

# Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau  
Prof. Dr.-Ing. habil. Sören Kohlhase



---

Bund-Länder-Vorhaben Klimaänderung und Küste

## Fallstudie Sylt

Teilprojekt

„Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung  
für die Insel Sylt“

## Abschlußbericht

BMBF-Geschäftszeichen 01 LK 9519/4

WITTE, J.-O., KOHLHASE, S., RADOMSKI, J., FRÖHLE, P.

Institut für Wasserbau der Universität Rostock  
Philipp-Müller-Str., 23966 Wismar, Germany

email: [iwr@bau.uni-rostock.de](mailto:iwr@bau.uni-rostock.de)

Tel.: ++49 (0)3841 - 753 448

Fax: ++49 (0)3841 - 753 306

**Abstract:**

Die Insel Sylt ist ein offenes System mit negativer Sedimentbilanz. Daher wird seit rd. 130 Jahren versucht, die Westküste der Insel durch Bauwerke zu stabilisieren. Da alle derartigen Versuche letztlich fehlgeschlagen sind, wurden in den 70er Jahren erste Versuche mit Strandersatzmaßnahmen durchgeführt, eine Technik, die auch heute noch angewendet wird. Dadurch konnte ein Rückgang der Küste weitestgehend verhindert werden.

Berechnungen und Vermessungen haben ergeben, daß die Insel jährlich etwa 1,0 Mio. m<sup>3</sup> Sediment verliert. Wesentlichste Aufgabe des Teilprojektes „Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt“ war es, den Einfluß veränderter Klimabedingungen und damit einhergehender Veränderungen der seeseitigen Beanspruchungen der Küste abzuschätzen und auf der Basis der Ergebnisse Möglichkeiten für den künftigen Schutz der Westküste der Insel Sylt aufzuzeigen.

Die wichtigsten Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden: Die Auswirkungen möglicher klimatischer Veränderungen auf die Sedimentverluste sind nicht signifikant wie die auf der Basis von Klimaimpaktszenarien durchgeführten Berechnungen ergeben haben. Akuter Handlungsbedarf als Folge von Klimaänderungen ergibt sich daher nicht, es sollten zur Minimierung der Verluste und Verringerung der Kosten für den Strandersatz jedoch stützende Maßnahmen vor allem am Riff und im Offshore-Bereich sowie an den Inselenden erwogen werden. Aus Sicht der Projektbearbeiter sind für stützende Bauwerke Bauweisen aus Geotextilien gegenüber starren Bauwerken zu bevorzugen. Strandersatz, als aktive Küstenschutzmaßnahme, bleibt unabhängig hiervon für den flächendeckenden Küstenschutz der Westküste der Insel Sylt unverzichtbar.

## Inhalt

1.	Einführung und Ausgangssituation .....	6
2.	Zielsetzung .....	7
3.	Methodik der Untersuchungen.....	8
4.	Szenarien .....	12
4.1.	Generelle Hinweise zur Klimafolgenforschung.....	12
4.2.	Auswertung regionaler Ergebnisse .....	14
5.	Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen .....	19
5.1.	Wind-Wellen-Korrelation .....	19
5.2.	Energieflußberechnungen.....	22
5.3.	Berechnung der Sedimenttransportkapazitäten .....	27
5.4.	Variationsrechnungen zu definierten Szenarien.....	31
5.5.	Entwicklung eines Programmpakets für die Datenverarbeitung und Simulation.....	37
6.	Bewertung ausgewählter Bauwerke .....	44
7.	Zusammenfassung.....	59
8.	Schrifttum .....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Ursachen, Wirkungen und Wechselwirkungen der äußeren Beanspruchungen der Küste und für Sylt denkbare Schutzmaßnahmen (schematisch, ohne lokale Zuordnung).....	9
Abb. 2:	Schematische Darstellung der Wind-Wellen-Korrelation (Witte et al. 1999b) .....	20
Abb. 3:	Zeitreihen gemessener und berechneter Seegangparameter 07/1990 bis 06/1991 .....	23
Abb. 4:	Schematische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Wind- und Seegangsstatistiken.....	24
Abb. 5:	Vergleich der Wellenhöhen aus den Messungen und den Berechnungen mit verschiedenen Energieflußansätzen (Kohlhase et al. 1994) .....	26
Abb. 6:	Küstenparalleler und küstennormaler Energiefluß im Profil N0, Insel Sylt für den Zeitraum 1990 bis 1991, berechnet nach einem erweiterten Tucker-Ansatz (nach Witte 1999a)...	27
Abb. 7:	Küstenparallele Energieflußkomponenten im Profil N0 und zugehörige Sedimenttransportkapazitäten im Zeitraum 07/1990 - 06/1991.....	29
Abb. 8:	Küstenparallele (nach Norden und Süden) Sedimenttransportkapazitäten entlang eines Profils für den Zeitraum 07/1990 bis 06/1991 .....	30
Abb. 9:	Bilanzierung der Sedimenttransportkapazitäten .....	30
Abb. 10:	Sedimenttransportkapazitäten nach Norden und Süden für alle Profile entlang der Westküste .....	31
Abb. 11:	Variabilität der Sedimenttransportkapazitäten .....	33
Abb. 12:	Veränderlichkeit der Sedimenttransportkapazitäten entlang eines Profils aufgrund steigender Wasserstände .....	34
Abb. 13:	Variation eines Referenzprofils, Beispiel Profil N0 .....	35
Abb. 14:	Einfluß steigender Wasserstände auf die Sedimenttransportkapazitäten (Profil 1) im Strand- und Riffbereich .....	36
Abb. 15:	Einfluß eines gegenüber dem Referenzprofil (Profil 1) erhöhten Riffs (Profil 3) auf die Sedimenttransportkapazitäten als Funktion der Wasserstandserhöhung .....	37
Abb. 16:	Einbindung des Programmpaketes WinSylt in die Windowsoberfläche.....	38
Abb. 17:	Winddaten am Meßpfahl Westerland 01.01.1990 – 31.12.1990 mit Auswahlfenster .....	39
Abb. 18:	Klasseneinteilung des Windes am Meßpfahl Westerland .....	40
Abb. 19:	Profilbetrachter zur Ansicht und Veränderung der Profile .....	41
Abb. 20:	Eingabefenster des Energieflusses für die Profile .....	42
Abb. 21:	Eingabefenster des Energieflusses für die Seegangsdaten.....	43
Abb. 22:	Überblick über technische Maßnahmen zum Schutz sandiger Küsten (Kohlhase 1999).	45
Abb. 23:	Sedimenthaushalt einer Brandungsküste – Quertransport (Onshore / Offshore) – (Kohlhase 1991a, nach CERC 1984) .....	49

Abb. 24: Sedimenthaushalt einer Brandungsküste – Längstransport – (Kohlhase 1991b) .....	50
Abb. 25: Sedimenthaushalt einer Brandungsküste – Einflüsse von Bauwerken – (Kohlhase 1991b).....	52
Abb. 26: Geotextiles Deckwerk vor dem Haus Kliffende / Kampen (Zustand: Feb. 2000) .....	56

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufstellung plausibler Szenarien bis zum Jahr 2050 (auf der Basis der IPCC-Szenarien von 1996) .....	14
Tab. 2: Meeresspiegelanstieg bis 2100 nach IPCC (Sterr 1998) .....	18
Tab. 3: Varianten A bis E für die Berechnung des Einflusses des Windes und des Wasserstandes auf den Sedimenttransport.....	19
Tab. 4: Varianten der Veränderlichkeit des Windes.....	32
Tab. 5: Untersuchte Varianten des Profils .....	35

## 1. Einführung und Ausgangssituation

Die Insel Sylt ist nach Westen der Nordsee zugewandt. Über eine Länge von ca. 42 km greift der Seegang die sandige Brandungsküste an, und die Insel verliert durch Erosion von Strand und Dünen seit Jahren an Substanz. Für den Schutz und Erhalt der Insel wurden von den zuständigen Fachbehörden und mit wissenschaftlicher Begleitung in mehreren Forschungsvorhaben verschiedene Varianten untersucht (ALW 1985, ALW 1997). Danach haben sich Strandersatzmaßnahmen als die derzeit wirksamste und kostengünstigste Maßnahme für den Küstenschutz herausgestellt, da nur durch sie Materialdefizite großräumig ausgeglichen werden können. Nach früheren Untersuchungen erscheint es sinnvoll, Strandersatzmaßnahmen mit konventionellen Küstenschutzbauwerken zu kombinieren, um die Verweilzeiten des aufgespülten Sandes zu verlängern und damit möglicherweise Kosten für den Erhalt und die Sicherung von Sylt einzusparen. Abschließende Vorstellungen hierzu gibt es zur Zeit jedoch nicht.

Die Prognosen zur zukünftigen Entwicklung zeigen, daß als Folge des globalen Klimawandels und der resultierenden Reaktion der Umwelt u. a. Veränderungen der Winde und des Meeresspiegels zu erwarten sind. Dieser Prozeß vollzieht sich nur sehr langsam, und die Auswirkungen dieses Wandels sind im einzelnen nicht signifikant meßbar.

Ein Einfluß möglicher klimatischer Veränderungen auf das bestehende meteorologische, hydrodynamische und morphologische System vor Sylt ist nicht auszuschließen, und es gilt daher im Sinne eines vorbeugenden Schutzes, diese potentiellen Gefahren zu erkennen und Strategien und Optionen für den zukünftigen Küstenschutz zu erarbeiten.

Das Projekt „Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt“, über deren Ergebnisse im folgenden berichtet wird, ist eingebunden in die interdisziplinär angelegte Fallstudie Sylt, an der außer der Universität Rostock die folgenden Universitäten und Institutionen beteiligt waren:

- TU Berlin: Institut für Landschaftsökonomie

- Christian-Albrechts-Universität Kiel: Katastrophenforschungsstelle, Institut für Soziologie, Geographisches Institut <sup>1</sup>
- Geomar, Forschungsstelle für marine Geowissenschaften, Kiel
- Otto-v.-Guericke-Universität Magdeburg: Institut für Psychologie
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
- Universität Hamburg: Biologische Anstalt Helgoland
- Universität Oldenburg sowie
- ein projektbegleitender Beirat

Der hiermit vorgelegte Abschlußbericht enthält die Teilergebnisse der ingenieurwissenschaftlichen Komponente der Fallstudie. Die Ergebnisse wurden mit geringen Änderungen dem gemeinsamen Bericht der Projektgruppe entnommen.

## **2. Zielsetzung**

Ziele des Projekts "Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt", das im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens "Fallstudie Sylt" am Institut für Wasserbau der Universität Rostock (IWR) bearbeitet wurde, sind:

- die Untersuchung der großräumigen Seegangsbedingungen, als wichtigste Einflußgröße auf die küstenmorphologischen Prozesse,
- die Charakterisierung der Auswirkungen veränderter Wind- und Wasserstandsbedingungen auf den Seegang,
- die daraus resultierenden Einflüsse auf den Sedimenttransport und
- die Bewertung ausgewählter Bauwerke aus wasserbaulicher Sicht unter dem Aspekt veränderter klimatischer Randbedingungen.

---

<sup>1</sup> federführend

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden damit eine wesentliche Grundlage für die integrative Bewertung künftiger Küstenschutzmaßnahmen für die Insel Sylt innerhalb des Verbundvorhabens "Fallstudie Sylt".

### 3. Methodik der Untersuchungen

Die morphologische Entwicklung der Insel Sylt wird maßgeblich von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- meteorologische Verhältnisse:  
Windgeschwindigkeit, -dauer und -richtung,
- hydrodynamische Verhältnisse:  
insbesondere Seegang und Wasserstand,
- Eigenschaften der Sedimente und Verfügbarkeit.

Diese Faktoren müssen unter dem Einfluß von Küstenschutzbauwerken bewertet werden. Die Ursache-, Wirkung- und Wechselwirkungskette sowie mögliche Schutzmaßnahmen sind in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1 macht deutlich, daß der Wind die treibende Kraft in diesem Geschehen ist und dieser direkt den Seegang, den Wasserstand und den Sedimenttransport beeinflusst.

In Verbindung mit Strandersatzmaßnahmen, die - wie vorher ausführte wurde - auch in Zukunft die wichtigste Komponente zum Ausgleich der Erosionsverluste und damit für den technischen Küstenschutz auf Sylt darstellen werden, kommen als stützende Maßnahmen vor allem in Betracht:

- Bauwerke an den Inselenden
- Bauwerke, die die Belastung der Insel vermindern.

In die langfristigen Schutzmaßnahmen sind ferner Bauwerke für den Objektschutz, insbesondere Längswerke zur Sicherung erosionsgefährdeter Küstenabschnitte oder Gebäude, zu diskutieren.



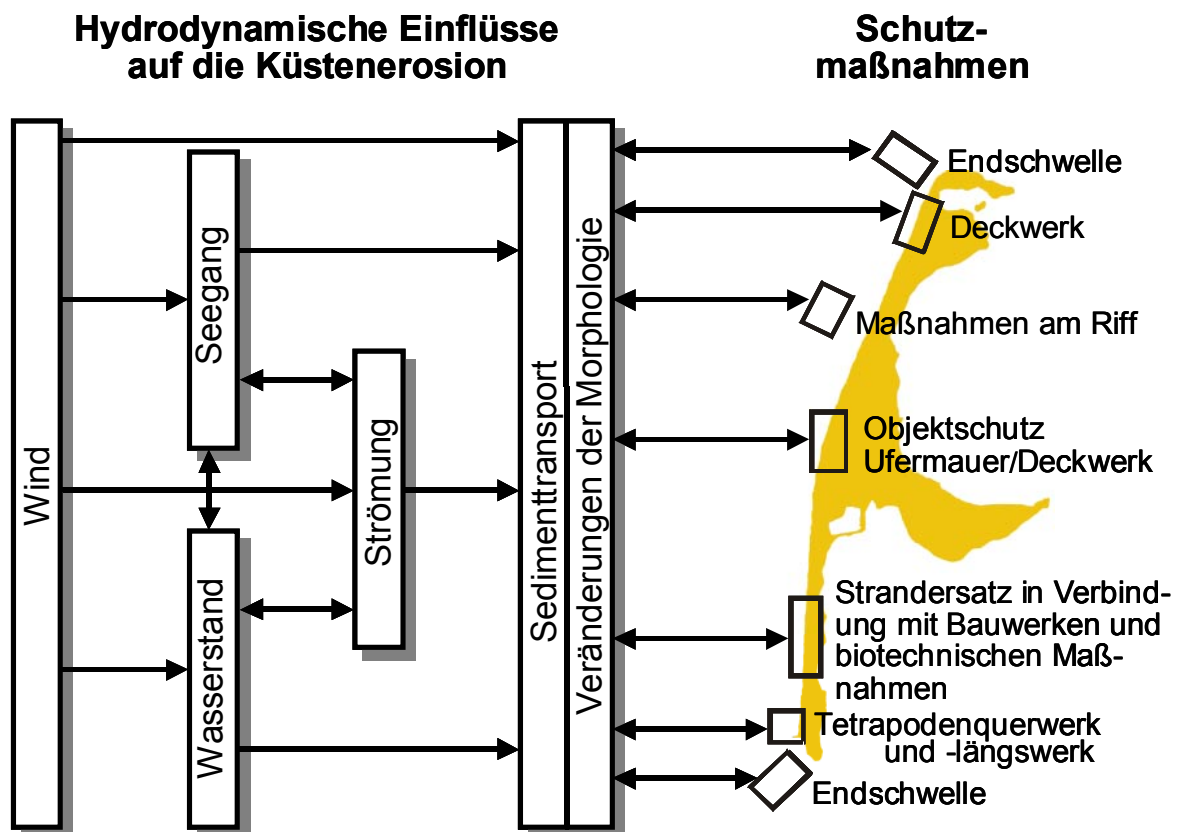


Abb. 1: Ursachen, Wirkungen und Wechselwirkungen der äußeren Beanspruchungen der Küste und für Sylt denkbare Schutzmaßnahmen (schematisch, ohne lokale Zuordnung)

Endschwellen wurden bereits im BMFT-Verbundforschungsvorhaben "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt" (Zimmermann et al. 1994) eingehend untersucht. Sie wurden auch in die "Fortschreibung Fachplan Küstenschutz Sylt" (ALW 1997) übernommen. Von den Maßnahmen am Riff wurde bisher eine Riffverstärkung bei Kampen/Kliffende (1990) realisiert (ALW 1997). Vorhandene Bauwerke für den Objektschutz, etwa Deckwerke oder das Tetrapodenquerwerk bei Hörnum, müssen in eine künftige Bewertung einbezogen werden.

Die Seegangsbedingungen als treibende Kraft des Sedimenttransports wurde im Projekt sowohl auf der Basis von Messungen als auch unter Verwendung von Seegangsvorhersageansätzen untersucht. Sie bauen auf den Ergebnissen des vorgenannten Programms "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt" auf. Insbesondere stehen seit Oktober 1986 Messungen des Seegangs (im wesentlichen Bojendaten) sowie Wind- und Wasserstandsmessungen an einem Meßpfahl des Amt für Ländliche Räume Husum (ALR) zur Verfügung.

Eine langzeitstatistische Bewertung der Daten unter der Vorgabe veränderter klimatischer Bedingungen setzt voraus, daß die Beziehungen zwischen Seegangs-, Wasserstands- und Winddaten bekannt sind, um den Einfluß der äußeren Beanspruchungen auf den Sedimenttransport berechnen und Einflüsse von Bauwerken quantifizieren zu können.

Da nicht von vornherein von homogenen Datensätzen ausgegangen werden kann, eine langzeitstatistische Auswertung jedoch eine kontinuierliche Aufzeichnung von Seegangsdaten zwingend notwendig macht (Fröhle 2000), müssen zunächst Datenlücken der Seegangszeitreihe durch Korrelationen zwischen Wind und Seegangsereignissen geschlossen werden. Diese Wind-Wellen-Korrelation bildet auch die Grundlage für eine Extrapolation der Seegangsdaten auf Zustände mit entsprechend den Szenarien geänderten Randbedingungen, d. h. veränderten Wind- und Wasserstandssituationen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen des Teilprojekts „Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt“ steht die Berechnung des Energieeintrags des Seegangs, da dieser ursächlich für die Sedimentbewegungen an einer Brandungsküste ist.

Die Berechnung von Flachwassereinflüssen, die die Seegangsparameter beim Einlaufen der Wellen verändern, wird auf der Basis von linearen Verfahren vorgenommen. Der Energieeintrag wird als Energiefluß (Produkt aus Wellenenergie und Gruppengeschwindigkeit) dargestellt, wobei auf verschiedene Ansätze aus dem Schrifttum zurückgegriffen werden kann.

Der Sedimenttransport, der letzten Endes die erforderlichen technischen Maßnahmen bestimmt, wird als Sedimenttransportkapazität ausgedrückt. Dieser Begriff beinhaltet das Vermögen der Wellen, Sediment aufzunehmen und küstenparallel zu verfrachten. Die Transportkapazität wird auf der Grundlage von theoretischen Ansätzen berechnet. Er dient dazu, Küstenveränderungen zu ermitteln und die Einflüsse von Bauwerken abzuschätzen.

Als Werkzeug zur Berechnung

- der Wind- und Seegangsstatistiken,

**„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:**

Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt

---

- des Energieflusses und
- der Sedimenttransportkapazitäten

wurde das Programmpaket WinSylt (siehe Kapitel 5.5) entwickelt, das den Projektpartnern und den Fachbehörden zur Verfügung steht.

## 4. Szenarien<sup>2</sup>

### 4.1. Generelle Hinweise zur Klimafolgenforschung

In den letzten zwei Jahrzehnten wird sowohl in der Wissenschaft als auch in der Öffentlichkeit in unterschiedlicher Intensität darüber diskutiert, welche Folgen von einem möglichen Klimawandel ausgehen können. Damit ist gleichzeitig die Frage verknüpft, ob und in welcher Form mögliche Klimafolgen beschrieben werden können bzw. wie die Folgen einer Veränderung des Klimas präventiv vermieden werden können oder sollen.

Die Beschreibung des Klimas beruht auf einer Zusammenfassung und Mittelung meteorologischer und hydrologischer Daten über einen längeren Zeitraum (mind. 30 Jahre) und ist somit vom Prinzip her retrospektiv. Für die Analyse und Bewertung des Klimawandels ist jedoch die Beschreibung von Trends von Bedeutung, die aus der Vergangenheit und der Gegenwart in die Zukunft extrapoliert werden. Für diese Extrapolation des Klimas sind komplexe numerische Klimamodelle erforderlich.

Die numerischen Modelle werden auf der Basis der naturgesetzlichen Zusammenhänge und der Integration regelmäßig erhobener globaler Klimadaten z. B. beim *Deutschen Klimarechenzentrum* (DKRZ) oder *GKSS-Forschungszentrum Geesthacht* (GKSS) entwickelt. Das Ziel ist es, das zukünftige Klimageschehen möglichst wirklichkeitsgetreu abzubilden.

Da die Modell- und Rechnertechnik innerhalb der letzten 10 Jahre deutlich verbessert wurde, konnten an den Instituten die Modelle schneller weiterentwickelt werden. Eine Verbesserung liegt in der höheren regionalen Auflösung der Klimamodelle. Basierten die früheren Modelle auf relativ weitmaschigen Gitternetzen, welche kaum regionale Aussagen (unterhalb 1000 km Auflösung) zuließen, so sind die aktuellen Modelle der Klimaforschung dadurch gekennzeichnet, daß sie auch „kleinere“ räumliche Einheiten abbilden können. Für

---

<sup>2</sup> auszugsweise aus dem Kap. 4 („Klimaszenarien“) des gemeinsamen Abschlußberichts der „Fallstudie Sylt“ (Sterr, H. , Fränzle, O. , Daschkeit, A. , Ahrendt, K. und Witte, J.-O.)

die Einbeziehung künftiger Trends in eine Modellierung werden eine Reihe von Annahmen bezüglich anthropogener Steuerungsfaktoren vorausgesetzt (Lohmann 1999; v. Storch et al. 1999).

Auf dieser Basis setzt die Kopplung von Klima- und Klimafolgenforschung an. Ausgehend von Annahmen bezüglich der globalen Bevölkerungsentwicklung, des künftigen Energieverbrauchs sowie der zukünftigen wirtschaftlichen Entwicklung werden vom *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) verschiedene Emissions-Szenarien abgeleitet, die von einer unterschiedlichen Zunahme der CO<sub>2</sub>-Anteile bzw. anderer Treibhausgase in der Atmosphäre ausgehen. Für diese Modelle wird derzeit die Entwicklung der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Jahre 2100 zugrundegelegt, und diese werden als zusätzliche Quellen in den Klimamodellen berücksichtigt. Es wird angenommen, daß an die Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Atmosphäre mittel- bis langfristig auch eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur gekoppelt ist. Für diese Berechnungen stehen zwei Typen von numerischen Modellen zur Verfügung.

