstein): "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Schlußbericht Phase I", Forschungsbericht (BMFT-MTK 0374), 1992
- MOHN (Ing.-Büro Mohn, Kiel): "Machbarkeitsstudie Küstenschutz Sylt - Erläuterungsbericht, Kostenschätzung und Mengenermittlung, Planunterlagen", 25.03.1996 (unveröffentlicht)
- RAUDKIVI, A.J.: "Betrachtungen zum Küstenschutz auf Sylt durch Anwendung einer Membran", Juli 1992 (unveröffentlicht)
- RAUDKIVI, A.J.: "Das Konzept der Endschwellen an den Inselenden von Sylt", August 1992 (unveröffentlicht)
- RAUDKIVI, A.J.: "Zur Erstellung konkreter Küstenschutzvorschläge für die Sylter Westküste", Juni 1993 (unveröffentlicht)

- SCHADE, D. & O.-B. von STACKELBERG: "Technische Kennblätter, Bewertungsmatrizen", in: "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II", Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar Husum, November 1994
- SCHALLER, D. & A. HINRICHSSEN: "Langfristige Meßkonzept", in: "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II", Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar Husum, November 1994
- SI (INSTITUT FÜR STRÖMUNGSMECHNIK UND ELEKTRONISCHES RECHNEN IM BAUWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER): "Datenmanagementsystem, Schlußbericht", Mai 1994 (unveröffentlicht)
- SI (INSTITUT FÜR STRÖMUNGSMECHNIK UND ELEKTRONISCHES RECHNEN IM BAUWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER): "Mathematische Modelle Sylt, Schlußbericht", Januar 1994 (unveröffentlicht)
- STACKELBERG von, O.-B.; D. SCHADE & A. HINRICHSSEN: "Detaillierter untersuchte Baumaßnahmen, Sonderbauweisen", in "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II", Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar Husum, November 1994
- TEMMLER, H.: "Gutachten des Geologischen Landesamtes für Spülsandentnahmen"  
Nr. 76/115 (v. 16.11.76) am Rantumbecken  
Nr. 79/115 (v. 25.02.81) in der Keitumer Bucht  
Nr. 82/6 (v. 15.03.92) südlich des Nössedeiches  
Nr. 82/34 (v. 28.06.83) im Seegebiet W Sylt (Westerland II)  
Nr. 82/85 (v. 31.01.82) im Gebiet der Theeknobsrinne  
Nr. 84/7 (v. 14.03.84) im Wattenmeer E Rantum  
Nr. 86/52 (v. 08.02.87) für das Gebiet Westerland II  
Nr. 87/70 (v. 25.02.88) am Salzsand/Lister Außentief  
Nr. 89/58 (v. 14.03.90) zum geologischen Aufbau der südlichen Hörnum-Halbinsel von Sylt  
Nr. 91/8 (v. 09.02.94) über den Aufbau des tieferen Untergrundes im Hinblick auf die Gewinnung von Spülsand im Umfeld der Insel Sylt  
(alle unveröffentlicht)
- TEMMLER, H.: "Gutachten des Geologischen Landesamtes Schleswig-Holstein über den Aufbau des tieferen Untergrundes im Hinblick auf die Gewinnung von Spülsand im Umfeld der Insel Sylt", Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein Kiel, Nr. 91/8 vom 9.2.1994 (unveröffentlicht)
- TEMMLER, H.: "Verfügbarkeit von Sandvorkommen" in: "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II", Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar Husum, November 1994
- THEILEN, F., KALLERHOFF, W. & POSEWANG, J.: "Kartierung des Kaolinsandes vor Sylt", Abschlußbericht, 13 S., 29 Anlg, 1994: (unveröffentlicht)
- TILLMANN, B.: "Untersuchungen zur Wirksamkeit von Sandvorspülungen als aktiver Küstenschutz am Beispiel der Insel Sylt", Braunschweig, 1990, Diplomarbeit (unveröffentl.)
- WENZEL, D.: "Strand- und Vorstrandentwicklung in Westerland nach der Sandvorspülung 1972", DIE KÜSTE, H.34, 1979
- ZANKE, U.: "Quasi-natürliche Sandfangelemente (QNS)", Juni 1991 (unveröffentlicht)
- ZAUSIG, F.: "Veränderungen der Küsten, Sände, Tiefs und Watten der Gewässer um Sylt (Nordsee) nach alten Seekarten, Seehandbüchern und Landkarten seit 1585", Geologie der Meere und Binnengewässer, Bd. 3, Gebrüder Bornträger, Berlin 1939

