

Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord  
Kiel

Kuratorium für Forschung  
im Küsteningenieurwesen  
Hindenburgufer 247  
24100 Kiel

Abschlußbericht zur Projektdefinition

E 21. NOV. 1997

**Numerische Simulation zur Morphogenese von Windwatten**

A 16. JAN. 1998

Förderkennzeichen MTK 0583

15.8.1995 - 31.12.1996

Dr.-Ing V. Barthel  
Dr.-Ing. R. Lehfeldt

Oktober 1997

№ 32509 kt

P55



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 ENTSTEHUNG DES PROJEKTES .....</b>	<b>3</b>
1.1 ZEITTADEL .....	3
1.2 FORSCHUNGSBEDARF "WINDWATTEN" .....	4
1.3 AKTIVITÄTEN IN DER PROJEKTDEFINITIONSPHASE .....	6
1.3.1 Ermittlung der Datenlage .....	7
1.3.2 Beurteilung bestehender und in der Entwicklung befindlicher Modellsysteme und entsprechender Forschungsvorhaben .....	7
1.4 PROJEKTBSCHREIBUNG ZUR VORLAGE BEIM BMBF .....	10
<b>2 BEWERTUNG LAUFENDER FORSCHUNGSVORHABEN .....</b>	<b>22</b>
<b>3 STAND DER MODELLTECHNIK .....</b>	<b>24</b>
3.1 MODELLIERUNG DER HYDRODYNAMIK .....	27
3.1.1 Strömungen .....	27
3.1.2 Wellen .....	28
3.1.3 Sedimenttransport .....	31
3.2 MODELLIERUNG DER MORPHODYNAMIK .....	32
3.2.1 Danish Hydraulic Institute (DHI) .....	32
3.2.2 Hydraulic Research Wallingford (HR Wallingford) .....	34
3.2.3 Delft Hydraulics Laboratory (DHL) .....	36
3.3 ANWENDUNGSBEISPIELE MORPHODYNAMISCHER MODELLIERUNG .....	38
3.3.1 Küstenrückgang und Küstenschutzpflanzung .....	38
3.3.2 Vorgelagerter Wellenbrecher .....	41
3.3.3 Modifikation der Reibung .....	43
3.3.4 Elbe bei Cuxhaven .....	44
3.3.5 Rhinplatte .....	44
3.4 SCHEMATISIERUNG FÜR LANGZEITSIMULATIONEN .....	47
3.4.1 Wellenklima .....	47
3.4.2 Sedimenttransportklima .....	48
<b>4 DATENERFASSUNG .....</b>	<b>50</b>
4.1 TOPOGRAPHIE .....	50
4.1.1 Baggerungen .....	50
4.1.2 Luftbilder .....	51
4.1.3 Seekarten .....	52
4.2 UMWELTDATEN .....	54
4.2.1 Wasserstand .....	54
4.2.2 Strömung .....	55
4.2.3 Seegang .....	55
4.2.4 Wind und Sturmflutsituationen .....	55
4.3 DOKUMENTATION ZUR ARCHIVARBEIT .....	56
4.4 VORBEREITUNG DER PILOTRECHNUNGEN .....	86
4.4.1 Übersichtsmodell und Detailmodell .....	86
4.4.2 Pegelwerte .....	88
4.4.3 Randbedingungen .....	89
<b>5 LITERATUR .....</b>	<b>91</b>

No 32509 lit

# Abbildungen

ABBILDUNG 1: TESTGEBIET RÜGEN/HIDDENSEE/DARST-ZINGSTER BODDENKETTE.....	21
ABBILDUNG 2: PROZESSE IM KÜSTENSYSTEM [49].....	25
ABBILDUNG 3: MODELL-KOMPONENTEN UND IHRE WECHSELWIRKUNGEN [19].....	26
ABBILDUNG 4: DEFINIERTE TESTFÄLLE FÜR MORPHODYNAMISCHE MODELLIERUNG IN MAST-2 [8].....	26
ABBILDUNG 5: HYDRODYNAMISCHE PROZESSE IM KÜSTENVORFELD [45].....	28
ABBILDUNG 6: FLUßDIAGRAMM ZUR MORPHODYNAMIK MODELLIERUNG [29].....	32
ABBILDUNG 7: MODELLSYSTEM PISCES VON HR WALLINGFORD [9].....	35
ABBILDUNG 8: MODELLGEBIETE BEI THYBORØN [16].....	38
ABBILDUNG 9: BERECHNETE WELLEN-, STRÖMUNGS- UND SEDIMENTTRANSPORTFELDER [16].....	39
ABBILDUNG 10: VARIATION DER BUHNENLÄNGE UND SEDIMENTTRANSPORT [16].....	40
ABBILDUNG 11: STRÖMUNGSFELD IM BEREICH EINES KÜSTENPARALLELEN WELLENBRECHERS [30].....	41
ABBILDUNG 12: MORPHOLOGISCHE ENTWICKLUNG NACH 20 TAGEN [30].....	42
ABBILDUNG 13: EINFLUß DER REIBUNGSERHÖHUNG DURCH WELLEN AUF SEDIMENTTRANSPORT [29].....	43
ABBILDUNG 14: MORPHOLOGISCHE ENTWICKLUNG DER ELBMÜNDUNG BEI CUXHAVEN [54].....	45
ABBILDUNG 15: TIEFENVERÄNDERUNG IN 20 JAHREN, RHINPLATTE [27].....	46
ABBILDUNG 16: AUSWIRKUNG VON SCHEMATISIERUNGEN DES WELLENKLIMAS [38].....	47
ABBILDUNG 17: MODELLGEBIETE UND MODELL-KOMPLEX FÜR ØRESUND [33].....	48
ABBILDUNG 18: SEDIMENTTRANSPORT-KLIMA [33].....	49
ABBILDUNG 19: AUFSPÜLUNG DER BAGGERMASSEN AUF DEM BOCK NACH [37].....	56
ABBILDUNG 20: AUFSTELLUNG DER BAGGERMENGEN IM NORDFAHRWASSER NACH [20].....	57
ABBILDUNG 21: BEISPIEL EINER ZUSAMMENSTELLUNG VON JAHRESBAGGERMENGEN NACH AKTENLAGE.....	58
ABBILDUNG 22: LAGEPLAN DER AUFSPÜLFLÄCHE AUF DER SANDBANK BOCK VON 1935.....	59
ABBILDUNG 23: LUFTBILD 1992, KLEINE WERDER - BOCK - GELLEN.....	66
ABBILDUNG 24: WINDWATT-PROBLEMATIK I.....	67
ABBILDUNG 25: WINDWATT-PROBLEMATIK II.....	68
ABBILDUNG 26: WINDWATT-PROBLEMATIK III.....	69
ABBILDUNG 27: WINDWATT-PROBLEMATIK IV.....	70
ABBILDUNG 28: FAHRWASSERVERLAGERUNG BARHÖFTER-, VIERENDEHL - RINNE, 1961 - 1992, NACH [20].....	71
ABBILDUNG 29: ÜBERSICHT NAUTISCHE KARTEN, BSH HAMBURG, ROSTOCK.....	73
ABBILDUNG 30: TOPOGRAPHISCHE KARTEN DES SEEGRUNDES OSTSEE, BSH.....	74
ABBILDUNG 31: BETONNUNGSPLAN.....	75
ABBILDUNG 32: NORDFAHRWASSER 1879.....	78
ABBILDUNG 33: NORDFAHRWASSER 1905 / 1937.....	79
ABBILDUNG 34: NORDFAHRWASSER 1915.....	80
ABBILDUNG 35: NORDFAHRWASSER 1935.....	81
ABBILDUNG 36: NORDFAHRWASSER 1986.....	82
ABBILDUNG 37: NORDFAHRWASSER 1993.....	83
ABBILDUNG 38: GEWÄSSERKUNDLICHE PEGEL.....	84
ABBILDUNG 39: DATENBASIS DES PILOTMODELLS.....	86
ABBILDUNG 40: TOPOGRAPHIE DES PILOTMODELLS.....	87
ABBILDUNG 41: TOPOGRAPHIE AM BOCK MIT GELLENSTROM UND BARHÖFTER RINNE.....	87
ABBILDUNG 42: WASSERSTÄNDE ENTLANG DER AUßENKÜSTE 1994-1995.....	88
ABBILDUNG 43: WASSERSTÄNDE NOVEMBER 1994, AUßENKÜSTE.....	88
ABBILDUNG 44: WASSERSTÄNDE NOVEMBER 1994, INNENKÜSTE.....	89
ABBILDUNG 45: RANDBEDINGUNGEN FÜR WIND.....	89

# Tabellen

TABELLE 1 STRÖMUNGS-MODELLE.....	27
TABELLE 2: SEEGANGS-MODELLE.....	30
TABELLE 3: SEDIMENT-TRANSPORT MODELLE.....	31
TABELLE 4: BAGGERMASSEN, ARCHIV WSA STRALSUND.....	60
TABELLE 5: FAHRWASSERVERTIEFUNGEN.....	62
TABELLE 6: LUFTBILDER UND WEITERE AKTEN.....	63
TABELLE 7: LAGEPLÄNE SANDAUFSPÜLUNGEN BOCK.....	64
TABELLE 8: AUFSTELLUNG HISTORISCHER LUFTBILDAUFNAHMEN BEIM WSA STRALSUND.....	65
TABELLE 9: CHRONOLOGIE DER SEEKARTE NR.1622.....	72
TABELLE 10: PEILPLANBESTAND WSA STRALSUND.....	76
TABELLE 11: SEEVERMESSUNGSKARTEN IM BEREICH BOCK, BESTAND BSH ROSTOCK.....	77
TABELLE 12: PEGEL-BESTANDSLISTE WSA STRALSUND.....	85

# 1 Entstehung des Projektes

## 1.1 Zeittafel

### Meilensteine

07.06.94	Problemdiskussion Nordfahrwasser Stralsund im WSA Stralsund
27-28.9.94	Projektvorstellung bei der KFKI Beratergruppe
22-23.3.95	KFKI-Antrag für 1-jährige Pilotphase an BMBF
15.08.95	Beginn der Pilotphase zur Projektdefinition
08.09.95	Treffen der Steuergruppe im STAUN Rostock
14.12.95	Treffen der Steuergruppe im STAUN Rostock
05.03.96	Treffen der Steuergruppe im STAUN Rostock
21.10.96	Treffen der Steuergruppe in der WSD Nord Kiel, WSD Nord und WSA Stralsund beschließen: Aufmessung der Sandbank Bock, Sedimentbeprobung am Windwatt, Strömungsmessungen in den Rinnen am Bock
30.10.96	Projektvorstellung bei der KFKI Beratergruppe
21.11.96	WSA regt an, die Sandbank Bock in die Befliegung 1997 mit einzubeziehen
29.11.96	Gemeinschaftsantrag von TU Cottbus, Uni Hannover, TU Darmstadt und WSD Nord /KFKI an BMBF
05.12.96	Bewilligung für 4 Jahre
01.01.97	Projektbeginn

### Besuche und Teilnahme an Seminaren

28.09.95	Ökosystem Boddengewässer - Veränderungen in Vergangenheit und Zukunft Inst. f. Ökologie der EMAU Greifswald, Kloster/Hiddensee
19-20.10.95	Statusseminar KLIBO Observatorium Zingst
24.10.95	Luftbilddauswertung EMAU Greifswald
01.04.96	Institut für Ostseeforschung Warnemünde Prüfung von Zusammenarbeit
23-24.09.96	DVWK Workshop Hannover Mehrdimensionale Modelle
29.10.96	KFKI Workshop Husum

### Modelltechnik

21.11.95	DHI
05.02.96	HR Wallingford
11-12.3.96	DHL
2-3.12.96	EDF Paris

### Archivarbeit

28.11.-01.12.95	WSA Stralsund Seekarten, Baggerungen, Luftbilder Sturmfluten, meteorologische Daten
-----------------	---

### Vorbereitung der Pilotstudie

Digitalisierung für Küstenmodell  
Beschaffung von Randbedingungen

## 1.2 Forschungsbedarf "Windwatten"

Das erste Treffen mit Teilnehmern vom WSA Stralsund (Meyer, Kraft), vom STAUN Rostock (Weiß, Gurwell), der TU Cottbus (Holz, Molkenthien, Plüß) und der WSD Nord (Barthel) fand am 7.6.1994 in Stralsund statt. Auf Initiative des WSA wurde eine Problemdiskussion um das Nordfahrwasser Stralsund geführt.

Es bestand Einigkeit darüber, daß für den Bereich der tidefreien Küste der Ostsee mit von Seegang geprägtem Küstenlängstransport und tief einschneidenden Rinnen, die als Zufahrten zu den Häfen erhalten und unterhalten werden müssen, ein erheblicher Nachholbedarf im Bereich der Küstenforschung besteht. Dabei müssen Langzeitentwicklungen der verschiedenen Komponenten dieser Küstenlandschaft ebenso wie kurzfristige notwendige Eingriffe betrachtet werden.

Um die Aufgaben des Bundes für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auf den Bundeswasserstraßen und die des Landes für den Küstenschutz effizient wahrnehmen zu können, sind Entscheidungshilfen nötig, die das Gesamtsystem in Betracht ziehen. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich somit über den Küstenbereich vom Darßer Ort bis zum Dornbusch (Hiddensee). Es liegt vollständig im Gebiet des Nationalparks Vorpommersche Boddenlandschaft und umfaßt das Fahrrinnensystem Vierendehl Rinne, Barhöfter Rinne, Gellenstrom sowie die Sandbank Bock und Bereiche des Geller Haken.

Die verfügbaren Unterlagen zur morphodynamischen Entwicklung der Stromrinnenverläufe sowie der Sandbänke, die hier als Windwatten bezeichnet werden, weisen diesen Küstenabschnitt als morphodynamisch sehr aktive Zone aus. Seegangsinduzierter Küstenlängstransport von Sediment, sturmflutbedingte Umlagerungen und kontinuierliche Unterhaltungsbaggermaßnahmen in den Fahrrinnen sind die Prozesse, die in ihrer Wechselwirkung die Küstenentwicklung prägen.

Anhand von Seekarten kann die morphologische Entwicklung des Nordfahrwassers seit 1879 verfolgt werden. Die heutigen Stromrinnenverläufe des Gellenstroms und der Barhöfter Rinne sind sehr ähnlich zu den vor 100 Jahren bestandenen Verhältnissen. Aus Sicherheitsgründen waren 1915 hier die Fahrrinnen nach Richtfeuerachsen verlegt worden. Als die stetig notwendigen Unterhaltungsbaggerungen für eine kurze Zeitspanne von 5 Jahren eingestellt werden mußten, verlagerte sich die Fahrrinne wieder um ca. 200m nach Süden bzw. Osten.

Zur Optimierung von Trassierung und Unterhaltungskosten im Fahrrinnensystem der Nordansteuerung Stralsund gibt es im WSA derzeit keine Entscheidungsgrundlagen. Eine quantitative Beschreibung dieses Gesamtsystems liegt bisher nicht vor. Einzelaspekte lassen sich nach Aufzeichnungen von Baggermengen, durch Auswertung von Luftbildern oder anhand von physikalischen Modellversuchen studieren. Synoptische Aussagen für die Wirkung anthropogener Eingriffe können jedoch bisher nicht getroffen werden.

Dies gilt insbesondere auch für den Verbleib von Baggergut. Zwischen 1906 und 1968 wurden die anfallenden Mengen auf der Sandbank Bock aufgespült. Vor allem am Nordostende erwartete man von der hochwasserfreien Ablagerung und der daraus resultierenden Verengung des Durchflußprofils eine stärkere Selbsträumung im Gellenstrom. Tatsächlich jedoch begann das System zu mäandrieren. Nach Modellversuchen der Forschungsanstalt für Schiffbau (1955), deren Ergebnisse aber nicht realisiert wurden, hätte eine Verlängerung des Gellen in Form eines Sandleitdammes stabilisierende Wirkung [22]. Derzeit wird kein Baggergut zu Strombaumaßnahmen in diesem Gebiet verwendet.

Mit Windwatten werden die Sandbänke und Sandflächen bezeichnet, die bei mittlerem Wasserstand der Ostsee freiliegen bzw. nur mit wenigen Zentimetern Wasser überstaut sind. Seegang und dadurch erzeugte Strömungen stellen die treibenden Kräfte dar. Die Dynamik der Windwatten ist bisher kaum erforscht. Dies geht auch aus der 1993 abgeschlossenen Forschungsstandanalyse zur mecklenburgisch-vorpommerschen Boddenlandschaft [25] hervor, die im Rahmen der interdisziplinären Klimawirkungsforschung angefertigt wurde. Die zumeist hypothetischen Genesevorstellungen von Haken und Nehrungen müssen demnach verifiziert und Korrelationen zwischen Wachstumszyklen und Klimaänderungen konkretisiert werden.

In dem auf 10 Jahre angelegten Bund-Länder-Forschungsverbundvorhaben Klimaänderung und Küste wird in einem Projektbereich Klimaänderung und Boddenlandschaft (KLIBO) [31] [48] seit Anfang 1994 daran gearbeitet, die maßgeblichen klimarelevanten Prozesse zu identifizieren und in mathematischen Modellen so nachzubilden, daß prognostische Aussagen möglich werden. An der Formulierung des wissenschaftlichen Rahmenkonzeptes von KLIBO [51] waren bis Ende 1992 Vertreter aller fünf Küstenländer beteiligt. Das wissenschaftliche Koordinierungsgremium bestand überwiegend aus Mitarbeitern von Forschungsinstitutionen (wie der Uni Hamburg, FTZ Westküste, Forschungsstelle Norderney, Uni Bremen) und einem Vertreter des STAUN Rostock). Neben der Inventarisierung aller impakt-relevanten Parameter bilden die Entwicklung von Modellen zur Küstenmorphogenese und -dynamik für Basisstudien sowie Fallstudien zur Boddenlandschaft küstenspezifische Themenschwerpunkte.

In den letzten Jahren sind numerische Modelle in der Küstenforschung in zunehmendem Maße eingesetzt worden. Nachdem es gelingt, hydrodynamische Prozesse (Wellen, Strömungen, Tide) mit zufriedenstellender Naturähnlichkeit zu simulieren [40] [41] und auch durch entsprechende Transportformeln Feststoff-Transportkapazitäten zu bestimmen, werden neue Modelltypen bereits erprobt. Im morphodynamischen Modell wird parallel zur Berechnung der Hydrodynamik auch der Feststofftransport berechnet und die Ergebnisse als Sedimentation bzw. Erosion bei der Topographie berücksichtigt. Die hydrodynamischen Prozesse laufen daher immer über einer kontinuierlich aktualisierten Topographie ab. Diese Einführung einer "beweglichen Sohle" beim hydrodynamisch-numerischen Modell verbessert die Naturähnlichkeit und damit den prognostischen Wert einer numerischen Simulation erheblich.

Erste morphodynamische Anwendungen liegen als Ergebnis der von der EU geförderten **MA**rine Science and **T**echnology - (MAST) Forschung vor [7][9][10][11][12][29][35]

[41][57] . Daneben konnte Zanke in einer Pilotstudie [54] im Auftrag der WSD-Nord die Topographie- Umlagerungen an der Rhinplatte in der Unterelbe in guter Übereinstimmung mit Beobachtungsmaterial über mehrere Jahre modellieren.

Gemäß seinem Forschungsprogramm [24] nimmt das KFKI übergreifende Aufgaben wahr, indem einerseits Naturmeßdaten zur Eichung und Verifizierung von Modellen bereitgestellt werden können und auch die Eignung und Anwendbarkeit von Modellen bewertet wird. Allgemeines Ziel der KFKI-Forschung ist es, *in anwendungsorientierten Projekten Naturvorgänge im Küstenbereich zu erfassen und vorherzusagen, so daß die im KFKI zusammengeschlossenen Fachverwaltungen die ihnen obliegenden Aufgaben zweckmäßig, wirtschaftlich und umweltverträglich ausführen können.*

Die hier formulierte Aufgabe, Bedarf und Fragestellungen für Modelle festzulegen, findet 1994 ihre Entsprechung im Forschungsleitplan zum Verbundvorhaben Klimaänderung und Küste [23]. Dort heißt es, die Arbeiten im Themenschwerpunkt Morphologie / Morphodynamik erfordern z.T. *Grundlagenarbeit, für die eine Abstimmung mit dem Forschungsprogramm des KFKI erforderlich ist.*

Das Projekt "Morphogenese von Windwatten" wurde in der Sitzung der Beratergruppe des KFKI am **27-28.9.1994** als neue Projektidee vorgestellt und fand Zustimmung. Es wurde beschlossen, einen Antrag für eine Projektdefinitionsphase in 1995 zu stellen. Auf der folgenden Beratergruppensitzung am **22-23.3.1995** wurde ein entsprechender Antrag vorgelegt und die Aufgaben eines neuen Mitarbeiters in der geplanten Pilotphase definiert. Zur Vorbereitung des Projektvorschlages sollte demnach das vorhandene Datenmaterial gesichtet und eine Vorauswahl der zum Vergleich geeigneten Simulationsverfahren getroffen werden.

Das Pilotprojekt wurde für den Zeitraum 15.8.1995 - 31.12.1996 gefördert. Es wird angestrebt, nach einer durch die Beratergruppe des KFKI akzeptierten Projektdefinition mit dem eigentlichen Projekt am 1.1.1997 zu beginnen.

Gegenwärtig wird das Ziel des Projektes in dem *Test und Vergleich verschiedener morphodynamischer Modellsysteme am Testgebiet Bock* und in der *Weiterentwicklung von Technologien zu einem handhabbaren System mit greifbarem Ergebnis* gesehen.

### **1.3 Aktivitäten in der Projektdefinitionsphase**

Nach Bereitstellung der Mittel im Frühjahr 1995 wurde zum 15.8.95 ein Wissenschaftler, Dr. Lehfeldt, eingestellt. Gleichzeitig wurde eine Steuergruppe gebildet, deren Mitglieder sich aus dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock (Drs. Weiß und Gurwell), dem Wasser-und Schiffsamt Stralsund (Herr Kraft),

der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
(Prof. Dr. Holz)  
und der Wasser-und Schifffahrtdirektion Nord  
(Dr. Barthel)

rekrutierten.

Es wurde vereinbart, die zur Verfügung stehende Zeit für folgende Aktivitäten auszunutzen:

1. Ermittlung der Datenlage
2. Beurteilung bestehender und in der Entwicklung befindlicher Modellsysteme und entsprechender Forschungsvorhaben
3. Konzipierung eines Projektes auf der Basis der vorhandenen Information

### **1.3.1 Ermittlung der Datenlage**

Im WSA Stralsund existieren Unterlagen zu Fahrrinnenvertiefungen und Unterhaltsbaggerungen, ergänzt durch vielfältiges Kartenmaterial. Die Entwicklung der Nordzufahrt Stralsund und der Sandbank Bock ist anhand von Seekarten zwischen 1879 und heute nachzuvollziehen. Es stehen Luftbilder u.a. aus einer WSD-Befliegung 1992 zur Illustration des jetzigen Zustandes zur Verfügung.

Zur Modellierung benötigte Daten müssen von unterschiedlichen Dienststellen zusammengetragen werden. Im Zuge der Definition charakteristischer Szenarien sind dann die

Topographie (WSD, BSH),  
Wasserstände (WSA, STAUN, BSH),  
Strömungsdaten aus Messung (STAUN, WSA) und Rechnung (BSH),  
Seegangdaten aus Messung (STAUN, GKSS) und Rechnung (BSH) und  
Wind (STAUN, WSA, DWD)

zu prüfen und wenn nötig zusätzliche Meßkampagnen durchzuführen.

### **1.3.2 Beurteilung bestehender und in der Entwicklung befindlicher Modellsysteme und entsprechender Forschungsvorhaben**

Zur Modellevaluation wurden vier europäische Forschungslabors besucht, die alle an MAST-2 Projekten beteiligt waren. Dort eingesetzte morphodynamische Modellsysteme koppeln bewährte Modellkomponenten für Seegang, Strömung und Sedimenttransport, die über Jahre entwickelt und validiert worden sind, mit einem neuen Morphodynamik-Modul für die Veränderlichkeit der Topographie.

Die Modellsysteme unterscheiden sich in der Parametrisierung der Wechselwirkungen von Seegang und Strömung, in der Komplexität der Wellenmodelle sowie in Details ihrer Sedimenttransportansätze. Die Formulierungen von Energiedissipation enthalten neben der örtlich variablen Bodenreibung zusätzlich die Wirkung des Seeganges in unterschiedlicher Weise. Ebenso folgen die Ansätze für Energiediffusion, die von der Strömungsge-

schwindigkeit und von der Wellenenergiedissipation abhängt, die Bestimmung der Sättigungskonzentration sowie die Formulierung der Sedimentations-/Erosionsbedingungen verschiedenen theoretischen Ansätzen.

Weiterhin unterscheiden sich die Modellsysteme in der Art der Kopplung ihrer Einzelkomponenten und in der Methodik im jeweiligen Morphodynamik-Modul. Anhand von gemeinsamen Testfällen für zumeist stationäre Szenarien haben alle Modellsysteme ihre Einsatzfähigkeit für Untersuchungen im Küsteningenieurwesen gezeigt.

Am **21.11.95** fand ein Besuch beim **Danish Hydraulic Institute** statt. Hauptgesprächspartner waren I. Brøker und J.A. Zyserman. Das Modellsystem MIKE21 beinhaltet eine breite Palette von Modulen unterschiedlicher Komplexität zur Modellierung von Wellen und Sedimenttransport. Neben den MAST-2-Testbeispielen gibt es eine Reihe von Küstenmanagementanwendungen, die z.B. die Wirkung typischer Starkwindereignisse in einem Mündungsbereich mit starkem Küstenrückgang und ausgedehnten Bühnenfeldern zeigen.

Mit MIKE21 sind Untersuchungen zu morphologischen Auswirkungen von Extremszenarien in Gebieten von der Größe  $200 \times 400 \text{m}^2$  in einem 20m Raster mit einer Simulationsdauer von wenigen Tagen möglich. Eine Beteiligung des DHI am KFKI-Projekt könnte im Aufenthalt eines KFKI-Mitarbeiters am DHI liegen, der dort gegen Nutzungsgebühr und Aufwandsentschädigung unter Betreuung die Modellumgebung zu einer Pilotstudie nutzt.

Am **5.2.1996** fand ein Besuch bei der Marine Sediments Group des britischen Forschungslabors **Hydraulic Research Wallingford** statt. Gesprächspartner waren R.L. Soulsby als Leiter der Arbeitsgruppe und die Mitarbeiter H.N. Southgate und T.J. Chesher. Ihr Modellsystem PISCES ist nach Angaben in der Literatur für Simulationszeiten bis zu einem Monat anwendbar. Langzeitsimulationen für Jahre/Jahrzehnte erfordern neue Modellansätze bzgl. Prozeß- und Daten-Filterung, die nicht in PISCES verfolgt werden.

Nach Einschätzung der Modellentwickler und Vergleich der Ergebnisse der MAST-2-Testfälle stellt dieses Modellsystem ein Werkzeug zur Analyse kleinräumiger Gebiete ( $1 \times 2 \text{km}^2$  mit 15m Raster) dar. Eine Beteiligung am KFKI-Projekt zur Modellbewertung von PISCES könnte im Rahmen eines Aufenthaltes von einem HR-Gastwissenschaftler beim KFKI erfolgen. Die Überlassung des Modells zu hiesigen Testläufen ist nicht möglich.