Zum einen kommen globale Modelle, sogenannte Top-Down-Modelle auf kontinentaler oder subkontinentaler Ebene und zum anderen regionale Modelle, sogenannte Bottom-Up-Modelle, zum Einsatz. Die Ergebnisse der beiden Modelltechniken weisen jedoch regionale Unterschiede für die untersuchten Parameter auf. So wird auf der Basis der globalen Modelle ein mittlerer Meeresspiegelanstieg von 0,49 m im Jahr 2100 berechnet, der auf regionaler Ebene nicht immer bestätigt werden kann.

Die Unterschiede der Ergebnisse liegen z. B. in lokalen tektonischen Hebungen bzw. Senkungen oder in den Unterschieden bei der Entwicklung des Meeresspiegels begründet.

Den Modellen kann entnommen werden, daß die vermuteten Klimafolgen weltweit insbesondere die dichtbesiedelten Küstenregionen betreffen, da sich beispielsweise der Meeresspiegelanstieg und die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Sturmereignissen in diesen Bereichen besonders deutlich zeigen werden.

Den Modellen ist gemein, daß die Berechnungsergebnisse durch detaillierte Untersuchungen der Umfeldbedingungen (vor allem Messungen in der Natur) verifiziert werden müssen.

#### 4.2. Auswertung regionaler Ergebnisse

Für die Projekte der Fallstudie Sylt stellt sich die Frage, inwieweit regionalbezogene Aussagen aus den global konzipierten Klimamodellen abgeleitet werden können. Der betrachtete Raum „Norddeutschland“ (terrestrisch) und die „Deutsche Bucht“ (marin) sind jedoch für die vorhandenen globalen Modelle noch zu „klein“, um hinreichend exakte Ergebnisse mit den Modellen zu berechnen.

Die für die Arbeiten der Fallstudie Sylt notwendigen Klimaszenarien wurden extern und zeitlich parallel erarbeitet und standen nicht bereits zu Beginn der Forschungsarbeiten zur Verfügung. Aus diesem Grund mußten in der Planungsphase sowie zu Beginn der Fallstudie plausible Szenarien für einen möglichen Klimawandel festgelegt werden.

Parameter	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
<b>Meeresspiegelanstieg</b>	+ 0,15 m <sup>*1</sup>	+ 0,15 m <sup>*1</sup> + 0,20 m <sup>*2</sup> = + 0,35 m	+ 0,15 m <sup>*1</sup> + 0,40 m <sup>*2</sup> = + 0,55 m
<b>Gezeiten (Tidenhub)</b>	-	+ 0,10 m <sup>*1</sup> + 0,10 m <sup>*2</sup> = + 0,20 m	+ 0,10 m <sup>*1</sup> + 0,20 m <sup>*2</sup> = + 0,30 m
<b>Wind / Stürme</b>	Extrapolation heutige Verteilung	5% Intensitätszunahme (insgesamt und für Kategorie Beaufort 12), Richtungsmaximum 270 <sup>0</sup>	10% Intensitätszunahme (insgesamt und für Kategorie Beaufort 12), Richtungsmaximum 300 <sup>0</sup>
<b>Sturmfluten</b>	Extrapolation der heutigen Höhen- / Häufigkeitsverteilung	10% längere Standzeit, 10% Häufigkeitszunahme	15% längere Standzeit, 15% Häufigkeitszunahme

\*<sup>1</sup> säkularer Meeresspiegelanstieg, \*<sup>2</sup> antropogener Meeresspiegelanstieg

Tab. 1: Aufstellung plausibler Szenarien bis zum Jahr 2050 (auf der Basis der IPCC-Szenarien von 1996)

Die plausiblen Szenarien der künftigen Klimaentwicklung (Tab. 1) wurden mit der Fallstudie Weserästuar (KLIMU, 2000) abgestimmt, um die Möglichkeit des späteren Ergebnisvergleichs zu erhalten. In Tab. 1 sind nur die für das Teilprojekt relevanten Parameter aufgeführt. Der Bezugszeitraum für diese Szenarien ist das Jahr 2050. Für einzelne Untersuchungen wurden die Parameter bis zum Jahr 2100 verlängert.

Diese plausiblen Szenarien basieren im wesentlichen auf den Szenarien des IPCC von 1996 (Watson et al. 1996) und werden im folgenden für die Verhältnisse der Insel Sylt konkretisiert. Die Ergebnisse des IPCC für 1996 weichen deutlich (ca. 25% niedriger im Hinblick auf die durchschnittliche Temperaturentwicklung und den Meeresspiegelanstieg) von denen aus dem IPCC-Bericht (1990) ab. Dies liegt darin begründet, daß die Modelltechnik verbessert wurde und in diese Modelle auch neuere ozeanische bzw. atmosphärische Parameter (Aerosole) integriert werden können.

Für das Untersuchungsgebiet Sylt bedeutet das, daß für den Bereich der Deutschen Bucht keine rapiden Änderungen der klimatischen Bedingungen zu erwarten sind (v. Storch et al. 1998 und Roth, Busch 1997). Gleichwohl zeigen einzelne Extremereignisse, deren künftige Anzahl und Intensität derzeit nicht prognostiziert werden kann, daß mitunter sehr schnell ein Handlungs- und Entscheidungsbedarf entstehen kann.

Betrachtet man dazu den säkularen Meeresspiegelanstieg am Pegel Cuxhaven als Referenz für die Deutsche Bucht, zeigt sich ein Anstieg von 0,30 m/Jahrhundert. Diese Erhöhung resultiert nicht nur aus möglichen Klimaschwankungen/möglichem Klimawandel, sondern vor allem aus lokalen Faktoren, z. B. Baumaßnahmen oder tektonischen Effekten. Auf der Basis der Berechnungsergebnisse der Klimamodelle kann für die Deutsche Bucht ein klimabedingter Anteil von 0,10 – 0,20 m/Jahrhundert abgeleitet werden. In verschiedenen Untersuchungen zur Häufigkeit und Intensität von Sturmereignissen, die wichtige Parameter für die küstenbezogene Klimafolgenforschung sind, wurde 1997 festgestellt: „Während in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten in der Tat die Häufigkeit und Stärke schwerer Stürme im Gebiet der Nordsee und Deutschen Bucht einen positiven Trend aufweist, so daß

bei einer isolierten Betrachtung dieses Zeitraumes der Eindruck eines klimaänderungsbedingten Effektes entstehen könnte, relativiert sich dieses Ergebnis bei der Betrachtung längerer Zeitskalen. Im Laufe des letzten Jahrhunderts sind Trends in der Größenordnung des neuerdings Beobachtetem durchaus bereits vorgekommen. Ein anthropogener Einfluß durch erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre läßt sich hier also zumindest nicht festmachen“ (Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung [Hrsg.] 1997). Des weiteren haben Analysen der Meßdaten für den Nordatlantik gezeigt, daß sich die Veränderungen des Sturmklimas wahrscheinlich noch im Rahmen der natürlichen Variabilität bewegen (v. Storch et al. 1998).

Auf der Basis der Klimamodelle wurde für das Szenario einer möglichen Verdopplung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes keine signifikante Zunahme der Sturmtätigkeit im Winter berechnet, zudem liegen die berechneten Ergebnisse noch im Bereich der natürlichen Variabilität. Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich auch für die Wind- und Seegangsverhältnisse (v. Storch et al. 1998). Im Gegensatz dazu zeigt die Auswertung von Siefert (1997), daß sowohl von einer Zunahme der Dauer sowie einer Zunahme der hohen Windgeschwindigkeiten für den Bereich der Deutschen Bucht auszugehen ist.

Unter der Annahme, daß sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt in Zukunft verdreifachen wird, lassen sich derzeit für das Untersuchungsgebiet keine Aussagen über die Zu- bzw. Abnahme der Gefährdung der Küste durch Stürme aus den Berechnungen ableiten (Nielinger 1997).

Weitere Untersuchungen zum Einfluß einer Verdoppelung bzw. Verdreifachung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zeigen eine Abnahme der Häufung für Sturmweatherlagen mit der sog. „Großwetterlage NWZ (Nordwest-Zyklonal)“, die in dieser Region hauptsächlich für hohe Windgeschwindigkeiten verantwortlich ist (Busch 1997).

An den Meeresspiegelanstieg und die Veränderlichkeit der Windverhältnisse (Dauer, Stärke und Richtung) ist die Entwicklung der Sturmflutwasserstände der Deutschen Bucht direkt gekoppelt. Die statistische Auswertung von Meßdaten der Pegel Amrum, Helgoland, Cuxhaven und Norderney (Gönnert u. Ferk 1996) haben ergeben, daß für den Zeitraum 1850 bis 1995 nur ein geringer Anstieg in der



Auftretenshäufigkeit von höheren Sturmflutscheitelwasserständen erkennbar ist, wohingegen für den Zeitraum 1950 bis 1995 ein signifikant gehäuftes Auftreten derselben festzustellen ist. Die Differenzierung dieser Ergebnisse (1950 bis 1995) in drei Sturmfluttypen hat ergeben, daß eine deutliche Zunahme der leichten Sturmfluten und keine Zunahme der mittleren und schweren Sturmfluten zu verzeichnen ist.

Die detaillierte Betrachtung der Sturmflutwasserstände, in die Anteile Tide und Windstau, zeigen für die Entwicklung der Scheitelwasserstände der Sturmzeiten in den letzten 200 Jahren keinen Anstieg. Es zeigt sich aber eine Häufung von Sturmzeiten, die mehrere Sturmflutscheitel umfassen. Demzufolge müßten Winde mit hohen Windgeschwindigkeiten und langer Dauer zugenommen haben. Die Darstellung der Ergebnisse zum Meeresspiegel, zum Wind und zu den Sturmflutwasserständen zeigt, daß kein eindeutiger Trend, z. B. Anstieg erkennbar ist.

Die durchgeführten Untersuchungen für den Bereich der Deutschen Bucht zeigen, daß die gewonnenen Erkenntnisse noch viele Unwägbarkeiten in sich bergen. Zum einen müssen die globalen Klimamodelle kontinuierlich um zusätzliche verstärkende oder schwächende Parameter erweitert und mit einem höheren Detaillierungsgrad (Regionalisierung) versehen werden, um noch verlässlichere Berechnungsergebnisse zu erhalten. Zum anderen sind die Auswirkungen eines Klimawandels, insbesondere des Meeresspiegels, nicht direkt meßbar, da das System „Ozean“ träge ist und somit zeitverzögert auf einen Klimawandel reagiert. So werden erst in einigen Jahren die Messungen in der Natur die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels besser abbilden und einen Trend beschreiben können, da dann die Ergebnisse nicht mehr im Bereich der natürlichen Variabilität liegen könnten.

Aus den vorliegenden Ergebnissen darf jedoch nicht geschlossen werden, daß es eine „Entwarnung“ gibt. Vielmehr zeigen die Unsicherheiten, daß die Möglichkeit eines Klimawandels und dessen Folgen schon jetzt berücksichtigt werden müssen, um auch in Zukunft einen ausreichenden Schutz der Bevölkerung sicherzustellen. Dazu wird derzeit z. B. der Generalplan Küstenschutz für Schleswig-Holstein überarbeitet, in den auch mögliche Folgen eines Klimawandels eingearbeitet werden (Probst 1998, 1998a).

Diese Analysen und die notwendigen spezifischen Parameter für die wasserbaulichen Berechnungen, die aus den Ergebnissen des GKSS-Projektes (Shackley et al. 1998; v. Storch et al. 1998a) leider nicht vollständig abgeleitet werden konnten (da bspw. nur die Windgeschwindigkeit verfügbar ist), wurden aus den Szenarien, in Zusammenarbeit mit den Koordinatoren und dem Teilprojekt Geologie, verschiedene Varianten im Sinne einer Parameterstudie entwickelt. Der Wasserstand wurde gemäß der anerkannten Untersuchungen zum globalen Meeresspiegelanstieg (Tab. 2) variiert.

	Aerosoleinfluß berücksichtigt	ohne Aerosol (1990)
niedrige Schätzung	0,20 m	0,23 m
mittlere Schätzung	0,49 m	0,50 m
Hohe Schätzung	0,86 m	0,96 m

Tab. 2: Meeresspiegelanstieg bis 2100 nach IPCC (Sterr 1998)

Zur Erhöhung der Genauigkeit des Meeresspiegelanstiegs im Bereich Sylt wurden die Pegel List und Hörnum ausgewertet (Hofstede 1999; Jensen et al. 1992). Die Ergebnisse zeigen, daß für das Tidemittelwasser ein säkularer Trend von +0,19 m und eine Zunahme des Tidehubs von +0,23 m (List) bis +0,45 m (Hörnum) in hundert Jahren festzustellen ist.

Für die Windverhältnisse wurde angenommen, daß sich sowohl die Windgeschwindigkeiten als auch die Windrichtungen verändern können. Für die Untersuchungen wurden diejenigen Parameter verändert, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit für Veränderungen des Sedimenttransports sorgen können. Eine Übersicht zu den untersuchten Varianten gibt Tab. 3.

Die definierten Varianten weisen Eintrittswahrscheinlichkeiten auf, die durch bestehende Meßzeiträume nicht quantifiziert werden können. Sie sind aber plausible klimatische Veränderungen, die in der Zukunft eintreten können und deren möglichen Auswirkungen auf dieser Grundlage schon zu diesem Zeitpunkt eingeschätzt werden können.

Variante	Wind-		Wasserstands- änderung
	geschwindigkeit	richtung	
<b>A</b>	+10% aus West bis Nord	-	-
<b>B</b>	+10% aus Süd bis West	-	-
<b>C</b>	+10% aus West bis Nord	Verschwenken um +10° nach Nord	0,00 m bis 0,50 m
	+10% aus Süd bis West	Verschwenken um +10° nach Süd	0,00 m bis 0,50 m
<b>E</b>	-	-	0,00 m bis 1,00 m

Tab. 3: Varianten A bis E für die Berechnung des Einflusses des Windes und des Wasserstandes auf den Sedimenttransport

## 5. Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zu den Arbeitsschwerpunkten im Detail vorgestellt und erläutert.

### 5.1. Wind-Wellen-Korrelation

Der Wind wird durch die Parameter Geschwindigkeit und Richtung charakterisiert; der Seegang wird auf die Parameter aus dem Richtungsspektrum Wellenhöhe ( $H_{m0}$ ), Wellenanlaufrichtung ( $\theta_m$ ) und Wellenperiode ( $T_{02}$ ) reduziert. Die Messungen haben gezeigt, daß die Instrumente zur Messung des Seegangs (Richtungswellenbojen) häufiger ausfallen; die Meßeinrichtungen für den Wasserstand und die Windverhältnisse weisen im Vergleich dazu deutlich geringere Ausfälle auf.

Wie vorher ausgeführt wurde, ist es im Rahmen der Projektarbeit somit eine vordringliche Aufgabe, die Datenlücken der Seegangszeitreihen zu schließen. Für die Verhältnisse vor Sylt wurde auf der Basis früherer Untersuchungen eine Wind-Wellen-Korrelation aufgestellt (Kohlhase et al. 1994), die es ermöglicht, fehlende Daten auf der Basis statistisch-empirischer Gesetzmäßigkeiten zu berechnen.

Die Korrelation berücksichtigt den Einfluß des Tidewasserstands und berechnet durch nicht-lineare Funktionen aus den Windparametern sowie weiteren in den Funktionen implizit enthaltenen Einflüssen (Fetch, Flachwassereffekte etc.) den Seegang. Eine schematische Darstellung dieser Zusammenhänge kann Abb. 2 entnommen werden (Witte et al. 1999b).

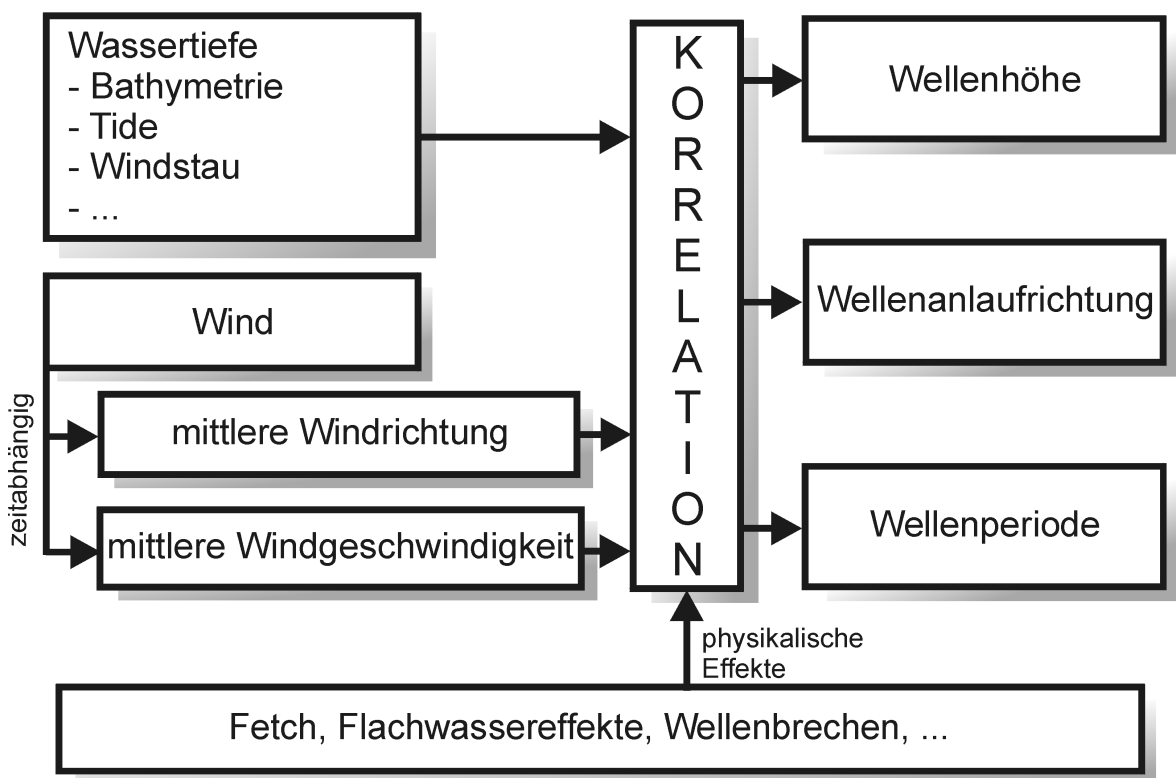


Abb. 2: Schematische Darstellung der Wind-Wellen-Korrelation (Witte et al. 1999b)

Die Untersuchungen im Projekt haben ergeben, daß die Korrelation zwischen Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit nach folgendem Ansatz durchgeführt werden kann:

$$H_i(\bar{\Theta}_U, \bar{U}, d) = (a(\bar{\Theta}_U) + b(\bar{\Theta}_U) * \bar{U}^2) * \sqrt{1 - \exp\left(-\left(\frac{\zeta * d}{a(\bar{\Theta}_U) + b(\bar{\Theta}_U) * \bar{U}^2}\right)^2\right)} \quad (\text{GL. 1})$$

In Gl. (1) sind:

$H_i$  : signifikante Wellenhöhe. Die Bezugswassertiefe beträgt 13 m, da frühere Messungen an der 13 m Tiefenlinie [m] durchgeführt wurden.

$\bar{\Theta}_U$  : mittlere Windrichtung der letzten vier Stunden vor der Seegangsmessung, gemessen am Meßpfahl Westerland des ALR [°]

$\bar{U}$  : mittlere Windgeschwindigkeit der letzten vier Stunden am Meßpfahl [ $\frac{m}{s}$ ]

$d$  : tideabhängige Wassertiefe an der vorher definierten Lokation [m]

$a(\bar{\Theta}_U)$  : richtungsabhängiger Regressionskoeffizient [m] (y-Achsenabschnitt)

$b(\bar{\Theta}_U)$  : richtungsabhängiger Regressionskoeffizient [ $\frac{s^2}{m}$ ]

$\zeta$  : iterativ ermittelter Koeffizient

Die Wellenhöhen  $H_i$  entsprechen der aus dem Spektrum berechneten signifikanten Wellenhöhe  $H_{m0}$ . Für die Regressionskoeffizienten  $a$  und  $b$  wird folgender Ansatz verwendet:

$$a(\bar{\Theta}_U) = a_0 + a_1 \sin 2\bar{\Theta}_U + a_2 \cos 2\bar{\Theta}_U$$

und:  $b(\bar{\Theta}_U) = b_0 + b_1(\pm) \sin 2\bar{\Theta}_U + b_2(\pm) \cos 2\bar{\Theta}_U$

Durch die Wind-Wellen-Korrelation werden die Lücken in einer Datenreihe geschlossen. Die Korrelationsrechnungen aus Zeitreihen der Windinformationen zeigen einen sehr guten Zusammenhang zwischen den gemessenen und nach Gl. (1) berechneten Daten, wie Abb. 3 verdeutlicht.

Die Szenarien (vgl. Kap. 4) gehen davon aus, daß sich die Windgeschwindigkeiten teilweise um bis zu 10 % erhöhen und der Wind um bis zu 10° drehen kann. Diese Veränderungen können in einer Zeitreihe nicht berücksichtigt werden, da eine partielle prozentuale Anhebung von Daten in einer Zeitreihe nur sehr schwer oder gar nicht realisiert werden kann und die modifizierte Zeitreihe dann möglicherweise keinen Zusammenhang mehr zur Physik haben kann.

Diese Überlegungen haben dazu geführt, die Wind-Wellen-Korrelation für Zeitreihen auf Seegangs- und Windstatistiken zu übertragen. Es wird somit eine verallgemeinerte Form der funktionalen Zusammenhänge zwischen Wind- und

Seegangdaten speziell für die Berechnung der Richtungsseegangstatistik direkt aus der Windstatistik ermöglicht.

Da jedoch hierbei der zeitliche Bezug zwischen den Datensätzen nicht mehr gegeben ist, müssen die aus der Tidebewegung resultierenden zeitlichen Wasserstandsänderungen vernachlässigt werden. Der Wasserstand wird entsprechend durch einen mittleren Wasserstand wiedergegeben. Die Änderungen des Wasserstandes infolge von Windstau werden berechnet und somit direkt berücksichtigt (Witte et al. 1998a).