## 7 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

### Tabellen

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 1: Mittlerer Volumenrückgang in den morphologischen Einheiten (Hauptprofile) seit 1949 .....  | 17  |
| Tabelle 2: Mittlere Volumenbilanz von Strand und Vorstrand (1982-1995) (Anwachsmengen NN+6m/NN-8m minus Aufspülmengen [aufgemessen im Höhenbereich NN+6m/NN-4m] in Einzelprofilen)..... | 18  |
| Tabelle 3: Übersicht der Wertverluste bei einem Rückgang in 50 Jahren.....  | 20  |
| Tabelle 4: Höchste Sturmflut - Wasserstände a.P. List (1900-1996).....  | 28  |
| Tabelle 5: Mittlere Verweildauern höherer Wasserstände a.P. Meßpfahl Westerland und List.....   | 30  |
| Tabelle 6: Prozentuale Häufigkeiten der Seegangereignisse (10.1986-09.1993).....  | 33  |
| Tabelle 7: Mittlerer Energiefluß an der NN-4m - Linie vor Rantum und Kampen.....  | 34  |
| Tabelle 8: Häufigkeitsverteilung des Windes am Meßpfahl Westerland (1.1.1988-31.12.1996).....   | 35  |
| Tabelle 9: Mittlere Windwirkung am Meßpfahl Westerland und an der Station List.....   | 36  |
| Tabelle 10: Inhaltsverzeichnis der Kennblätter.....   | 39  |
| Tabelle 11: Übersicht der vor der Westküste Sylts errichteten Bühnenbauwerke.....   | 55  |
| Tabelle 12: Zusammenstellung der Aufspülmengen und Aufspülkosten (1972-1996).....   | 60  |
| Tabelle 13: Mengen und Kosten des Sandersatzes (ausschließlich Strandaufspülungen).....   | 89  |
| Tabelle 14: Mengen und Kosten des Sandersatzes (Strand- und Vorstrandaufspülungen).....   | 91  |
| Tabelle 15: Eingrabbtiefen und Zäunhöhen für Sandfangzäune.....   | 94  |
| Tabelle 16: Übersicht Unterhaltungskosten vorhandener Küstenschutzanlagen.....  | 97  |
| Tabelle 17: Kosten der geplanten Küstenschutzmaßnahmen Westküste Sylt.....  | 100 |