Gesprächspartner bei **Delft Hydraulics** waren am **11-12.03.1996** Dr. J.A. Roelvink und Prof. H.J. de Vriend. Das morphodynamische Modellsystem DEL-MOR eignet sich für Studien mit Zeitskalen von Tagen bis Jahren. Es ist Bestandteil des DELFT3D Modellierungssystems, das sich besonders durch seine Benutzeroberfläche auszeichnet, mit der das Zusammenwirken von Einzelmodulen für die physikalischen Prozesse gesteuert wird.

Für Forschungszwecke kann eine Universitätslizenz erteilt werden, die kostenlos ist, wenn Modellvalidation und Anwendungen publiziert werden. Der Kostenrahmen für Trainings- und Support-Aufwand für 1) einige Wochen Einweisung eines Mitarbeiters beim DHL in Delft und 2) etwa zwei Monate Modellimplementierung durch einen DHL-Mitarbeiter in Kiel wird auf etwa 100.000,-DfL abgeschätzt.

Der letzte Besuch führte am **2-3.12..96** zum **Laboratoire Nationale d'Hydraulique** LNH EDF, Chatou, und zur **Societe Technique Centrale** STC, Compiegne, um mit Prof. B. Latteux und Dr. JM Tanguy Entwicklungs-Stand und -Perspektiven morphodynamischer Modelle in Frankreich zu erörtern.

Im Rahmen der MAST-2 Forschung erfolgte eine Zusammenarbeit von LNH und STC bei der Entwicklung eines Bodenevolutions-Modells [46]. Dies ist mittlerweile Bestandteil des TELEMAC -Modellierungssystems. Besonders hervorzuheben ist, daß die Boden­neigung in die Formulierung der kritischen Bodenschubspannung eingeht. Damit sind Prozesse wie etwa Riffelausbreitung realitätsnah zu modellieren [47].

Die Forschung im Umfeld von TELEMAC konzentriert sich derzeit auf Modellerweiterungen für kohäsive Sedimente und der Implementierung eines spektralen Wellenmodells. Dabei stehen Betrachtungen für Tidezyklen im Vordergrund. Bei der Validierung des Modells durch Fallstudien ist es gelungen, Schwebstoffmaxima in der Weser in guter Übereinstimmung mit Meßdaten zu reproduzieren [32]. Langzeitsimulationen stehen noch aus.

## 1.4 Projektbeschreibung zur Vorlage beim BMBF

### MorWin:

## Morphodynamische Modellierung von Windwatten - Netzgestützte Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen

### 1 Veranlassung

Die tidefreien Küsten der Ostsee unterliegen Verformungen, die vorwiegend durch Seegang und dessen Sekundärwirkungen geprägt sind. Neben den verschiedenen Strandformen, die durch die vorherrschenden Transportrichtungen und -intensitäten bestimmt werden, kommt es in Buchten mit gegenläufigen Transportrichtungen zur Ablagerung größerer Sedimentmengen, die flächenhaft kontinuierlich wachsen, und deren Konsolidierungsstadium weder zeitlich noch räumlich definierbar ist. Dabei können sie durch kurz- oder längerfristige wetterbedingte Materialumlagerungen Hafenzufahrten oder Boddenzugänge in ihrer Funktion beeinträchtigen. Die Dynamik dieser als Windwatten bezeichneten Transportkörper, die je nach Wasserstand freiliegen bzw. bis zu 1.5 m überstaut werden, ist bisher kaum erforscht.

Mit Hilfe der **Morphodynamischen Modellierung** kann das Verhalten der Windwatten und der dazugehörigen Materialquellen, die wesentliche Faktoren bei der Beurteilung der Küstenentwicklung sowie für Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen an Küstenschutzwerken und Küsteninfrastruktur wie Schifffahrtsstraßen oder Häfen darstellen, abgebildet werden. Von grundlegender Bedeutung ist dabei die numerische Simulation von Strömung, Seegang und Sedimenttransport unter Berücksichtigung der Veränderung der Morphologie durch Erosion und Ablagerung. Morphodynamische Modelle können als Entscheidungshilfen im Küstenmanagement dienen, da die Wirkung anthropogener Eingriffe schnell und kostengünstig analysiert werden kann.

Komplexe Projekte des Küsteningenieurwesens, wie z.B. die Erforschung der Morphodynamik von Windwatten (**MorWin**), können nur in Arbeitsgruppen mit ausgeprägtem physikalischen, mathematischen und datenverarbeitungstechnischen Expertenwissen durchgeführt werden. Unerlässlich ist dabei auch die Einbeziehung erfahrener praktizierender Küsteningenieure. Diese Gruppen arbeiten häufig örtlich getrennt und weitgehend unabhängig voneinander. Mit Computernetzen und den modernen Werkzeugen der Informations- und Kommunikationstechnik können verteilte Ressourcen zusammengeführt werden zu Projektgruppen, welche die Bearbeitung im Sinne eines "virtuellen Instituts" gemeinsam durchführen. Diese integrierte **netzgestützte Bearbeitung von Projekten im Küsteningenieurwesen** verspricht eine deutliche Steigerung von Effektivität und Wirtschaftlichkeit. Sie ist aber in komplexen Forschungs- und Anwendungsprojekten bisher nicht erprobt worden.

### 2 Konzeptioneller Ansatz

Die netzgestützte Projektbearbeitung für MorWin durch eine verteilte Expertengruppe erfolgt auf der Basis eines vierteiligen Modellkonzepts. Es berücksichtigt alle für eine ingenieurpraktische Bearbeitung von morphodynamischen Problemstellungen notwendigen Aspekte. Es sieht ein Informationsbasismodell, ein Analysemodell, ein Bewertungsmodell und ein Kooperationsmodell vor. Alle vier Teilmodelle sind offen, d.h. anpassungs- und erweiterungsfähig für beliebige Problemstellungen.

Das **Informationsbasismodell** umfaßt alle projektbeschreibenden Informationen, die für die Morphodynamik von Windwatten und deren Bewertung erforderlich sind, in einer konsistenten,

generalisierten (d.h. bearbeitungsunabhängigen) Form. Die Informationen werden durch semantisch behaftete Daten im Rechner gespeichert und verwaltet. Die Informationsbasis umfaßt:

- o Geometrie (z.B. Topographie, Strand, Deiche, Schiffahrtsrinnen, Navigationshilfen)
- o Hydrologie (z.B. Wasserstand, Strömung, Seegang)
- o Meteorologie (z.B. Wind, Luftdruck)
- o Sedimentologie (z.B. Kornverteilungen, Schichtungen)
- o Baumaßnahmen (z.B. Baggermengen, Verbringungen)
- o Betriebswirtschaft (z.B. Finanzen, Kosten, Ressourcen)

Das **Analysemodell** umfaßt die verschiedenen Methoden zur Analyse morphodynamischer Prozesse. Diese Methoden besitzen unterschiedliche Gültigkeitsbereiche für die praktische Anwendung. Sie gliedern sich prinzipiell in folgende Klassen:

- o analytische Methoden
- o numerische Methoden (z.B. FEM, FDM)
- o stochastische Methoden (z.B. Statistik, Regressionsanalyse)
- o Ingenieurmethoden (z.B. empirische Formeln)

Das **Bewertungsmodell** umfaßt die verschiedenen Methoden zur Bewertung von morphodynamischen Prozessen in Windwatten und zur Beurteilung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen im Küstenbereich. Diese Methoden sind wegen der unterschiedlichen Fragestellungen in der Praxis außerordentlich vielfältig. Sie gliedern sich prinzipiell in folgende Klassen:

- o Risikoanalysemethoden
- o Entscheidungsmethoden
- o Optimierungsmethoden
- o Varianten/Parametermethoden

Das **Kooperationsmodell** umfaßt die verschiedenen Methoden der integrierten netzgestützten Bearbeitung von Projekten des Küsteningenieurwesens:

- o Kommunikationsmethoden (z.B. Conferencing, Multi-Media, e-mail)
- o Koordinierungsmethoden (z.B. Zielverfolgungsmethoden)
- o Dokumentationsmethoden (z.B. Präsentation, Visualisierung, Berichtswesen)

Die Bearbeitung von MorWin mit den vier Modellen erfolgt integriert in einer verteilten Umgebung. Alle am Projekt beteiligten Experten bilden projektbezogen eine durch das Rechnernetz verbundene Einheit "**Das virtuelle Institut**".

### 3 Projektziel

Ziel des Projektes ist ein deutlicher Zuwachs im physikalischen Verständnis über morphodynamische Vorgänge an Windwatten, die in ihrer Wechselwirkung mit Ingenieureingriffen signifikante ökonomische und ökologische Wirkungen haben. Dieser Erkenntniszuwachs soll für das Testgebiet von Hiddensee bis Darßer Ort mit dem Strelasund erworben werden. Von besonderem Interesse ist die Umgebung des Windwatts "Bock", in dem die Sedimentumlagerungen die Küstenstabilität beeinflussen und zu wesentlichen Problemen bei der Unterhaltung von Schiffahrtswegen führen.

Im Zuge des Projektes soll die oben vorgestellte Modelltechnik erprobt werden. Die Ausnutzung der Computernetze kann zu einer erheblichen Steigerung der Effektivität bei der Bearbeitung von

komplexen Fragestellungen und zu einer besseren Verbreitung erworbenen Wissens unter den Projektarbeitern führen.

Um die hydro- und morphodynamischen Vorgänge in windwattengeprägten Küstengebieten durchgängig beschreiben und simulieren zu können, werden folgende Teilaspekte im Projekt bearbeitet:

- o Modell der Informationsbasis zur konsistenten Haltung und Verwaltung von Informationen über Geometrie, Hydrologie, Meteorologie, Sedimentologie, Baumaßnahmen und Betriebswirtschaft des Untersuchungsgebietes,
- o Hydrodynamische Methoden auf der Basis der FEM und FDM sowie stochastischer und ingenieurpraktischer Methoden zur Simulation von Strömungen, Wasserständen, des Seegangsklimas sowie von Küstenlängstransport in einem großräumigen Küstenmodell,
- o Morphodynamische Methoden auf der Basis der FEM und FDM zur Erfassung der Veränderung der Gewässersohle in einem kleinräumigen Testgebiet mit kurzfristigen Ereignisrechnungen und langfristigen Szenariensimulationen,
- o Varianten/Parametermethoden zur Bewertung von Simulationsergebnissen, zur Identifikation sedimentologisch signifikanter Ereignisse und Definition repräsentativer Langzeitszenarien im Testgebiet.

Diese Aspekte führen zu einer **Pilotversion eines Modellierungssystems**, das ein breites Spektrum von Fragestellungen des Küstenmanagements abdecken.

Als Eigenleistung im Sinne des "virtuellen Instituts" ist die Entwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen der modernen Informations- und Kommunikationstechnik für eine heterogene vernetzte Arbeitsumgebung vorgesehen, um

- o die Kommunikation der am Projekt Beteiligten im Netz zu unterstützen,
- o die Kooperation der am Projekt Beteiligten durch Koordinierungs- und Zielverfolgungsmethoden im Netz zu fördern und
- o die Dokumentation und Präsentation von Projektarbeiten und -ergebnissen im Netz zu ermöglichen.

Neben der reinen technischen Realisierung sind auch die für eine effiziente Projektbearbeitung notwendigen und zweckmäßigen Arbeitsweisen und Strukturen in der Bearbeitergruppe "virtuelles Institut" Gegenstand der Arbeiten. Sie führen zu einer **Pilotversion einer Arbeitsumgebung**, die eine netzgestützte Bearbeitung von Projekten des Küsteningenieurwesens ermöglicht.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Planung ingenieurmäßiger Eingriffe beim Küstenschutz und bei der Unterhaltung von Wasserstraßen im Rahmen der Amtsaufgaben der zuständigen Behörden des Landes Mecklenburg-Vorpommern und des Bundes.

## 4 Stand der Forschung

### 4.1 Morphodynamik

- o Die **Dynamik der Windwatten** ist kaum erforscht. Dies geht aus der 1993 abgeschlossenen Forschungsstandanalyse [1] zur Mecklenburg-Vorpommerschen Boddenlandschaft hervor, die im Rahmen der interdisziplinären Klimawirkungsforschung angefertigt wurde. Die in KLIBO (Projekt Klimaänderung und Bodden) durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf physikalisches Prozeßverständnis von Ursachen/Wirkungs-Ketten. Gegenwärtig werden Sediment- und Seegangsatlanen für die Außenküste vor Zingst angefertigt.
- o Die **Entwicklung von Modellkonzepten zur Morphodynamik** [2] und deren exemplarische Anwendung auf vereinbarte Testfälle wie Wellenbrecher, Flußmündungen und Buchten war

Schwerpunkt der MAST-2 Forschung der Europäischen Union. Erkenntnisse aus diesen Projekten sind in die kommerziell eingesetzten Modellsysteme der beteiligten nicht-deutschen Institutionen (z.B. Danish Hydraulics Institute, Delft Hydraulics, HR Wallingford) integriert worden. Deutsche Einrichtungen waren nur peripher beteiligt.

- o Zanke [47] konnte die **Materialumlagerungen an der Rhinplatte** in der Unterelbe im Rahmen einer Pilotstudie im Auftrag der WSD Nord in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen über mehrere Jahre modellieren. Die Simulation der Sedimentbewegung basierte auf einer repräsentativen Tide und alternativ einer Korngröße bzw. einer einfachen Kornverteilung. Die Erweiterung auf seegangserzeugten Sedimenttransport und die Entwicklung von Filterprozessen für die Langzeitsimulation bringt diesen deutschen Ansatz auf einen Stand, wie er in europäischen Projekten angestrebt wird.
- o Aus einem KFKI-geförderten Projekt zur Seegangmodellierung [3] liegen Erfahrungen zur **Kopplung von meteorologischen und hydrodynamischen Modellen** im Bereich der Deutschen Bucht vor. Für Langzeitsimulationen sind Filterprozesse notwendig, die bisher nur für Tideprozesse angewandt wurden [9].

## 4.2 Netzgestützte Projektbearbeitung

- o Die Informationsbe- und -verarbeitung durch Ingenieure benötigt effiziente **Visualisierungs-, Präsentations- und Dokumentationswerkzeuge**. Im Rahmen früherer Projekte wurden hierfür umfangreiche Pre- und Postprozessoren entwickelt, die eine zügige Fallstudienbearbeitung ermöglichen [22]. Die Visualisierung bzw. Animation von Simulationsergebnissen ist durch graphische Oberflächen mit vielfältigen Möglichkeiten spezieller Auswertungen verfügbar [19]. Die Integration des Netzes ist nur ansatzweise realisiert.
- o Die verteilte rechnergestützte Bearbeitung bedingt die Speicherung, die Verwaltung und den Austausch erheblicher Informationsmengen im Netz. Aus dem Projekt "Daten-Management-System" (Land Schleswig-Holstein) [4] sind Erfahrungen über **Speicherung und Abruf von Natur- und Modelldaten** in lokalen Umgebungen vorhanden. Im Projekt "Softwarebörse" des DFN-Verein [13] [38] und weitergehenden Forschungsarbeiten [21] wurden **Kommunikations- und Datenaustauschprozesse in Rechnernetzen** bearbeitet. Die Nutzung des Netzes für Problemstellungen mit großen Datenmengen ist nicht praktisch erprobt.
- o Das **Internet** hat sich in den letzten Jahren als die weltweit verfügbare Kommunikationsbasis für den Austausch multimedialer verteilter Informationsbestände herauskristallisiert. Im Internet stehen die technologische Basis für verteilte Dokumentation (z.B. WWW mit HTML) und verteilte Software (z.B. IPC-Technik, JAVA) zur Verfügung. Der Einsatz dieser Techniken für die Entwicklung netzfähiger Software und die dezentrale Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen ist bisher nicht erprobt. Im Rahmen der Vorbereitung des Projektes wurden erste Testimplementierungen eines 2D-Strömungsmodells und zugehörige Visualisierungssoftware in der Programmiersprache JAVA erprobt [40].
- o Die Zusammenarbeit räumlich und zeitlich getrennter Arbeitsgruppen im Rahmen eines dezentral strukturierten Projekts basiert auf **Telekooperation**. Die hierfür notwendigen technologischen Grundlagen (Kommunikation, Koordination und Kooperation) sind z.T. noch Forschungsgegenstand. Die Erprobung und Anwendung von Telekooperation für eine dezentrale Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen existiert bisher noch nicht.

## 5 Kooperationspartner

An der einzurichtenden Projektgruppe beteiligen sich von Hochschulseite Einrichtungen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, der Technischen Hochschule Darmstadt und der Universität Hannover:

- o Der **Lehrstuhl für Bauinformatik der BTU Cottbus** (Prof. Dr.-Ing. K.-P. Holz)
- o Das **Institut für Wasserbau der TH Darmstadt** (Prof. Dr.-Ing. U. Zanke)
- o Das **Institut für Bauinformatik der Universität Hannover** (Prof. Dr.-Ing. R. Damrath)

sowie von Seiten der Bundes- und Landesbehörden:

- o Die **Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Nord** in Kiel
- o Das **Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Stralsund**
- o Das **Staatliche Amt für Umwelt und Natur (STAUN) Rostock** des Landes Mecklenburg-Vorpommern

Die drei an der Projektgruppe beteiligten Hochschulinstitute werden sich überwiegend mit der Entwicklung und Erprobung der Pilotversion für die morphodynamische Modellierung von windwattengeprägten Gebieten befassen.

Die WSD Nord in Kiel koordiniert die Beschaffung aller notwendigen Daten des Testgebietes und führt Verifikationsberechnungen auch mit externer Software für das Testgebiet durch.

Die drei Hochschulinstitute und die WSD Nord werden gemeinsam an der Einführung und Umsetzung netzgestützter Arbeitsweisen für Projekte des Küsteningenieurwesens arbeiten.

Das WSA Stralsund und das STAUN stellen vorhandene Daten aus Naturmessungen zur Verfügung. Das WSA Stralsund führt ergänzende Naturmessungen zur Modellverifikation durch.

Mit dem **Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)** sowie der **Humboldt-Universität Berlin** existieren Absprachen über die Lieferung von Datensätzen bzw. über unabhängige Modellierungen für die Erstellung von Randwerten für das Testgebiet.

Die **Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)** in Koblenz wird die Arbeiten begleiten.

## 6 Qualifikation und Erfolgsaussichten

Die am Projekt Beteiligten waren in Forschung und Anwendung in vielfältiger Weise an der Modellierung physikalischer Prozesse im Küsteningenieurwesen und informations- und kommunikationstechnologischer Fragestellungen im Bauwesen beteiligt. Dies zeigen im einzelnen [13] bis [48].

An Projekten und Funktionen sind hervorzuheben:

- o Gutachter der EG für Projekte im MAST-2-Programm, Morphodynamik (Dr. Barthel, WSD Nord)
- o Hydrodynamische Modellierung an der Saar (Prof. Damrath)
- o Optimierung des Küstenschutzes auf der Insel Sylt (Prof. Holz)
- o Morphodynamische Modellierung in der Elbe (Prof. Zanke)
- o Lehr- und Forschungsaufgaben in der Informationsverarbeitung (Damrath, Holz, Zanke)

Die Erfolgsaussichten werden als günstig eingeschätzt. Sie basieren neben der Qualifikation und Erfahrung der einzelnen Personen in praktischen Projekten auch auf deren bereits in Kooperationen durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben.

Die für die Projektdurchführung erforderliche Grundausstattung (Personal, Computer, Netzanbindung) zur Erbringung der genannten Eigenleistungen ist an den beteiligten Hochschulinstituten vorhanden. Eine netzgestützte Anbindung der WSD Nord ist vorgesehen.

## 7 Projektarbeiten

### 7.1 Arbeitsplan

Das Projekt läuft über vier Jahre und wird in zwei Phasen eingeteilt:

**Phase I des Projekts (1997-98) konzentriert sich auf die Identifizierung der großräumigen morphodynamischen Prozesse und die Schaffung von Grundlagen für eine dezentrale Projektbearbeitung.**

Die erfolgreiche morphodynamische Modellierung erfordert ein hochauflösendes hydrodynamisches Küstenmodell mit Strömungs-, Wind-, Seegangs- und Sedimentmodellkomponenten. Dieses wird durch die Einbindung vorhandener Elemente und deren Weiterentwicklung erstellt.

Es liefert einen Überblick über die Strömungen und Wasserstände bei verschiedenen Szenarien im Bereich der Nordzufahrt Stralsund. Die Berechnung erfolgt mit Randbedingungen aus dem Zirkulationsmodell des Institutes für Ostseeforschung Warnemünde, das mit einer Auflösung von 500 m für aufgetretene Windereignisse Wasserstände und Strömungen bereitstellt.

Die erforderlichen Daten zur Beschreibung der Geometrie des Testgebietes werden aus Unterlagen des BSH (Topographie) und Datenbeständen vom STAUN Rostock (Küstenlinien) und der WSV (Fahrrinnen) gewonnen. Hydrologische Informationen von Wasserständen und Strömungen liegen beim WSA Stralsund vor und Seegangsdaten der Meßboje vor Zingst sollen von der GKSS erworben werden. Es wird geprüft, inwieweit Seegangsaufzeichnungen des STAUN verwendbar sind. Meteorologische Informationen werden vom Wetterdienst beschafft. Die Daten werden in die Informationsbasis transformiert.

Von den oben skizzierten numerischen Methoden wird zunächst ein FEM Strömungsmodell mit Wasserstands- und Strömungsmessungen verifiziert. Zur hinreichenden Erfassung des Seegangsklimas vor Zingst und Hiddensee wird die Wechselwirkung von Strömung und Wellen mit einem monochromatischen Wellenmodell und mit einem spektralen Wellenmodell untersucht. Die Ergebnisse werden mit dem System MIKE21 NSW [5] [6] vom Danish Hydraulic Institute für ausgewählte Situationen überprüft. Die ermittelten Seegangsverhältnisse im Flachwasser werden als Randbedingungen für morphologische Teilmodelle und den Betrieb eines Küstenprofilmodells benötigt.

Als Ingenieurmethode wird das Küstenprofilmodell COSMOS [7] [8] von Hydraulic Research Wallingford eingesetzt, um Materialströme im Küstenlängstransport zu ermitteln, die als Eingangswerte für morphodynamische Teilmodelle benötigt werden.

Zur Vorbereitung der geplanten morphologischen Langfriststudien in Phase II werden unter Einbeziehung von extremen Hoch- und Niedrigwasser-Situationen [11] [12] sedimentwirksame Ereignisse identifiziert. Dazu werden bekannte Modelle der Parameter-Bewertung auf Tauglichkeit und Effizienz geprüft und weiterentwickelt.

Aus den hydrodynamischen Simulationen der Phase I kann sich ein Bedarf an zusätzlichen Naturmessungen im Testgebiet zur Modellverifikation ergeben. Sie werden im Zusammenhang mit Datenerhebungen, die vom WSA Stralsund für eigene Belange geplant sind, durchgeführt. Die Planung des möglichen Meßprogramms soll unter Einbeziehung der Simulationsergebnisse aus dem großräumigen Küstenmodell erfolgen, um den Aufwand zu begrenzen.

Begleitend zur Bearbeitung der physikalischen Fragestellungen werden die informationstechnologischen Grundlagen für eine netzgestützte Projektbearbeitung geschaffen.

Mit Abschluß der Phase I

- o steht ein verifiziertes großräumiges hydrodynamisches Küstenmodell für das Testgebiet zur Verfügung,

- o sind sedimentwirksame Szenarien für das Testgebiet identifiziert und ggf. in Fallstudien bewertet,
- o ist eine Pilotumgebung für eine netzgestützte Bearbeitung durch die Projektgruppe eingeführt.

**Phase II des Projektes (1999-2000) konzentriert sich auf die Morphodynamik am Windwatt unter Nutzung netzgestützter Projektbearbeitungsmethoden.**

Die morphodynamischen Simulationen im Bereich um das Windwatt "Bock" (Abb.1) erfordern ergänzende Beschaffungen von sedimentologischen Daten. Sedimentproben aus Fahrrinnen sind beim WSA Stralsund vorhanden. Um Anhaltspunkte für typische Kornverteilungen zu erhalten, sollen darüber hinaus einige Kernbohrungen auf den Windwatten "Bock" und "Geller Haken" erfolgen.

Als weiteres ergänzendes Naturmeßprogramm sind nach Maßgabe der Simulationsergebnisse bereichsweise Aufmessungen der Sandbank "Bock" vorgesehen. Die dabei anzusetzende Methode wird vom WSA Stralsund geklärt. Diese Auswertungen werden in die Informationsbasis übernommen.

Die numerischen Methoden beinhalten in dieser Projektphase die morphodynamische Modellierung der Veränderung der Gewässersohle. Zunächst sind Untersuchungen ohne Wellen zum Einfluß unterschiedlicher Kornfraktionen vorgesehen. Entsprechend den Ergebnissen aus Phase I werden für die morphodynamische Simulation Wellenmodelle für monochromatische Wellen bzw. Wellenspektren eingesetzt. Im Verlauf dieser Untersuchungen werden exemplarische Fallstudien am "Bock" gerechnet und die Aussagefähigkeit der numerischen Methoden analysiert. Insbesondere bei der Bewertung unterschiedlicher Ausbauvarianten besteht Bedarf an Weiterentwicklung von Methoden zur Parameterbewertung. Weiterhin sollen die Möglichkeiten der Langfristvorhersage durch Filterung unbedeutender Prozesse bzw. durch Parametrisierung von Einflüssen untersucht werden. Ferner soll gezeigt werden, ob und wie eine Einbeziehung des äolischen Sandtransportes [10] erforderlich ist.

Zur Verifikation der morphodynamischen Simulationsergebnisse werden einzelne Szenarien mit externer Software zum Vergleich gerechnet. Nach heutigem Kenntnisstand kämen dazu zwei Produkte in Frage: MIKE21-MORPH vom Danish Hydraulic Institute oder PISCES von Hydraulic Research Wallingford. Eine Beschaffung dieser Produkte ist angesichts der schnellen Entwicklung netzfähiger Softwaretechnik nicht zweckmäßig. Die erforderlichen Vergleichsrechnungen sind daher in einem entsprechenden Auftrag durchzuführen und die Ergebnisse in ASCII-Form abzuliefern.

Neben diesen physikalischen und ingenieurpraktischen Untersuchungen werden die Erfahrungen mit netzgestützter Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen ausgewertet. Dabei werden neben den konkret verwendeten und sehr schnellem Wandel unterliegenden Werkzeugen der Kooperation, Kommunikation und Dokumentation auch die sich herausbildenden Strukturen und Arbeitsweisen bewertet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Empfehlungen und Kriterien für künftige netzgestützte Bearbeitung von Projekten im Küsteningenieurwesen abgeleitet.

Mit Abschluß der Phase II

- o steht ein verifiziertes morphodynamisches Modell für den "Bock" zur Verfügung,
- o liegt eine Bewertung von exemplarischen morphodynamischen Fallstudien am "Bock" vor und
- o existiert eine Bewertung der durchgeführten netzgestützten Projektbearbeitung.