In Abb. 4 ist das Vorgehen zur Korrelation zwischen Wind- und Seegangstatistiken zu erkennen. Für alle Klassenmitten, gebildet aus Windgeschwindigkeit und Windrichtung, wird mittels Wind-Wellen-Korrelation die zugehörige Seegangsklasse, die die Wellenhöhe und Wellenrichtung umfaßt, ermittelt. Der prozentuale Wert aus der Windstatistik wird an die zugehörige Zelle der Seegangstatistik übergeben. So wird eine Seegangstatistik aufgebaut, die zu 100 % alle Ereignisse berücksichtigt. Vergleichsrechnungen mit Seegangstatistiken aus Zeitreihen und aus korrelierten Windstatistiken haben ergeben, daß Abweichungen zwischen den Berechnungsarten unter 10 % liegen.

## 5.2. Energieflußberechnungen

Es existieren viele Modelle für die Simulation der Wellentransformation an geneigten, unprofilieren Küsten, von denen die Ansätze von BATTJES & JANSSEN, THORNTON & GUZA, DALLY und TUCKER ET AL. am bekanntesten sind. Einige der Modelle zur Berechnung des Energieflusses wurden von Partenscky et al. (1988) und Kohlhase et al. (1994) analysiert und weiterentwickelt. Energieflußmodelle basieren auf dem Gesetz der Energieerhaltung. Das bedeutet, daß die Energie im System durch Wellenbrechen, Bodenreibung oder Windschub an der Wasseroberfläche nur verändert wird. Dabei sind die Anteile der dissipierenden Terme aus Wellenbrechen und Bodenreibung am wichtigsten. Die Veränderung der Energie, d. h. die zeitlich gemittelte Energiedissipation  $\epsilon_d$  pro Flächeneinheit, muß durch geeignete mathematische Formulierungen beschrieben werden.

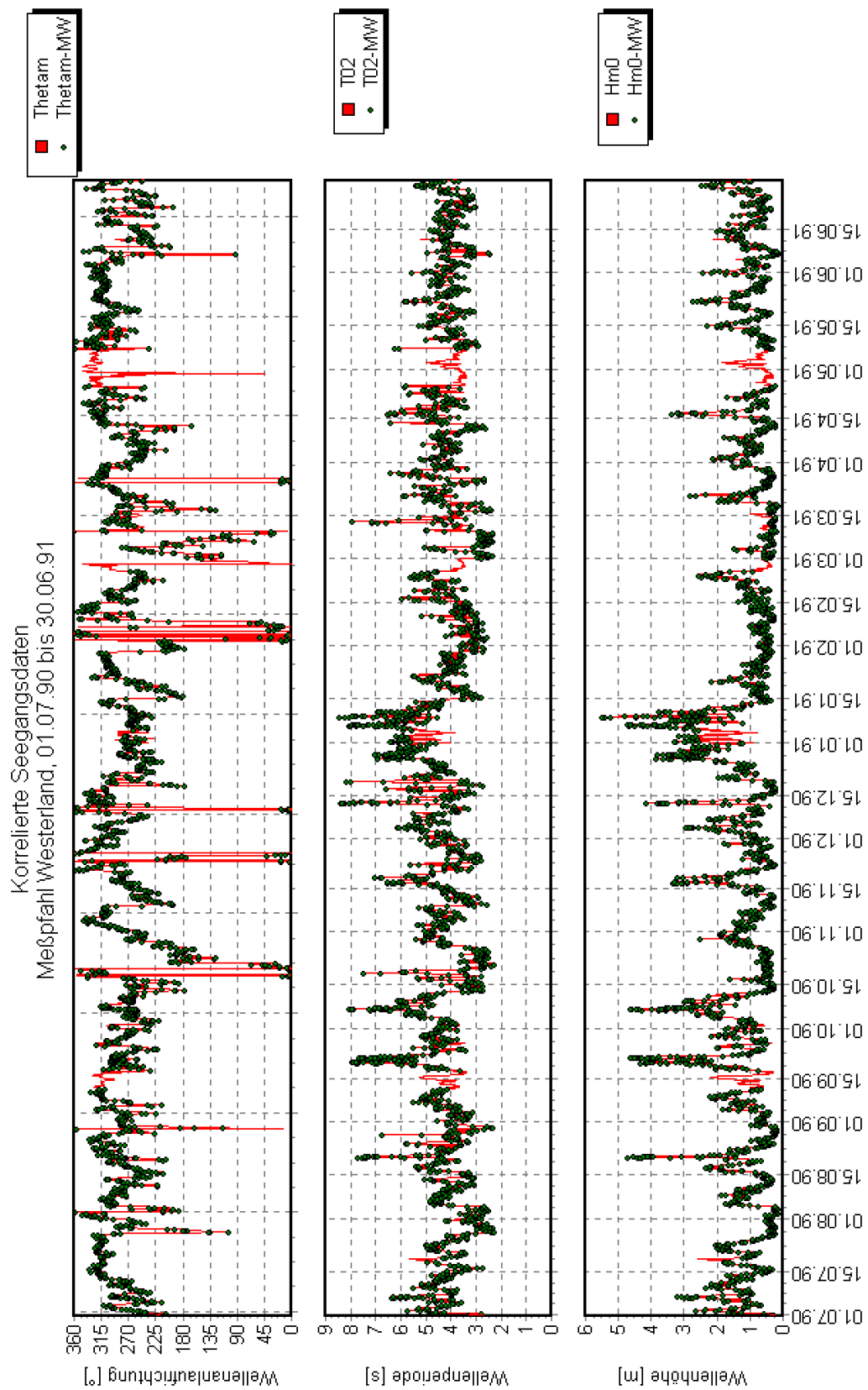
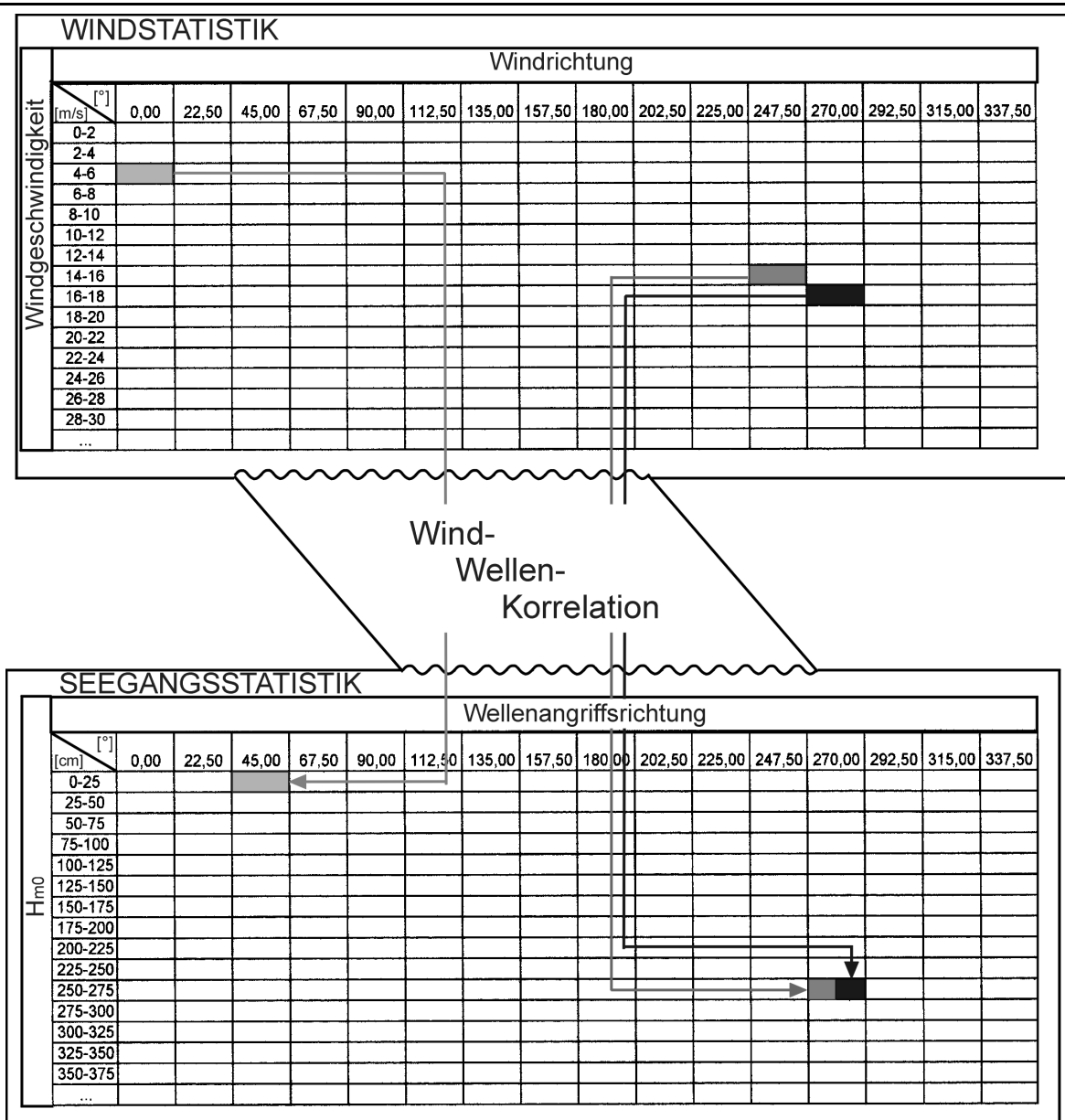


Abb. 3: Zeitreihen gemessener und berechneter Seegangsparameter 07/1990 bis 06/1991

mit: Theta = Wellenanlaichtung **berechnet** und MW: **gemessen**

„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:

Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt



schematisch

T02 = Wellenperiode **berechnet** und MW: **gemessen**

Hm0 = Wellenhöhe **berechnet** und MW: **gemessen**

Abb. 4: Schematische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Wind- und Seegangsstatistiken

Die Formulierung der Differentialgleichung für den Energiefluß lautet in allgemeiner Form:

$$\frac{\partial F}{\partial s} + \epsilon_d = 0 \quad (\text{GL. 2})$$



In Gl. (2) sind:

$F$  : Zeitlich gemittelter vertikal integrierter Energiefluß in Fortschrittsrichtung  $s$  der Wellen

$\varepsilon_d$  : zeitlich gemittelte Energiedissipation pro Flächeneinheit

Die Energieflusskomponente  $F_x$  (in Profilrichtung  $x$ ) wird durch die lineare Wellentheorie berechnet. Danach ist:

$$F_x = E \cdot c_g \cdot \cos \alpha \quad (\text{GL. 3})$$

Hierin ist:  $\alpha$  = Winkel zwischen der Strandnormalen und der Wellenanlaufrichtung

Die Energie des unregelmäßigen Seegangs ist definiert durch:

$$E = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H_{\text{rms}}^2 \quad (\text{GL. 4})$$

mit:

$\rho$  : Dichte von Wasser [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  : Erdbeschleunigung [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$H_{\text{rms}}$  : Wellenhöhe (root mean square) [m]

Die seeseitigen Randbedingungen  $F_{x0}$  und  $H_{\text{rms}0}$  und die Perioden- und Richtungsparameter des Seegangs  $T_{02}$  und  $\theta_{m0}$  an der Position  $x_0$  sind durch die Messungen und aus Wind-Wellen-Korrelation bekannt. Die Wassertiefe  $d$  an der Meßstelle beträgt  $d = 13 \text{ m NN}$ . Die entsprechenden Seegangsdaten werden an der Modellgrenze eingesteuert und sind mit dem Index 0 bezeichnet. Durch schrittweise Berechnung der Dissipation zwischen zwei benachbarten Punkten im Profil kann die Veränderung des Energieflusses wie folgt beschrieben werden:

$$F_{x(i)} = F_{x(i-1)} - \Delta x \cdot \varepsilon_{d(i-1) \rightarrow (i)} \quad (\text{GL. 5})$$

Der Dissipationsterm beinhaltet zum einen das Wellenbrechen und zum anderen die Bodenreibung, wobei der Anteil durch das Wellenbrechen höher ist als der der Bodenreibung. Die vorgenannten theoretischen Modelle basieren auf den o. a. Grundlagen, sind aber teilweise komplexer, da sie auch die Veränderung der Wellenhöhenverteilung nach dem Wellenbrechen berücksichtigen.

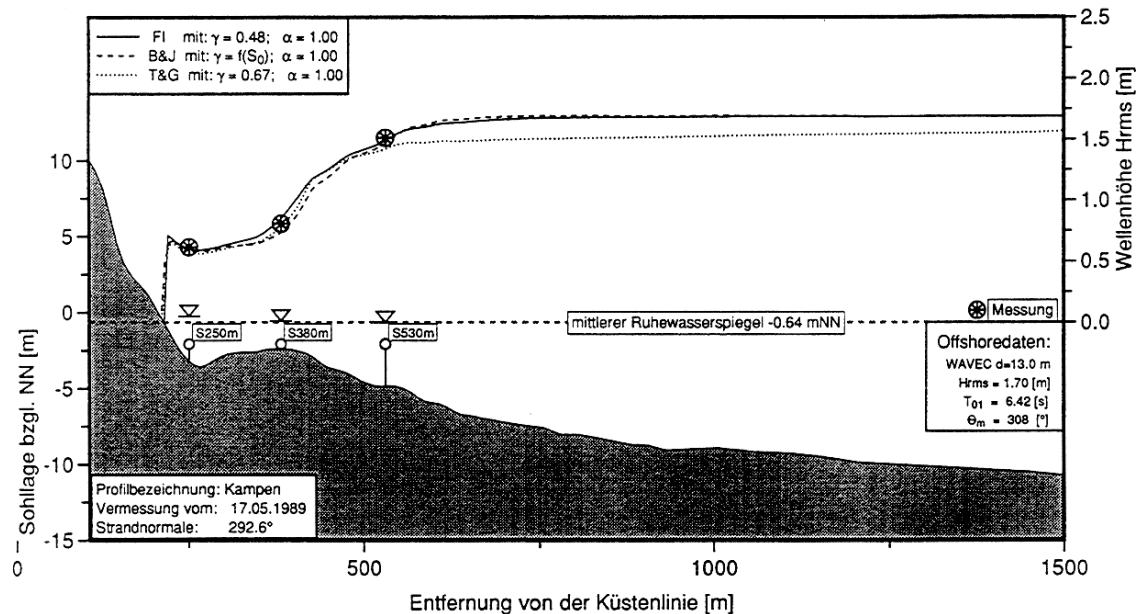


Abb. 5: Vergleich der Wellenhöhen aus den Messungen und den Berechnungen mit verschiedenen Energieflußansätzen (Kohlhase et al. 1994)

FI = erweiterter Ansatz des Franzius-Institut nach TUCKER

B&J = Ansatz nach Battjes und Janssen

T&G = Ansatz nach Thornton und Guza

Zur Verifikation des Ansatzes wurden gemessene und berechnete Wellenhöhen entlang eines Profils im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvorhaben „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ (Kohlhase et al. 1994) miteinander verglichen. Im Berechnungsbeispiel Abb. 5 zeigt sich, daß der erweiterte Ansatz nach Tucker (ausgezogene Linie in Abb. 5, FI) die vergleichsweise besten Ergebnisse liefert.

Ein Beispiel für den aus der Wellenhöhenabnahme berechneten Energiefluß und der strandnormalen bzw. strandparallelen Energieflußkomponenten ist in Abb. 6 aufgeführt. Die Abbildung zeigt die kumulierten Energieflußkomponenten nach

dem modifizierten Ansatz von TUCKER entlang eines ausgewählten Profils vor Sylt. Die Berechnungen wurden mit einer Statistik durchgeführt, die den Zeitraum von 07/1990 bis 06/1991 umfaßt.

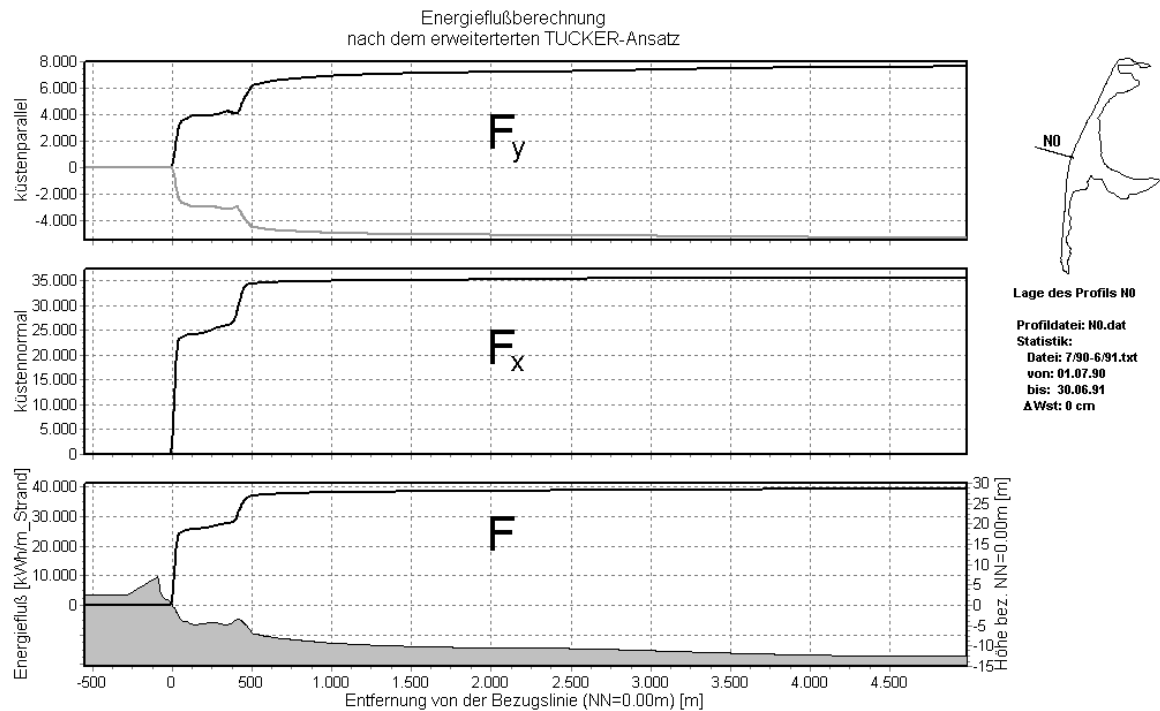


Abb. 6: Küstenparalleler und küstennormaler Energiefluß im Profil N0, Insel Sylt für den Zeitraum 1990 bis 1991, berechnet nach einem erweiterten Tucker-Ansatz (nach Witte 1999a)

Es ist gut zu erkennen, daß die Energiedissipation in der Brandungszone deutlich zunimmt. Die Energie wird im wesentlichen über dem Riff und direkt am Strand umgewandelt. Die Anteile der Energiedissipation über dem Riff und am Strand hängen im wesentlichen vom Gesamtenergieeintrag und vom aktuellen Wasserstand ab (Witte et al. 1998b).

### 5.3. Berechnung der Sedimenttransportkapazitäten

Aus dem küstenparallelen Energiefluß entlang eines Profils kann die zugehörige Sedimenttransportkapazität abgeleitet werden. Für die Berechnung der Morphodynamik wird ein Sedimenttransportansatz verwendet, der auf der im Shore Protection Manual (CERC 1984) vorgeschlagenen Transportbeziehung für den Küstenlängstransport basiert. Die in der CERC-Formulierung verwendete parallel zur Küste gerichtete Energiedissipation  $D_y$  entspricht der Differenz der resultierenden Energieflüsse  $F$  zwischen zwei Stützstellen ( $\epsilon_d$ ). Die Energiedissipation erfolgt

abhängig vom Winkel  $\alpha$  zwischen der Wellenanlaufriechung und der Strandnormalen des Profils:

$$D_y = -\frac{\partial F}{\partial s} \sin \alpha \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{GL. 6})$$

Unter Berücksichtigung der Dissipation  $D_y$ , der Lagerungsdichte  $a'$ , der Dichte für das Sediment  $\rho_s$  und das Wasser  $\rho$  sowie eines empirischen Koeffizienten  $K$ , der an Naturmessungen geeicht werden muß, kann das küstenlängs gerichtete Sedimenttransportvermögen  $\Delta Q_y$  nach Gl. (7) abgeschätzt werden.

$$\Delta Q_y(x) = -\frac{K}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot a'} D_y \Delta x \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (\text{GL. 7})$$

Für diese Formulierung wurden für die Verhältnisse im Bereich der Insel Sylt folgende Kenngrößen ermittelt (Strotmann et al. 1991):

$$a' : 0,6 [-]$$

$$\rho_s : 2.560 [\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$\rho : 1.025 [\text{kg} / \text{m}^3]$$

Der Beiwert  $K$  wird entsprechend der CERC-Empfehlungen (CERC 1984) zu  $K = 0,78$  angenommen. Gleichung 7 läßt sich für die Bedingungen vor Sylt somit wie folgt reduzieren:

$$\Delta Q_y(x) = -0,3047 \cdot D_y \Delta x \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (\text{GL. 8})$$

Beispielhaft für das schon vorher angegebene Profil N0 im Mittelteil der Insel Sylt sind in Abb. 7 die nach Norden und Süden gerichteten Energieflußkomponenten und die zugehörigen Sedimenttransportkapazitäten dargestellt. Der direkte Zusammenhang zwischen der Energiedissipation und den Sedimenttransportkapazitäten ist deutlich zu erkennen. Ist die Energiedissipation, d. h. sind die Veränderungen im Energiefluß groß, sind auch hohe Transportkapazitäten zu verzeichnen (Witte et al. 1999c).