### Abbildungen

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Übersichtskarte nördliche Nordfriesische Wattenmeer mit der Insel Sylt.....   | 4  |
| Abbildung 2: Auswertung der Luftbilder 1972 bis 1995 (blau: Sandplaten, rot: Riffbrandung).....  | 8  |
| Abbildung 3: Mittlere Riffhöhe im Zeitraum 1983-1995.....  | 9  |
| Abbildung 4: Mittlerer Abstand des Riffes zur NN+3,75m - Linie im Zeitraum 1983-1995.....  | 10 |
| Abbildung 5: Mittlere Rinnentiefe im Zeitraum 1983-1995.....   | 10 |
| Abbildung 6: Mittlerer Abstand der Rinne zur NN+3,75m - Linie im Zeitraum 1983-1995.....   | 11 |
| Abbildung 7: Mittlerer Abstand der Riffkronen zur Rinnenachse im Zeitraum 1983-1995.....   | 11 |
| Abbildung 8: Mittlere Strandbreite NN+3,75m/NN im Zeitraum 1983-1995.....  | 12 |
| Abbildung 9: Mittlere Strandbreite NN±1m/NN-1m im Zeitraumes 1983-1995.....  | 12 |
| Abbildung 10: Mittlere Strandbreite NN±0m/NN-2m im Zeitraumes 1983-1995.....   | 13 |
| Abbildung 11: Volumenanteil des Riffes am Vorstrand (NN-2m/NN-6m) im Jahre 1992 und als Mittelwert der Jahre 1989-1992 im Abschnitt 40s-35n.....   | 14 |
| Abbildung 12: Küstenrückgangsraten der NN+3,75m - Linie für unterschiedliche Zeiträume im Abschnitt 35s-35n.....   | 15 |
| Abbildung 13: Volumenrückgangsraten im Höhenbereich NN+5m/NN±0m für unterschiedliche Zeiträume im Abschnitt 35s-35n.....   | 16 |
| Abbildung 14: Wirkung der Sturmfluten Januar/Februar 1990 auf die Volumenbilanz NN+6m/NN-6m.....   | 19 |
| Abbildung 15: Veränderung der Knobssände von 1939 zu 1991.....   | 22 |
| Abbildung 16: Zustände des Küstenvorfeldes am nördlichen Inselende der Jahre 1898 und 1994.....  | 25 |
| Abbildung 17: Differenzen der Eintrittszeiten von Thw und Tnw sowie des Thb bez. Westerland.....   | 26 |
| Abbildung 18: Mittlere Tidekurven a.P. Hörnum - Hafen, a.P. List und Meßpfahl Westerland.....  | 27 |
| Abbildung 19: Wasserstände über NN+2m a.P. List (1900-1996).....   | 28 |
| Abbildung 20: Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wasserstandes nach Jenkinson-D - Verteilung für den Pegel List (Zeitraum 1945-1994).....   | 29 |
| Abbildung 21: Verweildauern erhöhter Wasserstände a.P. List (1900-1996).....   | 30 |
| Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung des Tidenhubs und der Tidefallgeschwindigkeiten a.P. Hörnum - Hafen und a.P. List für den Zeitraum 1936-1995.....                                    | 31 |
| Abbildung 23: Ganglinien der mittleren Energieflußkomponenten 500m seewärts der Küstenlinie im Küstenbereich zwischen Rantum und Kampen im Zeitraum Oktober 1986 bis September 1993..... | 34 |
| Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung des Windes am Meßpfahl Westerland (1.1.88-31.12.96).....   | 35 |
| Abbildung 25: Ganglinie der Häufigkeit von Winden aus den Ost- und Westsektoren an der Station List im Zeitraum 1950-1995 (Daten: Deutscher Wetterdienst, Offenbach).....                | 37 |
| Abbildung 26: Bearbeitungsablauf zur Festlegung optimaler Küstenschutzmaßnahmen.....   | 40 |
| Abbildung 27: Einteilung der Westküste von Sylt und der Inselenden in Abschnitte.....  | 41 |
| Abbildung 28: Ganglinie der Fläche landwärts der Abbruchkante Hörnum-Odde von 1972 bis 1993.....   | 46 |
| Abbildung 29: Fläche der wirtschaftlich gewinnbaren Spülsandvorkommen.....   | 51 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Abbildung 30: Setzungen am Tetrapodenquerwerk Hörnum.....</i>   | <i>58</i> |
| <i>Abbildung 31: Übersicht der Sandaufspülungen 1972-1996.....</i>   | <i>61</i> |
| <i>Abbildung 32: Ganglinien der Sandvolumen für die Aufspülungen im Bereich Westerland in den Höhengschichten<br/>NN+5m/NN-1m und NN-1m/NN-7m (bezogen auf die Vermessung 1971) .....</i>          | <i>62</i> |
| <i>Abbildung 33: Ganglinien der Sandvolumen für die Aufspülungen im Bereich Hörnum in den Höhengschichten<br/>NN+5m/NN-1m und NN-1m/NN-6m (bezogen auf die Vermessung 1982) .....</i>              | <i>62</i> |
| <i>Abbildung 34: Ganglinien der Sandvolumen für die Aufspülungen von 1985 bis 1990 in den Höhengschichten<br/>NN+5m/NN-1m und NN-1m/NN-6m (bezogen auf die jeweilige Ausgangsvermessung) .....</i> | <i>63</i> |
| <i>Abbildung 35: Küstenentwicklung (außer Hörnum-Odde) zwischen 1984/86 und 1993/94 für die Höhenkoten NN+5m,<br/>NN+3,75m und NN±0m .....</i>   | <i>65</i> |
| <i>Abbildung 36: Varianten zur Sicherung des südlichen Inselendes .....</i>  | <i>72</i> |
| <i>Abbildung 37: Varianten zur Sicherung des südlichen Inselendes .....</i>  | <i>73</i> |
| <i>Abbildung 38: Varianten zur Sicherung des nördlichen Inselendes .....</i>   | <i>77</i> |
| <i>Abbildung 39: Untersuchungsvarianten zur Verringerung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten .....</i>   | <i>81</i> |