## **7.2 Meilensteine**

Die Projektgruppe erstellt jeweils zum Ende des ersten, zweiten und dritten Projektjahres einen Projektfortschrittsbericht als Meilenstein und am Ende des Projektes einen Abschlußbericht. Die Meilensteine beschreiben die in dem jeweiligen Projektjahr durchgeführten Arbeiten, den aktuellen Projektstand sowie die für die folgenden Jahre resultierenden ggf. modifizierten Projektarbeiten. Der Abschlußbericht dokumentiert alle im Projekt durchgeführten Arbeiten, Ergebnisse und Erkenntnisse. Er enthält die aus dem Projekt gewonnenen Erfahrungen und deren Übertragung auf Problemstellungen der Windwatten bzw. auf die netzgestützte Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen.

### 7.3 Zeitplan

Phase I	1997	1998	1999	2000
Datenbeschaffung	■	□		
Naturmeßprogramm	□	□		
Aufbau der Informationsbasis	■	■		
Anpassung, Erprobung und Anwendung hydrodynamischer Modelle	■	■		
Anpassung, Erprobung und Anwendung Ingenieurmethoden		■		
Spezifikation von Szenarien, exemplarische Verifikation		■		
Identifikation sedimentwirksamer Ereignisse	■	■		
Grundlage netzgestützter Projektbearbeitung (Eigenleistung)	■	■		
Phase II	1997	1998	1999	2000
Ergänzung Datenbeschaffung und Einbau in die Informationsbasis			□	□
Ergänzendes Naturmeßprogramm			□	
Anpassung, Erprobung und Anwendung morphodynamischer Modelle			■	■
Spezifikation von Szenarien, exemplarische verifikation			■	■
Anpassung, Erprobung und Anwendung von Bewertungsmethoden			■	■
Exemplarische Fallstudie am "Bock"			□	■
Auswertung der dezentralen Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen				■
Netzgestützte Projektbearbeitung (Eigenleistung)			■	■
<b>Berichte:</b>	1. MSt.	2. MSt.	3. MSt.	AB

### 7.4 Arbeitsteilung

Der Grundgedanke eines "virtuellen Instituts" ist die Bearbeitung der einzelnen Teilaufgaben in institutionsübergreifenden Arbeitsgruppen. Eine wesentliche Eigenleistung der Hochschulinstitute besteht in der Entwicklung und Erprobung geeigneter Strukturen, Arbeitsweisen und Methoden eines "virtuellen Institutes". Folgt man dem Kooperationsgedanken eines virtuellen Institutes, so ist die Zuordnung einer Teilaufgabe zu einem Projektpartner nur schwer möglich.

Um den geltenden Antragsrichtlinien gerecht zu werden, wird folgende Aufteilung spezifiziert:

Die Universität Hannover übernimmt im wesentlichen die Modellierung hydrodynamischer Prozesse im Hinblick auf die Morphodynamik.

Die TH Darmstadt übernimmt im wesentlichen die Modellierung der morphodynamischen Prozesse.

Die BTU Cottbus übernimmt im wesentlichen die Modellierung ingenieurpraktischer Prozesse im Hinblick auf das Küstenmanagement. Darüber hinaus übernimmt sie die verwaltungstechnische Projektleitung.

Die WSD Nord in Kiel übernimmt im wesentlichen die Datenbeschaffung und Koordination der notwendigen Naturmeßprogramme, die Verifikation und die Bewertung für das ausgewählte Testgebiet sowie die Spezifikation von Anforderungen an Modellierungssysteme im Küsteningenieurwesen.

Unabhängig hiervon führen alle Projektpartner gemeinsam die Entwicklung, Erprobung und Anwendung der vernetzten Projektbearbeitungsumgebung durch.

## 9 Literatur

- [1] Forschungsanalyse zum Projektantrag "Klimaänderung und Boddenlandschaft", Dr. Gusen, 1993
- [2] Europäische Kommission (ed.): G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk/Poland, 1995
- [3] Rudolph,E., Winkel-Steinberg,N., Hinrichsen,A.: Abschlußbericht RAMSES (Registrierung, Analyse, Modellierung von Seegang und Strömung), KFKI-Sachprogramm 31, Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuaren, 1991
- [4] BMFT (ed.), Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase II, 1994
- [5] DHI Software: MIKE21 - A Modelling System for Estuaries, Coastal Waters and Seas: Hydrodynamic Modelling, Wave Modelling, Sediment Transport Modelling, Horsholm/Denmark, 1993
- [6] Mangor, K. et al.: Morphological Impact Assessment of Artificial Islands for the Øresund link between Denmark and Sweden, DHI, 1995
- [7] Chesher,T.J. et al.: PISCES - A Morphodynamic Coastal Area Model, First Annual Report, Report SR 337, HR Wallingford, 1993
- [8] Europäische Kommission (ed.): Marine science and technology (MAST III) 1994-98, Project Synopses (Vol. 1), Project PACE, 1996
- [9] Latteux,B. et al.: Long term morphological simulation under tidal current with non cohesive sediment, Europäische Kommission (ed.), G8M coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk/Poland, 1995
- [10] Erchinger,H.F., Knaack,H.: Die Versuchsstrandaufspülung 1992 auf Norderney und Messungen zum äolischen Sandtransport, Die Küste, 57, 1995
- [11] Baerens,Ch. et al.: Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste, Teil I: Sturmhochwasser. Spezialarbeiten aus der AG Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, No. 8, 1994
- [12] Baerens,Ch. et al.: Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste, Teil II: Sturmniedrigwasser. Spezialarbeiten aus der AG Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, No. 9, 1995

### Literatur aus der Projektgruppe

- [13] Alm,W., Kück,F. u.a.:Dezentrale Projektbearbeitung und Datenkommunikation, Bauinformatik,1992
- [14] Barthel,V., Zhang,J.: Hybrid Modelling Technique in River Engineering, Proc. Int. Symp. East-West, North-South Encounter on the State-of-the-art in River Engineering Methods and Design Philosophies, St.Petersburg, Russia, 1994
- [15] Barthel,V., Willis,D.H.: Investigations for a Lagoon Harbour in Madagascar, Proc. IV. COPEDEC, Rio de Janeiro/Brazil, 1995
- [16] Barthel,V., Olesen, K.W.: Morphodynamic Model Studies for Estuary Management, Proc. Int Conf. Hydraulic Development, Hongkong, 1996

- [17] Barthel,V, Lehfeldt,R.: Morphodynamische Probleme bei der Tideelbe im Bereich der Rhinplatte, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Darmstadt (im Druck), 1996
- [18] Damrath,R., Olbrich,M.: Object-Oriented Systems, Design and Programming, Summer school on Systems Engineering, Poznan/Poland 1995
- [19] Damrath,R.: Visualisierungsmodelle für Finite Elemente, Tagungsbeitrag FEM'95, Stuttgart 1995
- [20] Damrath,R., Laabs,A.: Editing methods for physical visualisation, Proc. Int. Conf. Computing in Civil and Building Engineering Berlin 95, A.A.Balkema, Rotterdam 1995
- [21] Fellerhoff,Th., Molkenthin,F.: Netzfähige Objektbanken im Bauwesen, Institut für Allgemeine Bauningenieurmethoden, TU Berlin, 1992
- [22] Holz,K.-P., Feist,M., Nöthel,H., Lehfeldt,R., Plüß,A., Zanke,U.: The TICAD Toolbox Applied to Coastal Engineering Problems, Hydrosoft '90, Proc. 3rd Int. Conf. on Hydraulic Engineering Software, Massachusetts/USA, Computational Mechanics Publications, 1990
- [23] Holz,K.-P.; Lehfeldt,R.: New Tendencies in CAD and Networking Applied to Numerical Modelling in Coastal Engineering, Proc. 4th Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering, Tokio/Japan, 1991
- [24] Holz,K.-P., Milbradt,P.: Large Area Simulation of Beach Processes, Proc. Int. Conf. on Computing in Civil and Building Engineering Berlin 95, A.A.Balkema, Rotterdam ,1995
- [25] Holz,K.-P., Molkenthin,F.: Implementation of Hydroinformatics Systems, Short Course Int. Conf. Hydroinformatics '96, Zürich/Switzerland, 1996
- [26] Lehfeldt,R., Holz,K.-P.: Model Validation in X-Environment, Proc IX. Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources, Denver/USA, Computational Mechanics Publications, 1992
- [27] Lehfeldt,R., Wang,S.S.Y.: An Example of Model Design and Validation, Advances in Hydro-Science and -Engineering, Vol.1 B, Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, 1993
- [28] König,M., Milbradt,P.: Allgemeine komponenten-orientierte Finite-Element-Modellierung, Proc. Forum Bauinformatik Cottbus 1996, VDI-Verlag, 1996
- [29] Kück,F., Holz,K.-P.: Interfacing Report-Processing and CAD-Data, Proc. Int. Conf. Hydroinformatics, Delft/The Netherlands, 1994
- [30] Mewis,P., Holz,K.-P.: A Quasi Bubble-Function Approach for Shallow Water Waves, Advances in Hydro-Science and -Engineering, Vol. I, Part A, 1993
- [31] Mewis,P., Holz,K.-P.: Inverse boundary value estimation for a shallow water model, Proc. XI. Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources, Cancun/Mexico, 1996
- [32] Milbradt,P., Holz,K.-P.: Modelling Wave Propagation in Large Areas, Proc. Computer Modelling of Seas and Coastal Regions, Computational Mechanics Publications, 1992
- [33] Milbradt,P.; Holz,K.-P.: Optimization of Beach Nourishment with Mathematical-Numerical Models, Proc of IV. Int. Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Rio de Janeiro/Brazil, 1995
- [34] Milbradt,P.: Zur Mathematischen Modellierung großräumiger Wellen- und Strömungsvorgänge (Dissertation) Institutreihe des Inst. f. Bauinformatik, Universität Hannover, 1995
- [35] Molkenthin,F.: Integration of construction, calculation and documentation - The Structural Editor, Proc. CIB-Workshop Construction on the Information Highway, Bled/Slovenia, University of Ljubljana/Slovenia, 1996
- [36] Molkenthin,F., Horstmann,O.: Advanced Grid Modeling for Coastal and Nearshore Regions, Proc. Int. Conf. Hydroinformatic '96, Zürich/Switzerland, 1996

- [37] Noethel,H., Sundar,V., Holz,K.-P.: Statistische Analysen von Meßdaten aus einem Bühnenfeld, Die Küste, Vol. 54, 1992
- [38] Pahl,P.J., Damrath,R., Kaldewey,K., Sprang,S., Häusler,J., Laabs,A., Molkenthin,F., Marcellis,H., Karras,L.: Technische Modelle in Netzen, CIP-Statusseminar, Berlin 1989, Springer-Verlag, 1992
- [39] Sellerhoff,F.; Milbradt,P., Rose,M., Hüttermann,R.: Entwicklung von Komponenten für den Einsatz bei bauingenieurspezifischen Problemen, Proc. Forum Bauinformatik Cottbus, VDI-Verlag, 1996
- [40] Sellerhoff,F., Milbradt,P.: Martin-Strömungsmodell implementiert in C und JAVA, <http://www.bauinf.uni-hannover.de/>
- [41] Sundar,V.; Noethel,H., Holz,K.-P.: Asymetries in Waves and Velocities in a grain field, Ocean Engineering, Vol. 21, No. 5, 1994
- [42] Schleider,O.: Entkoppelte Berechnung des Sedimentabtrags für das Dambruchproblem, Proc. Forum Bauinformatik Cottbus 1996, VDI-Verlag, 1996
- [43] Zanke,U.: Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer-Verlag, 1982
- [44] Zanke,U.: Der Beginn der Sedimenttransportberechnungen, Wasser&Boden, Heft 1, 1990
- [45] Zanke,U.: Über die Unschärfe von Sedimenttransportberechnungen, Wasser&Boden, Heft 9, 1992
- [46] Zanke,U.: Ein numerisches Modell für bewegliche Sohle, Wasser&Boden, Heft 12, 1994
- [47] Zanke,U.: Bericht zur morphodynamischen Berechnung der Elbe bei Glückstadt, Hydro-Consult Hannover, 1995

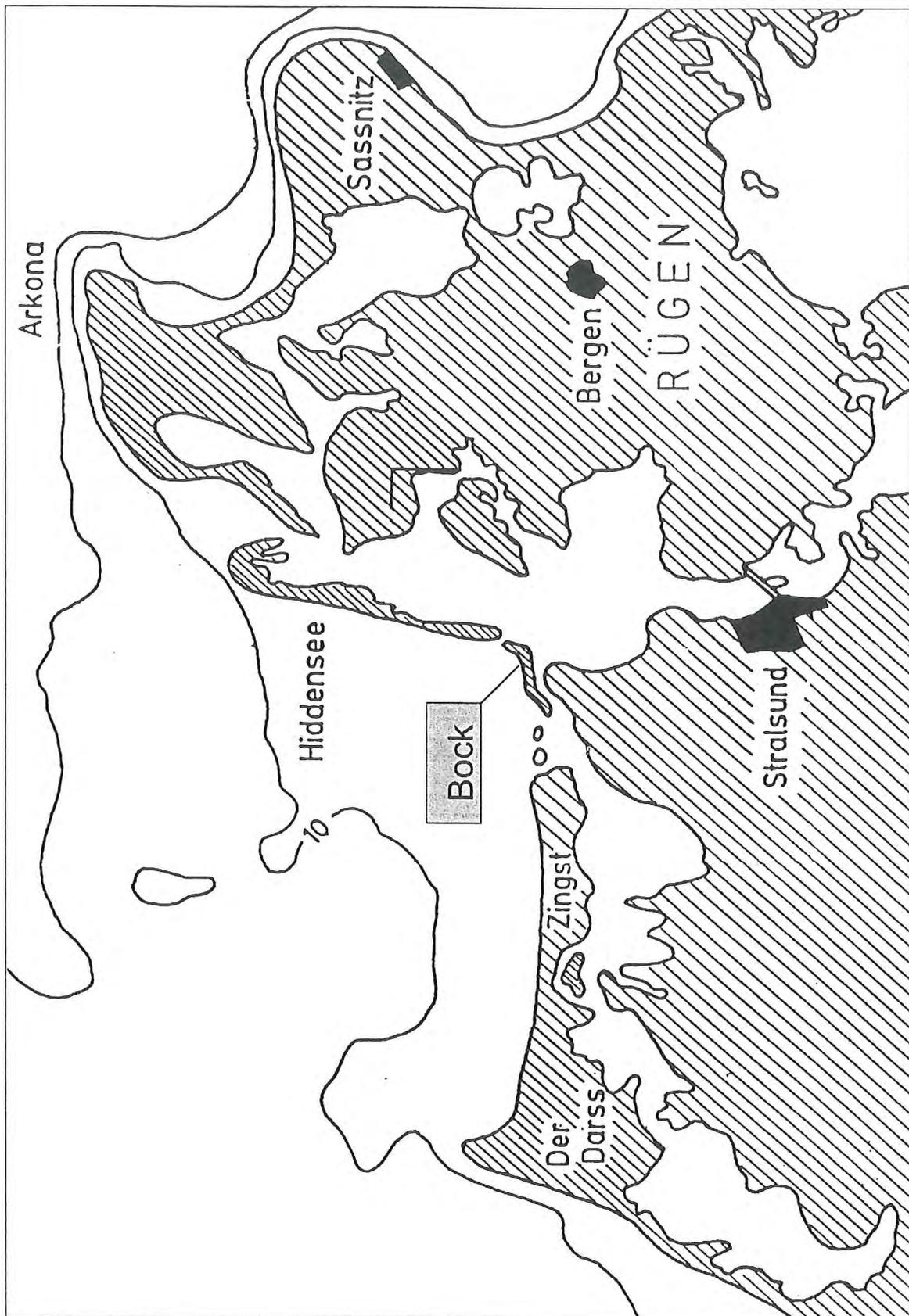


Abbildung 1: Testgebiet Rügen/Hiddensee/Darst-Zingster Boddenkette

## 2 Bewertung laufender Forschungsvorhaben

Derzeit arbeiten Wissenschaftler in mehreren Forschungsverbundprojekten im Bereich der mecklenburg-vorpommerschen Küste an der Frage nach Eintrag, Transformation und Verbleib von Schweb-, Nähr- und Schadstoffen in das Brackwasserökosystem Ostsee und seinen Küstengewässern. Das Koordinierungsbüro Boddenforschung an der EMAU Greifswald unterstützt und koordiniert die beiden Verbundprojekte **GOAP** (Greifswalder Bodden und Oderästuar- Austauschprozesse) und **TRUMP** (Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht), die Beiträge zur physikalischen Ozeanographie liefern sollen.

Schwerpunkt in der numerischen Modellierung liegt bei methodischen Fragen im Hinblick auf die Erstellung eines effizienten, problemorientierten Simulationswerkzeuges. Die Generierung einer hochauflösenden digitalen Topographie, Bereitstellung von Randwerten, Modell-validation und Verbesserung der Modellansätze stehen derzeit im Vordergrund der Untersuchungen. Weiterhin soll ein OstseeDatenInformationssystem aufgebaut werden.

Der Forschungsleitplan 1994 [23] umreißt die wissenschaftlichen Ziele der Küstenforschung so, daß Impaktszenarien für das Gesamtsystem Küste in Form von Basis-, Fall- und Mangement-Studien untersucht werden sollen. Die Projekte sollen dabei keine Vielfalt der Einzelheiten widerspiegeln, sondern generalisierbare Ergebnisse der Grundlagen liefern.

Auf diesem Hintergrund ist auch das Bund-Länder-Verbundprojekt **KLIBO** (Klimaänderung und Boddenlandschaft) angesiedelt. Dem Leitantrag [31] zufolge werden Ursachen - Wirkungsketten untersucht, wie etwa die Variabilität atmosphärischer Zirkulationsmuster und deren Rückwirkung auf Sturmflut-Intensität und -Verteilung. Die numerische Modellierung von Seegangsbelastung und Sedimenttransport bildet einen weiteren Schwerpunkt. Mit dem Aufbau von gekoppelten Modellsystemen zur Erfassung der Wechselwirkungen von Wind, Wellen, Strömung und Transport soll die Grundlage für Strömungs- und Sedimentrechnungen unter verschiedenen Wind-Szenarien gebildet werden. Mit diesem Werkzeug sollen Sedimentations- und Erosionsmuster in den Boddengewässern identifiziert, d.h. das geophysikalische Prozeßverständnis verbessert werden.

Im Rahmen der gesamten Boddenforschung wird bei der Modellierung ähnlich wie in einem KFKI-Projekt [41] eine Kopplung von andernorts verifizierten Modellkomponenten vorgenommen. Dazu werden zwischen den Einzelmodellen geeignete Schnittstellen zum Informationsaustausch in allen notwendigen Richtungen eingerichtet.

An keiner Stelle sind bisher Entwicklungen zu erkennen, die die Ergebnisse der MAST-2-Forschung umsetzen würden. Insbesondere bei Simulationen zur Morphogenese stoßen Modell-Systeme bzgl. Rechenzeit an ihre Grenzen, wenn großflächig hochaufgelöst über lange Zeiträume mit systembedingt kleinen Zeitschritten gerechnet werden muß [13]. Filtern im Prozeßbereich, um die genese-relevanten Mechanismen zu erfassen, und Filtern im Datenbereich zur Identifikation genese-relevanter Ereignisse werden als Abhilfe dazu in der Fachliteratur [44] vorgeschlagen.

Schwerpunkt der Arbeiten in der MAST-2-Forschung war die Entwicklung von Modellkonzepten und deren exemplarische Anwendung auf vereinbarte schematische Testfälle. Die Erkenntnisse aus diesen Projekten sind in die kommerziell eingesetzten Modellsysteme aller beteiligten Institutionen integriert worden.

Die angestrebten Untersuchungen zur Morphogenese von Windwatten stellen eine ortsbezogene Forschungsaufgabe dar und beinhalten ingenieurpraktische Fragen zur Stabilität und Regeneration von Fahrrinnen. Am konkreten Beispiel der Sandbank Bock sollen die operationellen Eigenschaften ausgewählter kommerzieller Modellsysteme mit repräsentativen Szenarien getestet und bewertet werden. Darüber hinaus soll ein bestehendes Simulationssystem weiterentwickelt und mit den kommerziellen Systemen verglichen werden. Ziel des Projektes ist die Bereitstellung eines modellgestützten Werkzeuges als Entscheidungshilfe zur Durchführung der Aufgaben der Bundes- (Unterhaltung der Hafenzufahrten) und Landesdienststellen (Küstenschutzaufgaben). Auf vorhandenes Datenmaterial und bisher erfolgte Auswertungen wird zur Vermeidung von Doppelarbeit zurückgegriffen.

Mit dem erarbeiteten operationellen Modellsystem können von der WSV kurz- und mittelfristige Untersuchungen (<10 Jahre) zur Optimierung der Fahrwasserunterhaltung durchgeführt werden. Gleichmaßen ist es im Küstenmanagement unter Einbeziehung angrenzender Regionen (Coastal Zone Management) einsetzbar.

### 3 Stand der Modelltechnik

Numerische Simulationssysteme, die für Untersuchungsgebiete mit Abmessungen ausgedehnter Meeresgebiete bis hin zu kleinräumigen Küstenabschnitten betrieben werden, haben sich als Werkzeug zur Analyse und Vorhersage etabliert.

Anhand der Abbildung 2 [49] lassen sich Prozesse im Küstensystem nach Hydrodynamik, Morphodynamik und Ökodynamik klassifizieren. Im Projekt MorWin liegt der Forschungsschwerpunkt in der Morphodynamik. Im Folgenden wird daher kein Bezug hergestellt zu ökodynamischen Modellen, wie sie etwa in Verbundprojekten wie KUSTOS, ÖKOBOD u.ä. entwickelt und betrieben werden.

Die numerische Modellierung hat mit Programmen für die hydrodynamischen Einzelprozesse von Strömung, Transport und Wellen begonnen und die in Abbildung 3 [19] dargestellten Wechselwirkungen hinsichtlich des Seeganges sukzessive mit erfaßt. In morphodynamischen Simulationen wird zusätzlich der Einfluß einer veränderlichen Topographie auf alle hydrodynamische Einzelkomponenten berücksichtigt.

Durch Programmketten geeignet gekoppelter Einzelmodelle werden die komplexen physikalischen Zusammenhänge simuliert. Die Modellketten verschiedener Modelliergruppen unterscheiden sich in der Art der Kopplung ihrer Einzelmodule und in Parametrisierungen der eigentlichen Prozesse. Die Simulationen werden durch umfangreiche Prä- und Postprocessing Software unterstützt, deren Leistungsumfang und Verfügbarkeit sehr unterschiedlich ist.

Der Betrieb solcher Modelle stellt hohe Anforderungen an die Programmstruktur und die Datenhaltung. Als ein Beispiel von vielen sei der notwendige Informationsaustausch zwischen den Rechenmodulen angeführt, wenn eine seegangsbedingt veränderte Energiedissipation im Strömungsmodul verwendet werden soll. Am DHL sind in diesem Zusammenhang [19] Regeln für Modularität und Wechselwirkung sowie für Wiederverwendbarkeit generischer Software erarbeitet worden (AIM, Architecture for Integrated Modelling). Weiterhin wurde ein proprietäres Datenaustauschformat definiert (NEFIS, NEutral File System), das das Arbeiten mit multidimensionalen Datensätzen normiert und unterstützt.

Die Entwicklung morphodynamischer Modelle war wesentlicher Bestandteil der "Marine Science and Technology" - Forschung der EU. In MAST-2 wurden Datensätze zum Testen von Strömungs- und Sedimenttransport - Modellen definiert. Abbildung 4 zeigt die ausgewählten Geometrien [8] einer halbrunden Bucht, einer Flußmündung, einer Lagune und eines küstenparallelen Wellenbrechers, die unter den angegebenen Werten für Korndurchmesser, Wellenhöhe und -periode modelliert wurden. Die räumlichen Auflösungen  $\Delta x$  liegt zwischen 4 und 15 m.

Die Validation der Modelle erfolgt durch möglichst umfang- und zahlreiche Hindcast-Simulationen mit charakteristischen Ereignissen, für die vorhandene Meßreihen reproduziert und die bestimmenden physikalischen Prozesse analysiert werden. Aus der lokalen

Übereinstimmung von Daten aus Natur und Rechnung wird geschlossen, daß solche Prozesse, die für spezifische Fragestellungen relevant sind, im jeweiligen Modellsystem hinreichend abgebildet werden.

Für Langzeituntersuchungen werden synthetische Zeitreihen entwickelt, die die Struktur prägender Ereignisse enthalten. Erst solche schematischen Szenarien für Tide-, Wellen- und Sedimentationsklima erlauben Simulationen über Jahre und Jahrzehnte. Arbeiten in diesem Bereich sind Gegenstand aktueller Forschung [44].

Validierte Modelle erlauben Vorhersage-Simulationen mit deren Hilfe eine Systemanalyse durchgeführt werden kann. Zeitliche und räumliche Szenarien, die Extremereignisse in den treibenden Kräften (z.B. Tide, Wind, Zufluß) bzw. anthropogene Veränderungen der Topographie (z.B. Baggern, Buhnen, Dämme) darstellen, können untersucht und bewertet werden. Sie werden als zentraler Bestandteil zukünftiger integrierter Küstenschutz-Managementsysteme (IKM) angesehen [36]. In diesem Rahmen soll die Küstenforschung zum einen Klima- und Belastungsprognosen erarbeiten und zum andern Schutz- und Ausbau-Szenarien analysieren, um Reaktionsstrategien zu entwickeln, mit denen die Küstenschutzplanung optimiert werden kann.