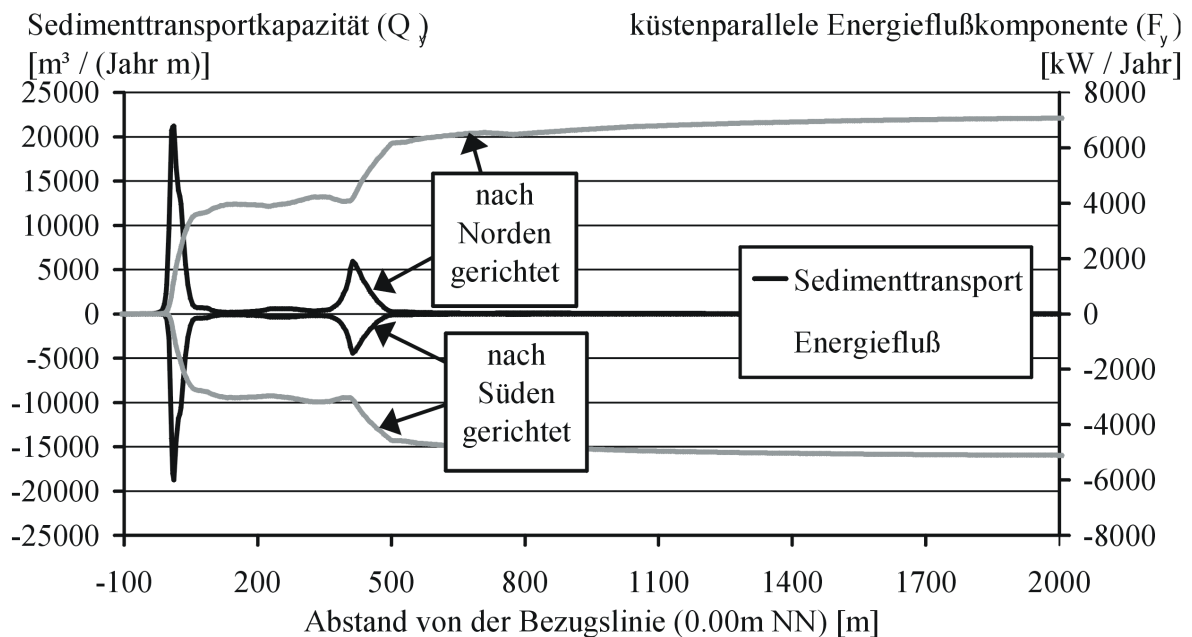


Abb. 7: Küstenparallele Energieflußkomponenten im Profil N0 und zugehörige Sedimenttransportkapazitäten im Zeitraum 07/1990 - 06/1991

Für das gleiche Berechnungsbeispiel sind in Abb. 8 nur die Verteilung der Sedimenttransportkapazitäten entlang eines Profils dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß sich zwei Kernzonen des Sedimenttransports ausweisen lassen. Der eine Bereich liegt über dem Riff, und der andere befindet sich im Bereich des Strandes.

Die Berechnungen haben gezeigt, daß abhängig von den hydrodynamischen Bedingungen (Wasserstand und Energieeintrag) ca. 30 - 50 % des Sedimenttransportes über dem Riff stattfinden.

Ein direkter Zusammenhang zwischen Sedimenttransport und örtlicher Akkumulation oder Erosion von Sedimenten kann aus Gründen des Sedimenthaushalts nicht angegeben werden (siehe hierzu Kohlhasse 1991), da ein hoher Sedimentdurchsatz nicht zwangsläufig zu morphologischen Änderungen führt. Erosion und Akkumulation aus dem Längstransport von Sedimenten werden vielmehr durch den Gradienten der Transportkapazitäten bestimmt. Dabei sind durch das örtlich verfügbare Sediment Grenzen gegeben. Eine Abschätzung der erodierten bzw. akkumulierten Sedimentmengen erfordert daher die Einbeziehung der Transport

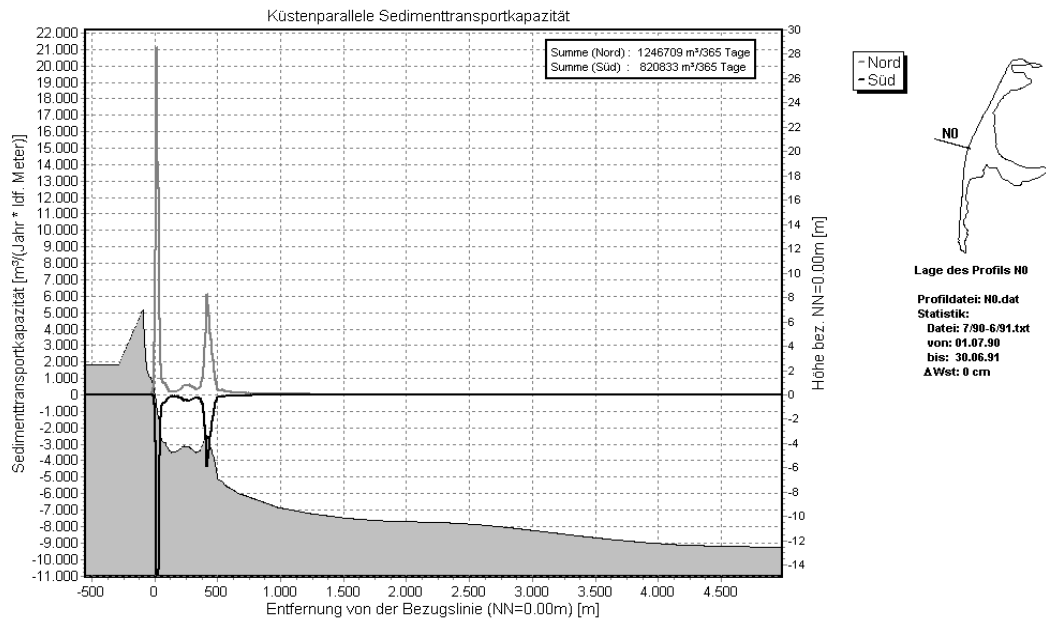


Abb. 8: Küstenparallele (nach Norden und Süden) Sedimenttransportkapazitäten entlang eines Profils für den Zeitraum 07/1990 bis 06/1991

kapazitäten der jeweils benachbarten Abschnitte. Abb. 9 zeigt die Methodik zur Bilanzierung der Sedimenttransportkapazitäten.

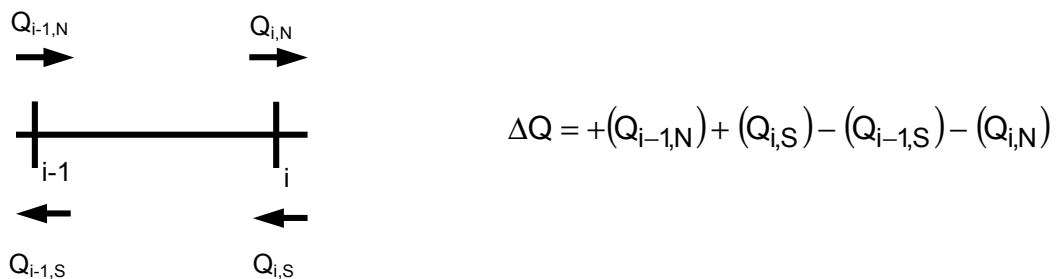


Abb. 9: Bilanzierung der Sedimenttransportkapazitäten

Die Berechnungen werden zwischen zwei Elementen (i-1 und i) der Küste, getrennt für die Transporte in nördliche ( $Q_{i,N}$ ) und südliche Richtung ( $Q_{i,S}$ ) durchgeführt. Die bilanzierte Sedimenttransportkapazität  $\Delta Q$  wird jeweils dem Bereich zwischen den beiden Elementen i-1 und i zugeordnet. Bei der Bilanzierung muß davon ausgegangen werden, daß in diesen beiden Abschnitten ausreichend Sediment für den Transport zur Verfügung gestellt werden kann.

Aus der Bilanz der Sedimenttransportkapazitäten können nun die Gebiete bestimmt werden, in denen Erosion ( $\Delta Q < 0$ ) oder Akkumulation ( $\Delta Q > 0$ ) auftritt.

Für die Gesamtbilanzierung von Sedimenterosion und Sedimentakkumulation für die Insel Sylt werden die Sedimenttransportkapazitäten an allen Profilen berechnet (Abb. 10). Für die Bewertung der Berechnungsergebnisse müssen die vorgeannten Einschränkungen und Voraussetzungen berücksichtigt werden.

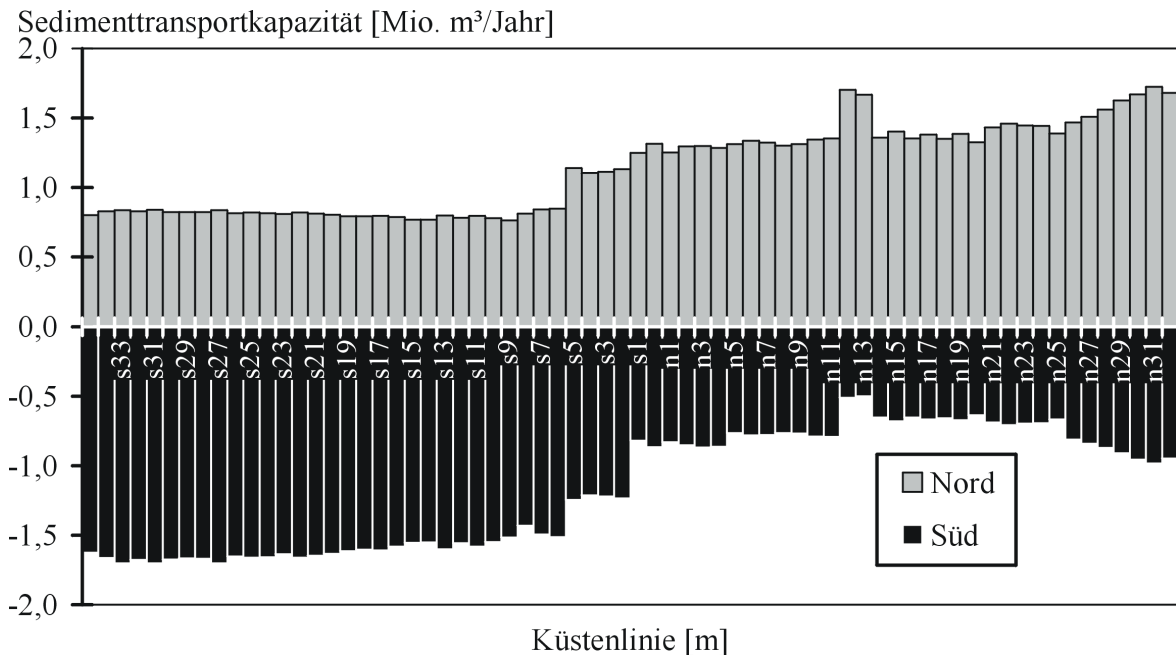


Abb. 10: Sedimenttransportkapazitäten nach Norden und Süden für alle Profile entlang der Westküste

Die Bilanzierung der Sedimenttransportkapazitäten entlang der Küste ergibt einen rechnerischen Sedimentverlust von 1,02 Mio. m<sup>3</sup> (Witte et al. 1999d). Die natürliche Variabilität, d. h. die Unterschiede zwischen verschiedenen Jahren (90 - 91, 92 und 88 - 98), des resultierenden Sedimenttransportes liegt nach den durchgeführten Berechnungen bei rd. 0,9 - 1,1 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr (vgl. Abb. 11).

Die berechneten Verluste sind damit in guter Übereinstimmung mit den Verlustberechnungen des ALR aus den synoptischen Vermessungen der Jahre 06/1992 und 05/1999. Diese Analysen ergaben (ALR 2000) einen Sedimentverlust von 1,078 Mio. m<sup>3</sup>.

#### 5.4. Variationsrechnungen zu definierten Szenarien

Im Rahmen der Fallstudie Sylt wurden in der Projektgruppe Szenarien definiert (vgl. Kap. 4), die die klimatische Variabilität der maßgebenden Einflußfaktoren beschreiben. Die am Institut für Wasserbau der Universität Rostock durch-

geführten Untersuchungen berücksichtigen den Einfluß der Veränderlichkeit des Windes und des Wasserstandes auf den Energiefluß und die damit verbundenen Sedimenttransportkapazitäten. Die Veränderlichkeit des Windes wurde definiert als maximale Erhöhung der Windgeschwindigkeiten um 10% und Verdrehung der Windrichtungen um bis zu 10° nach Norden und Süden (Tab. 4).

Variante	Windgeschwindigkeit	Windrichtung
A	+10% aus 292,5° bis 337,5°	keine Veränderungen
B	+10% aus 202,5° bis 247,5°	keine Veränderungen
C	+10% aus 292,5° bis 337,5°	verschwenken um +10° nach Nord
D	+10% aus 202,5° bis 247,5°	verschwenken um +10° nach Süd

Tab. 4: Varianten der Veränderlichkeit des Windes

Die in den Varianten A bis D angegebenen Windsituationen wurden zusätzlich mit um 0,50 m erhöhten Wasserständen untersucht. Die Szenarienrechnungen wurden für die Statistik der Jahre 1988 – 1998 durchgeführt, damit sichergestellt ist, daß alle relevanten Klassen der Statistik mit hoher Wahrscheinlichkeit belegt sind. Beispielhaft sind Ergebnisse der Berechnungen in Abb. 11 im Vergleich mit Berechnungen zur natürlichen Variabilität der Wellen dargestellt (vgl. Kap.5.3).

Es ist zu erkennen, daß die berechneten Ergebnisse gemäß Abb. 11 keine signifikanten Unterschiede in der Gesamtbilanz der Sedimenttransportkapazitäten aufweisen. Die Untersuchungen zu den Windszenarien zeigen, auch in Kombination mit erhöhten Wasserständen, keine wesentlichen Veränderungen in der Gesamtbilanz der Transportkapazitäten im Vergleich zu der "natürlichen" Variabilität.

Signifikante Unterschiede ergeben sich bei steigenden Wasserständen jedoch in Hinblick auf lokale Effekte im Profil. Abb. 12 zeigt deutlich, daß der Sediment-



transport im Profil im wesentlichen über dem Riff und im Bereich des Strandes stattfindet.

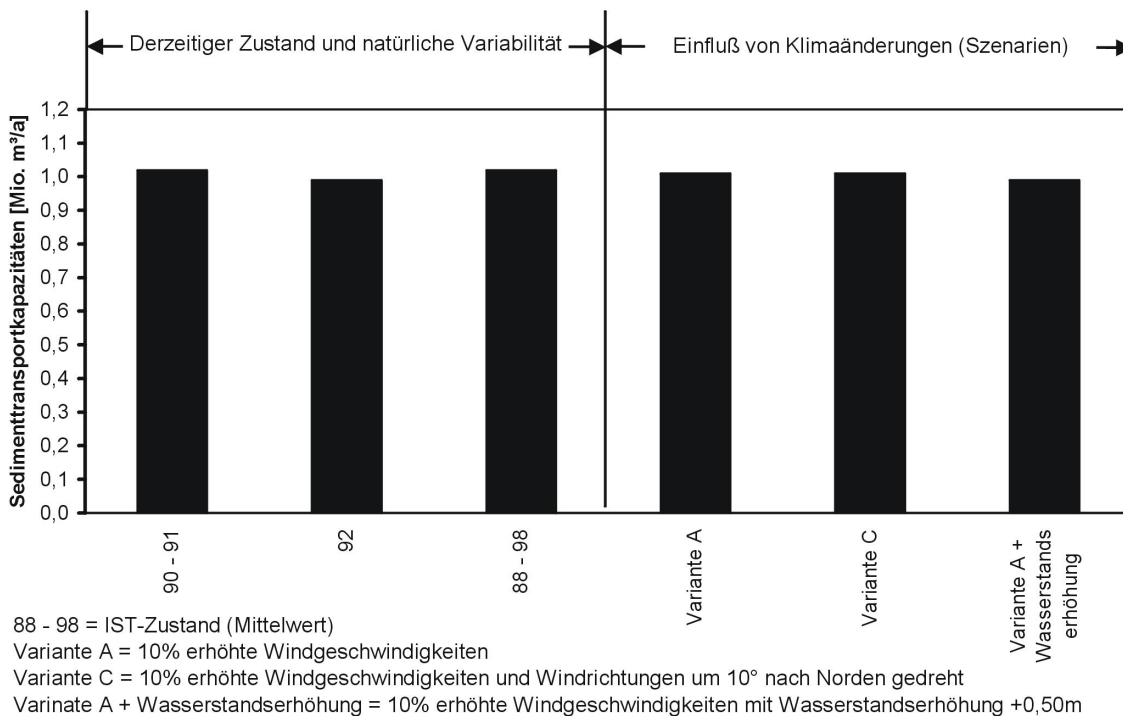


Abb. 11: Variabilität der Sedimenttransportkapazitäten

Mit steigendem Wasserstand nimmt der Transport über dem Riff ab und im Strandbereich zu. Bei den Berechnungen wurde davon ausgegangen, daß sich die Morphologie der Küstenprofile nicht verändert, so daß dieses Ergebnis nicht überrascht. Es ist aber davon auszugehen, daß sich die Wassertiefen zumindest teilweise an die veränderten Wasserstandsverhältnisse anpassen werden, da sich der Prozeß der Wasserstandserhöhung nur sehr langsam vollziehen wird. Die Untersuchungen stellen somit den ungünstigsten Fall der Kombination aus veränderter Morphologie und Wasserstandserhöhung dar.

Es ist aus Abb. 12 auch gut zu erkennen, daß sich die Sedimenttransportkapazitäten mit steigendem Wasserstand (im Beispiel +0,50 m) zum Strand verschieben. Diese Tendenz wird sich mit noch größeren Wasserstandserhöhungen noch weiter verstärken, ohne daß daraus aber direkt auf einen höheren Küstenrückgang geschlossen werden könnte.

Für die Diskussionen möglicher Optionen der Küstenschutzplanung wurden ferner Vergleichsrechnungen zum Einfluß steigender Wasserstände und einer veränder-

lichen Morphologie auf die seegangsdämpfende Wirkung des Riffs und somit auf den Sedimenttransport durchgeführt (Witte et al. 1999a). Dabei wurden Querprofile im Strandbereich,

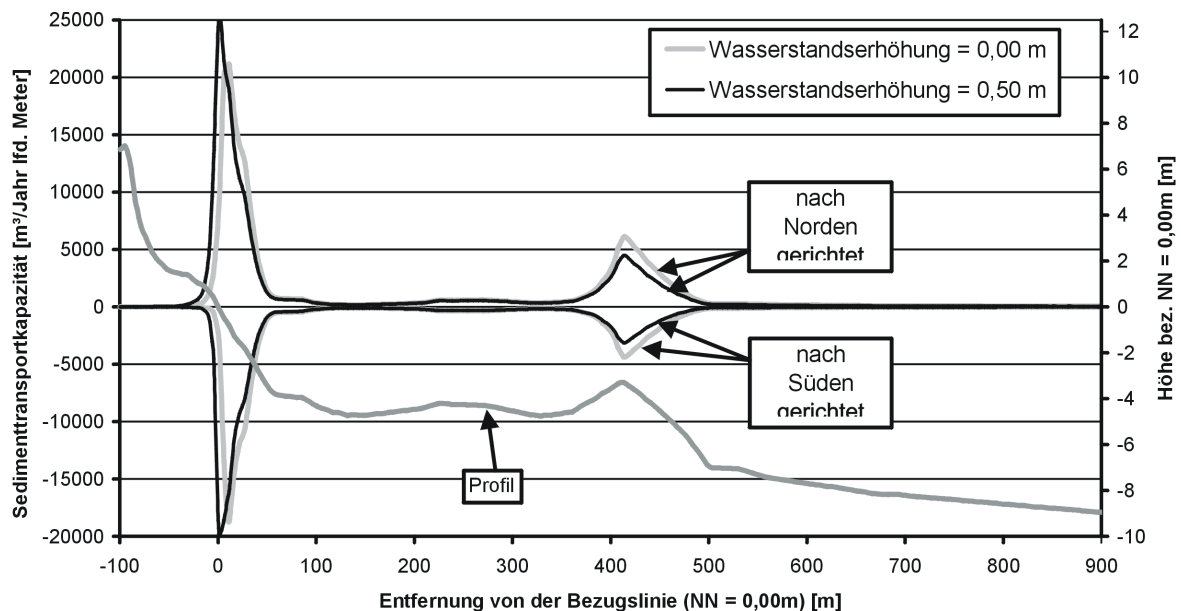


Abb. 12: Veränderlichkeit der Sedimenttransportkapazitäten entlang eines Profils aufgrund steigender Wasserstände

auf dem Riff und seeseitig des Riffs, wie am Beispiel des Profils N0 in Abb. 13 und Tab. 5 angegeben ist, wie folgt verändert: Neben dem Referenzprofil (Profil 1), das den heutigen Zustand (hier Profil N0) repräsentiert, wurden zwei Varianten (Profil 2 und 3) untersucht, die in Tab. 5 charakterisiert sind.

Der untersuchte Einfluß steigender Wasserstände auf die küstenparallelen Sedimenttransportkapazitäten ist in Abb. 14 für das Berechnungsbeispiel (Profil N0) dargestellt. In den in Abb. 14 dargestellten Ergebnissen wurde das Profil in seiner Form nicht variiert. Der Einfluß erhöhter Wasserstände auf die Transportkapazitäten wurde getrennt für den Strand- und den Riffbereich entsprechend Abb. 13 unterteilt.

Die küstenparallele Sedimenttransportkapazität (STK) wird auf den Zustand ohne Wasserstandserhöhung normiert. Es ist zu erkennen, daß mit steigendem Wasserstand die Sedimenttransportkapazitäten im Strandbereich zunehmen, während im Riffbereich die Sedimenttransportkapazitäten abnehmen.

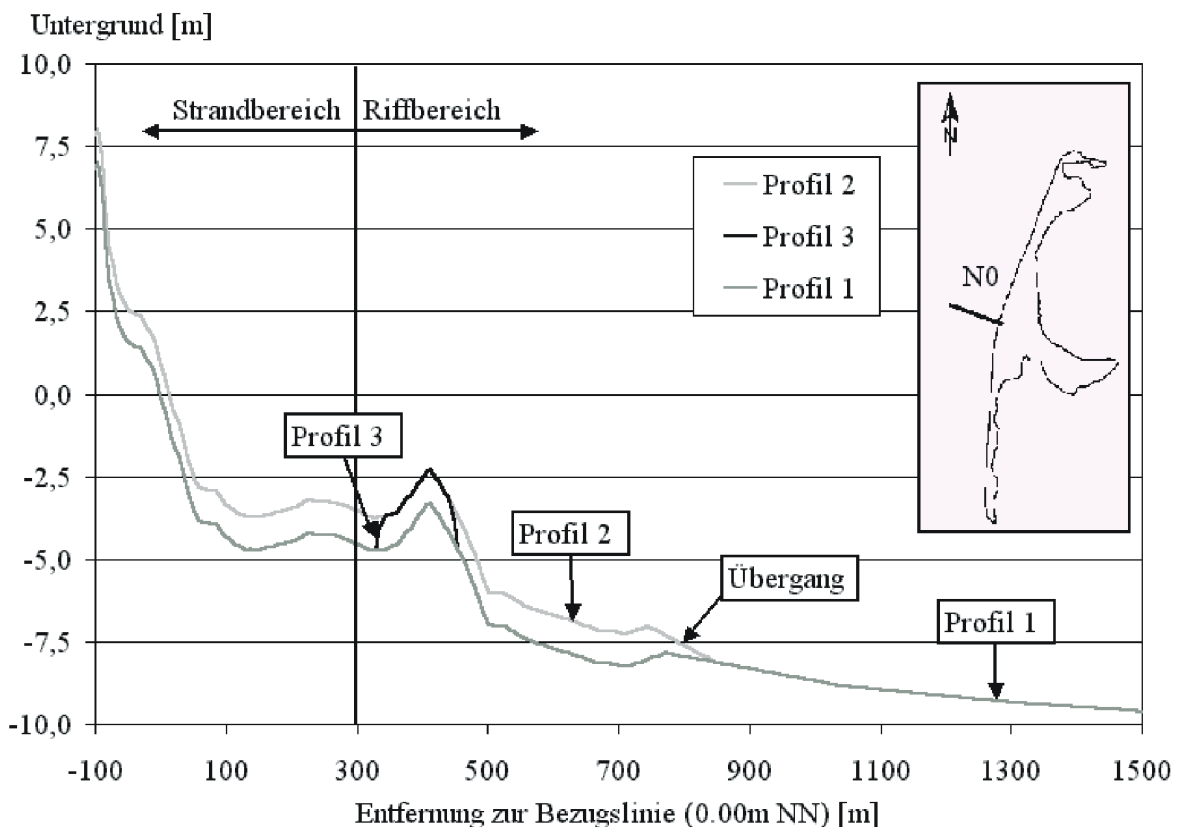


Abb. 13: Variation eines Referenzprofils, Beispiel Profil N0

Profil 1	Referenzprofil $\equiv$ N0
Profil 2	Profil folgt der Wasserstandserhöhung, ist also - unabhängig vom Ort - um das Maß des Wasserstandsanstiegs (hier = 1 m) angehoben. Außerhalb des angehobenen Bereichs (-500 bis +850 m) wurde ein linearer Übergang zum Referenzprofil, wie aus Abb. 13 erkenntlich ist, vorgenommen.
Profil 3	Rifferhöhung: Der Riffbereich +300 m bis +450 m wurde um einen Meter angehoben.