## Fachplan Küstenschutz Sylt (Fortschreibung)

| I N H A L T   | Seite      |
|---|------------|
| <b>1 EINLEITUNG .....</b>   | <b>3</b>   |
| 1.1 VERANLASSUNG UND ZWECK .....  | 3          |
| 1.2 FACHPLAN KÜSTENSCHUTZ SYLT (STAND: 13.01.1985) .....  | 3          |
| <b>2 PLANUNGSGRUNDLAGEN .....</b>   | <b>7</b>   |
| 2.1 MORPHOLOGIE .....   | 7          |
| 2.1.1 <i>Westküste</i> .....  | 7          |
| 2.1.2 <i>Südliches Inselende und Küstenvorfeld</i> .....  | 21         |
| 2.1.3 <i>Nördliches Inselende und Küstenvorfeld</i> .....                                       | 24         |
| 2.2 HYDROLOGIE UND METEOROLOGIE .....   | 26         |
| 2.2.1 <i>Wasserstand</i> .....  | 26         |
| 2.2.2 <i>Strömung</i> .....   | 31         |
| 2.2.3 <i>Seegang</i> .....  | 32         |
| 2.2.4 <i>Wind</i> .....   | 34         |
| 2.3 UNTERSUCHUNG BAULICHER MAßNAHMEN (1986-1993) .....  | 38         |
| 2.3.1 <i>Technische Kennblätter</i> .....   | 38         |
| 2.3.2 <i>Bewertungsmatrizen</i> .....   | 42         |
| 2.3.3 <i>Entwicklung von Instrumentarien</i> .....  | 43         |
| 2.3.4 <i>Wirkungsweise ausgewählter Maßnahmen</i> .....   | 45         |
| 2.4 MÖGLICHKEITEN UND AUSWIRKUNGEN DER SANDENTNAHMEN .....                                      | 50         |
| <b>3 BISHERIGE KÜSTENSCHUTZMAßNAHMEN .....</b>  | <b>54</b>  |
| 3.1 KÜSTENSCHUTZMAßNAHMEN BIS 1972 .....  | 54         |
| 3.1.1 <i>Biotechnische Maßnahmen</i> .....  | 54         |
| 3.1.2 <i>Buhnenbauten</i> .....   | 54         |
| 3.1.3 <i>Deckwerke Westerland und List</i> .....  | 55         |
| 3.1.4 <i>Ufermauer und Fußsicherungen Westerland</i> .....                                      | 56         |
| 3.1.5 <i>Tetrapodenquerwerk und -längswerk Hörnum</i> .....                                     | 56         |
| 3.1.6 <i>Tetrapodenlängswerke Westerland</i> .....  | 57         |
| 3.2 KÜSTENSCHUTZMAßNAHMEN VON 1972 BIS 1996 .....   | 59         |
| 3.2.1 <i>Sandaufspülungen</i> .....   | 59         |
| 3.2.2 <i>Biotechnische Maßnahmen</i> .....  | 66         |
| 3.2.3 <i>Riffergänzung Kampen - Kliffende</i> .....   | 66         |
| 3.2.4 <i>Beseitigung der Spundwandbuhnen</i> .....  | 67         |
| 3.2.5 <i>Sicherung des Deckwerkes am Lister Ellenbogen</i> .....                                | 67         |
| 3.3 BEARBEITUNG MÖGLICHER KÜSTENSCHUTZKONZEPTE .....  | 68         |
| 3.3.1 <i>Machbarkeitsstudie Sandaufspülungen</i> .....  | 69         |
| 3.3.2 <i>Machbarkeitsstudie Sicherung des südlichen Inselendes</i> .....                        | 70         |
| 3.3.3 <i>Machbarkeitsstudie Sicherung des nördlichen Inselendes</i> .....                       | 75         |
| 3.3.4 <i>Machbarkeitsstudie Verringerung der großen Abbruchraten bei Sturmfluten</i> .....      | 79         |
| 3.3.5 <i>Bewertung der Konzepte</i> .....   | 82         |
| <b>4 GESAMTKONZEPT KÜSTENSCHUTZMAßNAHMEN 1997 BIS 2007 .....</b>                                | <b>85</b>  |
| 4.1 STRANDAUFSPÜLUNGEN, AUFSPÜLUNGEN IM VORSTRAND UND SICHERUNG DES NÖRDLICHEN INSELENDES ..... | 85         |
| 4.1.1 <i>Strandaufspülungen</i> .....   | 85         |
| 4.1.2 <i>Aufspülungen im Vorstrand</i> .....  | 89         |
| 4.1.3 <i>Endschwelle List</i> .....   | 91         |
| 4.1.4 <i>Holzpfahlbuhnen List</i> .....   | 93         |
| 4.2 BIOTECHNISCHE MAßNAHMEN .....   | 94         |
| 4.3 UNTERHALTUNG BESTEHENDER BAUWERKE .....   | 97         |
| 4.4 MEBKONZEPT .....  | 98         |
| 4.5 FORSCHUNGS- UND UNTERSUCHUNGSBEDARF .....   | 98         |
| 4.6 KOSTEN (INCL. UNTERHALTUNGSKOSTEN) .....  | 99         |
| 4.7 TRÄGER UND FINANZIERUNG .....   | 101        |
| <b>5 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>  | <b>102</b> |
| <b>6 QUELLENANGABEN .....</b>   | <b>104</b> |
| <b>7 TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>  | <b>108</b> |