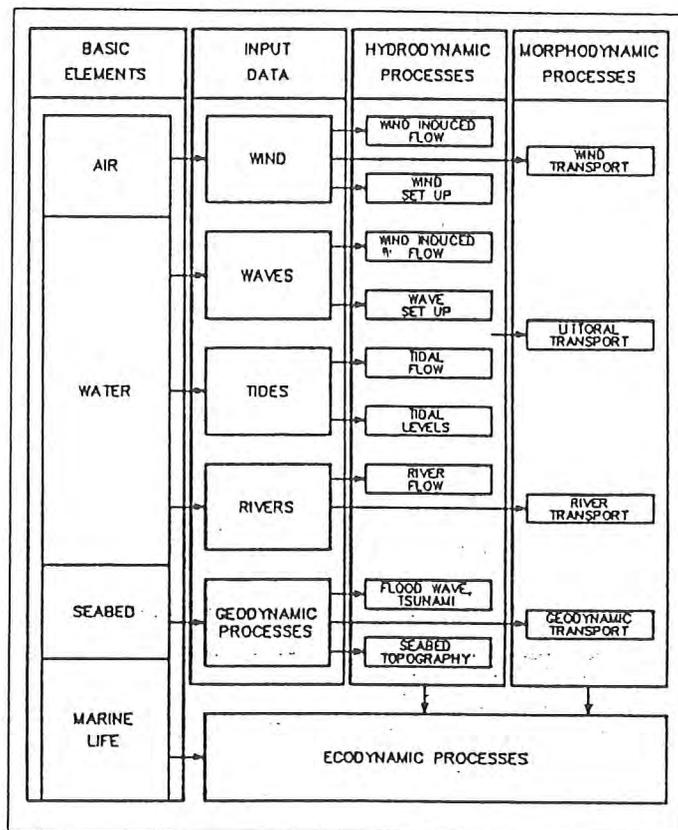


Abbildung 2: Prozesse im Küstensystem [49]

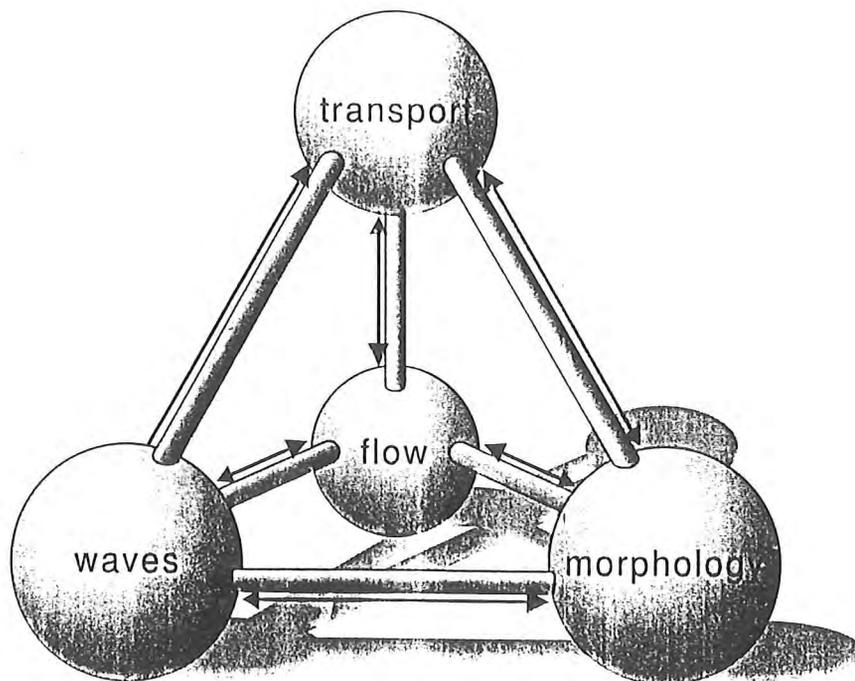
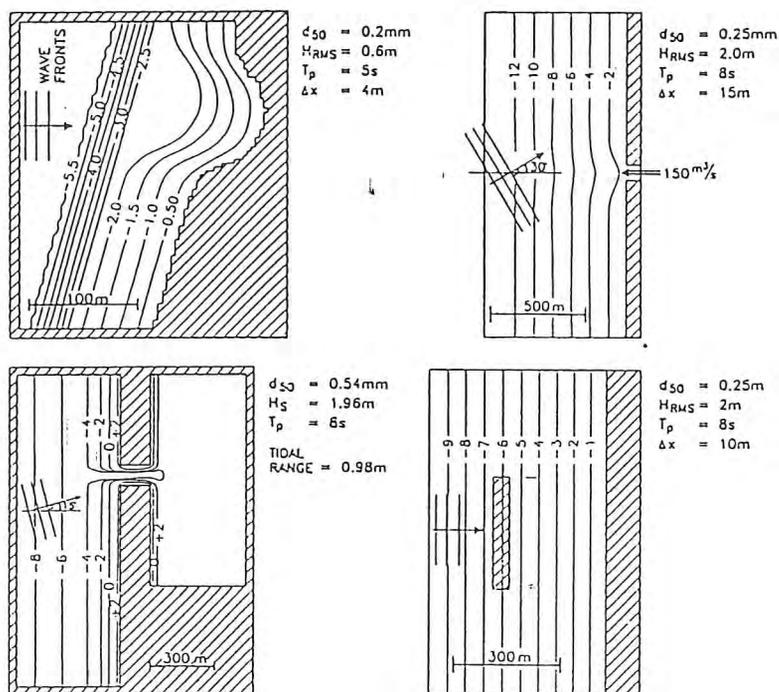


Abbildung 3: Modell-Komponenten und ihre Wechselwirkungen [19]



Sketches of the four common test cases: 1) Semicircular bay 2) River outflow, 3) Keta Lagoon, 4) Shore parallel breakwater

Abbildung 4: Definierte Testfälle für morphodynamische Modellierung in MAST-2 [8]

### 3.1 Modellierung der Hydrodynamik

#### 3.1.1 Strömungen

Simulationssysteme für die Hydrodynamik mit wind- und tide-getriebenen Strömungen stehen seit langem in großer Zahl zur Verfügung. Sie unterscheiden sich vor allem in Parametrisierungen für den Impulseintrag und den Mischungswirksamen Energieeintrag an der Oberfläche sowie in der Komplexität ihrer Turbulenzmodellierung. Für barokline Verhältnisse ist das Strömungsmodell mit einem Transportmodell für Salz (und Temperatur) gekoppelt, so daß der Einfluß von Dichteeffekten, der in Auftriebsgebieten bedeutsam ist, mit erfaßt wird.

Der Impulseintrag an der Wasseroberfläche durch den Wind ist zunächst vor allem in Sturmflutstudien untersucht worden. Im Zusammenhang mit hochauflösenden Küstenmodellen, in denen der Seegang wesentliche Bedeutung hat, wird der Frage nach Abschattungseffekten durch Inseln und geeigneten Parametrisierungen in Flachwassergebieten wie den Bodden [56] erneut nachgegangen.

Die folgende Zusammenstellung zeigt den Leistungsumfang von Strömungsmodellen, die bei einigen europäischen Wasserbaulabors im Einsatz sind:

#### DHI - Danish Hydraulic Institute [14]

Mike21-HD 2d Strömung  
 implizites ADI, FD, Double Sweep-Verfahren  
 Rechteck-Gitter, staggered grid

#### DHL - Delft Hydraulics Laboratory [19]

WAQUA 2d Strömung und Wasserqualität  
 TRISULA 2d-h / 3d Strömung und Wasserqualität (Salz, Temperatur)  
 Krummlinige und Rechteck-Gitter, auch schmale Dämme und Bühnen  
 FD-Verfahren

#### HR - Hydraulic Research Wallingford [9]

Tideflow-2D 2d Strömungen  
 explizites FD-Verfahren

Institut	DHL	DHL	DHI	HR
Modell-Name	TRISULA	WAQUA	M21 HD	Tideflow
Dimensionen	3d	2d	2d	2d
Turbulenz	k-ε	k-ε	E(x,y)	E(x,y)
Advektion/Diffusion	+	+	+	+
Coriolis	+	+	+	+
Dichte	+	-	-	-
Wasserqualität (S,T)	+	+	-	-
Bodenreibung	+	+	+	+
Wellen	+	+	+	+
Tide	+	+	+	+
Wind	+	+	+	+
Luftdruckgradient	-	-	+	-
Verdunstung	-	-	+	-
Trockenfallen	+	+	+	+
Discharge	+		+	+

Tabelle 1 Strömungs-Modelle

### 3.1.2 Wellen

Die Vielfalt von Phänomenen, die im Zusammenhang mit kurzen Wellen modelliert werden muß, ist in Abbildung 5 [45] angedeutet. Beim Einlaufen des Seegangs von See bis zum Ufer wird eine Reihe von Transformationen wirksam. Neben Umformungen durch Shoaling, Tiefen- und Strömungsrefraktion, Diffraktion und Reflexion treten Energie-dissipation durch Wellenbrechen und Bodenreibung sowie Energiezufuhr durch Wind auf. Die Gesamtwirkung führt zu Brandungstau und Küstenlängstransport, die das tide- und wind-induzierte Strömungsfeld modifizieren. Am Übergang von Tief- zu Flachwasser werden neue Wellen erzeugt, die z.B. zu Seiches führen können.

Eine breite Palette von Seegangsmodellen steht zur Verfügung, die sich in Auswahl und Parametrisierung der erfaßten Prozesse unterscheiden. Übergabegrößen an das Strömungsmodell sind radiation stresses, die den Impulsüberschuß infolge Wellenbewegung repräsentieren und die Verteilung von Druck und horizontalen Geschwindigkeiten einer fortschreitenden periodischen Welle beschreiben.

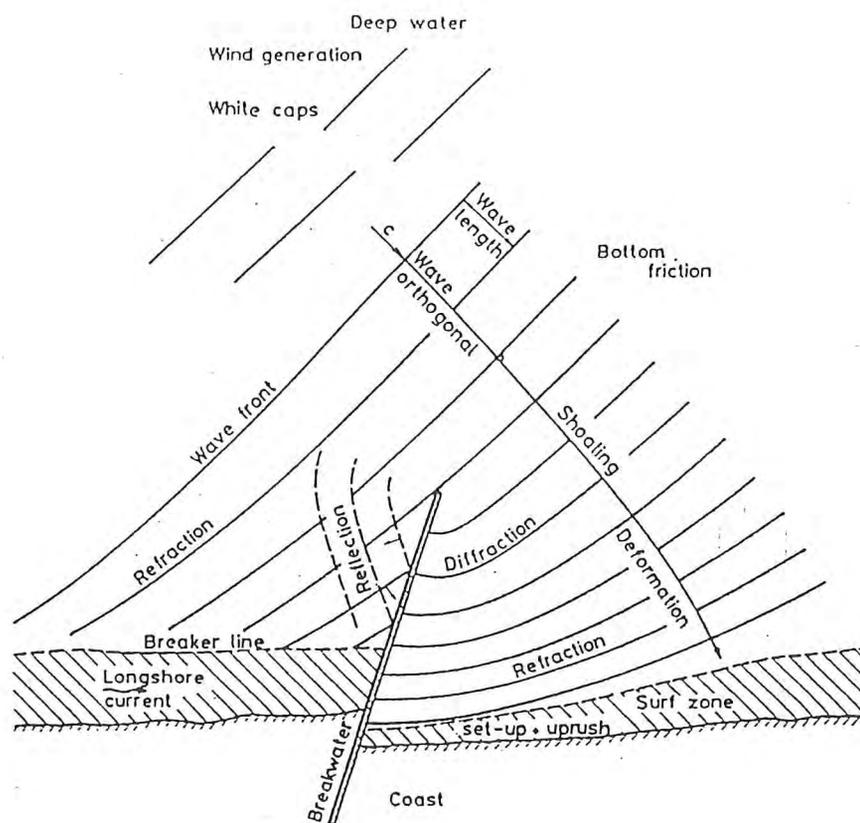


Abbildung 5: Hydrodynamische Prozesse im Küstenvorfeld [45]

Die Wellenmodelle können nach ihren Grundgleichungen in drei Kategorien eingeteilt werden: lineare Wellenmodelle, Wave-Action-Modelle und Boussinesq-Modelle.

Lineare Wellenmodelle gehen von der linearen Wellentheorie aus. Die allgemeinste Grundgleichung dieses Modelltyps ist die auf Berkhoff zurückgehende elliptische mild-slope-equation, deren Lösung ein komplexes Geschwindigkeitspotential ist und deren numerische Approximation erheblichen Rechenaufwand erfordert [4][5]. Sie beschreibt die kombinierte Wirkung von Diffraktion, Refraktion, Shoaling und Reflexion beim Fortschreiten linearer Wellen und berücksichtigt ebenfalls eine vorgegebene Strömung.

In der parabolic mild-slope-equation [21] wird die Reflexion vernachlässigt. Mit der dadurch erreichten deutlichen Rechenzeitsparung beim Lösen dieser Gleichung ist sie Grundlage vieler kommerzieller Wellenmodelle.

Die Arbeiten von Battjes [3] und Yoo & O'Connor [52][53] sind Ausgangspunkt weiterer Wellenmodelle. Grundgleichung hier ist eine zeitunabhängige Form der mild-slope Gleichung. Schnelle Lösungsalgorithmen zeichnen diese Wellenmodelle vor den o.g. mild-slope-Modellen aus.

Wellenstrahlmodelle erfassen nur noch die Tiefen- und Strömungsrefraktion. Wellenbrechen wird durch empirische Formeln beschrieben.

Lineare Wellenmodelle können ein Seegangsspektrum nur als Superposition aller vorhandenen Frequenzkomponenten berücksichtigen und müssen für jede Komponente eine separate Simulation durchführen. Die Superposition der Teilergebnisse kann jedoch keine nichtlinearen Wechselwirkungen der Einzelkomponenten, die besonders im flachen Wasser wichtig sind, wiedergeben.

Die Gruppe der Wave-Action-Modelle geht von der Erhaltung der Wave-Action-Density, d.h. Energie pro Relativfrequenz, aus. Energiequellen und -senken (z.B. Wind, Wellenbrechen, Bodenreibung, Blockieren infolge Strömung) werden durch einfache Ansätze beschrieben. Diffraktion wird nicht berücksichtigt.

Eine Simulation von Seegangsspektren ist möglich. Die Energieverteilung wird in Abhängigkeit von der Frequenz parametrisiert und in Fortschrittsrichtung diskretisiert. Im tiefen Wasser ist die Energie in einem engen Frequenzbereich konzentriert. Im flachen Wasser sind die Spektren jedoch breitbandiger, so daß dieser Ansatz problematisch wird.

Die Stärke der nichtlinearen Boussinesq-Wellen-Modelle ist ihre Anwendbarkeit im flachen Wasser. Sie basieren auf der vertikalen Integration der Flachwassergleichungen, wobei die vertikalen Beschleunigungen in Wellen durch den Boussinesq-Term berücksichtigt werden. Die von Boussinesq angegebene Gleichung ist von Peregrine [21] und anderen [34] so weiterentwickelt worden, daß auch Wechselwirkungen mit einer Grundströmung und Wellenbrechen erfaßt werden.

Es können Einzelwellen und Seegangsspektren berechnet werden. Die hohe Auflösung von mindestens 6 - 8 Stützstellen pro Wellenlänge führt bei diesem Modelltyp zu hohen Rechenzeiten, so daß sie als nur als Detailmodelle angewandt werden.

Die folgende Zusammenstellung zeigt den Leistungsumfang von Wellenmodellen, die bei einigen europäischen Wasserbaulabors im Einsatz sind.

#### **DHI - Danish Hydraulic Institute [14]**

Mike21-BW	Boussinesq Wellen
-EMS	Elliptic Mild Slope nach Berkhoff
-PMS	Parabolic Mild Slope
-NSW	Nearshore Spectral Wind-Wave Module; parametrisch/diskretes Spektral-Modell
-OSW	Offshore Spektral Wind-Wave Module; diskretes Spektral-Modell, 2D Spektrum

## DHL - Delft Hydraulics Laboratory [19]

ENDEC	1d
HISWA	HIndcasting of Shallow Water wAves
PHIDIAS	Program for HIndcasting of waves on Deep, Intermediate and Shallow water; 2D Spektrum
PHAROS	Mild Slope

## HR - Hydraulic Research Wallingford [9] [42]

FDWAVE	Mild Slope nach Battjes, schneller Lösungsalgorithmus
--------	---

Modell-Konzept	Wave-Action				Impuls				
	DHI	DHL	DHI	DHL	HR	DHI	DHL	DHI	DHI
Modell-Name	OSW	PHIDIAS	NSW	HISWA	FDWAVE	EMS	PHAROS	PMS	BW
zeitabhängig	+	+	-	-	-	-	-	-	+
Richtungsseegang	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Shoaling	+		+			+		+	+
Refraktion	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Strömungsrefraktion		+		+	+		+		
Diffraktion	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Reflexion	+		-		-	+	+	-	+
Bodenreibung	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wellenbrechen	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Wellen-Blockieren		+							
winderzeugte Wellen	+	+	+	+	-	-	-	-	-
nichtlineare Wellen	-	+	-	-		-		-	+
Welle-Welle WW	+		-			-	-	-	+
Welle-Strömung	-	+	+	+		-		-	-
Welle-Schiff	-		-	-	-	-	-	-	+

Tabelle 2: Seegangs-Modelle

### 3.1.3 Sedimenttransport

Die folgende Zusammenstellung zeigt den Anwendungsbereich von Sedimenttransportmodellen, die bei einigen europäischen Wasserbaulabors im Einsatz sind.

#### DHI - Danish Hydraulic Institute [15]

Mike21-ST 2d  
 Transportformeln nach Engelund-Hansen, Engelund-Fredsøe, Zyserman-Fredsøe, Meyer-Peter-Müller, Ackers-White, Bijker

#### DHL - Delft Hydraulics Laboratory [18]

SUSTRRA 2d-h  
 SUSTRENCH 2d-v  
 SUSTIM q3d vertikale Ansatzfunktionen für Geschwindigkeit  
 Sediment-Konzentration mit Transportformeln nach Engelund-Hansen, Meyer-PeterMüller, Bijker, Bailard-Van Rijn

#### HR - Hydraulic Research Wallingford [50] [35]

SANDFLOW-2D Transportformeln nach Ackers-White, Van Rijn

Institut	DHL			DHI	HR
Modell-Name	SUSTRRA	SUSTREN	SUSTIM	M21 ST	SANDFLOW
Dimensionen	2h	2v	q3d	2d	2d
bed load		+	+	+	+
suspended load	+	+	+	+	+
Erosion/Deposition	+	+	+	+	+
Wellen	+	+	+	+	+
Strömung	+	+	+	+	+

Tabelle 3: Sediment-Transport Modelle

### 3.2 Modellierung der Morphodynamik

#### 3.2.1 Danish Hydraulic Institute (DHI)

Am 21.11.95 fand ein Besuch beim Danish Hydraulic Institute statt. Hauptgesprächspartner waren I. Brøker und J.A. Zyserman. Das Modellsystem MIKE21 beinhaltet eine breite Palette von Modulen unterschiedlicher Komplexität zur Modellierung von Strömung, Wellen und Sedimenttransport. Neben den MAST-2 - Testbeispielen gibt es eine Reihe interessanter Küstenmanagementanwendungen, die z.B. die Wirkung typischer Starkwindereignisse in einem Mündungsbereich mit starkem Küstenrückgang und ausgedehnten Bühnenfeldern zeigen.

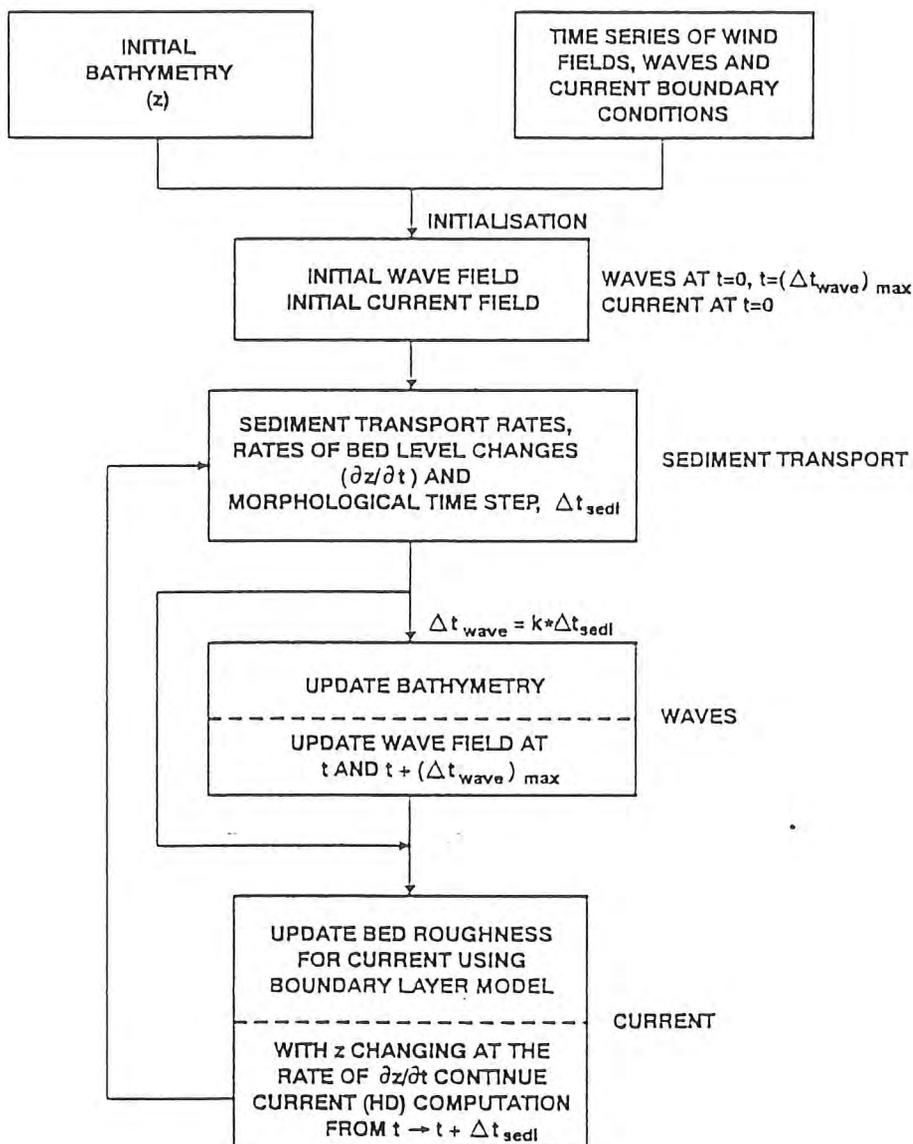


Abbildung 6: Flußdiagramm zur Morphodynamik Modellierung [29]

Anhand des Flußdiagramms für das morphodynamische Modell in Abbildung 6 wird die Sequenz der einzeln modellierten Prozesse für das DHI-System dargestellt.

- 1) Aus der Anfangstiefen-Verteilung sowie aus Zeitreihen für Strömungs- und Wellen-Randbedingungen werden Anfangsfelder der Strömung und des Seegangs ermittelt.
- 2) In der morphologischen Schleife werden der Sedimenttransport, die Rate der Topographie-Änderung und der morphologische Zeitschritt  $DTS_{Sedi}$  berechnet.
- 3) Wenn nötig, wird das Wellenfeld mit neuer Tiefe erneut berechnet. Dies erfolgt nur bei jedem  $k$ -ten Sediment-Rechenschritt.
- 4) Danach werden die Reibungskoeffizienten (Boden plus Welle/Strömungs-Wechselwirkung) neu bestimmt.
- 5) Damit läuft die hydrodynamische Rechnung bis zum nächsten hydrodynamischen Zeitschritt  $T + DTS_{Sedi}$

Die hier zum Einsatz kommenden Modelle sind

Mike21-PMS für Wellen

Mike21-HD für Strömung mit wellenabhängiger Reibung

Mike21-ST für Sedimenttransport unter Strömung und Wellen

Wenn das Sedimenttransport-Modell Mike21-ST [15] für Strömung alleine betrieben wird, stehen fünf Formulierungen für die Sedimenttransportraten zur Auswahl:

- Engelund-Hansen total load
- Engelund-Fredsøe total load (bed+suspended)
- Zyserman-Fredsøe total load (bed+suspended)
- Meyer-Peter-Müller bed load
- Ackers-White total load

Die Sedimenttransportraten werden berechnet mit der lokalen Wassertiefe und der tiefenge-mittelten Strömungsgeschwindigkeit, die aus Mike21-HD übernommen werden, sowie dem Strömungswiderstand, der Größe und der Sortierung der Materials.

Wird neben der Strömung noch der Seegang berücksichtigt, kann entweder nach

- Bijker total load (bed+suspended)

berechnet werden, oder ein Transportmodell (STP), in dem

Welle/Strömung-Wechselwirkung, Wellenbrechen,  
Materialsortierungen, Bodenzustand

erfaßt werden, zur Berechnung der Sedimentraten eingesetzt werden. Die notwendigen Wellenparameter, Wellenhöhe und -periode, werden in diesem Fall aus einem der Mike21-Wellenmodelle (NSW, PMS, EMS) übernommen.

Die DHI Software ist weltweit an mehr als 100 Standorten installiert und wird vor allem in Asien und in vielen Ländern Europas als Standard-Werkzeug angesehen. Seit 1995 finden regelmäßig Benutzer-Konferenzen mit Präsentationen und Workshops statt [17].

Eine Beteiligung des DHI am KFKI-Projekt könnte im Aufenthalt eines KFKI-Mitarbeiters am DHI liegen, der dort gegen Nutzungsgebühr und Aufwandsentschädigung unter Betreuung die Modellumgebung zu einer Pilotstudie nutzt. Das vorgeschlagene Untersuchungsprogramm umfaßt 1) Sediment Bilanzierung (Seegangstatistik und Littoraltransport), 2) Übersichtsmodell zur Strömung (Mike21/Mike3) und 3) lokale Morphodynamik mit gekoppelten Wellen-/Strömungs-/Sedimenttransport- Modellen.

Eine Kostenschätzung für die vollständige Untersuchung beläuft sich auf insgesamt 300.000,- DM. Die UNIX-Installation der dedizierten Modelle wird mit 53.000,- DM veranschlagt.

### 3.2.2 Hydraulic Research Wallingford (HR Wallingford)

Am 5. Februar 1996 fand ein Besuch bei der Marine Sedimentation Group des britischen Forschungslabors Hydraulic Research Wallingford statt. Gesprächspartner waren R.L. Soulsby als Leiter der Arbeitsgruppe und die Mitarbeiter H.N. Southgate und T.J. Chesher.

Ziel des Treffens war die Vorstellung des morphodynamischen Modells PISCES, das im Rahmen der EG-Förderung MAST-2, Morphodynamik, seit 1992 entwickelt worden ist. Weiterhin waren mögliche Formen der Zusammenarbeit Bestandteil der Gespräche.

Das Modellsystem PISCES [9] [35] koppelt die in HR Wallingford im Laufe der letzten 20 Jahre entwickelten Modelle für Tideströmung und Sedimenttransport (TIDEWAY) sowie Wellen (FDWAVE). Als neue Komponente tritt ein morphodynamisches Modell hinzu, das mit einem morphodynamischen Zeitschritt die Entwicklung der Topographie beschreibt und die notwendigen Korrekturen des Strömungsfeldes bei erfolgter Topographieänderung steuert (vergl. Abbildung 7).

Mit PISCES werden folgende physikalische Prozesse erfaßt:

- Wellenverteilungen für alle Tidewasserstände,
- tide-, wind- und wellen-induzierte Strömung,
- Wechselwirkung Wellen - Strömung,
- welleninduzierter Sedimenttransport,
- morphodynamische Entwicklung incl. seitliche Erosion von Kanälen.

Beim Strömungs- und Sedimenttransport-Modell handelt es sich um ein explizites, 2-dimensionales Finite-Differenzen-Verfahren auf einem regelmäßigen Gitter (15m Raster in den vorgestellten Testfällen). Die Energiedissipation im Reibungsansatz enthält neben einer örtlich variablen Bodenreibung die Wirkung des Seeganges. Die Energiediffusion ist mit einer Eddy-Viscosity, die wie üblich von der Strömungsgeschwindigkeit und zusätzlich von der Wellenenergiedissipation abhängt, parametrisiert.

Des Sedimenttransport ist in der ersten Version [9] nach einer Transportformel von van Rijn berechnet worden, die zusätzliche empirische Terme für den Einfluß von Wellenbewegung aufweist und weiterhin noch Bodenneigungseffekte berücksichtigt. Diese Version zeigt für den MAST-2-Testfall einer Flußmündung bei stationärer Strömung im Vergleich mit DHI und anderen die ausgeprägteste morphodynamische Entwicklung.

Die nachfolgenden Testfälle für Tideströmungen sind mit dem Sediment-Transportmodell SANDFLOW-2D [35] für repräsentative Korndurchmesser durchgeführt worden, das folgende Eigenschaften hat:

- Verzögerungsfunktion für Quellen (Sedimentation und Erosion),
- Sättigungskonzentration aus Gesamtfracht nach van Rijn (mit Erweiterungen wie oben), explizite FD Methode mit Zeitschrittkriterium gemäß maximaler Diffusion,
- Kalibrieren durch Sinkgeschwindigkeit und vertikale Diffusivität.