Tab. 5: Untersuchte Varianten des Profils

Die Ergebnisse der berechneten Sedimenttransportkapazitäten, die mit einem erhöhten Profil (Profil 3) in Bezug auf das Referenzprofil (Profil 1) durchgeführt wurden, sind in Abb. 15 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Sedimenttransportkapazitäten im Strandbereich für alle Wasserstände geringer und im Riffbereich größer als im Referenzzustand sind.

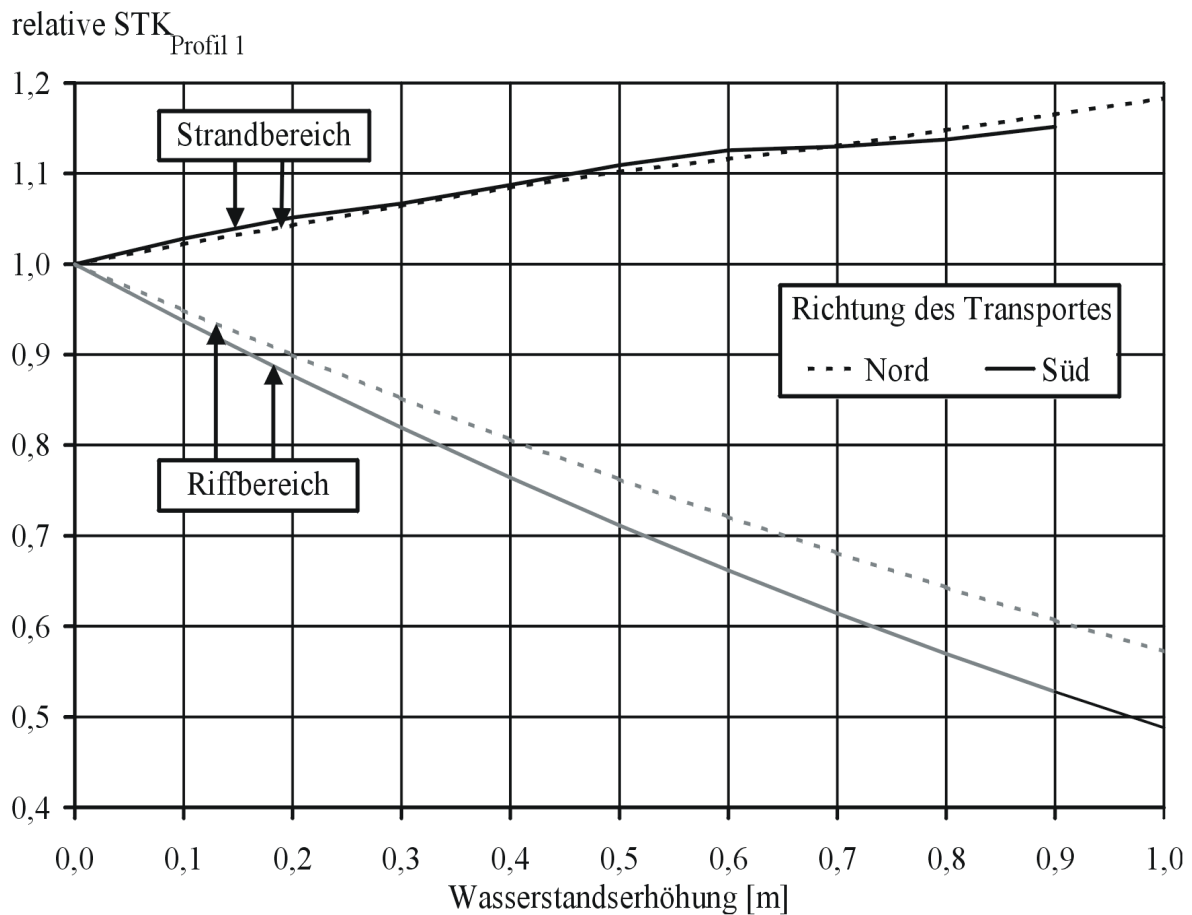


Abb. 14: Einfluß steigender Wasserstände auf die Sedimenttransportkapazitäten (Profil 1) im Strand- und Riffbereich

Die Sedimenttransportkapazitäten sind auch ohne Wasserstandserhöhung im Riffbereich signifikant höher und im Strandbereich deutlich geringer als im Referenzzustand. Das bedeutet, daß bei einem erhöhten Riff auch ohne Wasserstandserhöhung mehr Transport über dem Riff stattfindet.

Es zeigt sich weiter, daß auch mit steigendem Wasserstand die Sedimenttransportkapazitäten bei einem Profil mit einem erhöhten Riff höher sind als im Referenzzustand, d. h. daß die seegangsdämpfende Wirkung eines erhöhten Riffs immer höher ist als der Referenzfall. Im allgemeinen nimmt die Wirkung des Riffs aber mit steigendem Wasserstand dennoch ab. Diese Ergebnisse stehen in sehr guter Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen zur wellendämpfenden Wirkung eines Riffs (Partensky et al. 1988).

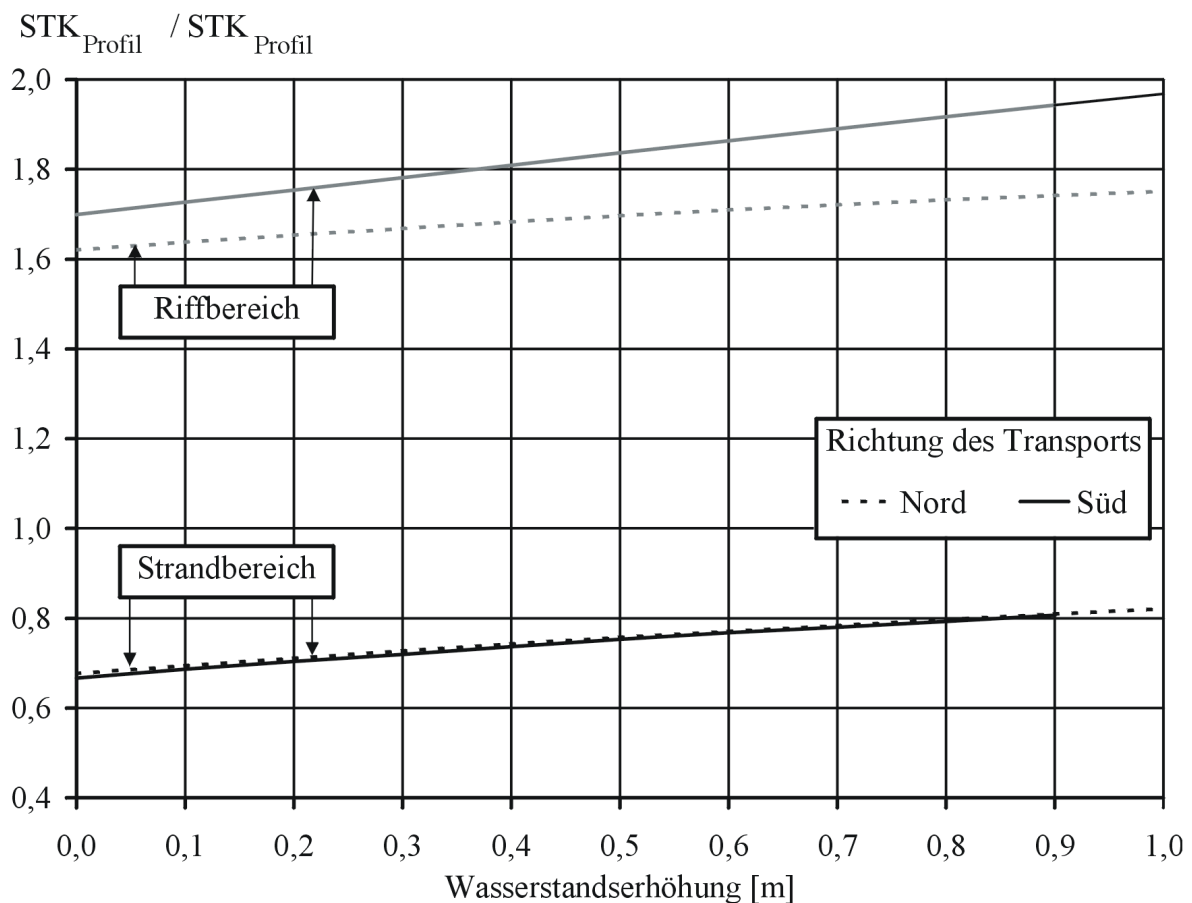




Abb. 15: Einfluß eines gegenüber dem Referenzprofil (Profil 1) erhöhten Riffs (Profil 3) auf die Sedimenttransportkapazitäten als Funktion der Wasserstandserhöhung

### 5.5. Entwicklung eines Programmpakets für die Datenverarbeitung und Simulation

In die Untersuchungen des Teilprojekts „Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt“ sind sehr unterschiedlich ausgerichtete Arbeitsziele der Projektpartner eingebunden. Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Rahmen des vom Institut für Wasserbau der Universität Rostock bearbeiteten Projekts war die Entwicklung des Programmpakets „WinSylt“ für die Datenverarbeitung und Simulation, mit dem ein Zugriff anderer Nutzer auf die Daten gegeben ist und Wünsche der Projektpartner gezielt bearbeitet werden können. WinSylt ist mit der Programmierumgebung *Delphi* für den Einsatz in den 32-Bit-Betriebssystemen Windows 95, 98 und NT (vgl. Abb. 16) entwickelt worden.

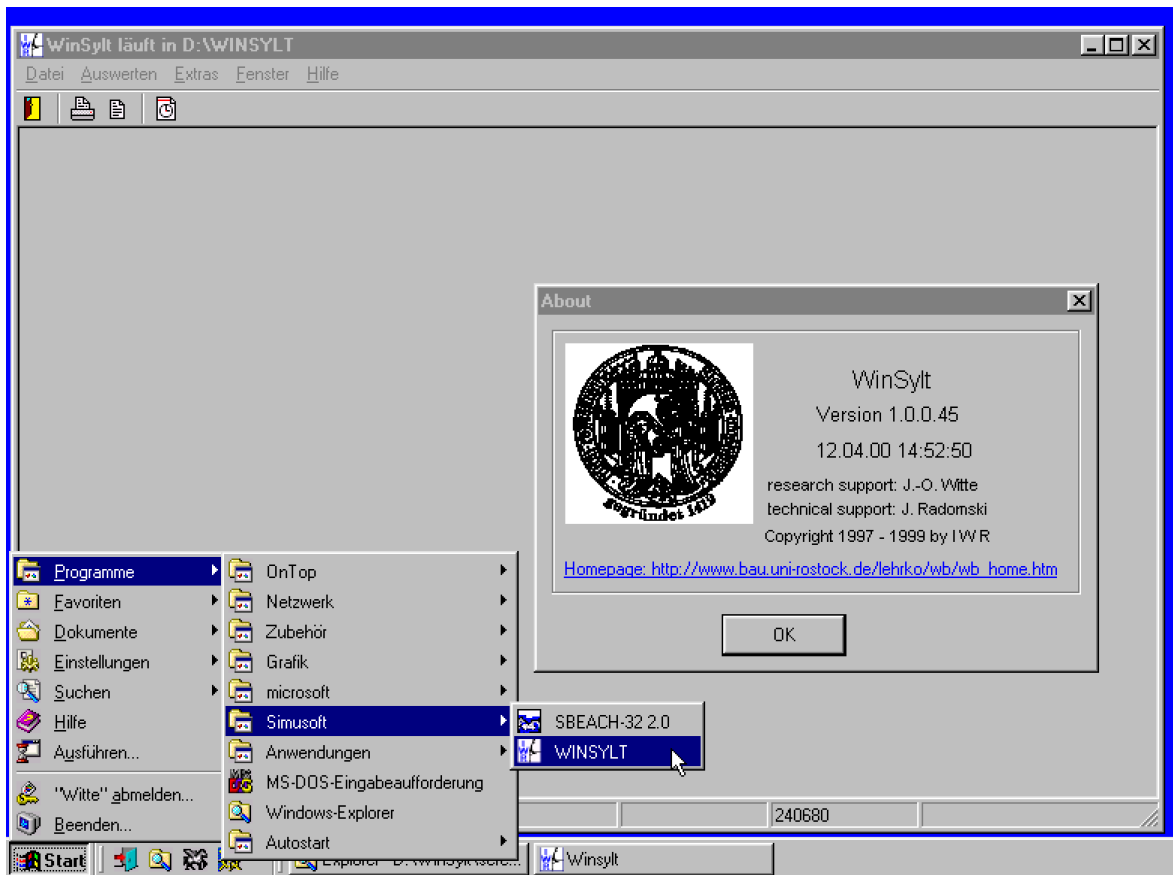


Abb. 16: Einbindung des Programmpaketes WinSylt in die Windowsoberfläche

Durch die konsequente Nutzung der Windows-Funktionalitäten wurde eine benutzerfreundliche Arbeitsoberfläche geschaffen, die den Anwender durch die Struktur leitet. Dabei sind die Exportformate (als Bild oder Datentabelle) auf das MS Office Paket, insbesondere auf Microsoft Excel abgestimmt.

Das Programm enthält eine Zusammenstellung von Funktionalitäten zur Unterstützung des Anwenders (Projektbearbeiter, Mitarbeiter in Fachbehörden etc.) bei der täglichen Arbeit, z. B. durch Visualisierung der Seegangsdaten und die Berechnung des Energieflusses bzw. Sedimenttransportkapazitäten.

Das Programm WinSylt beinhaltet zwei Kernfunktionen, die in einer geschlossenen Umgebung genutzt werden können:

- Auswertung, Präsentation und Bewertung von Wind-, Wasserstands- und Seegangsdaten
- Simulation des Energieflusses und der Sedimenttransportkapazitäten entlang der Profile und der Küste.

## „Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:

### Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt

Der flexible und komfortable Zugriff auf beliebig lange Zeitreihen ist in Abb. 17 am Beispiel der Windgeschwindigkeit und -richtung für das Jahr 1990 dargestellt. Über das Auswahlfenster sind alle wesentlichen Informationen der Zeitreihe verfügbar. Es ist zu erkennen, daß die Winddaten am Meßpfahl Westerland vom 01.12.1987 bis 30.11.1999 im System verfügbar sind und für nahezu jeden Zeitraum dargestellt werden können.

Nach der Visualisierung der Daten als Diagramm kann diese Information an einen Drucker gesendet, in die Zwischenablage kopiert oder in verschiedenen Bildformaten als Datei abgespeichert werden.

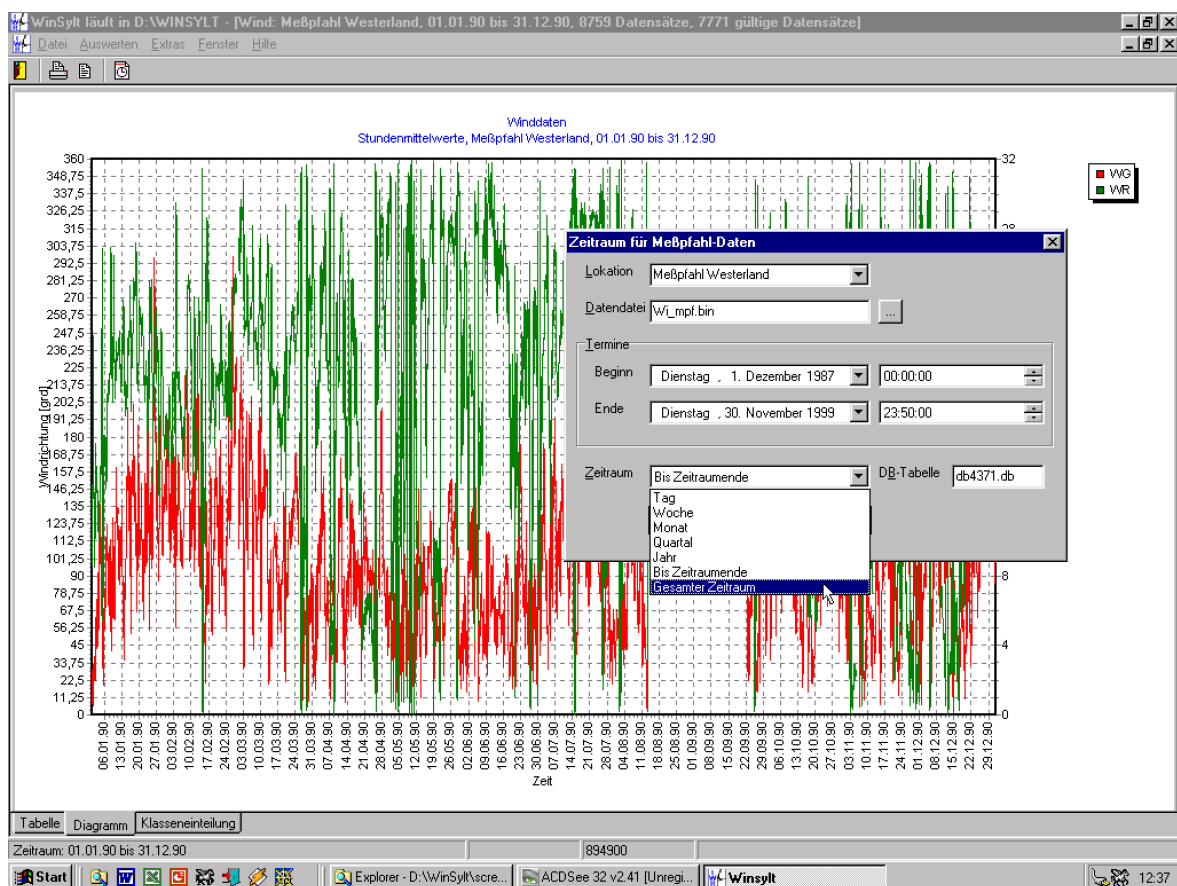


Abb. 17: Winddaten am Meßpfahl Westerland 01.01.1990 – 31.12.1990 mit Auswahlfenster

Parallel zur Diagrammansicht können zum einen die Datentabelle und zum anderen eine Häufigkeitsverteilung der eingelesenen Daten angesehen werden. Die Datentabelle kann in verschiedenen Formaten abgespeichert werden, um einen schnellen und sicheren Datentransfer zu anderen Programmen zu ermöglichen.

## „Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:

### Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt

Eine Häufigkeitsverteilung der Daten ist in Abb. 18 am Beispiel der Winddaten aus Abb. 17 dargestellt.

Neben der farblichen Kennzeichnung der Häufigkeiten (grün = geringe Häufigkeit; rot = hohe Häufigkeit) sowie der Berechnung der Summenhäufigkeiten kann die Matrix in verschiedenen Formaten an andere Programme übergeben werden. Die erzeugten Windstatistiken (Häufigkeitsverteilung) sind die Grundlage für die Wind-Wellen-Korrelation auf der Basis der Statistiken zur Berechnung des Einflusses veränderter Windverhältnisse auf den Seegang. Hierzu müssen die Statistiken entsprechend der Varianten (vgl. Tab. 4) modifiziert werden.

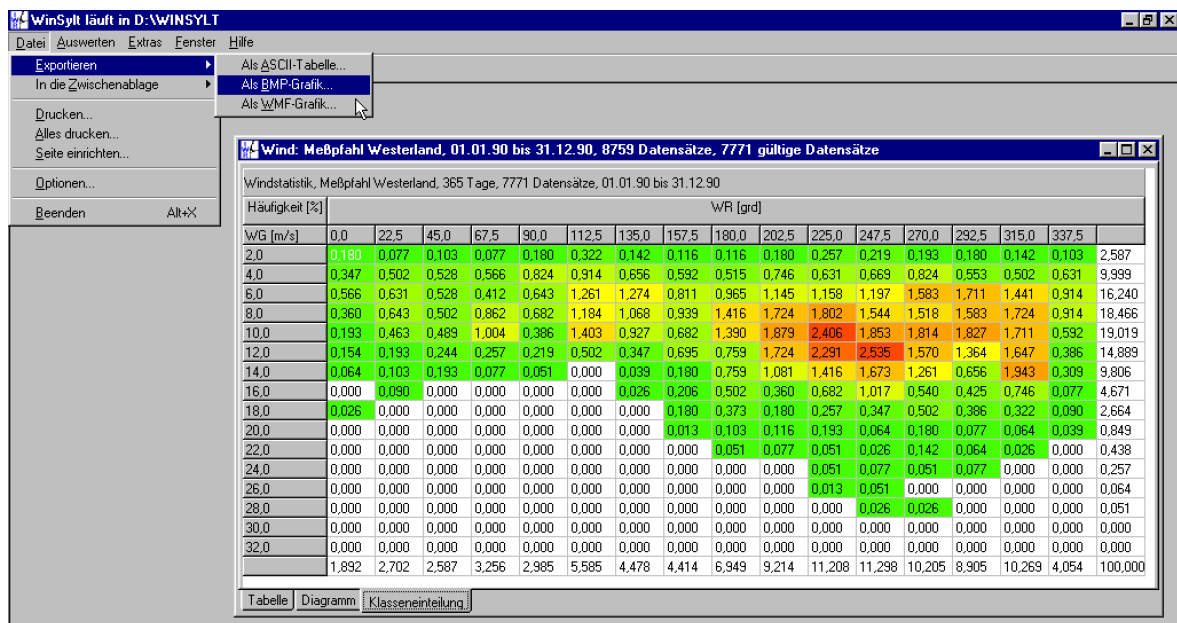



Abb. 18: Klasseneinteilung des Windes am Meßpfahl Westerland

Die Darstellung der Diagramme, Datentabellen und Häufigkeitsverteilungen sowie die möglichen Übergabefunktionen gelten in Analogie auch für die Wasserstands- und Seegangsdaten.