Das eingesetzte Wellenmodell [9] berücksichtigt Refraktion und Diffraktion. Es erfaßt Dissipation durch Bodenreibung und Wellenbrechen. Zur Lösung wird ein explizites, zeilenweises Predictor-Corrector-Verfahren verwendet. Das Rechengitter ist dabei in Hauptanlaufichtung des Seeganges orientiert. Als Vorteil eines zweiten Rechengitters neben dem der Strömungs-/Transport-Rechnung wird die Flexibilität im Fall notwendiger

Netzverdichtungen angeführt. Zur numerischen Stabilisierung wird Mittelwertbildung in der jeweiligen Rechenzeile benutzt.

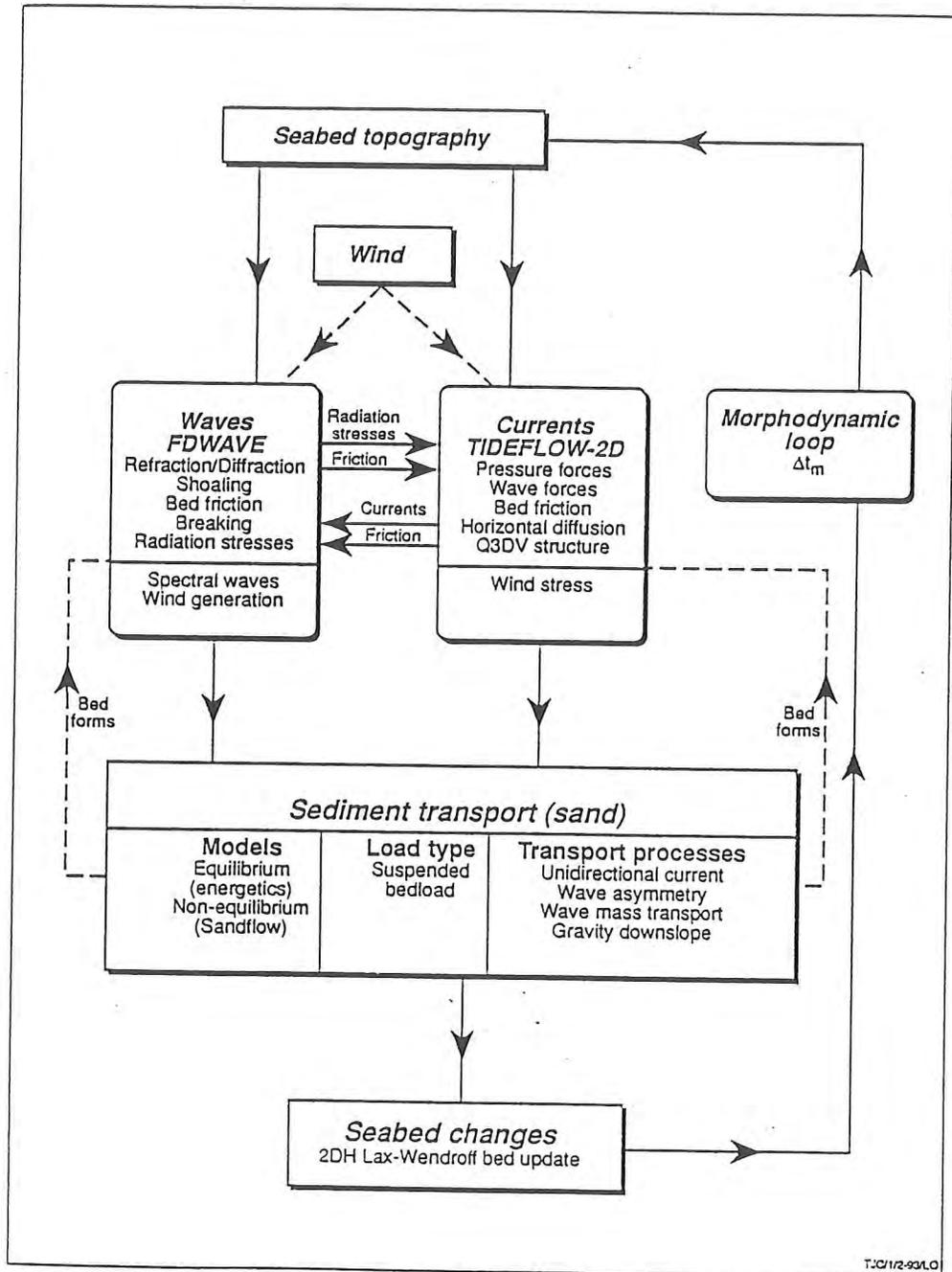


Abbildung 7: Modellsystem PISCES von HR Wallingford [9]

PISCES ist nach Angaben in der Literatur und nach Gesprächen mit HR Wallingford für Simulationszeiten bis zu einem Monat anwendbar. Langzeitsimulationen für Jahre / Jahrzehnte erfordern neue Modellansätze bzgl. Prozeß- und Daten-Filterung, die nicht in PISCES verfolgt werden.

Nach Einschätzung der Modellentwickler und Vergleich der Ergebnisse der MAST-2-Testfälle stellt dieses Modellsystem ein Werkzeug zur Analyse kleinräumiger Gebiete ( $1 \times 2 \text{ km}^2$ ) dar. Eine Beteiligung am KFKI-Projekt zur Modellbewertung von PISCES könnte im Rahmen eines Aufenthaltes von einem HR-Gastwissenschaftler beim KFKI erfolgen. Die Überlassung des Modells zu hiesigen Testläufen wird als nicht praktikabel angesehen.

### 3.2.3 Delft Hydraulics Laboratory (DHL)

Gesprächspartner in Delft waren am 12.03.1996 Dr. J.A. Roelvink und Prof. H.J. de Vriend. Für morphodynamische Modellierungen wird vom Delfter Modellierungssystem DELFT3D [28] das Teilmodell DEL2D-MOR eingesetzt, mit dem Untersuchungen bis hin zu einem Jahr durchgeführt werden.

Die Komponenten für Strömungen, Seegang, Sedimenttransport sind identisch mit den Einzelmodellen, die am DHL seit 30 Jahren entwickelt worden. Die flexible Modulstruktur erlaubt in DEL2D-MOR, die Programmablaufsteuerung über eine Benutzeroberfläche festzulegen. Es wird eine Baumstruktur von Prozessen definiert, an deren unterstem Ende die Rechenmodule der Einzelprozesse stehen. Mit dem interaktiven Steuermodul werden Zeitschritte für Basisprozesse vorgegeben und Zeiträume oder Abbruchbedingungen für Simulationen definiert.

Dieser Ansatz der Programm-Gestaltung trägt modernen Ansprüchen an Software Handhabung Rechnung. Die eigentliche Modellkopplung mit Datenaustausch über Dateien zwischen den Einzelmodellen unterscheidet sich jedoch nicht von DHI oder HR Wallingford.

Das barokline Modell TRISULA löst die Flachwassergleichungen zur Strömungsberechnung auf krummlinigen Koordinaten mit Trockenfallen. Turbulenzmodelle bis  $k-\epsilon$  können ausgewählt werden. Der Seegangseinfluß wird über radiation-stress berücksichtigt und kann in die Änderung der Bodenreibung nach verschiedenen Formulierungen eingehen.

Zur Seegangsberechnung wird Modell HISWA für stationäre, kurzkämmige Wellen auf einem gesonderten Rechteckgitter eingesetzt. Gewöhnlich werden mehrere Seegangsläufe für unterschiedliche Randbedingungen (Richtungen) durchgeführt, wobei die Strömungs- und Wasserstandsdaten aus der Strömungsrechnung stammen. Die Ergebnisse können wieder ans Strömungsmodell zurückgegeben werden.

Beim Sedimenttransport werden Geschiebefracht und Schwebstofffracht jeweils als lokale Funktion von Strömungs- und Seegangparametern sowie der Bodenbeschaffenheit errechnet. Dies kann entweder mit den in der Literatur angegebenen Transportformeln geschehen oder durch Lösung einer Transportgleichung. Dazu wird ein quasi 3d-Ansatz benutzt, in dem die Vertikalprofile von Sedimentkonzentration und Geschwindigkeit durch Ansatzfunktionen beschrieben sind. Bodenneigungseffekte und nicht erodierbare Schichten können in jedem Fall erfaßt werden.

Im Morphodynamikmodul wird die Topographieänderung nach Bildung der Sedimentbilanzen berechnet und gemäß dem morphodynamischen Zeitschritt die Tiefenverteilung aktualisiert, analog zum Verfahren bei HR Wallingford (vergl. Abbildung 7).

Erste Anwendungen von DEL-MOR bilden die MAST-2 Testbeispiele [39]. Welche Vorteile der quasi 3d Ansatz bietet, ist noch nicht geklärt [8].

Bei einer Beteiligung am KFKI-Forschungsprojekt kann eine kostenlose Universitätslizenz für WindowsNT oder UNIX erteilt werden. Für updates (2mal jährlich) und technische Unterstützung ist in jedem Fall eine 10%-ige Unterhaltungslizenz in Höhe von 17.000,- DfL notwendig. Damit wird garantiert, daß im Projekt mit der jeweils aktuellen Programmversion gearbeitet wird.

Der Kostenrahmen für Trainings- und Support-Aufwand für 1) einige Wochen Einweisung eines Mitarbeiters beim DHL in Delft und 2) etwa zwei Monate Modellimplementierung durch einen DHL-Mitarbeiter in Kiel wird auf etwa 100.000,-DfL abgeschätzt.

### 3.3 Anwendungsbeispiele morphodynamischer Modellierung

#### 3.3.1 Küstenrückgang und Küstenschutzplanung

Ein morphodynamisches Modell vom DHI [16] wird am Nordseezugang des Limfjordes mit starkem Küstenrückgang eingesetzt 1) zur Analyse des Systemverhaltens durch hindcasting von zwei prägenden Starkwindereignissen und 2) als Planungshilfe für Buhnenbau und Sandvorspülungen.

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden bestimmt durch das Wasserstandsgefälle über die Halbinsel Jütland hinweg. Maximaler Tidehub von 40 cm und im Mittel nordwärts setzende Strömungen bestimmen das Regime. Starkwindereignisse aus Richtungen SW bis NW überlagern sich diesen hydrographischen Bedingungen.

Die quasi-uniforme Küstenlinie erlaubt Untersuchungen mit LITPACK, das für alle Wellen- und Strömungssituationen Sedimentbilanzen liefert. Ergebnisse werden mit Erosionsmessungen über 25 Jahre verglichen.

Die Abbildung 8 zeigt die Überdeckung des Küstengebietes mit dem großräumigen Strömungsmodell (MIKE21-HD), das an Pegelpositionen gesteuert wird und eine Auflösung von 400m besitzt. Darin eingebettet ist das Regionalmodell zur Hydrodynamik mit 100m Auflösung (MIKE21-HD), das von einem regionalen spektralen Wellenmodell (MIKE21-NSW) Seegangs-informationen erhält. Das eigentliche Untersuchungsgebiet mit einer Ausdehnung von 400x250m<sup>2</sup> hat eine Auflösung von 20m. Das hier zum Einsatz kommende Strömungsmodell MIKE21-HD übernimmt direkt radiation stresses aus dem parabolischen mild-slope Wellenmodell MIKE21-PMS und berücksichtigt weiterhin die seegangs-modifizierte Bodenreibung.

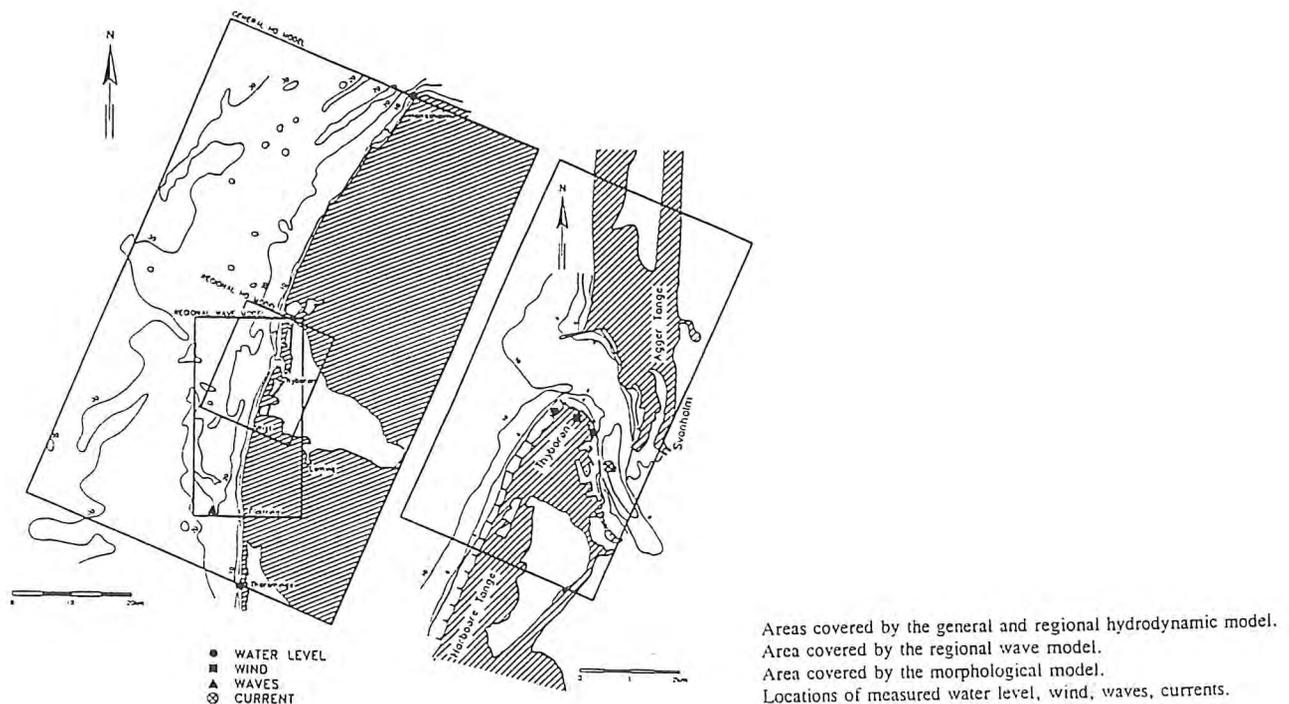


Abbildung 8: Modellgebiete bei Thyborøn [16]

Abbildung 9 zeigt Wellen-, Strömungs- und Sedimenttransport-Felder während eines Sturmereignisses. In Abbildung 10 ist die Wirkung unterschiedlicher Buhnenlängen hinsichtlich des Küstenlängstransportes während eines Sturmereignisses dargestellt.

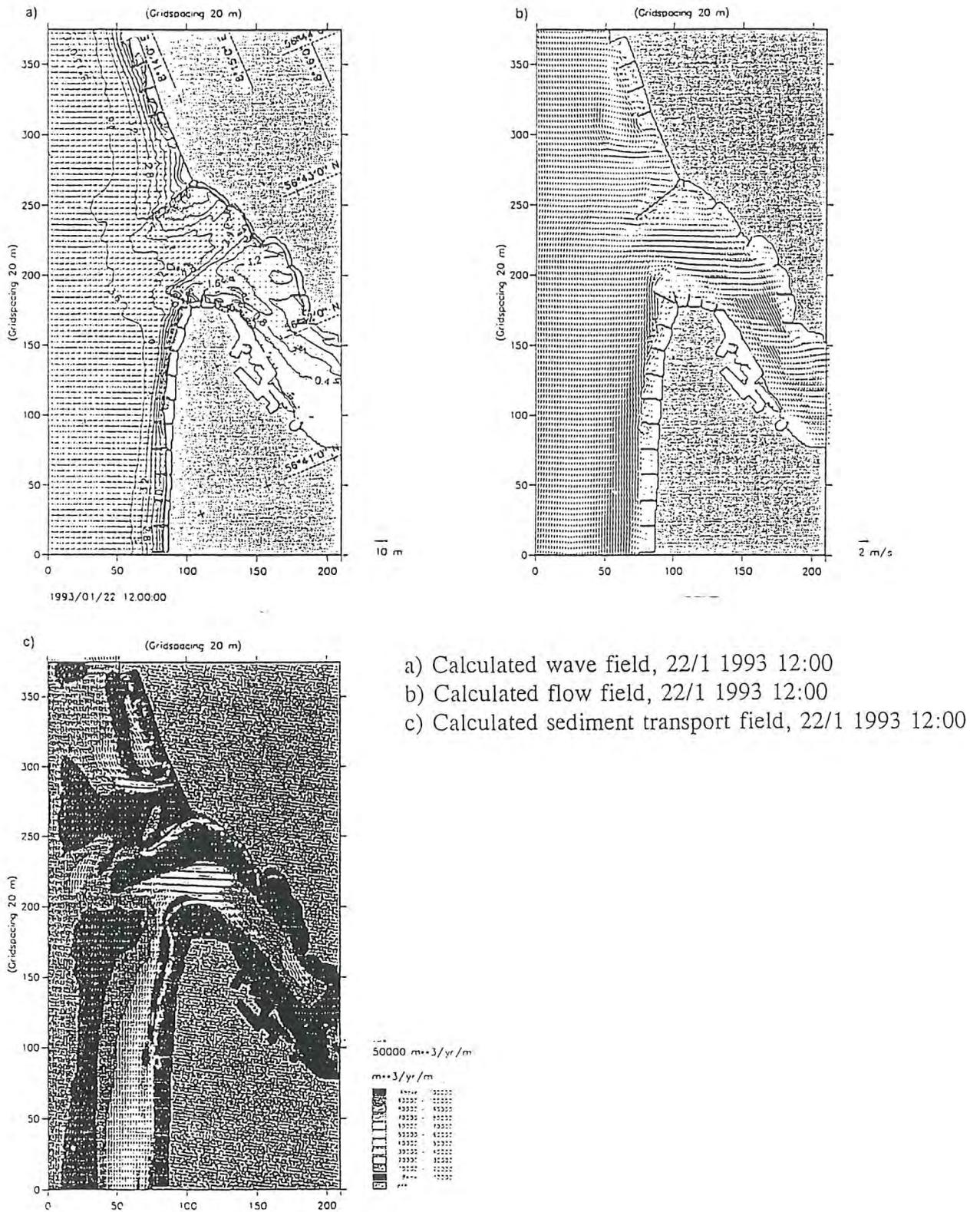
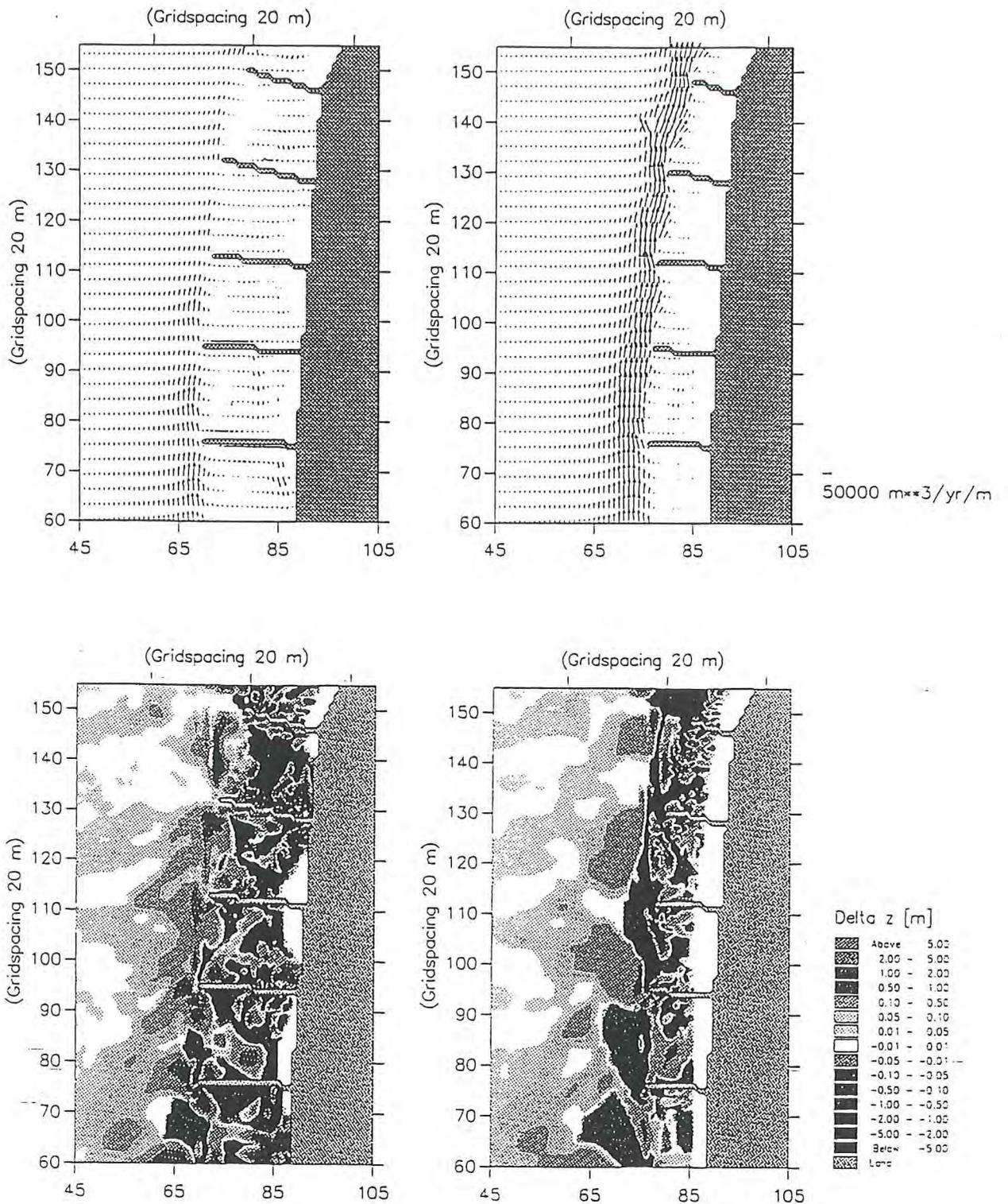


Abbildung 9: Berechnete Wellen-, Strömungs- und Sedimenttransportfelder [16]



Sediment transport (instantaneous) and morphological response (20/1 0:00 - 22/1 15:00 1993) in a groyne field during a storm. Two different lengths of the groynes are tested.

Abbildung 10: Variation der Buhnenlänge und Sedimenttransport [16]

### 3.3.2 Vorgelagerter Wellenbrecher

Die morphodynamischen Modelluntersuchungen des DHI [30] liefern einen Beitrag zum Prozeßverständnis in der Umgebung eines vorgelagerten Wellenbrechers. Ausgehend von einer ebenen Strandtopographie wird die morphologische Entwicklung hinter einem Wellenbrecher für unterschiedliche konstante Seegangsbedingungen analysiert.

Für normalen Wellenanlauf bilden sich durch den unterschiedlichen Wellenauflauf entlang der ungeschützten Küste bzw. hinter dem Wellenbrecher zwei symmetrische Eddies aus. Bei schrägem Wellenanlauf tritt deutlicher Küstenlängstransport von Sediment auf, der vom Abstand des Wellenbrechers zum Ufer und der Anlaufrichtung abhängt.

Abbildung 11 zeigt das prinzipielle Strömungsfeld für diesen Untersuchungsfall und in der Abbildung 12 rechts ist die Entwicklung der Topographie nach 20 Tagen dargestellt. Eine herkömmliche Simulation ohne morphodynamische Rückkopplung innerhalb der Modell-Komponenten führt auf eine extrapolierte Tiefenänderung, die keine stromab auftretende Erosionszone zeigt und deutlich unterschiedliche Ablagerungsmuster im abgeschirmten Bereich aufweist.

Das verwendete Wellenmodell muß in diesem Beispiel die Phänomene von shoaling, Tiefenrefraktion, Wellenbrechen und Diffraktion erfassen [29]. Das spektrale Wellenmodell des DHI berücksichtigt keine Diffraktion. Der Versuch, zur Kompensation ein breitbandiges  $\cos^2$ -Richtungsspektrum einzusetzen, führt zu einer Glättung des radiation stress - Feldes. Somit reduzieren sich die radiation stress - Gradienten, so daß die Sediment-Transportraten um den Faktor 3 kleiner waren, als bei Verwendung eines Modells, das Diffraktion berücksichtigt.

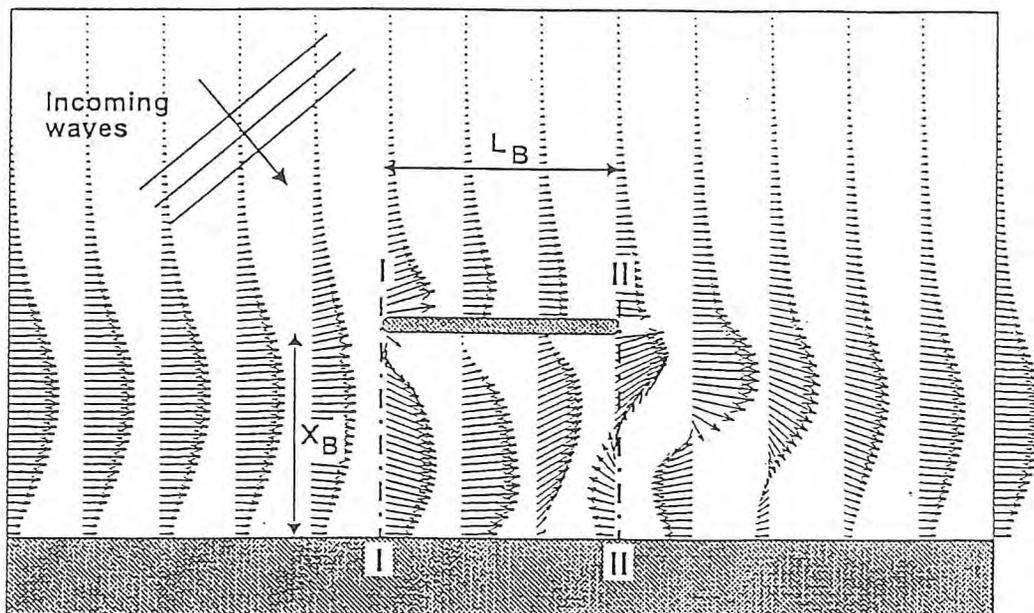
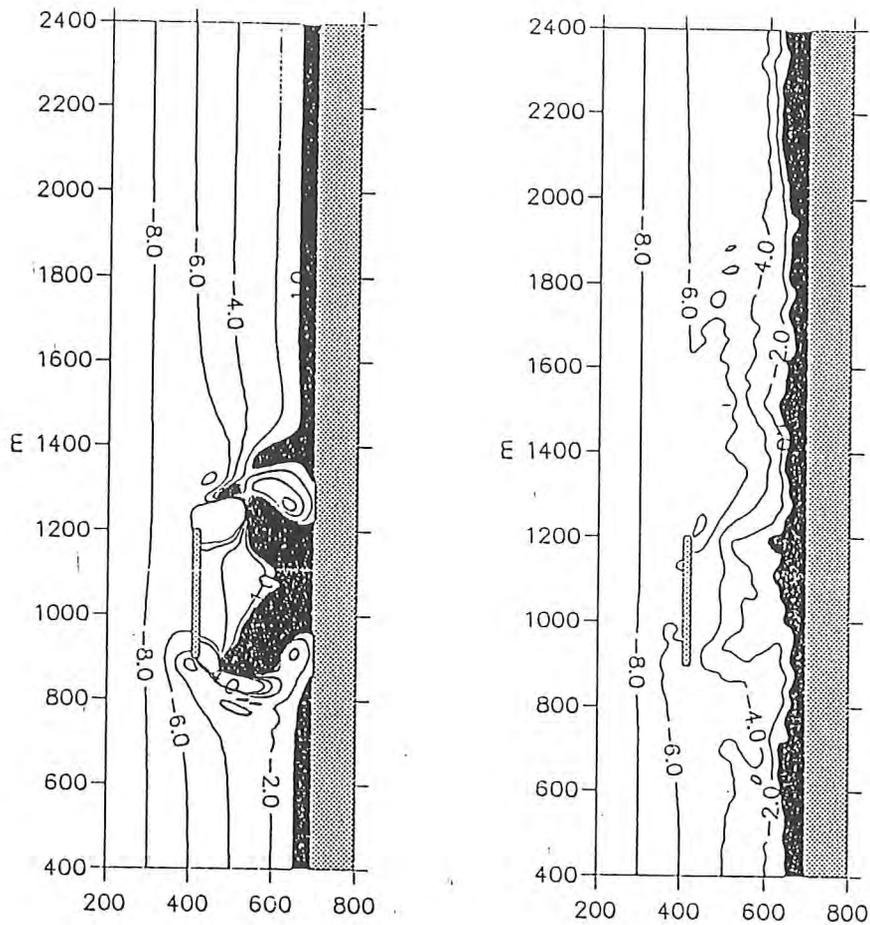


Abbildung 11: Strömungsfeld im Bereich eines küstenparallelen Wellenbrechers [30]



Initial bathymetry: plane beach, slope 1:50

Incident waves: monochromatic, unidirectional,  $H_{rms} = 2$  m (at 10 m depth), wave period,  $T = 8$  s, angle between coast orthogonal and direction =  $10^\circ$

Sediment: median grain size = 0.25 mm

Breakwater: length = 310 m, distance from shore = 270 m

Abbildung 12: Morphologische Entwicklung nach 20 Tagen [30]

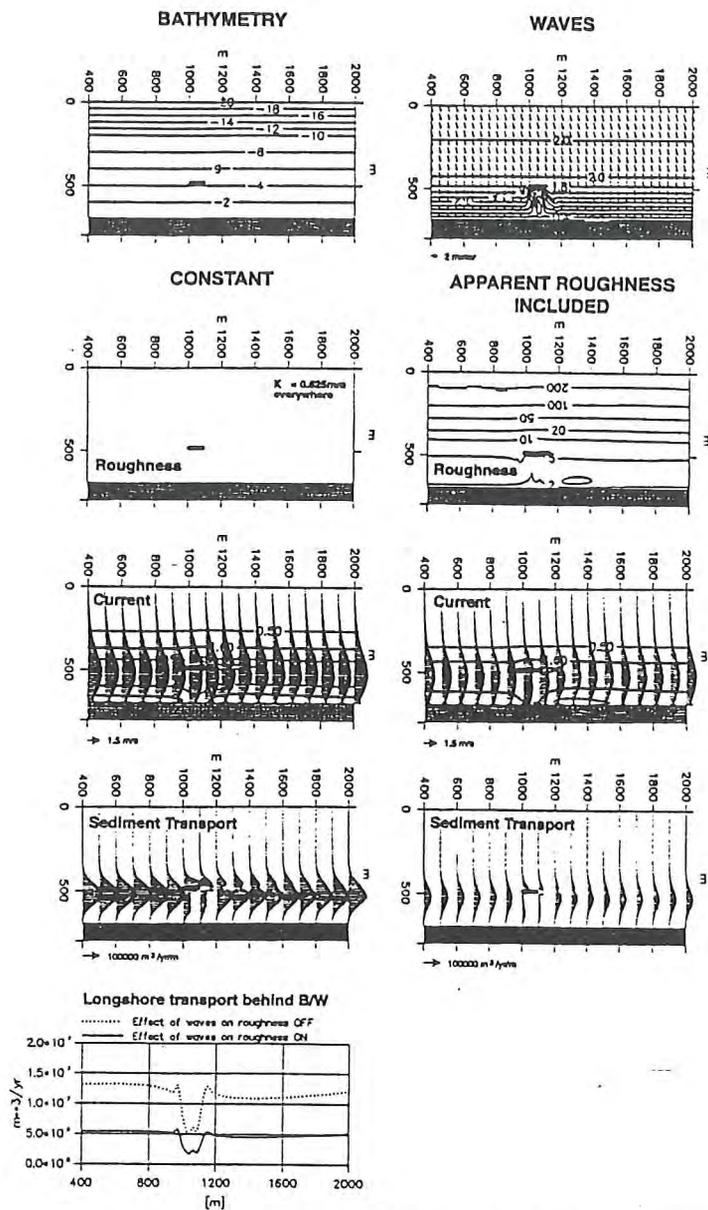
links: morphologische Extrapolation

rechts: morphodynamische Kopplung

### 3.3.3 Modifikation der Reibung

Am Beispiel des vorgelagerten Wellenbrechers wird der Einfluß der seegangsbedingeten Reibungsänderung aufgezeigt [29]. Die Reibung erhöht sich in diesem Fall um einen Faktor 5 bis 10 in den Bereichen, die für den Sedimenttransport relevant sind. Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen ab (im Beispiel mit dem Faktor 0.6) und die Sedimenttransportrate sinkt auf etwa die Hälfte.

Die Abbildung 13 zeigt diesen Effekt im Vergleich von Simulationen mit konstanter Bodenreibung im linken Teil und seegangserhöhter Reibung rechts.



Roughness distribution and current- and sediment transport fields for constant and wave-enhanced roughness. Comparison of longshore sediment transport.

Abbildung 13: Einfluß der Reibungserhöhung durch Wellen auf Sedimenttransport [29]

### 3.3.4 Elbe bei Cuxhaven

Mit dem morphodynamischen Modul zum Strömungsmodellierungssystem TICAD [26] werden von Zanke [55] eine Reihe von Fallstudien zur Deltabildung, Verlandung eines Sandfanges, Baggerrinnen, schematischen Tidebecken und Ausbildung von Watten und Rinnen durchgeführt.

Die Verifikation des Modells geschieht durch Fallstudien. Weil die Modellierung von Sedimenttransport auf einer Vielzahl empirischer Annahmen beruht und die Simulationen (wie in der Meteorologie) sensibel von Anfangs- und Randbedingungen abhängen, ergeben sich nach einer gewissen Zeit häufig nur noch im Grundsatz richtige Ergebnisformen.

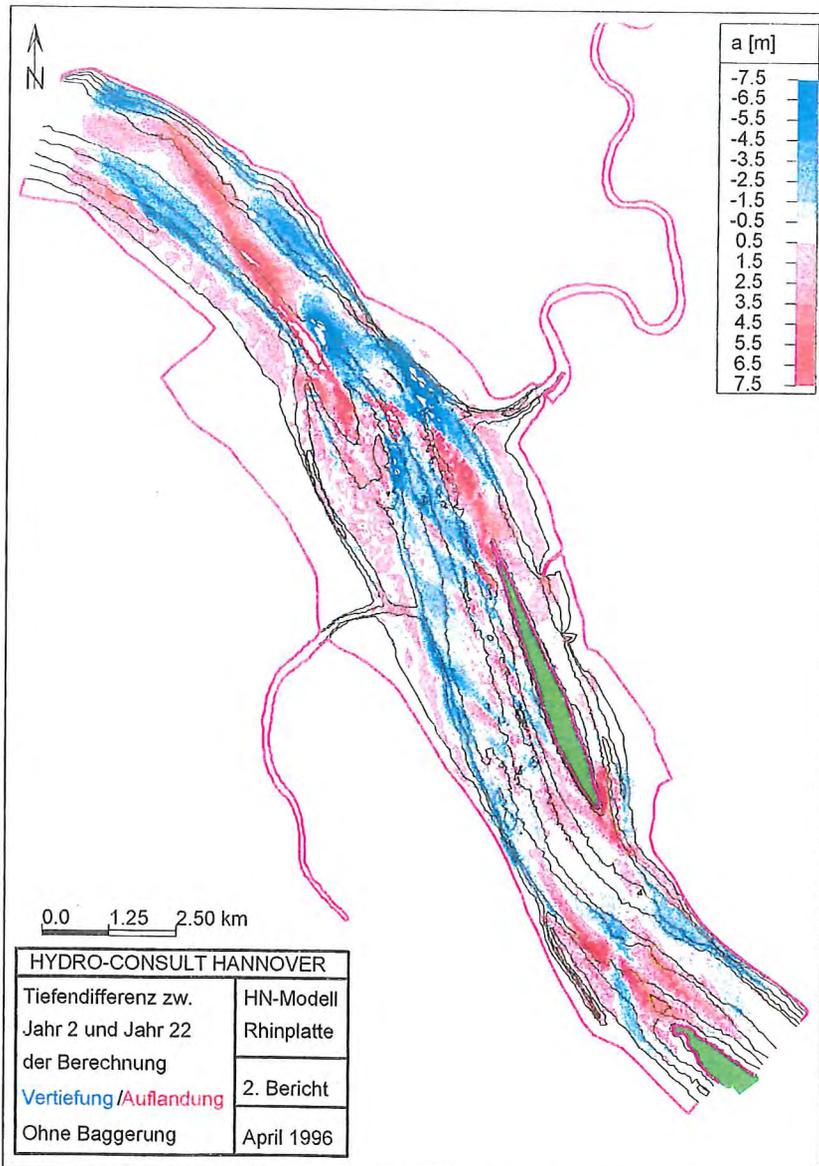
In einer morphodynamischen Simulation über 60 Jahre für das Elbmündungsgebiet bei Cuxhaven zeigt Zanke [54], daß sich der heutige Zustand des Rinnensystems auch bei stark verfremdeten, schematischen Anfangsbedingungen reproduzieren läßt. Der Selbstregelungsprozeß zwischen Strömung und Wassertiefen wird hier von der Tide dominiert und führt zu zwangsläufigen Ausprägungen der Hauptrinnen (vergl. Abbildung 14). Der tatsächliche Zeitmaßstab solcher Veränderungen muß durch Kartenanalysen ermittelt werden.

### 3.3.5 Rhinplatte

Zanke konnte die Materialumlagerungen an der Rhinplatte in der Unterelbe im Rahmen einer Pilotstudie im Auftrag der WSD Nord [27] in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen über mehrere Jahre modellieren. Die Simulation der Sedimentbewegung basierte auf einer repräsentativen Tide und alternativ einer Korngröße bzw. einer einfachen Kornverteilung. Der Einfluß von Seegang wurde bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Baggern und Verklappen von Baggergut wurde mitsimuliert.

Bemerkenswert an dieser Studie sind sowohl die gute Reproduktion der Morphodynamik, dokumentiert durch Bildung der Tiefendifferenzen aus zwei Peilungen in 1992 und 1994, als auch die über 20 Jahre stabile Lage von Übertiefen in diesem Stromabschnitt, die als Klappstellen für Baggergut genutzt werden (vergl. Abbildung 15).





Stabile Rinnen: Stör, Wischhafener Süderelbe, Glückstädter Fahrwasser  
 Verwilderung (Querbarren): Westseite Rhinplatte  
 Verlandungstendenzen: Wischhafener Fährzufahrt, Rhinplatte  
 Flutrinne: Krautsander Watt

Abbildung 15: Tiefenveränderung in 20 Jahren, Rhinplatte [27]

### 3.4 Schematisierung für Langzeitsimulationen

#### 3.4.1 Wellenklima

Anhand von Profilmessungen in regelmäßigen Abständen von 200m, die an der Küste von Terschelling seit etwa 30 Jahren vorliegen, ist vom DHL die Entwicklung des Küstenquerprofils [38] untersucht worden. Dabei hat sich gezeigt, daß eine Reduzierung des Wellenklimas auf einen mittleren Seegang für Langzeitsimulationen möglich ist.

In folgenden Schritten wird das Wellenklima so schematisiert, daß bei einer in Abbildung 16 dargestellten 10-Jahres-Simulation das Küstenquerprofil mit den gemessenen Barren-Systemen reproduziert wird.

- 1) Seegangsbedingungen mit Wellenhöhen feststellen, bei denen wesentliche morphologische Veränderungen eintreten (z.B.  $H > 1.5\text{m}$  im Fall einer nachsimulierten Strandaufspülung).
- 2) Anzahl der Tage ermitteln, an denen diese Bedingungen prägend vorherrschen.
- 3) Prüfen, ob die Jahreswirkung durch Anwendung der signifikanten Wellen für den prägenden Zeitraum zu erzielen ist.
- 4) Rechnung mit dem Mittelwert der signifikanten Wellen für prägenden Zeitraum reproduziert die Jahreswirkung.

Die Chronologie des signifikanten Seegangs ist nach dieser Studie für die Ergebnisse unerheblich.

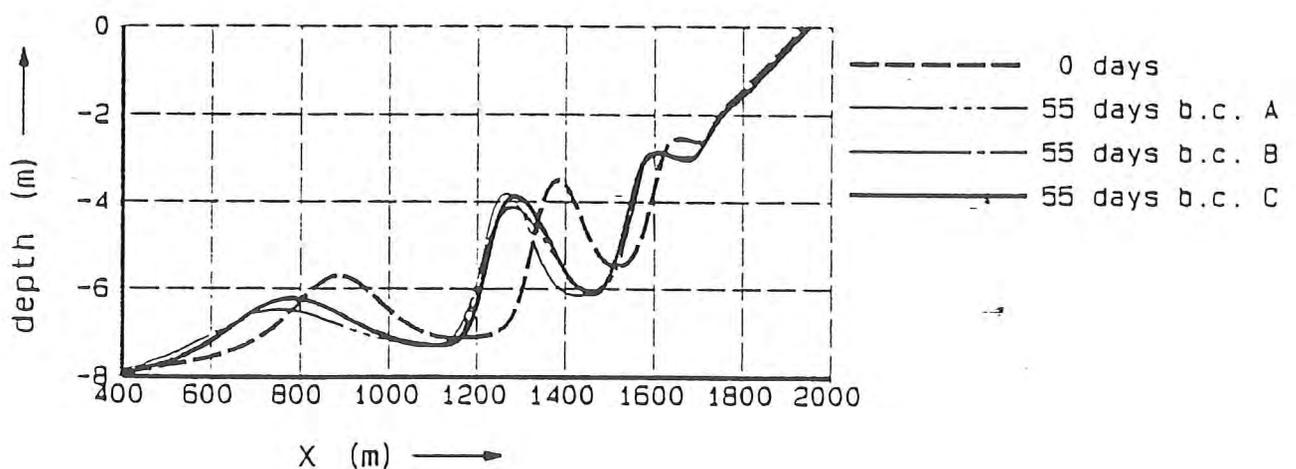


Abbildung 16: Auswirkung von Schematisierungen des Wellenklimas [38]

### 3.4.2 Sedimenttransportklima

Eine Schematisierung des Sedimenttransport-Klimas ist vom DHI durchgeführt worden, um die Anzahl der Modellierungsszenarien zu reduzieren. Die Abbildung 17 zeigt das Beispiel der genesteten Modellkette für Sedimenttransport im Øresund zur Untersuchung von morphologischen Änderungen durch die Tunnel/Insel/Brücken-Verbindung zwischen Dänemark und Schweden [33].

Das grob aufgelöste Umgebungsmodell (500m Raster) liefert die Randbedingungen für die höher auflösenden Modellgebiete, in denen die Wechselwirkungen zwischen Strömung/Wellen und Sedimenttransport berücksichtigt werden. Nur im Detailmodell (50m Raster) wird die Sedimenttransport-Berechnung durchgeführt.

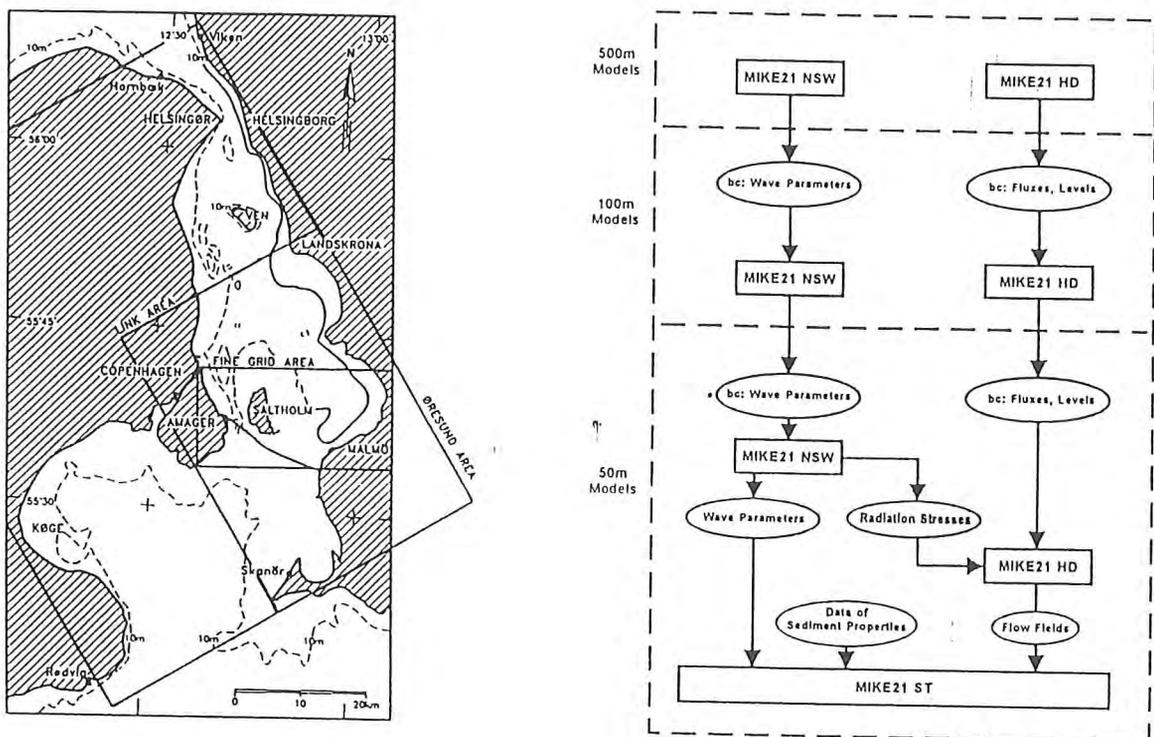


Abbildung 17: Modellgebiete und Modell-Komplex für Øresund [33]

Die hohe Auflösung im Detailmodell verhindert dynamische Modell-Läufe mit morphodynamischer Kopplung. Statt dessen werden ersatzweise eine diskrete Anzahl stationärer Wind/Wellen/Strömung/Wasserstands-Szenarien gerechnet.

Die Auswahl charakteristischer Zustände darf nicht allein nach hydrographischen Aspekten erfolgen, sondern muß deren jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit mit berücksichtigen. Die Signifikanz eines Ereignisses hängt sowohl von der induzierten Sedimenttransportrate als auch von der Auftrittshäufigkeit ab. Daher muß das Sedimenttransport-Klima im Untersuchungsgebiet vorab analysiert werden.

Aus Hindcast-Simulationen von Wellen (100m Raster) und Strömung (500m Raster) werden Jahres-Statistiken für Seegang und Strömung an ausgewählten Positionen ermittelt. Das Sedimenttransport-Potential wird an jeder dieser Stationen für jedes Wellenhöhen/Strömungs-Segment (bin) berechnet und mit seiner jährlichen Eintrittshäufigkeit multipliziert. Als Ergebnis wird pro Station die Transportverteilung als Funktion von Strömung und Wellenhöhe dargestellt.

In Abbildung 18 sind die ausgewählten stationären Szenarien ( $\oplus$ ) eingetragen. Sie repräsentieren die wesentlichen Anteile der jährlichen Transportverteilung an dieser Station.

Wird eine solche Analyse für verschiedene Wassertiefen und wellen- bzw. strömungs-dominierte Gebiete gemacht, kann man erkennen, ob die ausgewählten Szenarien eine vertretbare Diskretisierung des jährlichen Transportklimas darstellen.

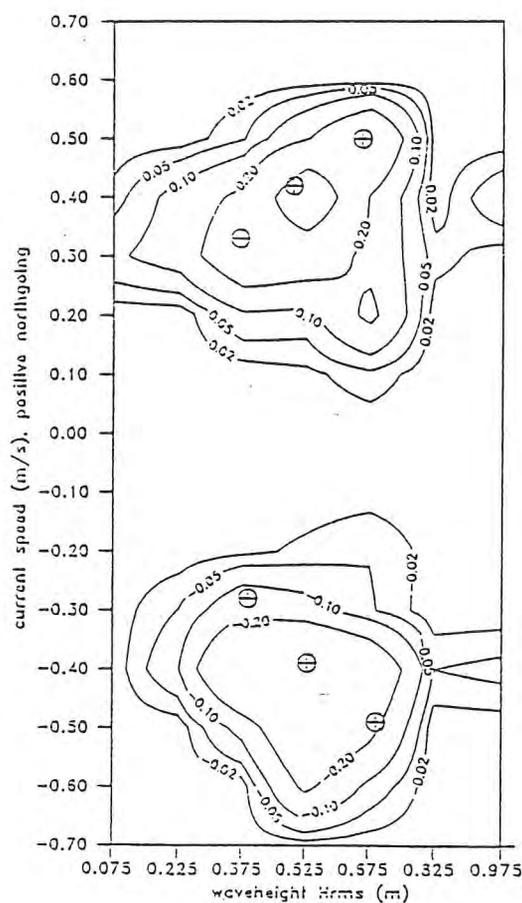


Abbildung 18: Sedimenttransport-Klima [33]

## 4 Datenerfassung

Die Datenerfassung konzentriert sich auf die Beschaffung von Topographieangaben aus dem geplanten Untersuchungsgebiet, um ein digitales Geländemodell als Grundlage für alle notwendigen numerischen Rechengitter aufstellen zu können. Wichtig sind dabei flächendeckende Informationen, die möglichst innerhalb eines kurzen Zeitraums gewonnen wurden. Zur Beschreibung morphogenetischer Vorgänge werden darüber hinaus Daten aus verschiedenen Jahren gesucht. Dazu werden Belege über Baggerungen, Luftbildserien und Seekarten und Peilpläne gesichtet.

Um die physikalischen Phänomene im Bereich der Sandbank Bock beschreiben und Steuerdaten für numerische Simulationen aufbereiten zu können, werden Quellen für Umweltdaten wie Wasserstand, Strömung, Seegang und Wind zusammengestellt. Dabei handelt es sich einerseits um punktuelle Feldmessungen an Dauermeßstationen bzw. aus speziellen Meßprogrammen, und andererseits um synoptische Informationen aus großräumigen Simulationsmodellen, deren verifizierte Hindcast-Daten zumeist für mehrere Jahre verfügbar sind.

### 4.1 Topographie

#### 4.1.1 Baggerungen

Das WSA Stralsund verfügt derzeit in seinem Archiv über einen umfänglichen Aktenbestand zur Problematik Fahrwasserausbau und -unterhaltung der Nordzufahrt Stralsund. Die verschiedenen Ausbauzustände des Rinnensystems sind dokumentiert durch

- Aufzeichnungen der Baggermengen,
- dazugehörige Peilpläne,
- Belege zu Spülstellen auf der Sandbank „Der Bock“.

Die Aktenbestände sind katalogisiert und können nach Stichworten mit Hilfe einer Datenbank auf einem PC durchsucht werden. Mit dem Ziel, für das geplante Projekt historische Entwicklungsstufen quantitativ belegen zu können, wurden die nachfolgend in Tabelle 4 aufgeführten Akten unter den Gesichtspunkten

- Baggermassen, Sandaufspülung Bock
- Fahrwasservertiefungen
- Luftbilder

herausgefiltert. Eine Vielzahl weiterer Quellen behandelt zumeist juristische Fragen und wurde daher hier nicht weiter ausgewertet.

Zum 30. 6. 1996 werden diese Akten dem Vorpommerschen Landesarchiv in Greifswald überstellt. Wie ein zukünftiger Zugriff auf die jetzt lokalisierten Dokumente aussehen könnte, ist derzeit ungeklärt.

Eine systematische Aufbereitung von Baggermassen und deren Verbleib findet sich bisher nur in wenigen Literaturquellen. Reinhard, 1953, „Der Bock“ [37], stellt die Aufspülungen auf dem Bock bis 1944 zusammen (Abbildung 19). Im Rahmen einer Diplomarbeit [20] sind 1993 die Baggermengen im Nordfahrwasser, allerdings mit einer 10-Jahres Lücke zwischen 1980 und 1990, dokumentiert worden (Abbildung 20). Dabei sind möglicherweise nicht alle WSA-

Unterlagen berücksichtigt worden, wie aus dem Vergleich mit Jahresbaggermengen nach Aktenlage (Abbildung 21) für das Jahr 1941 hervorgeht.

Die z.T. erheblichen Datenlücken lassen sich kaum noch schließen, da ein Großteil der Akten nach der Wiedervereinigung vernichtet worden ist. Die Baggerarbeiten in den fraglichen Zeiten sind im wesentlichen von der Firma BBB durchgeführt worden. Persönlicher Kontakt zu zwei ehemaligen Mitarbeitern hat ergeben, daß die

Originale aller Peilpläne (Vor- und Schlußpeilungen) für die  
Baggerungen 1948, 52, 62, 68  
im Archiv einer Nachfolgefirma lagern.

Über den Verbleib von Baggergut (Verklappung/Aufspülung) kann nur noch aus persönlicher Erinnerung berichtet werden, da alle diesbezüglichen Unterlagen vernichtet sind.

Die Aufspülungen auf der Sandbank Bock sind durch diverse Lagepläne belegt, die z.T. den o.a. Akten beigelegt sind bzw. als Originale im WSA Stralsund archiviert werden. Als Beispiel ist in Abbildung 22 der Lageplan vom Beginn der Aufspülungen aus den Jahren 1934/35 abgebildet. Die Struktur dieser Spülfläche taucht in der Folgezeit in etlichen Kartenwerken vom Bock mit bollwerkartigem Charakter auf.

Der derzeitige Lageplanbestand im WSA Stralsund in Hinblick auf Sandaufspülungen am Bock ist in Tabelle 7 zusammengestellt. Darüber hinaus ist bisher keine Auswertung dieser Unterlagen vorgenommen worden.

#### **4.1.2 Luftbilder**

Im WSA Stralsund liegen eine Reihe von Luftbildern vor, die aus den Jahren 1934 bis 1936 stammen und im Bereich Darß - Zingst - Hiddensee aufgenommen worden sind. Der derzeitige Bestand ist in Tabelle 8 dokumentiert.

Nach Aktenlage des Archivs (Nr. 1942 aus dem Jahr 1959/60) war 1960 eine Luftbildserie mit etwa 200 Aufnahmen vom Gellen, Barhöfter Rinne, Vierendehl-Rinne und Seegebiet Gellen - Bock zur Erkennung der Sandwanderung erstellt worden. Diese Aufnahmen konnten weder im WSA gefunden werden noch waren sie irgendeiner mit Luftbildern betrauten Institution bekannt.