Ein weiterer Menüpunkt ist die Berechnung der korrelierten Seegangszeitreihen auf der Basis der in Kap. 5.1 vorgestellten Wind-Wellen-Korrelation unter Verwendung der Wind- und Wasserstandsdaten am Meßpfahl Westerland. Des weiteren können aus einer Windzeitreihe oder –statistik die Seegangsstatistiken korreliert werden. Über diese Funktion werden die zugehörigen Seegangsstatistiken aus den modifizierten Windstatistiken, auf der Basis der Varianten, korreliert.



Zur Berechnung des Einflusses möglicher Veränderungen innerhalb der Profile wurde ein Profilbetrachter (vgl. Abb. 19) entwickelt, der es ermöglicht, die Profile zu visualisieren und zu modifizieren. Dabei ist es möglich, jeden Punkt im Profil mit der „Maus“ durch Auswahl zu verschieben und die Profildatei zu speichern.

Die in Kap. 3 vorgestellte Methodik wird hier als Modellkette innerhalb des Programmpakets ersichtlich. Die notwendigen Energiefluß- und Sedimenttransportberechnungen zur Bilanzierung der Sedimente entlang der Profile und Westküste der Insel Sylt wurden in  WinSylt implementiert.

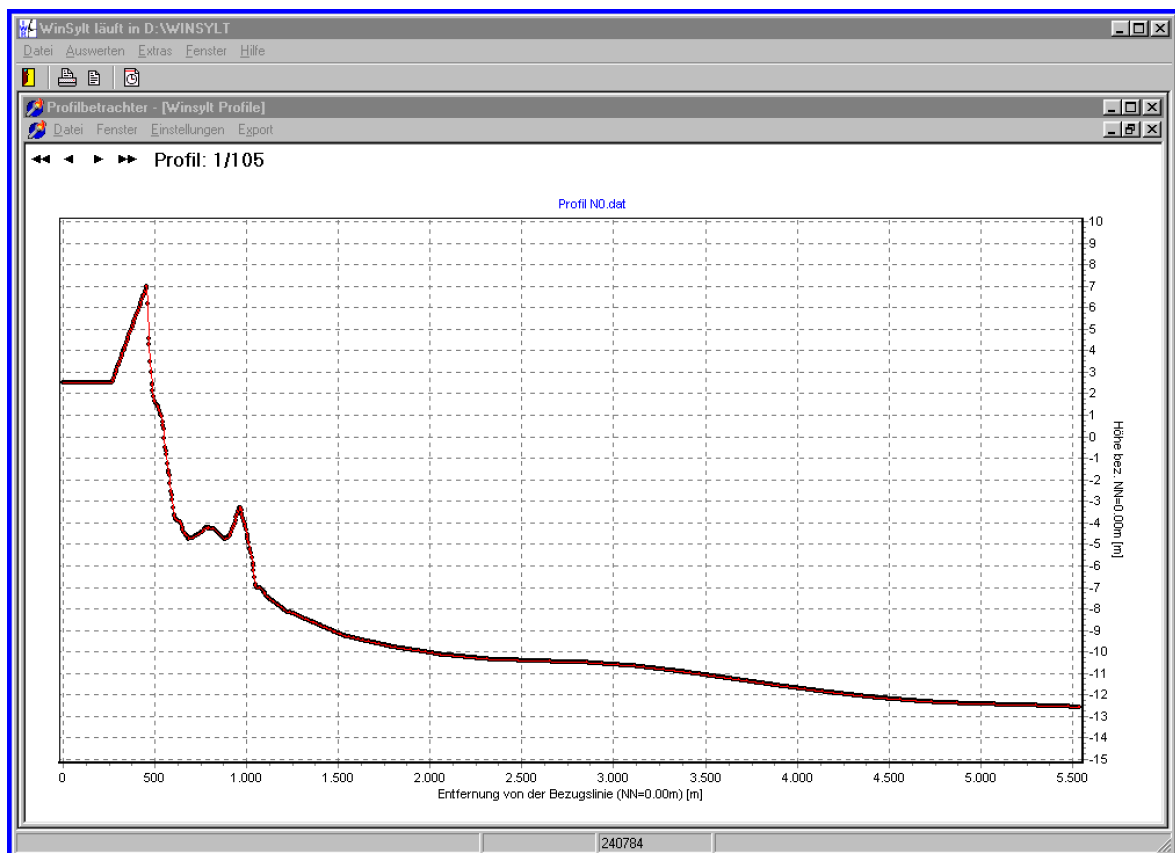


Abb. 19: Profilbetrachter zur Ansicht und Veränderung der Profile

Im folgenden wird das Eingabefenster für den Energiefluß erläutert. Die Eingabe für die Berechnung und die Bilanzierung der Sedimenttransportkapazitäten erfolgt in Analogie dazu. In Abb. 20 wird deutlich, daß das Eingabefenster in „Profil“, „Wasserstandszenarien“, „Seegangsdaten“ und „Berechnung“ unterteilt ist. Die Kategorie „Profil“ behandelt alle Aspekte, die die Auswahl der zu berechnenden Profile betreffen.

## „Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:

### Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt

Es ist zum einen möglich, nur ein einzelnes Profil zu berechnen, wobei der Anfangs- und Endpunkt in Gauß-Krüger-Koordinaten und der zugehörige Winkel des Profils angegeben werden. Zum anderen wird dem Benutzer die Auswahl mehrerer Profile in einer Profilliste ermöglicht, die in einer Profillistendatei gespeichert werden. Diese Auswahl ist für die Berechnungen im Batchbetrieb von großem Nutzen.

Unter dem Punkt „Wasserstandsszenarien“ ist es möglich, den Wasserstand für den Batchbetrieb in äquidistanten Schritten zu erhöhen oder nur einen Wasserstand anzugeben.

The screenshot shows the 'Energieflußparameter' dialog box with the following settings:

- Tab: Statistik
- Einzelereignis:  (selected)
- Hm0 [m]: 5,0
- I02 [sec]: 3,0
- Thetam [°]: 0,0
- Statistik:  (selected)
- Statistik file: 1086\_0997.txt
- Wst.-Statistik: wststat.txt
- Aus Zeitreihe:  (not selected)
- Bgjendatei: B2&c.bin
- Von: Montag, 1. September 1986
- Bis: Dienstag, 30. November 1999
- Zeitraum: Bis Zeitraumende
- Intervall [h]: 4
- Wasserstand:  aus Tidedatei (selected)
- Wst.-Statistik:  aus Wst.-Statistik (not selected)
- Ausgabedatei: D:\WinSylt\Ergebnis\

Abb. 20: Eingabefenster des Energieflusses für die Profile

Über die Gruppe „Seegangsdaten“ (Abb. 21) werden alle Parameter des Seegangs definiert. Es ist möglich, sowohl Einzelereignisse, Statistiken und Zeitreihen des Seegangs zu berechnen. Für die Berechnungen werden die

Wellenhöhe ( $H_{m0}$ ), die Wellenperiode ( $T_{02}$ ) und der Wellenanlaufwinkel benötigt. Diese Parameter liegen sowohl in den Statistiken als auch für die Zeitreihen vor.

Für die Berechnung des Energieflusses anhand von Statistiken wird eine zugehörige Wasserstandsstatistik benötigt, damit nicht nur der mittlere Wasserstand, sondern ein zugehöriger Mittelwert des Wasserstands für eine Wellenhöhe verfügbar ist. Bei der Berechnung unter Verwendung von Zeitreihen kann entweder auf die Wasserstandsstatistik oder auf die zugehörige Zeitreihe des Wasserstands zurückgegriffen werden. Zusätzlich kann das Zeitintervall für die Seegangsdaten festgelegt werden. Der Unter-

punkt „Berechnung“ beinhaltet die verschiedenen Methoden, nach denen die Berechnung des Energieflusses vorgenommen werden kann. In dieser Version werden die Energieflußansätze nach:

- Tucker,
- erweiterter Tucker,
- Thornton & Guza und
- Battjes & Janssen

unterstützt (Ansätze vgl. Partensky et al. 1988 sowie Kohlase et al. 1994).

Durch die Eingaben im Auswahlmenu werden die Ergebnisdaten automatisch in den zugehörigen Pfaden und Dateien auf der Festplatte gespeichert. Die berechneten Sedimenttransportkapazitäten entlang der Profile können in einem Punkt entlang der Küste (über alle Profile) bilanziert werden.

## 6. Bewertung ausgewählter Bauwerke

Die im Teilprojekt „Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt“ erzielten Ergebnisse (Kap. 5) haben das überraschende Ergebnis gezeigt, daß sich die jährlich zu erwartenden Sedimentverluste an der Westküste der Insel Sylt - unter den angenommenen Klimaimpaktszenarien (Kap. 4) - nicht signifikant verändern werden. Dieses wurde in Kap. 5.4 im einzelnen dargestellt. Es besteht daher zunächst kein Grund, die Aussagen des Fachplans, daß Strandersatzmaßnahmen die technisch sinnvollste und kostenmäßig günstigste Maßnahme für die Insel Sylt darstellen, in Zweifel zu ziehen.

Diese für den künftigen Küstenschutz wichtige Aussage wird dadurch gestützt, daß der Fachplan (ALW 1985) und dessen Fortschreibung (ALW 1997), unter wissenschaftlicher Begleitung aller damals wichtigen Hochschulinstitute (Universität Hannover, Universität Kiel, Technische Universität Braunschweig), aufgestellt wurde. Das für den Küstenschutz zuständige AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ALW) Husum (heute AMT FÜR LÄNDLICHE RÄUME, ALR) hatte zusätzlich einen renommierten wissenschaftlichen Koordinator eingeschaltet.

In die Untersuchungen sind also vielfältige Erfahrungen zum Küstenschutz der Insel Sylt eingeflossen. Es ist festzuhalten, daß alle in Frage kommenden technischen Möglichkeiten eingehend bewertet wurden. Mögliche Optionen für den Küstenschutz müssen daher auf der Grundlage des Fachplans und seiner Fortschreibung diskutiert werden. Gleichwohl sollen die technischen Möglichkeiten hier nochmals angeschnitten werden, da die Fülle früherer Untersuchungen nicht allgemein bekannt ist.

In Abb. 22 sind Maßnahmen für den Schutz einer sandigen Brandungsküste in schematischer Form wiedergegeben. Sie umfassen Baumaßnahmen des aktiven und passiven Küstenschutzes und vielfältige Kombinationen. Es ist bekannt, daß alle Versuche, die Westküste durch passive Bauwerke zu stabilisieren (Beispiele sind vor allem die Ufermauer Westerland, die Tetrapodenlängswerke und das Querwerk bei Hörnum, Schade 1991) letztlich fehlgeschlagen sind.

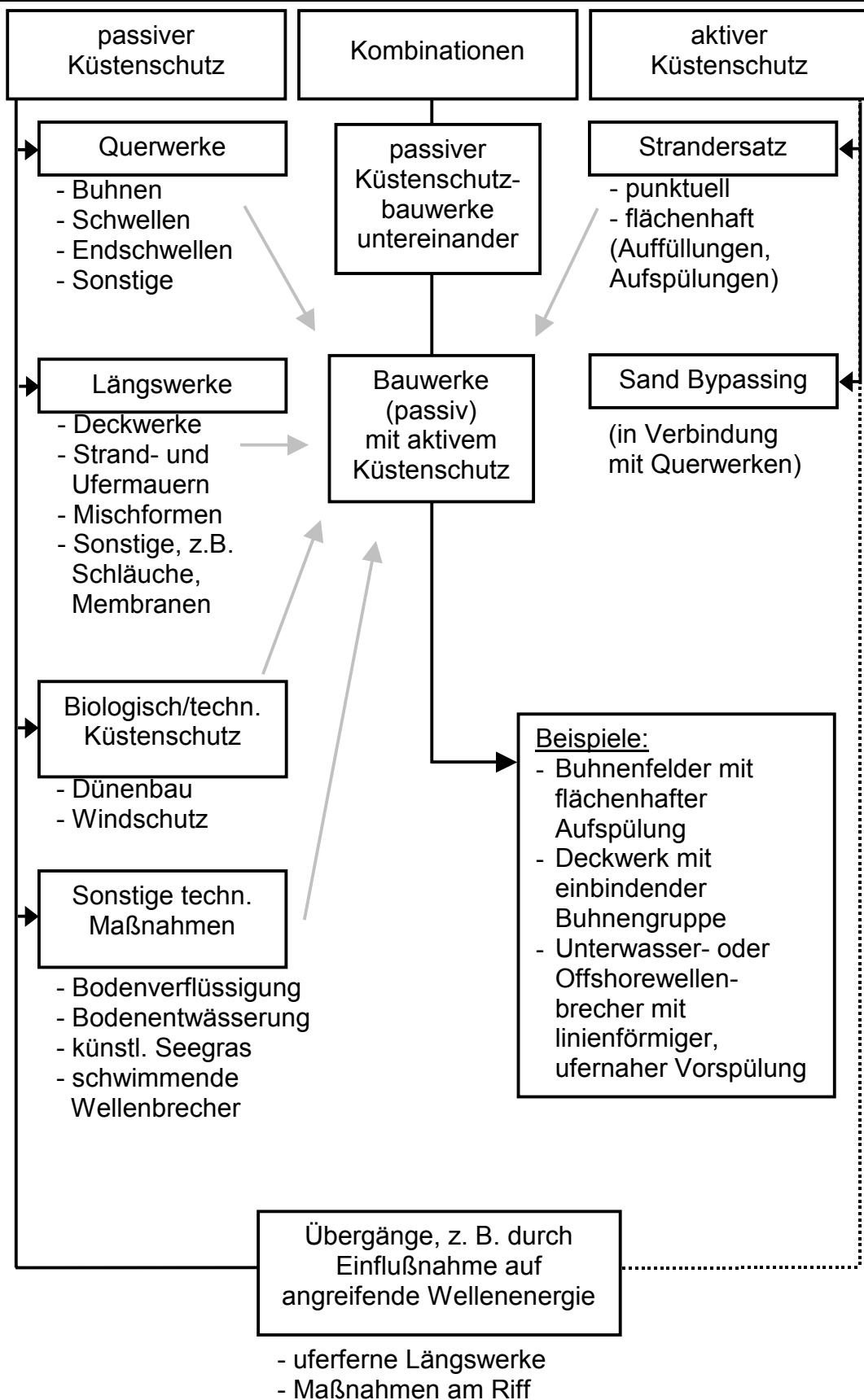


Abb. 22: Überblick über technische Maßnahmen zum Schutz sandiger Küsten (Kohlhase 1999)

In den 70er Jahren wurden aus diesem Grund erste Versuche mit Strandersatzmaßnahmen durchgeführt. Der Begriff zeigt schon, daß die entstandenen Sedimentverluste ersetzt werden müssen. Strandersatzmaßnahmen die, wie Abb. 22 zeigt, in verschiedener Weise ausgeführt werden können, werden in der ganzen Welt erfolgreich angewendet, und Sylt stellt somit keinen Einzelfall dar. Passive Bauwerke kommen aus Gründen des Sedimenthaushalts primär als stützende Maßnahmen in Verbindung mit Strandersatzmaßnahmen in Betracht mit dem Ziel, die Verweilzeiten des künstlichen Strandes zu verlängern und durch Verlängerung der Vorspülintervalle die Kosten für den Strandersatz zu verringern. Anwendungen für passive Küstenschutzwerke ergeben sich ferner aus Aufgaben des (lokalen) Objektschutzes.

Die sehr differenzierten Untersuchungen zu technischen Alternativen für den künftigen Schutz der Westküste der Insel Sylt, wie sie in der damaligen Projektgruppe und vom ALR durchgeführt wurden, sind von folgenden Rahmenbedingungen ausgegangen:

- weitestgehender Erhalt der Küstenlinie.
- Vermeidung negativer Einflüsse auf die Nachbarbereiche.
- Minimierung von Beeinträchtigungen der Umwelt.
- Erhalt des Erscheinungsbildes der Insel.
- Akzeptanz für den Tourismus.

Diese Rahmenbedingungen sind noch heute gültig. Unter den genannten Vorgaben wurden seinerzeit im Verbundforschungsvorhaben „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ (BMFT 1994) vor allem die folgenden technischen Maßnahmen in einer Projektgruppe diskutiert:

- Maßnahmen am Riff,
- Bühnen oder Rauheitselemente zwischen dem Riff und dem Strand (Riff – Rinne – System),
- Strandersatzmaßnahmen in verschiedener Ausführungsformen,
- Biotechnische Maßnahmen,

- Geotextilien als Objektschutz oder als Membran im Vorspülkörper,
- Endschwellen in unterschiedlicher konstruktiver Ausführung und Anordnung.

Hieraus läßt sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten ableiten.

Die in der damaligen Projektgruppe gewonnenen Erkenntnisse zeigen, daß eine Bewertung von Küstenschutzalternativen durch z. B. eine Kosten/Nutzen-Untersuchung schwierig ist, weil aufgrund der großräumigen Einflüsse und Effekte (insbesondere Lee-Erosion) noch nicht einmal die Kosten exakt ermittelt werden können. Selbst die viel einfacheren Bewertungen im Sinne einer Nutzwertanalyse führten zu großen Schwierigkeiten und durchaus sehr unterschiedlichen Ergebnissen innerhalb der Gruppe. Gleichwohl ergab die Auswertung eindeutig, daß für den künftigen Küstenschutz die Vorteile weicher Lösungen gegenüber starren Bauweisen überwiegen und, vor allem, daß Strandersatzmaßnahmen unverzichtbar sind, da die Insel Sylt ein offenes System ist.

Lokale Sicherheiten, im Sinne eines Objektschutzes, müssen jedoch unabhängig hiervon gegeben sein. Küstenlängstransport und Küstenquertransport sind dabei in gleicher Weise von Bedeutung.

Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge soll hier auf die Grundlagen der Transportvorgänge einer sandigen Brandungsküste noch einmal kurz eingegangen werden (vgl. Kohlhasse 1991a).

Der Sedimenthaushalt wird durch die zeitliche und räumliche Veränderlichkeit der angreifenden Kräfte beeinflusst. Dazu gehören:

- der Seegang,
- die Wasserstände, Tide und Sturmfluten,
- die Strömungen und
- der Wind

sowie deren Wechselwirkungen mit den Sedimenten.

Für die Berechnung des Sedimenttransportes ist die formale Trennung in Küstenlängstransport und Küstenquertransport praktikabel, wenngleich diese Komponenten in der Natur nur überlagert auftreten.

Betrachtet man den Quertransport, d. h. eine Belastungssituation des Strandes durch normal zum Strand anlaufende Wellen, werden sich in Abhängigkeit von den Sedimenteigenschaften und der Art und Dauer der Beanspruchung, Strandprofile, wie in Abb. 23 schematisch dargestellt, einstellen.

Wegen der Veränderlichkeit der äußeren Belastungen kann aus Abb. 23 gefolgert werden, daß sich unter den angenommen Bedingungen ein stabiles Profil (Gleichgewichtsprofil) nicht ausbilden wird (dieser Zustand kann allenfalls in einem Modell bei ausreichend langer Versuchsdauer erzeugt werden). Da die Natur einer stetigen Veränderung unterliegt, wird sich vielmehr ein „dynamisches“ Gleichgewichtsprofil einstellen, da die küstenlängsgerichteten Transporte gedanklich ausgeschlossen wurden. Bereiche mit Erosion und Akkumulation innerhalb eines Profils werden sich langfristig ausgleichen. Wichtig ist die Aussage, daß auch bei extremen Seegangsbedingungen mit hohen Wasserständen z. B. Sturmfluten der Sand im Profil bleibt.

Aus der Sicht dynamischer Querprofile sind die Winterstürme 1999/2000 und deren Folgen zu bewerten. Bei den küstennormal anlaufenden Wellen resultieren aus Abbrüchen keine Verluste. Die Schäden an Dünen und am Kliff sind zwar besonders deutlich, aber der Sand verbleibt grundsätzlich im Profil, solange man eine Längsströmung und Transport ausschließt.

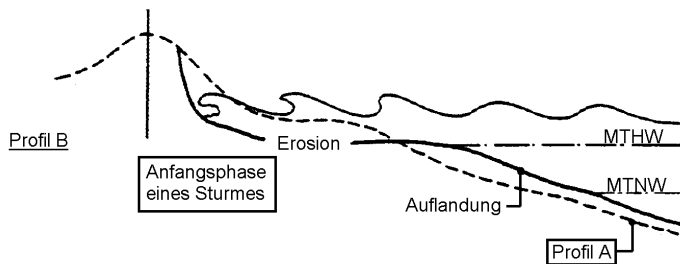
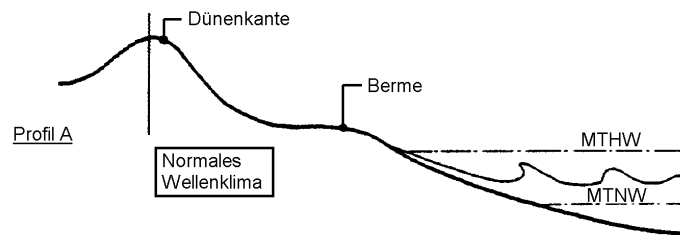
Trotz der auffälligen, sichtbaren Schäden, wie sie nach einem Sturmereignis auftreten, können durch die Küstenquertransporte allein also keine Aussagen zu tendenzieller Erosion oder Akkumulation abgeleitet werden. Diese können nur durch die Überlagerung des Quertransportes mit dem Küstenlängstransport abgeleitet werden.