Für das Gebiet der Sandbank Bock sind von der *Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung* in Bonn Luftbildkarten zu beziehen, die aus einer Befliegung im

Sommer 1937

stammen. Diese Unterlagen werden derzeit auch an der EMAU Greifswald in einem KLIBO-Projekt zur Entwicklung der Küstenlinie (Schumacher/Tiplot) ausgewertet. Weiterhin sind über die Firma *UVE GmbH, Berlin* Aufnahmen aus der Gesamtbefliegung der DDR aus dem Jahr

1953

zu beziehen. Im *Bundesarchiv, Abteilungen Potsdam*, sind Luftbildfilme mit Aufnahmen zur Sandbank Bock aus den Jahren

1956,

1960,

1966,

1971,

1976

verfügbar. Vom *Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern Schwerin* sind Aufnahmen vom Bock erhältlich aus den Jahren

1983,

1988,

1993/94.

Die Kosten für Papierbilder belaufen sich auf ca. 100,-DM pro Abzug. Für Negative gilt z.T. 140,-DM pro Bild. Bisher sind keine Bilder von den oben genannten Stellen beschafft worden.

In der WSD Nord sind die Luftbilder eines Bildfluges vom 4.5.1992 entlang der Mecklenburg-Vorpommerschen Küste verfügbar. Die Bilder mit den Nummern 100, 101, 102 und 242 für den Bereich Kleine Werder - Bock - Gellen sind in Abbildung 23 als Montage dargestellt. Die ausgedehnten Sand- / Windwatt- Flächen sind in dieser Sequenz jedoch nur teilweise erfaßt.

Wesentlich eindrucksvoller stellt eine Reihe von Amateuraufnahmen (Sprenger, Barhöft) aus verschiedenen Jahren, die beim WSA Stralsund vorliegen, die Problematik der Windwatt-Gebiete in Abbildung 24 bis Abbildung 27 dar.

Weiterhin liegen in der WSD Nord Einzelaufnahmen entlang der Boddenküste aus 1995 vor. Im Rahmen der regelmäßigen Bildflüge im Auftrag der WSD-Nord soll bei der nächsten Befliegung des Raumes Darß-Zingst-Hiddensee im Frühjahr 1997 die gesamte Sandbank Bock und auch der Gellen Haken im Hinblick auf das Windwattenprojekt mit erfaßt werden.

#### 4.1.3 Seekarten

Der Verlauf der Fahrrinnen in der Nordzufahrt Stralsund hat sich in den letzten 30 Jahren deutlich von erstmals 1905 eingerichteten Richtfeuerstrecken entfernt. Einen Vergleich zwischen 1961 und 1992 stellen Dießner und Dießner [20] vor. Demnach ist die Barhöfter Rinne nach Südosten und die Vierendehlrinne in dieser Zeit nach Süden gewandert (vergl. Abbildung 28). Im Zuge dieser Verlagerung ist offenbar auch eine Stabilisierung des Georeliefs eingetreten, was sich an dem in 1992 ausgeglichenen Verlauf der 2m - Isobathe zeigt.

Grundlage dieser Untersuchungen sind die Seekarten Nr.3009 (1961, SHD) und Nr 1622 (1992, BSH), wobei der jüngeren Karte keine Neuvermessung zugrunde liegt, sondern nur punktuell Korrekturen vorgenommen wurden [20].

Über das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in kann auf Seekarten und Tiefendaten des Nordfahrwassers Stralsund zugegriffen werden.

Im WSA Stralsund sind die unten tabellarisch erfaßten Seekarten (Tabelle 9) vorhanden, aus denen die Entwicklung von 1961 bis 1993 entnommen werden kann. Die vorhandenen Ausgaben dokumentieren im wesentlichen jährliche lokale Korrekturen. Die Ausgangskarte Nr 3009 von 1961 beruht auf einer Vermessung von 1958, die bis 1966 verwendet wird. Bis 1979 ist die Karte von 1966 Grundlage. Die letzten Karten des SHD bis 1988 basieren auf der Karte von 1979, wobei hier nicht geklärt wurde, ob dies eine Neuvermessung war. Die aktuellen Karten, die heute vom BSH herausgegeben werden, beziehen sich alle auf den Stand von 1966.

Die räumliche Zuordnung der Seekarten erfolgt nach dem *Verzeichnis der Nautischen Karten und Bücher* des BSH (vergl. Abbildung 29). Anhand der *Topographischen Karte des Seegrundes Ostsee* (vergl. Abbildung 30) des BSH können aktuelle Tiefendaten in digitaler Form angefordert werden. Allerdings sind derzeit bei weitem noch nicht alle Gebiete verfügbar. Dies gilt leider auch für Gellen-Strom, Barhöfter Rinne und Vierendehl-Rinne.

Neben diesen Seekarten liegen im WSA Stralsund Peilpläne für die einzelnen Fahrwasserabschnitte der Nordzufahrt vor. Diese sind im Zusammenhang mit Baggermaßnahmen entstanden und müßten den Archivakten (Tabelle 5) zugeordnet werden. Damit könnte die Erfassung der Baggermassen in den einzelnen Jahren sicherlich vervollständigt werden (vergl. Abschnitt Baggermassen).

Um die Peilpläne örtlich zuzuordnen, ist in Abbildung 31 der Betonungsplan abgebildet. In Tabelle 10 sind die vorhandenen Peilpläne unter Angabe der jeweiligen Fahrwasserstrecken zusammengestellt. Vermessungsunterlagen sind derzeit für folgende Fahrwasserabschnitte verfügbar vom WSA anhand der vorliegenden Peilpläne und vom BSH Rostock, wo die Daten z.T. auch in digitaler Form vorliegen (vergl. Tabelle 11 für vollständige Angaben):

Gellenstrom:	WSA: 1957/58/59/60/62/63 und 1983/89/90/91 BSH: 1948/52/53/67
Barhöfter Rinne:	WSA: 1957/58/59/60/62/63/64/65 und 1984/91/92 BSH: 1983/92/93
Vierendehlrinne:	WSA: 1958/60/63/91 BSH: 1983/85/92/94

Im Rahmen der Projektvorbereitung wurde folgendes Kartenmaterial beim WSA Stralsund bzw. in der WSD Nord, Kiel lokalisiert:

1879	1:75000	N.W.Küste von Rügen mit den Einsegelungen nach Stralsund	Hydrographisches Amt der Kaiserlichen Marine, Berlin
1905	1:50000	Die Fahrwasser nach Barth und und Damgarten	Oberkommando der Kriegsmarine, Berlin, 1925/37
1915	1:50000	Nördliche Einfahrt Stralsund	Reichs-Marine-Amt, Berlin
1935	1:30000	Nördliche Einfahrten nach Stralsund	Oberkommando der Kriegsmarine, Berlin, 1940/44/46
1986	1:50000	Topographische Karte, Stand 1983 N-33-50-D Groß Mehrdorf N-33-51-C Ramin	Ministerium für Nationale Verteidigung
1993	1:25000	Seekarte 3005 Blatt 12 Bock-Hiddensee-Ummantz Blatt 13 Vierendehlrinne	BSH, Hamburg

Ausschnitte aus diesen Karten in der unmittelbaren Umgebung der Sandbank Bock und dem Fahrwassersystem Gellenstrom - Barhöfter Rinne - Vierendehlrinne sind in Abbildung 32 bis Abbildung 37 zusammengestellt.

Die Karte von 1905 (Abbildung 33) zeigt den Ausbau des Fahrwasser nach Richtfeuerlinien. Bis 1937 wird diese Aufnahme vom Oberkommando der Kriegsmarine immer wieder aktualisiert. Sie markiert auch den projektierten Sandaufspülungsbereich auf dem Bock. Dieser ist ebenfalls in der ab 1935 verwendeten Karte (Abbildung 35) eingezeichnet. Die tatsächlichen Aufspülungen sind in Abbildung 22 dargestellt.

## 4.2 Umweltdaten

### 4.2.1 Wasserstand

Ganglinien und Hauptzahlen liegen von den Pegeln, die in Abbildung 38 aufgezeigt sind, im Bereich der WSD Nord vor. Die Bestandsliste vom WSA Stralsund (Tabelle 12) zeigt die Dauer der Wasserstandsregistrierungen bis 1994.

Die Wasserstände im Projektgebiet sind als Terminwerte archiviert für die Pegel

Althagen	Saaler Bodden	1971-1994
Zingst	Zingster Strom	1971-1994
Zingst	Ostsee	1984-1994
Barth	Barther Bodden	1971-1994
Barhöft	Prohner Wieck	1971-1994
Stralsund	Strelasund	1946-1994
Stahlbrode	Strelasund	1971-1988
Neuendorf	Ostsee	1984-1994
Neuendorf	Schaproder Bodden	1986-1994
Kloster	Vitter Bodden	1971-1994
Wittower Fähr	Rassower Strom	1971-1994

Weiterhin liegen stündliche Werte an folgenden Pegeln vor:

Althagen	Saaler Bodden	1978-84,	1986,	1987,	1991,	1993
Zingst	Zingster Strom		1986,	1987,	1991,	1993
Zingst	Ostsee	1984,	1986,		1991,	1993
Barth	Barther Bodden	1978-82,	1986,	1987,	1991,	1993
Stralsund	Strelasund	1978-82,	1986,	1987,	1991,	1993
Neuendorf	Ostsee		1986,		1991,	1993
Neuendorf	Schaproder Bodden	1985 -		1987,	1991,	1993
Kloster	Vitter Bodden	1978-79, 1981-85,		1987,	1991,	1993
Wittower Fähr	Rassower Strom	1978 -		1987,	1991,	1993

Die Daten ab 1993 bis heute sind derzeit in Bearbeitung.

Das STAUN Rostock unterhält über eine Firma die Stationen Warnemünde, Zingst und Koserow. Hier werden neben Wellen- und Wasserqualitätsparametern (Temperatur, Salzgehalt jeweils 1 Wert über die Tiefe) die Wasserstände registriert und liegen in digitaler Form vor.

#### 4.2.2 Strömung

Im Strelasund sind in 1995 Strömungsmessungen vom WSA Stralsund durchgeführt worden:

7.3.-15.5 6 Stationen, 15 Geräte, Wassertiefe 3.5-13m

11.10-12.12. 11 Stationen, 18 Geräte, Wassertiefe 3-13m

Das BSH in Hamburg hält auf einem Gitter von 1sm Strömungswerte im Projektgebiet seit 1993 in 3 Schichten alle 15 Minuten vor. Diese Daten stammen aus einem 3D baroklinen Strömungsmodell und sind bei Bedarf digital erhältlich. Damit ist eine Identifikation von Szenarien einer west-östlichen bzw. ost-westlichen Durchströmung des Strelasundes möglich ist. Die Gitterweite ist jedoch zu grob, als daß verlässliche Randbedingungen für ein Lokalmmodell erzeugt werden könnten.

Am IOW sind keine Strömungsmessungen vorhanden. Das dortige Zirkulationsmodell der Ostsee löst die Bodden nicht auf, so daß von dort keine unmittelbar verwendbare Information gewonnen werden kann. Allerdings könnten Randwerte für ein Küstenmodell bereitgestellt werden.

Das STAUN mißt Strömungen an den Stationen Zingst und Koserow (je 1 Wert) und hat in Warnemünde mehrere Geräte zur Längs- und Tiefenprofilmessung im Einsatz.

#### 4.2.3 Seegang

Seit 1990 werden von der GKSS kontinuierlich Seegangsmessungen mit einer wave rider Boje an einer Position vor Zingst ( $54^{\circ} 51' N$ ,  $12^{\circ} 41' E$ ) durchgeführt. Diese Position ist repräsentativ für den Gesamtbereich Darß-Zingst-Hiddensee. Die spektralen Daten sind in Stundenintervallen gespeichert.

Vom BSH Hamburg sind Seegangs-Modelldaten seit Anfang 1992 als 6-stündliche Werte auf einem 15km Gitter erhältlich. Für höhere räumliche Auflösung müßte wie im KFKI Seegangsprojekt [41] ein geschachteltes Modellsystem aufgebaut werden.

Das STAUN erhält kontinuierliche Messungen der Wellenhöhe und -periode von Warnemünde, Zingst und Koserow.

Analoge Registrierungen vom Meßsteg Neuendorf (1977-1980) und Zingst (1990-1991, evtl auch früher) lagern im STAUN Archiv.

#### 4.2.4 Wind und Sturmflutsituationen

Kontinuierliche Windmessungen liegen an allen vom STAUN Rostock betriebenen Meßstationen vor. Das WSA Stralsund betreibt seit 1993 die Stationen Ruden und Faltenhagen. Für Modellierungszwecke können vom Meteorologischen Dienst in Offenbach die Windfelder bereitgestellt werden.

Die neueste zusammenfassende Darstellung der Sturmfluten ist in dem Beitrag von Stigge 1994 [43] enthalten. Auch die Monographie zur Sandbank Bock von Reinhard [37] wertet die Sturmhochwasser bis 1949 aus. Neuere Arbeiten [1] [2] am Meteorologischen Institut der Humboldt-Universität beschäftigen sich darüber hinaus auch mit Sturmniedrigwasser-Situationen, die zuerst von Birr [6] diskutiert wurden.

### 4.3 Dokumentation zur Archivarbeit

Aufspülung der Baggermassen auf dem Bock	
	m <sup>3</sup> **
1906 . . . . .	125 413
1907 bis 1911	
	Beschaffung der Spülereinrichtung
1912 . . . . .	53 700
1913 . . . . .	64 950
1914 . . . . .	40 350
1915 bis 1922	
	Beschaffung eines neuen Spülgerätes
1923 . . . . .	125 000
1924 . . . . .	
1925 . . . . .	70 312
1926 . . . . .	70 160
1927 . . . . .	194 575
1928 . . . . .	211 775
1929 . . . . .	152 100
1930 . . . . .	177 730
1931 . . . . .	175 125
1932 . . . . .	153 105
1933 . . . . .	209 810
1934 . . . . .	227 475
1935 . . . . .	268 100
1936 . . . . .	231 635
1937 . . . . .	400 140
1938 . . . . .	365 400
1939 . . . . .	262 650
1940 . . . . .	300 550
1941 . . . . .	234 000
1942 . . . . .	170 000
1943 . . . . .	241 500
1944 . . . . .	110 000
Insgesamt wurden über 5 000 000 aufgespült	

Abbildung 19: Aufspülung der Baggermassen auf dem Bock nach [37]

Aufstellung der Baggermengen im Nordfahrwasser von 1927 bis 1944  
(alle Angaben in m³)

Jahr	Baggermengen	Bodentyp	Vorkaufs des Baggerschiffs
1927	194.575	Feinsand	Seegebiet
1928	211.775	Feinsand	Seegebiet
1929	152.100	Grobsand	Bock/Seegebiet
1930	177.790	Grobsand	Bock/Seegebiet
1931	175.125	Mittelsand	Bock/Seegebiet
1932	153.105	Mittelsand	Bock/Seegebiet
1933	209.810	Mittelsand	Bock/Seegebiet
1934	227.475	Grobsand	Bock/Seegebiet
1935	268.100	Grobsand	Bock/Seegebiet
1936	251.635	Grobsand	Bock/Seegebiet
1937	400.140	Mittelsand	Bock/Seegebiet
1938	365.400	Feinsand	Bock/Seegebiet
1939	262.650	Feinsand	Bock/Seegebiet
1940	300.550	Feinsand	Bock/Seegebiet
1941	234.000	Mittelsand	Bock/Seegebiet
1942	170.000	Grobsand	Bock/Seegebiet
1943	241.500	Mittelsand	Bock/Seegebiet
1944	110.000	Feinsand	Bock

Aufstellung der Baggermengen im Nordfahrwasser von 1946 bis 1992  
(alle Angaben in m³)

Jahr	Baggermengen	Bodentyp	Vorkaufs des Baggerschiffs	Zeitraum der Baggerarbeiten
1946	120.400	Feinsand	Seegebiet	25.05. bis 15.10
1947	182.955	Feinsand	Bock	
1948	245.000	Sand	Bock/Seegebiet	
1949	296.625	Feinsand	Bock/Seegebiet	
1950	236.000	Mittelsand	Dänholm/Bock/Barhöft/Seeg.	
1951	206.400	Mittelsand	Bock/westl. Hiddensee	
1952	116.846	Feinsand	Bock/Seegebiet	01.05. bis 18.12.
1953	103.706	Feinsand	Bock/Seegebiet	
1954	227.411	Feinsand	Bock/Seegebiet	01.04. bis 18.12.
1955	200.606	Feinsand	Bock/Seegebiet	
1956	193.725	Feinsand	Bock/Seegebiet	
1957	84.536	Feinsand	Seegebiet	07.12. bis 23.12.
1958	131.662	...	...	
1959	140.862	Grobsand	Bock	01.05. bis 31.05.
1960	85.802	Grobsand	Bock	
1961	83.651	Grobsand	Bock	01.03. bis 20.03.
1962	106.642	Feinsand	Bock	15.04. bis 15.05.
1963	116.836	Feinsand	Bock/Seegebiet	10.04. bis 30.06.
1964	112.975	Feinsand	Bock/Seegebiet	08.04. bis 02.07.
1965	142.085	Feinsand	Bock/Seegebiet	15.04. bis 18.09.
1966	102.661	Feinsand	Bock	21.03. bis 15.06.

Jahr	Baggermengen	Bodentyp	Vorkaufs des Baggerschiffs	Zeitraum der Baggerarbeiten
1967	96.547	Feinsand	Seegebiet	
1968	133.122	Feinsand	Bock/Seegebiet	
1969	174.614	Grobsand	Bock/Seegebiet	
1970	75.480	Grobsand		
1971	83.486	Grobsand		
1972	99.232	Grobsand		
1973	110.972	Feinsand		
1974	28.665	Feinsand		
1975	1.170	Feinsand		
1976	59.820	Feinsand		
1977	132.000	Feinsand		
1978	45.954	Feinsand		
1979	49.620	Feinsand		
1980	...	...	...	
1981	...	...	...	
1982	...	...	...	
...	...	...	...	
1990	46.420	Feinsand	Spülfeld Drigge	21.12.89 bis 02.09/07.07 bis 25.09
1991	86.716	Feinsand	Vitte/Seegebiet	23.09 bis 17.11
1992	15.000	Sand/Schlick	Vitte/Seegebiet	09.02 bis 24.02

Abbildung 20: Aufstellung der Baggermengen im Nordfahrwasser nach [20]

Zusammenstellung  
 der Baggermengen im westlichen Stralsunder Fahrwasser  
 nach dem Peilplan vom April 1941  
 (Baggerungstiefe 6 m unter M.W.)

Lfd. Nr.	Strecke mit Tonnenbezeichnung (jetzige Lage)	überschläglich m <sup>3</sup> ermittelte Bodenmenge	
1.	Baggerrinne nach See 3/E bis 5/G	28 000 m <sup>3</sup>	28 000 r
2.	Gellen-Rinne 5/G bis 6/H	10 000 m <sup>3</sup>	
3.	6/H bis 8/K	25 500 m <sup>3</sup>	
4.	8/K bis 12/O	75 000 m <sup>3</sup>	
5.	12/O bis 14/Q	36 500 m <sup>3</sup>	
6.	14/Q bis 15/R	20 000 m <sup>3</sup>	
7.	15/R bis 19/V	1 000 m <sup>3</sup>	168 000 r
8.	Barhöfter-Rinne 19/V bis 21/X	19 000 m <sup>3</sup>	
9.	21/X bis 26/D	1 000 m <sup>3</sup>	20 000 r
10.	Vierendehl-Rinne 26/D bis 28/F	29 000 m <sup>3</sup>	
11.	28/F bis H	42 000 m <sup>3</sup>	
12.	H bis J	-	
13.	J bis L	35 000 m <sup>3</sup>	
14.	L bis 37/P	131 000 m <sup>3</sup>	
15.	37/P bis Einfahrt	60 000 m <sup>3</sup>	297 000 r
	Zur Baggerrinne		513 000 r
			=====

Bemerkung: Die zu erwartende Jahres-Baggerleistung ist von den jeweils angetroffenen Bodenarten und in der Gellenrinne noch besonders von der Witterung abhängig. Sie wird für Einschiebtrieb mit 60 Stunden Betriebszeit in der Woche auf Grund der früheren Betriebsergebnisse auf 200 bis 300 000 m<sup>3</sup> und für Doppelschicht mit 2 x 51 = 102 Stunden Betriebszeit in der Woche auf 300 bis 400 000 m<sup>3</sup> Bodenbewegung geschätzt.

Aufgestellt:

Stralsund, den April 1941  
 Wasserstrassenamt West

Abbildung 21: Beispiel einer Zusammenstellung von Jahresbaggermengen nach Aktenlage

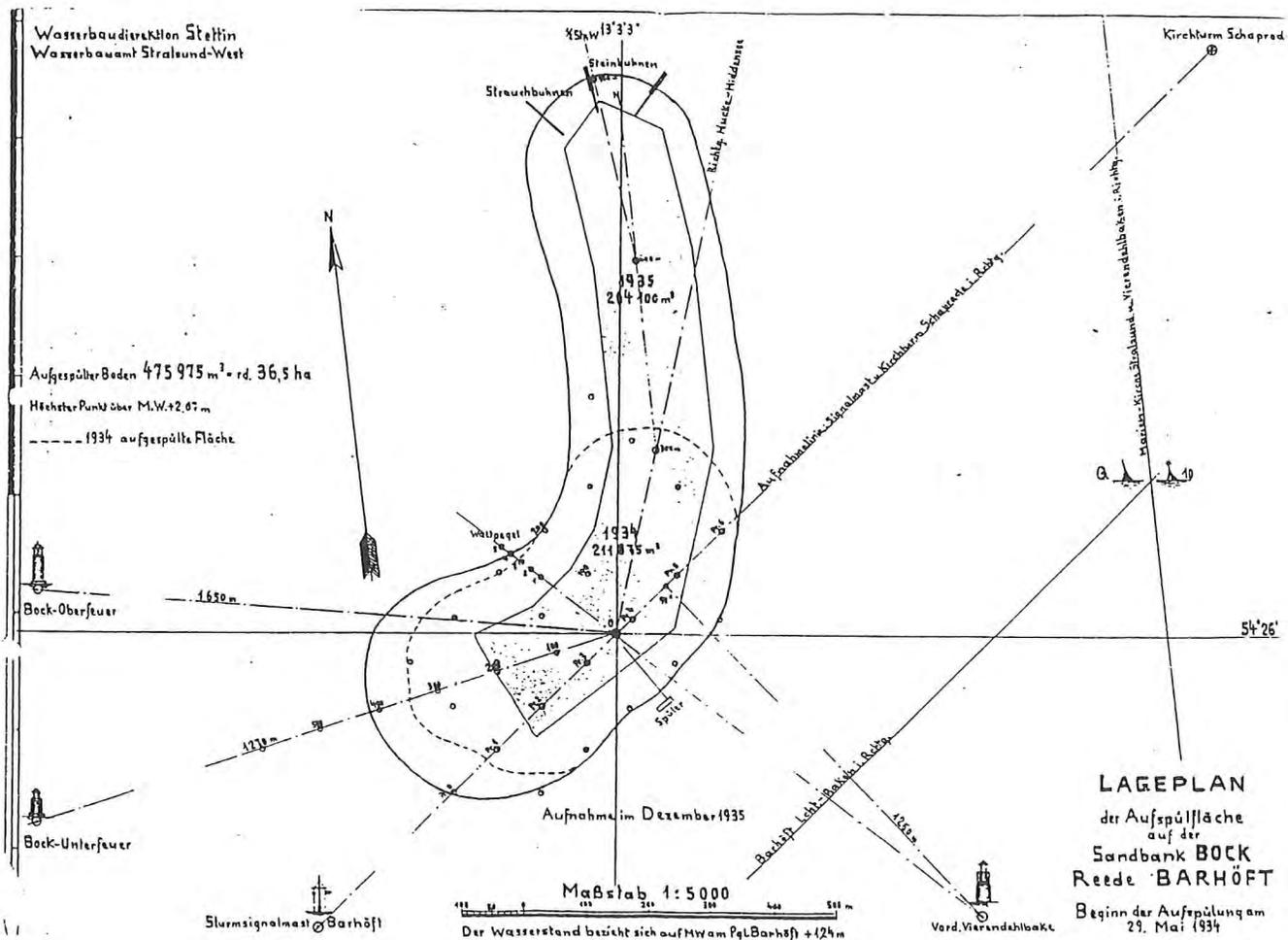


Abbildung 22: Lageplan der Aufspülfläche auf der Sandbank Bock von 1935

# Archiv Wasser- und Schiffsamt Stralsund

Stand November 1995

## Baggermassen

Archiv Nr.	Jahr	Bezug
1127	1891	Westliches Fahrwasser Gellen Baggerungen
1105	1906-1925	Nordwestliches Fahrwasser Baggerungen
940	1911-1924	Sandablagerungen auf dem Bock Profile Bock und Werder Übersichtsplan Bock 1919
942	1924-1929	Sandablagerungen auf dem Bock VI/68 Eigentumsverhältnisse Bock seit 1857 Nutzungsrechte Kl. Werder und Bock Lageplan 1:50000 Sandbank Bock 1:2000, Okt.1925
203 3580	1936	Kostenüberschlag Baggerungen westliches Stralsunder Fahrwasser und Spülarbeiten auf dem Bock Erläuterungsbericht, Baggermassen Seekarte 164, Spülstellen
937	1934-1950	Sandablagerungen Bock Spülstellen 1948, Lageplan 1:5000
305	1934-1959	Sandablagerungen Bock Aufspülungen 1941
priv	1944	Lage- und Pflanzungspläne Bock Spüldamm Südost und Ost Peilpläne 1944
4170	1949	Sandbank Bock Sandaufspülungen 1906-1946
936	1949	Buhnenbau am Bock Peilplan Nordspitze Bock 10/1948
1348	1951	Buhnen am Bock Erläuterungen der Historie Peilplan Nordspitze 4/1950 und 8/1950
958	1952-1966	Sandablagerung auf dem Bock Peilung Nordspitze

Tabelle 4: Baggermassen, Archiv WSA Stralsund

935	1953	Entwurf zum Bühnenbau Sandbank Bock Modellversuch FAS Großmodell Rügen - Bock
188	1953-1964	Nordwestliches Fahrwasser Baggerungen 1954 Modellversuch 1953 -->Bruchmüller-Gutachten Fahrwasserkontrollpeilung 1962 Gellenrinne
205	1957	Baggermengen 1906-1957 Baggerstellen
939	1959-1955	Sandablagerungen Bock Spülstellen 1947, Lageplan von 1944
3281	1962-1970	Nördliches Fahrwasser Baggerungen
<u>130</u>	1968-1973	Baggerungen Nordfahrwasser, Peilungen 1967 Nordfahrwasser 1968 Gellen Reede 1969/70 Geller Haken Rinne 1976 Vierendehlrinne
3427	1969	Studie Nordfahrwasser Baggermassen, Tiefenkarte
3019	1974	Baggerschüttstellen der DDR
855	1976-1978	Baggerungen Rinne Barhöft, Außenreede Gellen, Reede Bock
899	1979	Peilungen 1976-1979 Gellenstrom Barhöfter Rinne Vierendehlrinne Reede Bock
4032	1983-1989	Nordfahrwasser - Bauakte Baggerungen Baggerstrecken und -massen
3954	1985-1988	Baggerungen Barhöft - Barth Rinne am Bock Pläne und Massenbelege