**Vorstellung:**

normal auf den Strand  
anlaufende Wellen  
erzeugen ein stabiles Profil

→ Gleichgewichtsprofil



**Natur:**

Veränderlichkeit der  
äußeren Kräfte

→ dynamisches  
Gleichgewicht

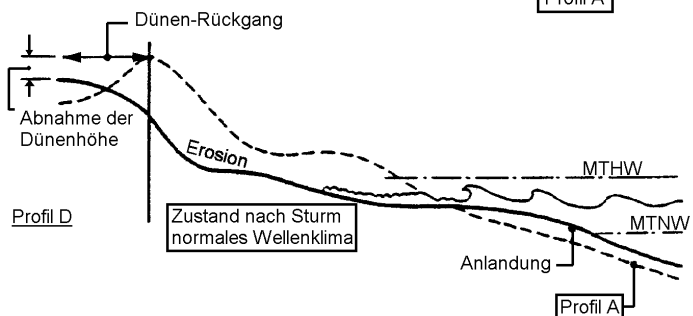
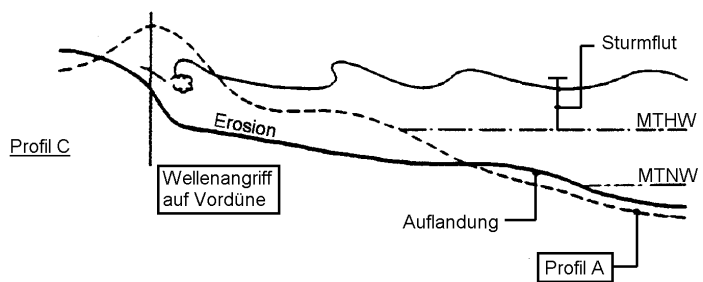


Abb. 23: Sedimenthaushalt einer Brandungsküste – Quertransport (Onshore / Offshore) – (Kohlhase 1991a, nach CERC 1984)

Der Längstransport entsteht (vgl. Abb. 24) durch welleninduzierte Längsströmungen, verbunden mit Tideströmungen und großräumigen Küstenströmungen. Vor Sylt dominiert der welleninduzierte Strömungsanteil. Vor allem in der Brecherzone werden Sedimente aufgewirbelt und durch die resultierende Strömung küstenparallel verfrachtet. Diese Transportrichtung wirkt also dem Aufbau eines dynamischen Gleichgewichts im Profil entgegen.

Die Vergleiche zwischen Messungen in der Natur und Berechnungen innerhalb des Projekts haben ergeben, daß die verwendeten Ansätze in der Lage sind, die Wellenhöhen entlang eines Profils zu berechnen und die küstenlängsgerichteten Sedimenttransporte mit guter Genauigkeit zu quantifizieren. Die Transporte müssen aber als Transportkapazitäten ausgedrückt werden. Der Begriff Kapazität deutet an, daß die mathematische Formulierung die tatsächliche Verfügbarkeit der Sedimente unberücksichtigt läßt. Dennoch läßt sich eine generelle Aussage zum Sedimenttransport aus diesem Ansatz ableiten, solange die Grenzen und Vereinfachungen berücksichtigt werden.

Aus den berechneten Längstransporten kann der Sedimentdurchsatz ermittelt werden, woraus allerdings keine direkten Rückschlüsse auf Erosion oder Akkumulation der Küstenlinie gezogen werden können. (Dies wird vielfach bei der Ermittlung von Erosions- und Akkumulationsbereichen auf der Basis von Vermessungen übersehen.)

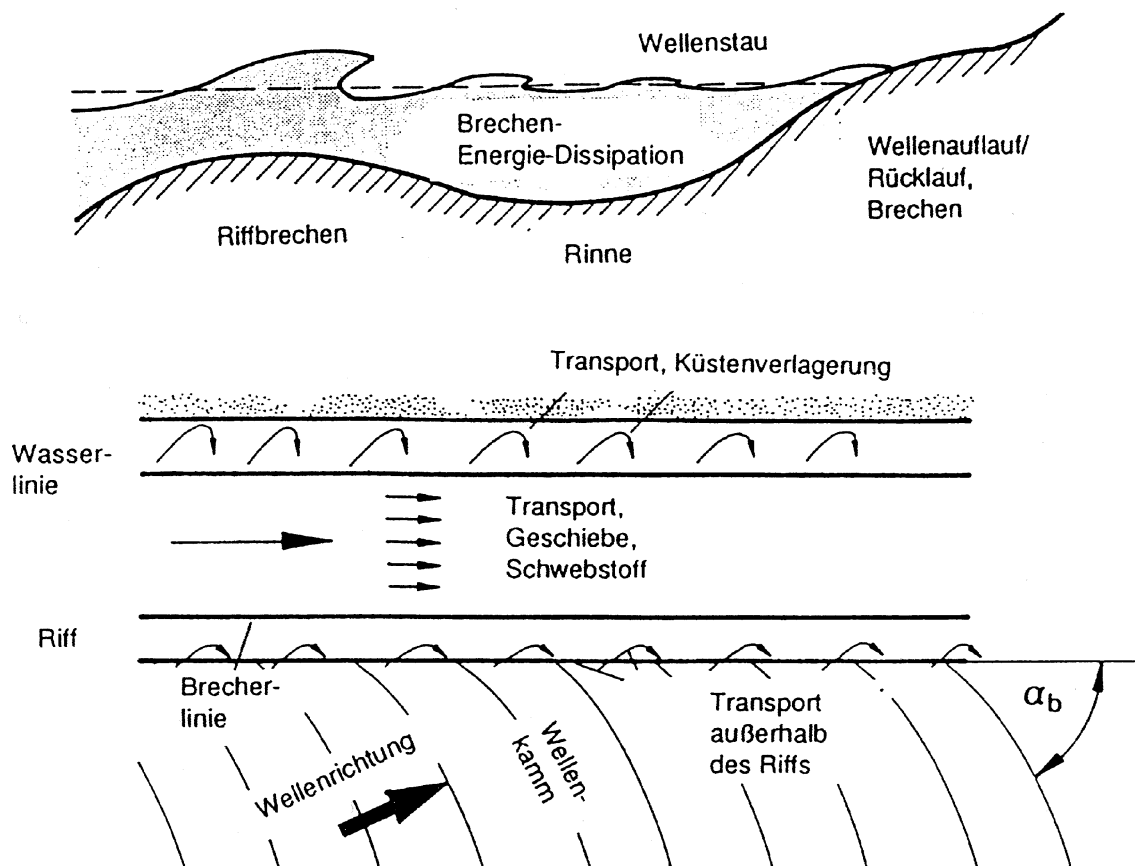


Abb. 24: Sedimenthaushalt einer Brandungsküste – Längstransport – (Kohlhase 1991b)

Küstenveränderungen können vielmehr nur aus den Gradienten der Transporte zwischen zwei Profilen ermittelt werden, da primär der Gradient und weniger der absolute Betrag der Sedimenttransporte für Küstenrückgänge oder –zuwächse verantwortlich ist.

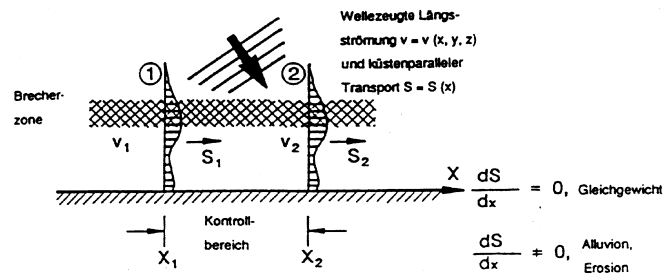
Abb. 25 verdeutlicht, daß der Einsatz von starren Bauwerken, selbst die geringen Längstransporte, schwerwiegende Folgen für das dynamische Gleichgewicht eines Strandes haben kann. Besonders deutlich werden die durch Bauwerke hervorgerufenen Veränderungen des Sedimenttransports an Querwerken, deren Sinn es ja ist, Sedimente zurückzuhalten. Das im Wellenschatten entstehende Defizit an Sedimenten, die Lee-Erosion, zeigt sich aber nicht nur an Querwerken, sondern auch an Deckwerken oder an uferfernen Wellenbrechern (Offshore-Wellenbrechern), da sich infolge der Schwächung der küstenparallelen, durch Seegang induzierten Strömungen im Bereich des Wellenschattens Sedimente ablagern. Das Maß der Ablagerungen, die sich als Salient (Höft) oder als vollständiger Tombolo zeigen, ist abhängig von der Geometrie des Offshore-Wellenbrechers und der Transmission der Wellen.

Wenn Bauwerke konventioneller Art (s. Abb. 22, passiver Küstenschutz) als ergänzende Maßnahmen in Betracht gezogen werden, ist also dafür Sorge zu tragen, daß die grundsätzlich unvermeidliche Lee-Erosion so weit beherrscht wird, daß der angestrebte positive Effekt eines Bauwerks nicht durch eine Belastung der Nachbarabschnitte wieder zunichte gemacht wird.

Wie schwierig dieses ist, zeigen vor allem die Erfahrungen mit dem Tetrapodenquerwerk in Hörnum, das den nördlich gelegenen Strandbereich der Westküste Sylts zwar ganz unstrittig stabilisiert, auf den Bereich der Hörnum-Odde aber negativ gewirkt hat. Schon während des Projekts „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ wurde darüber diskutiert, ob es nicht besser sei, daß Querwerk zumindest zu verkürzen, um den Einfluß der Lee-Erosion zu verringern.

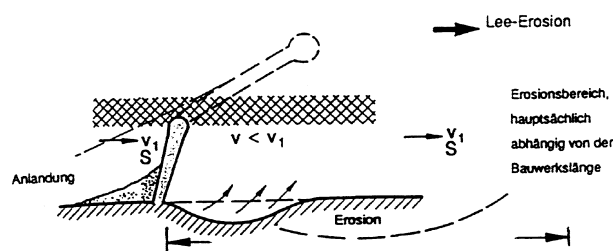
Es kann aus diesem Beispiel aber nicht gefolgert werden, daß starre Bauwerke in offenen Systemen überhaupt nicht zum Einsatz kommen können. Als sogenannte „Terminal groynes“ (Buhnen, die einen Küstenabschnitt begrenzen) haben sie z. B. den Zweck, den Sedimentaustritt an den Rändern eines offenen Systems

### Natürliche Bedingungen:



### Bauwerkseinflüsse:

Lee-Erosion (Beispiel Buhne, Wellenbrecher)



Tombolo-Effekt (Offshore-Wellenbrecher, Künstliches Riff)

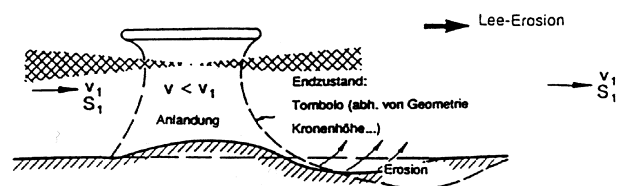


Abb. 25: Sedimenthaushalt einer Brandungsküste – Einflüsse von Bauwerken – (Kohlhase 1991b) zu vermindern und damit die Verweilzeiten der Sedimente zu erhöhen. Weiterhin können Bauwerke als Objektschutz lokal Sicherheiten für gefährdete Abschnitte gewährleisten.

Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts haben die früheren, im ALR Husum laufenden Untersuchungen, bestätigt, daß Strandersatzmaßnahmen die wirkungsvollste Küstenschutzkomponente für die Insel Sylt darstellen.

Als stützende Maßnahmen kommen, aus Sicht der Projektbearbeiter, primär Maßnahmen am Riff oder im Offshore-Bereich sowie an den Inselenden als wirkungsvolle Ergänzung zu den Strandersatzmaßnahmen in Betracht. Aber die Erfahrungen mit den jüngsten Sturmfluten zeigen auch, daß lokal Objektschutzmaßnahmen sinnvoll sein können.

Das Riff hat im Gesamtsystem, wie in diesem Bericht ausgeführt wurde, eine besondere Bedeutung. Es beeinflusst maßgeblich das Brechen der Wellen. Die Schwächung der Wellenenergie schon vor Erreichen des Strandes hat einen unmittelbaren Einfluß auf die Belastung der Dünen und Kliffs.

Es hat sich gezeigt, daß der Wasserstand der maßgebende Einflußfaktor auf die Energiedissipation über dem Riff ist. Mit steigendem Wasserstand nimmt dessen seegangsdämpfende Wirkung zwar ab (und die Belastungen des Strandes durch Seegang entsprechend zu), im zeitlichen Mittel gesehen ist der Einfluß des Riffs auf die aus dem Energieeintrag resultierende Sedimentbewegung aber beträchtlich.

Hierauf wurde bereits in der Riffstudie (Partenscky et al. 1988) hingewiesen, auch wurden erste, später modifizierte Ansätze entwickelt, mit denen die Energiedissipation der Wellen für das Brandungsgeschehen der Insel Sylt berechnet werden kann.

Natürlich liegt es auf der Hand, die Brandungsvorgänge auf der Insel Sylt mit denen einer Südseeinsel, die durch natürliche Korallenriffe geschützt ist, zu vergleichen. Eine direkte Übertragung der Situation einer Südseeinsel auf die Verhältnisse vor Sylt ist aber aus folgenden Gründen nicht möglich:

- das Brandungriff vor Sylt entsteht vor allem aus Sedimentumlagerungen innerhalb eines Profils in einem dynamischen Regelkreis zwischen Seegang, Strömungen und vorhandenem geologischen Substrat.
- ein Korallenriff ist im Gegensatz zu einem Brandungriff lagestabil. Die weißen Strände im Schutzbereich der Riffe werden größtenteils durch Korallenbruch gebildet, wodurch durch Strömungen verloren gehendes Strandmaterial ständig ergänzt wird.

Auf der Grundlage unseres heutigen Wissensstandes sind wir weit davon entfernt, die Wechselwirkungen zwischen einem Brandungriff und der äußeren Beanspruchung rechnerisch zu erfassen und die Veränderungen des Riffs in ihrem zeitlichen Verlauf mit theoretischen Ansätzen zu simulieren. Nach den Vermessungen, die für die Westküste Sylts durchgeführt wurden (ALR 2000), sind die räumlich/zeitlichen Umlagerungen beträchtlich.

Wenngleich also die wellendämpfende Wirkung eines Riffs überzeugt wird, ist äußerste Vorsicht geboten, die Lage des Riffs durch starre Bauwerke zu fixieren, d. h. in einen dynamischen Prozeß einzugreifen, den man nicht beherrscht.

Es waren keineswegs allein Kostengründe, daß die Anfang der 60er Jahre am Franzius-Institut der Technischen Universität Hannover durchgeführten Modellversuche zu Unterwasser-Wellenbrechern vor Sylt nicht in die Küstenschutzpraxis umgesetzt wurden.

Die seinerzeit im Auftrage einer namhaften Baufirma untersuchten Betonelemente waren im übrigen in ihrer Geometrie ähnlich wie in den letzten Jahren immer wieder diskutierte Elemente des sog. „Henkelriffs“.

Das Henkelriff scheint zunächst eine Variante für denkbare Maßnahmen am Riff zu sein, ist vom Grundsatz her aber ein konventioneller Unterwasserwellenbrecher (und keineswegs ein „Strömungselement“, dessen Wirkung auf eine optimierte Form zurückzuführen sei, wie in Firmenprospekten ausgeführt wird). Wie an dieser Stelle nicht im einzelnen nachgewiesen werden kann, ist die Form des künstlichen Riffelements für die eigentliche Wirkungsweise eines Unterwasserwellenbrechers in Bezug auf die Energiedissipation und auf den Sedimenttransport im Vergleich zu anderen Parametern von untergeordneter Rolle.

Das Henkelriff ist auch nicht als dauerhafte Lösung zur Stabilisierung der Westküste Sylts zu sehen, da, abgesehen von den Risiken, ein alleiniger Küstenschutz ohne zusätzliche Materialzufuhr in das offene System der Insel mit einem starren Bauwerk an einer Brandungsküste mit negativer Sedimentbilanz aufgrund der physikalischen Grundlagen nicht möglich ist. Eine positive Einflußnahme auf die Sedimentdynamik ist lediglich lokal möglich (vgl. hierzu Kohlhasse et al. 1999).

Ein Brandungsriff, wie vor der Insel Sylt, ist ein dynamisches Gebilde, das sowohl in der Lage als auch in der Höhe variiert. Eine Fixierung der Lage des Riffs durch Betonelemente wird zu ernststen Folgen, z. B. durch flächenhafte Erosionen und Rinnenbildung führen, die derzeit nicht abzuschätzen sind.

Zu erwartende negative Wirkungen durch das Henkelriff würden gegebenenfalls auch Kosten für die Beseitigung der 20 t schweren Betonelemente nach sich ziehen.

Unter diesen Umständen sind weiche Lösungen aus Geotextilien für eine Riffverstärkung zu favorisieren. Für die erfolgreiche Erstellung eines künstlichen Riffs mit geotextilen Baustoffen gibt es bereits einige gute Beispiele. So wurden vor Sylt für eine Riffverstärkung bei Kampen geotextile Großsäcke eingesetzt (Kohlhase 1997). In Australien wurde an der Goldcoast aus Küstenschutzgründen und für die Verbesserung der Surfbedingungen ein Riff aus geotextilen Megacontainern erstellt (GCCC 2000).

Verpackte Baustoffe haben in der Anwendung im Küstenschutz eindeutige Vorteile gegenüber konventionellen Bauweisen. Es ist möglich, örtlich anstehenden Sand bei Schonung anderer Ressourcen wie Steine, Beton oder Stahl in Geotextilien zu verpacken (Kohlhase 1997, Kohlhase 1999). Geotextile Containerlösungen können inzwischen, wie erst kürzlich beim Bau des vorgenannten Artificial reef in Australien unter Beweis gestellt wurde (GCCC 2000), mit einer Größe von bis zu 25 m und einer Breite von 5,6 m mit einem Gesamtgewicht von 500 t gefertigt und verlegt werden (NAUE 2000).

Ein großer Vorteil verpackter Baustoffe gegenüber starren Konstruktionen aus Beton und Stahl ist deren Flexibilität. Auch lassen sich geotextile Elemente vergleichsweise einfach durch Zerstörung entfernen. Treten im Bereich des Bauwerks unerwünschte Sedimentumlagerungen durch Kolkbildung auf, so kann das Bauwerk diese Veränderungen durch Verformung zerstörungsarm ausgleichen. Diese Eigenschaften sind auch der Grund dafür, daß das geotextile Deckwerk, das als Objektschutz für das Haus Kliffende geplant wurde (Nickels u. Heerten 2000) in seiner Funktion während der Winterstürme 1999/2000 nicht versagt hat.

Die jüngsten schweren Sturmfluten haben gezeigt, daß geotextile Bauweisen in der Lage sind, auch extremen Beanspruchungen zu widerstehen, wenngleich an dem in Abb. 26 gezeigten Bauwerk auch Schäden erkennbar sind. Die Schäden zeigen, daß die seinerzeit verwendete Membranbauweise technisch noch verbessert werden kann. Bei „geotextilen Verbundbaustoffen“ muß insbesondere der flächige Verbund der einzelnen Komponenten verbessert werden.

Treibgut z. B. Kantholz etc. kann Schäden am geotextilen Hüllstoff verursachen, die eine nicht unbedingt einfache Reparatur zwingend notwendig machen. Es

müssen künftig noch bessere Lösungen angeboten werden, die diese Schadstellen innerhalb kurzer Zeit schließen, um das mögliche Versagen des Bauwerks zu verhindern.



Abb. 26: Geotextiles Deckwerk vor dem Haus Kliffende / Kampen (Zustand: Feb. 2000)

Bewähren sich Bauwerk aus Geotextilien langfristig, können diese auch noch nachträglich in ein konventionelles Bauwerk überführt werden und mit Schuttsteinen bedeckt werden (Kohlhase 1997). Damit werden Risiken aus planerischen Unsicherheiten (z.B. Folgen für das Umfeld) vermieden.

Mögliche Nachteile gegenüber konventionellen Bauweisen liegen in der mangelnden Akzeptanz insbesondere in Hinblick auf den Umweltschutz, im traditionellen, stark konstruktiv ausgerichteten Denken und Handeln der planenden Ingenieure und damit einhergehend in der Ansicht, daß diese Maßnahmen häufig zu wenig technisch sind.

Als Variante für die heute auf Sylt praktizierten Strandersatzmaßnahmen wird, durch die Medien unterstützt, zunehmend das Prinzip der Strandentwässerung diskutiert. Das Wirkungsprinzip der Stranddrainage entspricht dem eines Querwerks (Bühne) mit den Vorteilen, daß eine optimale Anpassung an das Natur- und



Landschaftsbild möglich ist. Ebenso können durch eine Online-Steuerung die negativen Lee-Effekte minimiert werden.

Das Funktionsprinzip einer Stranddrainage basiert auf der Entwässerung des Bodens. Die Erosivität des Strandes wird herabgesetzt; küstenparallel verdriftete Sedimente können im entwässerten Bereich örtlich zurückgehalten werden. Das physikalische Prinzip einer Stranddrainage ist schon seit 1948 bekannt und wurde von verschiedenen Firmen nahezu weltweit, also auch für Sylt, patentiert. Beispiele zeigen, daß die Systemlängen auf einige hundert Meter begrenzt werden müssen. Damit sind Stranddrainagen denkbare Maßnahmen vornehmlich für den Objektschutz. Trotz einiger guter Referenzobjekte aus dem Ausland (BMS 1992) ist zu beachten, daß die Funktion einer Stranddrainage unter den gegebenen Seegangs- und Wasserstandsverhältnissen vor Sylt oder vergleichbaren Bedingungen noch nicht getestet wurde und die Wirkungsweise und vor allem die Wirtschaftlichkeit unter den Randbedingungen einer Hochenergieküste nicht nachgewiesen ist. Bei näherer Betrachtung der nicht immer umfassenden Schrifttumshinweise ist davon auszugehen, daß das Vorspülen von Strandmaterial derzeit wirtschaftlicher und räumlich flexibler ist.

Schon die Untersuchungen in der Projektgruppe des Vorläuferprojekts des BMFT „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ (BMFT 1994) haben gezeigt, daß „Terminal groynes“ bzw. sog. „Endschwellen“ im Norden und Süden von Sylt in eine Planung stützender Maßnahmen mit einbezogen werden sollten. Die Endschwellen sollen die Verweilzeiten der Sedimente im System erhöhen, indem der Austrag von Sedimenten in die Tiefs bei Hörnum und List und damit die „echten“ Verluste vermindert werden. Da diese Maßnahme ebenfalls nur einen stützenden Charakter hat, sind auch mit dieser Variante Strandersatzmaßnahmen unumgänglich, da im System weiterhin „echte“ Verluste auftreten. Die Verlustmengen können aber zum Teil reduziert und somit auch die Vorspülmengen verringert werden.

Die Auswirkungen von Endschwellen auf die großräumige Hydro- und Morphodynamik sind über numerische und hydraulische Simulationsmodelle nur sehr eingeschränkt abzubilden, so daß ein Versuch im Naturmaßstab wünschenswert wäre. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und in Übereinstimmung mit

den Planungen des ALR Husum bietet es sich an, die Auswirkungen einer Endschwelle ggf. zunächst am nördlichen Inselende zu untersuchen. Dabei sollte darauf geachtet werden, daß der Einfluß der Endschwelle auf die Strömungsverhältnisse und damit auf den Sedimenttransport kontinuierlich beobachtet werden muß. Die Erfahrungen könnten dann für den technisch schwierigeren Bereich im Süden der Insel genutzt werden.

Die Projektbearbeiter schlagen vor, Endschwellen, wenn diese wirtschaftlich gebaut werden können, als geotextile Bauwerke in Kombination mit Vorspülungen im Unterwasserbereich des Strandes auszuführen. Negative Auswirkungen, die von den Schwellen verursacht werden können, sind wegen der zumindest teilweisen Unterbrechung der Sedimentbewegungen nicht auszuschließen, aber nur schwer oder gar nicht abschätzbar. Für eine Testphase sollte eine technisch einfache geotextile Lösung aus Säcken und/oder Großcontainern gewählt werden. Die Schwellen sollten bewußt als Versuchsbauwerke konzipiert werden mit der Option, sie im Falle von ungewünschten Nebeneffekten auf den Sedimenthaushalt außerhalb des Schutzbereiches wieder zu entfernen.

Die Sedimentverluste von rd. 2,0 Mio. m<sup>3</sup> während der Wintermonate 1999/2000, machen, obwohl sie nicht vollständig „echte“ Verluste sind, deutlich, daß unter den vorher angegebenen Vorgaben des Fachplans enorme Sedimentmengen (jährlich ca. 1 Mio. m<sup>3</sup>) benötigt werden, um die entstandenen Defizite auch in Zukunft auszugleichen. Dabei stellt sich natürlich auch die Frage, ob auch in Zukunft Vorspülmaterial (vgl. NOURTEC 1997) für Strandersatzmaßnahmen in ausreichender Menge und zu akzeptablen Kosten zur Verfügung stehen wird. Um so wichtiger wird es sein, stützende Baumaßnahmen in eine Planung einzu-beziehen.

Strandersatzmaßnahmen an der Westküste der Insel Sylt sind auch in Zukunft unverzichtbar. Im Rahmen der vorgenommenen Analysen ist aber deutlich geworden, daß insbesondere für die Bewertung von Maßnahmen am Riff bzw. im Offshore-Bereich und an den Inselenden weiterführende Untersuchungen und auch wissenschaftlich begleitete Versuche in der Natur notwendig sind. Diese Untersuchungen sollten auf die Minimierung der Gesamtkosten für den Küsten-

schutz der Insel Sylt gerichtet sein und unter den Aspekten der räumlichen Anordnung und der Ausführung dieser Baumaßnahmen diskutiert werden.

## 7. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsverbundes "Fallstudie Sylt" wurde am Institut für Wasserbau der Universität Rostock das Teilprojekt "Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt" bearbeitet. Die wesentlichen Arbeitsziele des Projekts waren:

- die Charakterisierung des großräumigen Seegangsklimas,
- die Untersuchung der Auswirkungen möglicher veränderter Randbedingungen auf das Seegangsklima,
- die Abschätzung der daraus resultierenden Veränderungen des Sedimenttransports
- die Bewertung ausgewählter Bauwerke aus wasserbaulicher Sicht unter dem Aspekt veränderter klimatischer Randbedingungen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden eine wesentliche Grundlage für die integrative Bewertung künftiger Küstenschutzmaßnahmen für die Insel Sylt innerhalb des Verbundvorhabens "Fallstudie Sylt".

Für die Charakterisierung des großräumigen Seegangsklimas sind lange Zeiträume signifikanter Seegangsdaten notwendig. Dazu werden seit Oktober 1986 Messungen des Seegangs bzw. der signifikanten Seegangparameter und seit Dezember 1987 Messungen des Windes vor Westerland durchgeführt. Die langzeitstatistische Auswertung und Bewertung der Seegangsdaten erfordert ferner kontinuierliche Zeitreihen, bei denen keine Datenlücken auftreten.

Da kontinuierliche Zeitreihen der Seegangsdaten in der Regel nicht vorliegen, muß zur Schließung dieser Datenlücken eine Wind-Wellen-Korrelation auf der Basis empirischer Gesetzmäßigkeiten aufgestellt werden. Die Verbesserung der Datenlage ermöglicht nun die großräumige und langfristige Charakterisierung des Seegangs vor Sylt. Die geschlossene Seegangszeitreihe und die daraus abge-

leitete Seegangsstatisik stellen die Grundlage zur Kalibrierung der Simulationsmodelle für den Sedimenttransport dar.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens "Fallstudie Sylt" aufgestellten Szenarien wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus den vorhandenen regionalisierten Klimamodellen und dem Schrifttum hergeleitet (vgl. Kap. 4).

Die klimatischen Veränderungen, die sich u. a. in veränderten Windverhältnissen zeigen, können nicht direkt in der Windzeitreihe, sondern nur in einer Windstatistik berücksichtigt werden. Die Wind-Wellen-Korrelation für Zeitreihen wurde deshalb auf Statistiken übertragen, so daß die Windszenarien in modifizierten Windstatistiken berücksichtigt und anschließend die zugehörigen Seegangsstatistiken berechnet werden konnten. Dabei wurde davon ausgegangen, daß die empirisch ermittelten Zusammenhänge zwischen Wind, Wasserstand und Seegang unter den angenommenen klimatischen Veränderungen gültig bleiben. Vergleichende Berechnungen zwischen Zeitreihen und Statistiken haben ergeben, daß der maximale Fehler zwischen den Berechnungsverfahren (Zeitreihe und Statistik) bei rd. 10 % liegt.


Aus den vorhandenen Seegangsparemtern kann der Energiefluß entlang eines Profils über verschiedene Ansätze berechnet werden. Vergleiche zwischen gemessenen und aus Energieflußmodellen berechneten Wellenhöhen an verschiedenen Positionen eines Profils haben sehr gute Übereinstimmungen ergeben.

Aus dem berechneten Energiefluß entlang eines Profils kann die Energie-dissipation und die daran gekoppelte Sedimenttransportkapazität direkt berechnet und anschließend in die küstenparallelen Komponenten (nach Norden und nach Süden) des Sedimenttransports zerlegt werden. Auf der Basis der küstenparallelen Sedimenttransportkapazitäten aller Profile entlang der Küste kann eine Gesamtbilanz des Sedimenttransports berechnet werden. Die Bilanzierung zeigte, daß der jährliche Sedimentverlust bei rd. 1 Mio. m<sup>3</sup> liegt. Die natürliche Variabilität des Sedimenttransports weist keine signifikanten Schwankungen auf. In guter Übereinstimmung mit den berechneten Transporten steht die Bilanzierung aus

zwei synoptischen Vermessungen (1992 – 1999), die einen Verlust von 1,078 Mio. m<sup>3</sup> ergeben hat.

Unter Verwendung der im Projekt entwickelten Modellkette konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Windszenarien und Szenarien mit veränderlichem (mittleren) Wasserstand auf den Sedimenttransport untersucht werden. Dabei wurden aus den modifizierten Windstatistiken unter Berücksichtigung des mittleren Wasserstands die zugehörigen Seegangsstatistiken und die korrespondierenden küstenparallelen Sedimenttransportkapazitäten berechnet. Die Bilanzierungen dieser Transporte entlang der Westküste der Insel Sylt zeigten ebenfalls keine signifikanten Veränderungen im Vergleich zur natürlichen Variabilität.

Aus diesen Ergebnissen kann aber nicht gefolgert werden, daß die bestehenden Schutzmaßnahmen nicht an mögliche veränderte Randbedingungen angepaßt werden müssen. Vielmehr weisen die Untersuchungen zum Einfluß steigender Wasserstände auf signifikante Veränderungen der Verteilung der Transporte im Querschnitt hin. Dabei nehmen mit steigendem Wasserstand die Transporte über dem Riff ab und im Strandbereich zu. Die Untersuchungen zeigen auch, daß mit steigendem Wasserstand der seegangsdämpfende Einfluß des Riffs – unter den getroffenen Annahmen - deutlich abnimmt.

Für alle vorgenannten Berechnungen wurde das am Institut für Wasserbau der Universität Rostock entwickelte Programmpaket  WinSylt verwendet. Das Programmpaket ermöglicht zum einen den Datenzugriff und die Visualisierung der Seegangs-, Wind- und Wasserstandsdaten sowie die daran gekoppelte Wind-Wellen-Korrelation und zum anderen die Berechnung des Energieflusses und des Sedimenttransports auf der Basis von Zeitreihen und Statistiken.

Mit den erarbeiteten Grundlagen können nun mögliche Optionen für die Küstenschutzplanung bewertet werden. Dabei ist nochmals festzuhalten, daß Veränderungen des Winds und des Wasserstands (Klimaszenarien, vgl. Kap. 4) keine signifikanten Veränderungen der resultierenden Sedimenttransporte innerhalb der nächsten 50 Jahre erwarten lassen. Es besteht daher zunächst kein Grund, die Aussagen des Fachplans Küstenschutz Sylt und dessen Fortschreibung (ALW 1985, ALW 1997), daß Strandersatzmaßnahmen die technisch sinnvollste

und kostenmäßig günstigste Maßnahme für den Schutz der Westküste der Insel Sylt darstellen, in Zweifel zu ziehen.

Die Insel Sylt ist ein offenes System mit negativer Sedimentbilanz. Es hat sich gezeigt, daß alle Versuche, die Westküste der Insel durch passive bzw. starre Bauwerke zu stabilisieren, letztlich fehlgeschlagen sind, da die Sedimentverluste durch Bauwerke allein nicht ausgeglichen werden können. Daher wurden in den 70er Jahren erste Versuche mit Strandersatzmaßnahmen durchgeführt, die, wie der Begriff schon zeigt, die entstandenen Sedimentverluste ersetzen.

Passive Bauwerke kommen aus Gründen des Sedimenthaushalts nur als stützende Maßnahmen in Betracht, um die Verweilzeiten der Sedimente zu erhöhen und damit die Vorspülintervalle zu verringern. Weitere Anwendungen ergeben sich im Zusammenhang mit den Aufgaben des Objektschutzes.

Schon früher wurden sehr differenzierte Untersuchungen unter klar definierten Rahmenbedingungen (vgl. Kap. 6) zu technischen Alternativen für den künftigen Schutz der Insel Sylt durchgeführt, in denen verschiedene Möglichkeiten des aktiven und passiven Küstenschutzes verglichen und bewertet wurden. Die Anwendung von volkswirtschaftlichen Entscheidungsmethoden gestaltet sich für Küstenschutzmaßnahmen als extrem schwierig wie schon die Untersuchungen im BMFT-Projekt „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ gezeigt haben. Konsens besteht in der Fachwelt darin, daß die Vorteile weicher Lösungen für den Küstenschutz gegenüber starren Bauweisen überwiegen und, vor allem, daß Strandersatzmaßnahmen unverzichtbar sind.

Da ein Austritt von Sedimenten aus dem offenen System Sylt nicht verhindert werden kann, werden stützende Bauwerke sowohl im Riff- bzw. Offshore-Bereich als auch an den Inselenden empfohlen. Zumal die Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen äußeren Beanspruchungen, Bauwerken und den Sedimenten als unvollkommen angesehen werden müssen und Prognosen schwierig sind, sollten diese Maßnahmen zumindest innerhalb einer Testphase als geotextile Lösung aus Säcken oder Großcontainern konzipiert werden, vor allem, da Geotextilien Veränderungen in der Morphologie durch Verformungen zerstörungsarm ausgleichen können. Für den Fall, daß sich aufgrund von planerischen Unsicher-

heiten wider Erwarten doch signifikante negative Veränderungen im Umfeld des Bauwerks einstellen, so kann dieses vergleichsweise einfach durch Zerstörung entfernt werden. Andererseits kann das Bauwerk, wenn es sich bewährt hat, später durch Bedeckung mit Schüttsteinen in eine konventionelle Maßnahme überführt werden.

Die jüngsten Sturmfluten 1999/2000 haben gezeigt, daß geotextile Bauwerke für Objektschutzaufgaben geeignet sind. Ein flächendeckender Küstenschutz der Westküste Sylts ist aber nur durch Ersatz des verlorengegangenen Strandes möglich.

## 8. Schrifttum

Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum (ALW)	1985	Fachplan Küstenschutz Sylt, Husum
Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum (ALW)	1997	Fortschreibung Fachplan Küstenschutz Sylt, Husum
Amt für Ländliche Räume (ALR)	2000	Morphologische Entwicklung der Sylter Westküste, unveröffentlicht
Beach Management System (BMS) Ovesen, N. K. Schuldt, J. Ch.	1992	Beach Management System, Documentation, Danish Geotechnical Institute
BMFT	1994	Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt – Phase II, Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie
Busch, U.	1997	Sturmfluten: 40 Jahre Hindcast versus Szenarien. Untersuchung von Sturmweatherlagen in der Deutschen Bucht, Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung (Hrsg.), S. 42-45
CERC	1984	Shore Protection Manual, U.S. Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Vicksburg, Mississippi
Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung e.V.	1997	Künftige Gefährdung durch Sturmfluten. Kurzfassung der Vorträge eines Workshops im Rahmen der IDNDR am 10.06.1997, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg (Deutsche IDNDR-Reihe Nr. 7)
Fröhle, Peter	2000	Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus, Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Rostock
Gold Coast City Council (GCCC)	2000	<a href="http://www.goldcoast.qld.gov.au/narrowneck.html">http://www.goldcoast.qld.gov.au/narrowneck.html</a>



**„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:**

**Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt**

---

- |   |       |  |
|---|-------|--|
| Gönnert, G.<br>Ferk, U.                               | 1996  | Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe, Sterr, H. u. Preu, Chr. (Hrsg.), S. 13-31  |
| Hofstede, J.L.A.                                      | 1999  | Process-response analysis for Hörnum tidal inlet in the German sector of the Wadden Sea, Quarternary International 60, pp. 107-117   |
| Jensen, J.<br>Mügge, H.-E.<br>Schönfeld, W.           | 1992  | Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht, Die Küste 53, S. 211-275   |
| KLIMU (Klimaänderung und Unterweserregion)            | 2000  | <a href="http://www.klimu.uni-bremen.de/index.html">http://www.klimu.uni-bremen.de/index.html</a>  |
| Kohlhase, Sören                                       | 1991a | The Concept of Sediment Budget in the Nearshore Area, Seminar on Causes of Coastal Erosion in Sri Lanka, Colombo   |
| Kohlhase, Sören                                       | 1991b | The need to monitor the coastal response to structural interventions, Seminar on Causes of Coastal Erosion in Sri Lanka, Colombo, Sri Lanka  |
| Kohlhase, Sören                                       | 1997  | Some Aspects of the use of geotextiles in the field of coastal engineering, First German-Chinese Joint Seminar on Recent Developments in Coastal Engineering, Hasenwinkel                        |
| Kohlhase, Sören                                       | 1999  | Geokunststoff-Baukörper im Küstenschutz. In: Geokunststoffe in der Geotechnik, Blatt I (Geokunststoff-Kolloquium der Firma Naue Fasertechnik), Erpelkamp 1999                                    |
| Kohlhase, Sören                                       | 1999  | Light Revetments, Requirements and Realisation. Examples from Coastal Areas in Germany, Proceedings of Second German-Chinese Joint Seminar on Recent Developments in Coastal Engineering, Tainan |
| Kohlhase, Sören<br>Fröhle, Peter<br>Koppe, Bärbel     | 1999  | Coastal Protection of the Isle of Usedom – Conceptional Design of an Offshore Breakwater System at the Streckelsberg Baltic Sea, Limnologica No.29, pp. 325 - 331                                |
| Kohlhase, Sören<br>Strotmann, Thomas<br>Fröhle, Peter | 1994  | Seegang und Wasserstand vor der Insel Sylt, in: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt – Phase II, Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie                                      |

**„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:**

**Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt**

---

- |   |       |  |
|---|-------|--|
| Lohmann, G  | 1999  | Klimaveränderungen und Meeresspiegelanstieg. Eine Analyse vorliegender Beobachtungen und Modellergebnisse, BWK (Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau) (Hrsg.): Küstenschutz an Nordsee und Ostsee.- Kiel, S. 1-15    |
| Naue Fasertechnik (Naue)  | 1999  | Imagebroschüre: „Weltrekord mit Terrafix <sup>®</sup> “, 500t Mega-Sandcontainer aus Terrafix <sup>®</sup> Vliesstoffen, www.naue.com  |
| Nickels, Hans<br>Heerten, Georg   | 2000  | Objektschutz Haus Kliffende, HANSA, 137. Jahrgang, Nr. 3, pp. 72 - 75  |
| Nielinger, J.   | 1997  | Auswirkungen möglicher Klimaänderungen im Gebiet der Deutschen Bucht, Numerische Simulation von Sturmweatherlagen (Deterministische Regionalisierung), Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung (Hrsg.), S. 29-32                              |
| NOURTEC<br>(Knaak, H.<br>Kunz, H.)  | 1997  | EU-MAST-II Forschungsvorhaben: Innovative Nourishment Techniques Evaluation, Final Report MTK 0563 , bmbf –Meerestechnik-  |
| Partenskcy, Hans-Werner<br>Kohlhase, Sören<br>Daemrich, Karl-Friedrich<br>Scheffer, Hans-Joachim<br>Schwarze, Horst | 1988  | Theoretische Vorstudie zur wellendämpfenden Wirkung des Riffs und zum seegangserzeugten Feststofftransport an der Westküste der Insel Sylt, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 67 |
| Probst, B.  | 1998  | Leitbild und Ziele des Küstenschutzes in Schleswig-Holstein oder: Wer das Ziel nicht kennt, kann nicht treffen, MLR (Ministerium für ländliche Räume, Landwirtschaft, Ernährung und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein) (Hrsg.), S. 3-11            |
| Probst, B.  | 1998a | Künftiger Küstenschutz, Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer u. Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltatlas Wattenmeer. Band 1 – Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer.- Stuttgart, S. 156-157                              |

**„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:**

**Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt**

---

- |  |      |   |
|--|------|---|
| Roth, R.<br>Busch, U.  | 1997 | Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Wasserstände und Windverhältnisse an der deutschen Nordseeküste, Abschlußbericht, unveröffentlicht  |
| Schade, D.   | 1991 | Untersuchungen über das Wellenklima an einer Brandungsküste unter Einschluß der Richtungsstruktur des Seegangs, dargestellt am Beispiel der Insel Sylt  |
| Schade, D.<br>Kohlhase, S.                                     | 1991 | Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 71<br>Seegangsklimauntersuchungen für die Insel Sylt unter Einschluß von Richtungsspektren. In: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Statusseminar 1991, BMFT (Hrsg.) |
| Shackley, S.<br>Young, P.<br>Parkinson, S.<br>Wynne, B.        | 1998 | Uncertainty, Complexity and Concepts of Good Science in Climate Change Modelling: Are GCM's the Best Tools?, Climate Change 38, pp. 159 - 205   |
| Siefert, W.  | 1997 | Sturmflut- und Windstauentwicklung im südlichen Nordseegebiet in den letzten 100 Jahren, Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung (Hrsg.), S. 12-19   |
| Sterr, H.  | 1998 | Auswirkung auf den Meeresspiegel, in: Lozan, J.L. et al. (Hrsg.), S. 201-206, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg   |
| Strothmann, Th.<br>Kohlhase, S.                                | 1991 | Untersuchungen zur wellendämpfenden Wirkung des Riffs vor der Westküste der Insel Sylt. In: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Statusseminar 1991, BMFT (Hrsg.)   |
| Strotmann, Th.<br>Fittschen, Th.<br>Schade, D.<br>Kohlhase, S. | 1991 | Directional wave measurements and the influence of a sandy bar on the nearshore wave energy, Third International Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, pp. 1479-1493, Mombasa, Kenya  |
| v. Storch, H.<br>Güss, S.<br>Heimann, M.                       | 1999 | Das Klimamodell und seine Modellierung, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg   |

**„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:**

**Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt**

---

- |   |       |  |
|---|-------|--|
| v. Storch, H.<br>Langenberg, H.<br>Pohlmann, Th.                        | 1998  | Stürme, Seegang und Sturmfluten im Nordostatlantik, in: Lozan, J.L. et al. (Hrsg.), S. 182-189, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg  |
| v. Storch, H.<br>Schnur, R.<br>Zorita, E.                               | 1998a | Szenarien & Beratung. Anwenderorientierte Szenarien für den norddeutschen Küstenraum, GKSS, Abschlußbericht  |
| Watson, R.T.,<br>Zinyowera, M.C.<br>Moss, R.H.<br>Dokken, D.J. (Eds.)   | 1996  | Climate Change 1995. Impacts, Adaptions and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Camebridge     |
| Witte, Jan-Ole  | 1999a | Wind-Wellen Korrelation und die Berechnung des Energieflusses am Beispiel der Insel Sylt, Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Heft 1, S. 183 ff, Rostock   |
| Witte, Jan-Ole<br>Fröhle, Peter<br>Fittschen, Thomas<br>Kohlhase, Sören | 1999b | Assessment of Long-term Directional Wave Conditions Based on Nearshore Wind-Wave Correlations, Proceedings of the International MEDCOAST Conference, Antalya, Turkey   |
| Witte, Jan-Ole<br>Fröhle, Peter<br>Kohlhase, Sören                      | 1998a | 1. Zwischenbericht "Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt" (unveröffentlicht)   |
| Witte, Jan-Ole<br>Kohlhase, Sören                                       | 1998b | Parametric Study on Hydrographic Influences on Wave Climate Inshore of a Barred Sandy Beach, 3rd International Conference on Hydro-Science and -Engineering, Cottbus/Berlin, Germany   |
| Witte, Jan-Ole<br>Kohlhase, Sören                                       | 1999d | Parametric Study on Influences of Hydrographic changes on the Sediment transport Capacity of a barred sandy beach, 5th International conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Cape Town, South Africa |

**„Fallstudie Sylt“ Abschlußbericht des Teilprojekts:**

**Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt**

---

Witte, Jan-Ole Radomski, Jörg Fröhle, Peter Kohlhase, Sören	1999c	2. Zwischenbericht "Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt" (unveröffentlicht)
Zimmermann, C. Kohlhase, S. Strothmann, Th. Fröhle, P.	1991	Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Abschlußbericht Phase I, unveröffentlicht
Zimmermann, C. Kohlhase, S. Strothmann, Th. Fröhle, P.	1994	Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Abschlußbericht Phase II, unveröffentlicht