Tabelle 4 ff: Baggerungen

## Fahrwasservertiefungen

<b>Archiv Nr.</b>	<b>Jahr</b>	<b>Bezug</b>
<u>1194</u>	1895	5m - Ausbau Baggermassen 1885-1894 Lageplan 1:25000 von 1906
<u>988</u>	1901-1907	Westliches Fahrwasser Baggerungen und Löschstellen, 4m - Ausbau
205	1902	Allgemeiner Entwurf für die vertiefung des nordwestlichen Fahrwassers bis auf 4m Lageplan, Peilplan
<b>983</b>	1908-1911	Sandablagerungen auf dem Bock VI/66 Spülstellen Bock und Kl. Werder 1907 Baggerplan, Solltiefen Nordwestliches Fahrwasser Fahrwasservertiefung am Bock von 3.20 auf 4.20m, 1908
814	1935-1936	Nordwestliches Fahrwasser Seekarte 145 von 1935
<u>1014</u>	1936-1955	Nordwestliches Fahrwasser 1944 Behelfsmäßige Verlegung des Fahrwassers -->141 1946 Peilungen 1953 Gellenstrom und Vierendehrinne 1955 Vierendehrinne
<b>1015</b>	1936-1942	Vertiefung des nordwestlichen Fahrwassers 1930/35 und 1937/38 Baggergut und -kosten Vierendehrinne 1940 und 1941, Tonne 26-28 1941 Zusammenstellung aller Rinnen 1941
204	1940	Betonnungsplan 1:30000 2- und 4m Linien
<u>141</u> <u>1014</u>	1944	Behelfsmäßige Verlegung des Fahrwassers Bock zwecks Verringerung der Baggerarbeiten Übersichts- und Lageplan
4172	1948	Bruchmüller-Gutachten Instandhaltung Buhnen
1420	1952	Entwicklung der Seewasserstraßen seit 1945 Sicherung Bock
1635	1968	Hafen Barhöft Tiefenplan Barhöft Reede 1:1000

Tabelle 5: Fahrwasservertiefungen

## Luftbilder

Archiv Nr.	Jahr	Bezug
1942	1959-1960	Luftbildmessung Herstellung von Spezialkarten 1:2500 Karten

## Weitere Akten

- ermittelt nach Stichworten wie: Bock, Fahrwasservertiefung, Baggerung u.ä.
- zumeist zu juristischen Fragen
- hier keine Auswertung
- Auflistung nur nach Archiv Nummer (derzeit nicht auffindbar markiert durch Unterstrich)

142, 144, 145, 146, 147,  
179,  
201, 202,  
815, 859,  
911, 941, 946, 980, 982, 984, 999  
1000,  
1107, 1123, 1124, 1125,  
1290,  
1308, 1334,  
1424, 1425, 1426,  
1884,  
1924, 1926, 1938,  
3001, 3036, 3038,  
3132,  
3290,  
3563,  
3618,  
4031

Tabelle 6: Luftbilder und weitere Akten

## Lagepläne zur Sandaufspülung Bock im WSA Stralsund

Stand November 1995

Archiv Nr.	Monat/Jahr	Bezug
2/9	2/1907	Der Bock, Kleine Werder
2/10	4/1929	Lageplan der Kleinen Werder
2/49	6/1931	Lageplan Barhöft - Bock
2/4	5/1936	Aufspülfläche am Bock
2/13	11/1936	Lageplan Spülfläche Bock
2/60	12/1936	Baggerungen und Spülarbeiten 1:50000
2/17	~1938	Aufspülung 1:5000
2/8	12/1938	Erhöhung der Bockrichtfeuer
2/19	6/1941	Aufspülung Bock 1:5000
2/16	7/1941	Aufspülung Bock
2/15	12/1941	Deckblatt Aufspülungen Sandbank Bock
2/18	12/1941	Deckblatt Aufspülung Bock
2/20	4/1942	Buhnenbauten Bock
2/21	4/1942	Deckblatt Aufspülung Bock Nordende
2/48	8/1942	Deckblatt Aufspülung Bock Nordende
2/22	1942	Spülfläche Bock
-----	5/1943	Aufspülung Sandbank Bock 1:5000
2/26	4/1944	Aufspülung Nordspitze von 12/1941 und 4/1943
2/27	4/1944	Aufspülung Nordspitze von 4/1942 und 5/1943
2/31	6/1944 und 10/1948	Sandbank Bock Buhnen Ost/West
2/29	3/1947	Sandbank Bock 1:25000
2/28	3/1947	Sandbank Bock Buhnen West
2/37	10/1948	Nordspitze der Sandbank Bock 1:2000
2/40	9/1949	Nordspitze Bock 1:2000
2/39	10/1949	Nordspitze Bock Nachpeilung
2/43	4/1950	Nordspitze Bock Nachpeilung 1:2000
2/47	8/1950	Nordspitze Bock Peilplan 1:2000
2/41	12/1950	Bock Buhne Ost
2/3	12/1950	Doppelte Seebuhne
2/42	12/1950	4 Strauchbuhnen
2/44	5/1951	Nordspitze Bock Übersicht 1:5000
2/46	1/1952	Nordspitze Sandbank Bock 1:2000
2/45	3/1952	Querprofile Nordspitze Sandbank Bock
2/51	5/1953	Sandbank Bock (Nordspitze) 1:2000
2/54	4/1954	Nordspitze Bock 1:2000
2/56	6/1955	Sandbank Bock 1:25000
2/35	9/1955	Sandbank Bock 1:2000
2/57	8/1956	Nordspitze 1:2000
-----	10/1983	Nordfahrwasser Peilungen
-----	4/1992	Nordfahrwasser Peilungen
-----	8/1992	Yachthafen Altefähr
2/2	?	Sandbank Bock Seebuhne
2/7	?	FAS Übersicht
2/11	?	Der Bock
2/38 und 2/39?		Sandbank Bock 1:5000

Tabelle 7: Lagepläne Sandaufspülungen Bock

Zusammenstellung im WSA Stralsund  
vorliegender Luftbildaufnahmen  
im Bereich Zingst-Bock-Hiddensee

- 1 Luftbildaufnahme ostw. Zarrentin  
M. ca. 1:25000  
  
Darstellung: Gewässerbereich Vierendehl, Schwedenstrom,  
Barhöfter FW, Barhöfter Rinne  
  
aufgenommen: 06.05.1934, 15.30 Uhr
- 2 Aufnahmen vom 28.04.1936  
  
107/17, 107/18, 107/19
- 3 Satz Luftbildaufnahmen aus 26 Stck. Einzelfotos, schät-  
zungsweise aus den 30er Jahren, keine weiteren Angaben.
- 4 2 Fotos, zusammengesetzt aus Luftbildfolgen mit einskiz-  
zierter Bockkontur, keine Jahresangaben
- 5 Luftbildaufnahmen vom 30.06.1936, M. 1:10000 aufgezo-  
gen auf Karton - Blattweise  
  
Bl.-Nr. 1 Sandbank Bock mit Gellen u. Barhöft  
Bl.-Nr. 2 Sandbank Bock - Werdersche Inseln - Zingst  
Bl.-Nr. 3 Nordküste Zingst  
Bl.-Nr. 4 Nordküste Zingst  
Bl.-Nr. 5 Nordküste Zingst (Ostteil)  
  
Einheitsbl. Nr. 10 Hiddensee
- 6 Luftbildaufnahmen 372.00.61.6.90  
  
Bl. 31, 32, 33, 34, 42, 43, 46, 47
- 7 Luftbild WSD Nord  
Bildflug vom 04.05.1992  
  
H. Bewfer, Dortmund  
System 42/83 Krassowski  
M. 1:5000

Tabelle 8: Aufstellung historischer Luftbildaufnahmen beim WSA Stralsund

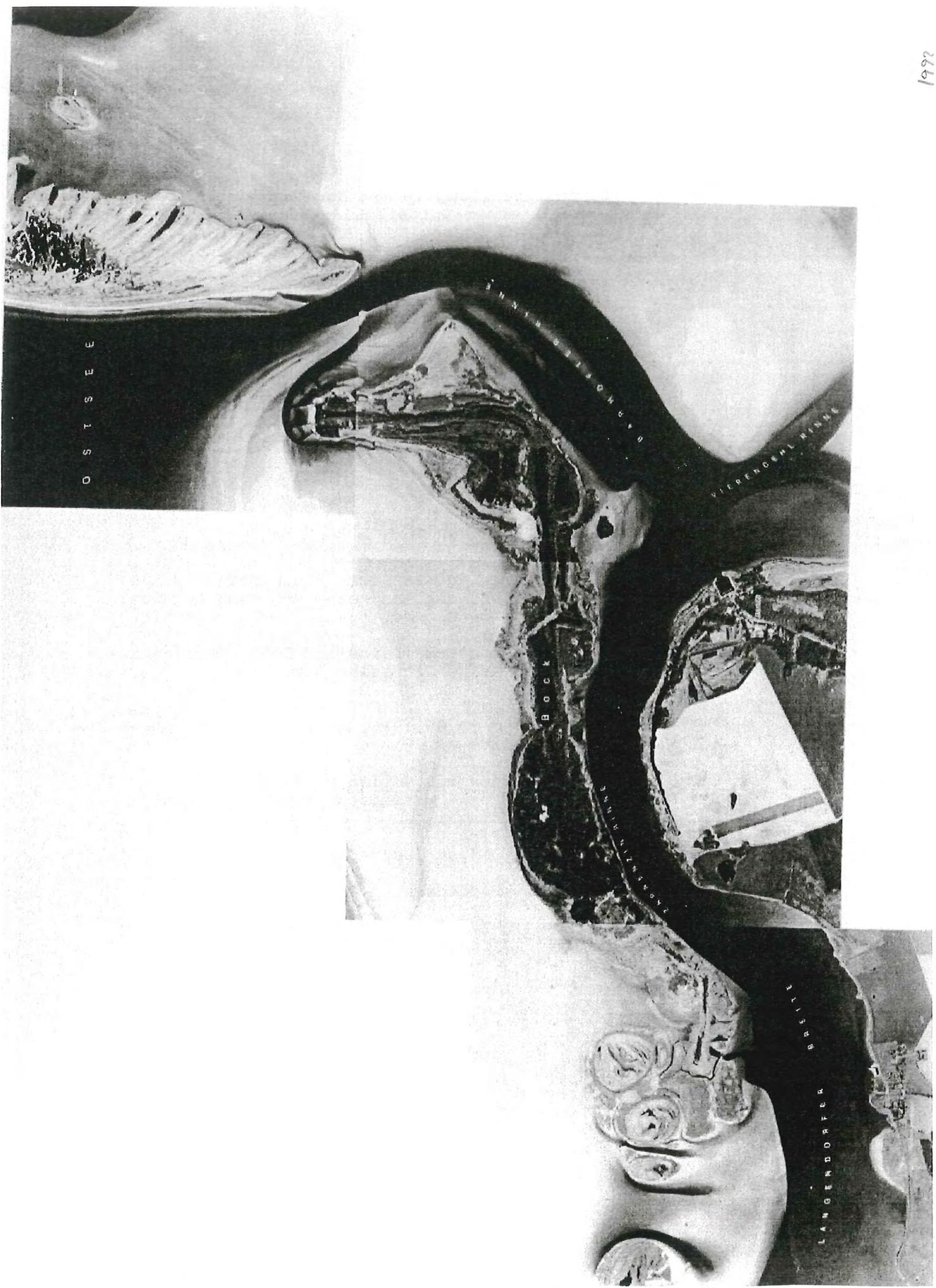


Abbildung 23: Luftbild 1992, Kleine Werder - Bock - Gellen

Insel Bock mit Windwatt / Gellenstrom und Fahrwasser nach Barht  
Blickrichtung Ost - West



Insel Bock , im Hintergrund Hiddensee - Gellen und Rügen  
Blickrichtung West - Ost



Abbildung 24: Windwatt-Problematik I

## Hiddensee - Blick auf die Südspitze Gellen



## Blick auf Gellenstrom - Barhöfter Rinne links - Gellen und Sandbank rechts - Bock



Inselbock - im Hintergrund Hiddensee - Gellen  
Blickrichtung Südwest nach Nordost



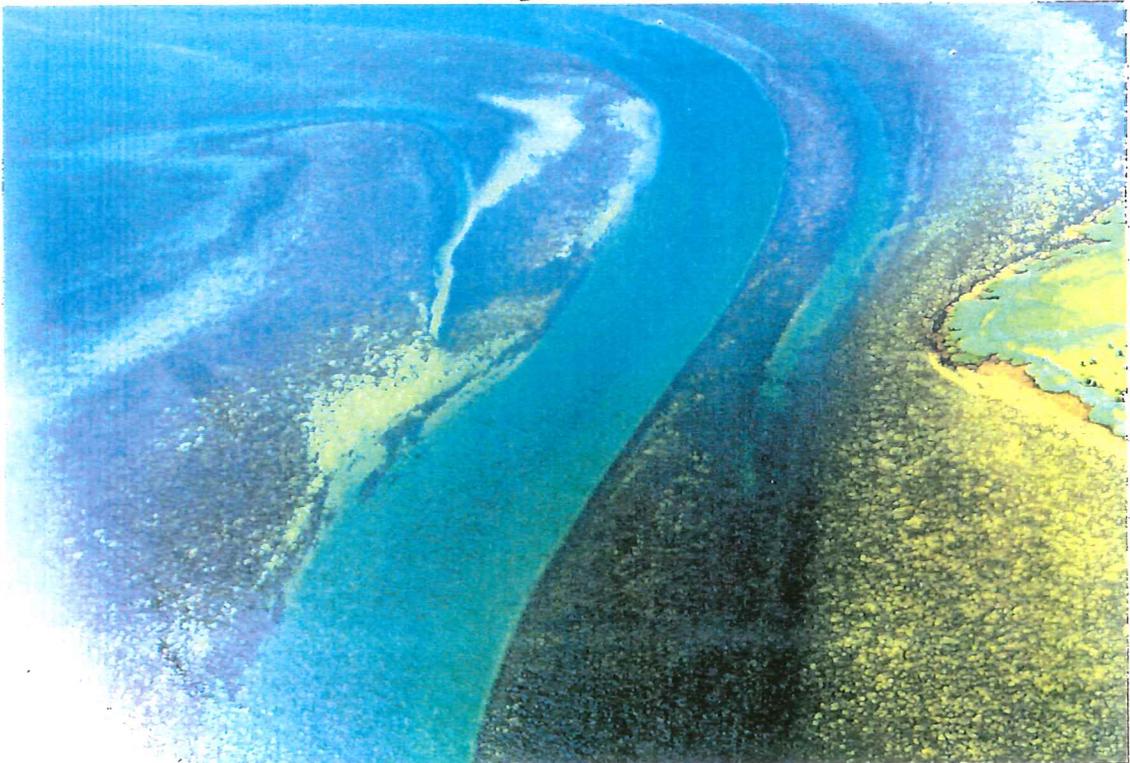
Gellenstrom zwischen  
links - Bock  
rechts - Gellen



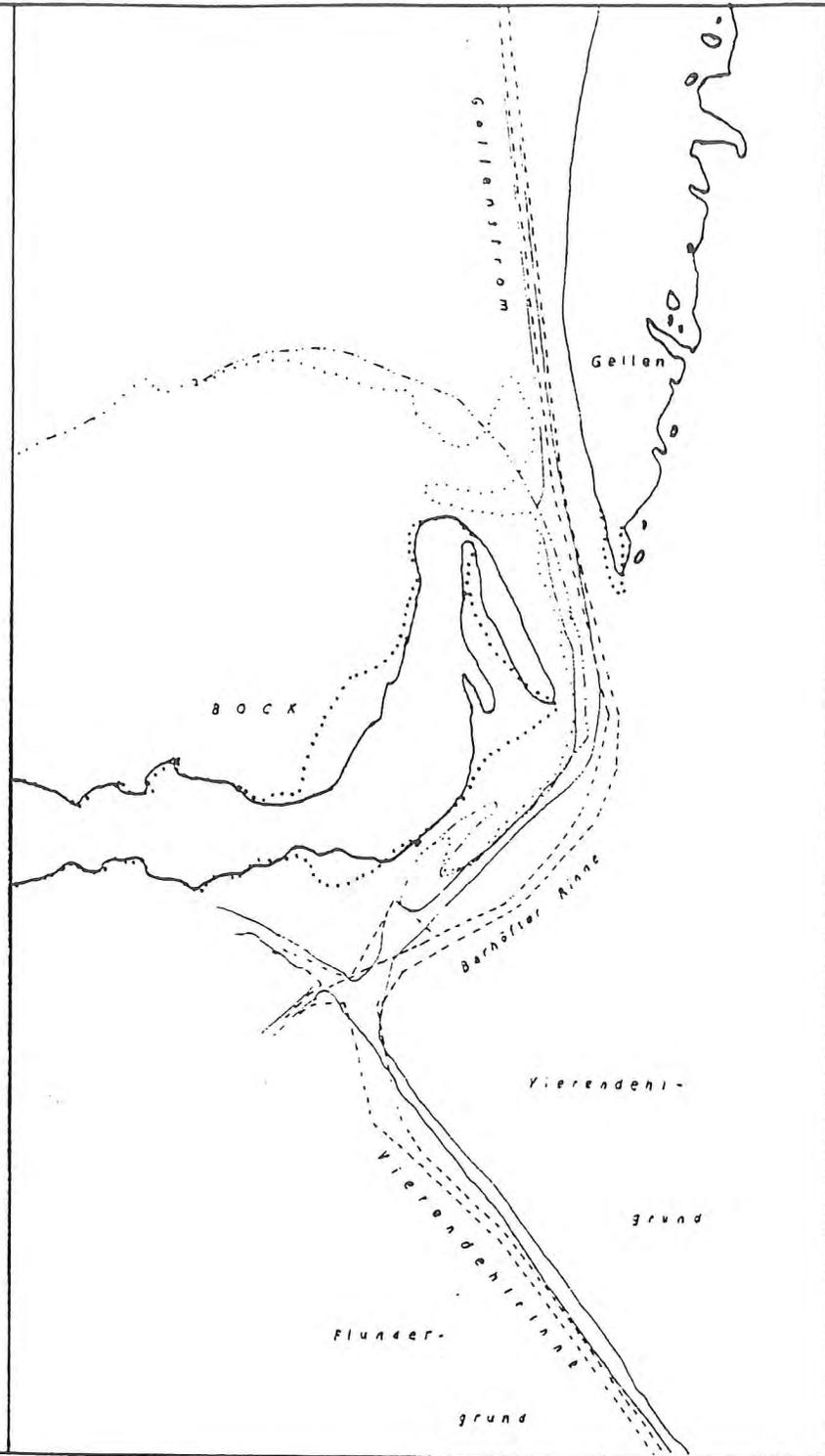
Blickrichtung von Süden nach Norden  
im Vordergrund - Vierendehrinne  
rechts - Gellen mit Sandbank  
links unten - Mühlenstrom  
links oben - Fahrwasser nach Barht



Mühlenstrom  
in Blickrichtung von Nord nach Süd



Vergleich der Küstenlinie, Fahrwassergrenzen und  
2m-Isobathe (nach Seekarten Nr. 3009 (1961) und Nr. 1622 (1992))



Küstenlinie	Fahrwasser	2m-Isobathe
— 1961	— 1961	... 1961
--- 1992	--- 1992	--- 1992

Abb.  
11.3

Abbildung 28: Fahrwasserverlagerung Barhöfter-, Vierendehlrinne, 1961 - 1992, nach [20]

<b>Bezeichnung Ausgabe</b>		<b>Herausgeber</b>
3009	(58) 61	SHD
3009	(58) 62	
1621	(58) 65	
1621 NfD	1965	
1622	(66) 68	
1622	(66) 72	
1622	(66) 76	
1622	(66) 78	
1622 B	(66) 79	
1622	(79) 82	
1622	(79) 85	
1622	(79) 88	SHD
1622	(66) 4.90	BSH
1622	(66) 5.92	
1622	(66) 92	
1622	(66) 6.93	BSH

Tabelle 9: Chronologie der Seekarte Nr.1622

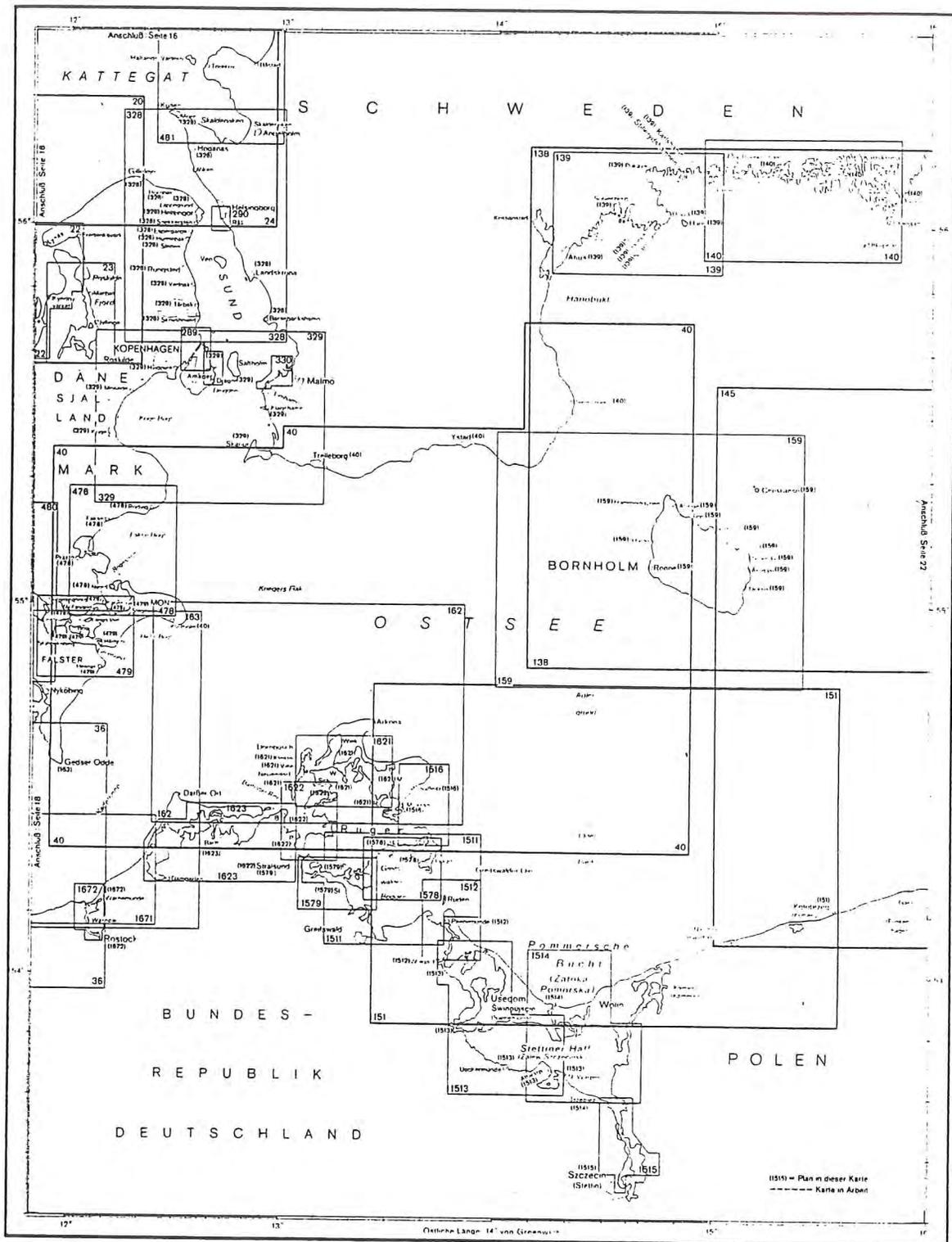


Abbildung 29: Übersicht Nautische Karten, BSH Hamburg, Rostock

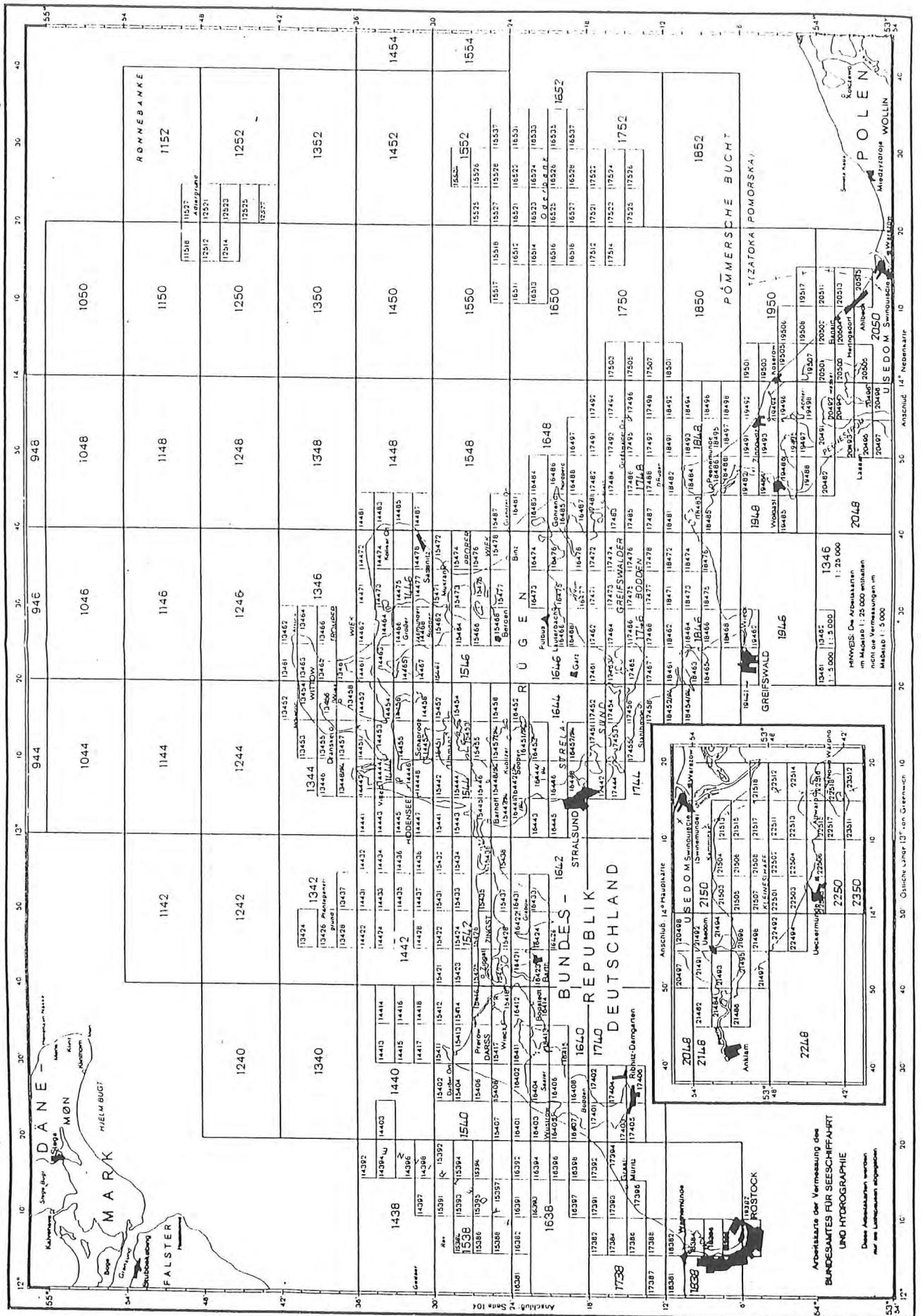


Abbildung 30: Topographische Karten des Seegrundes Ostsee, BSH

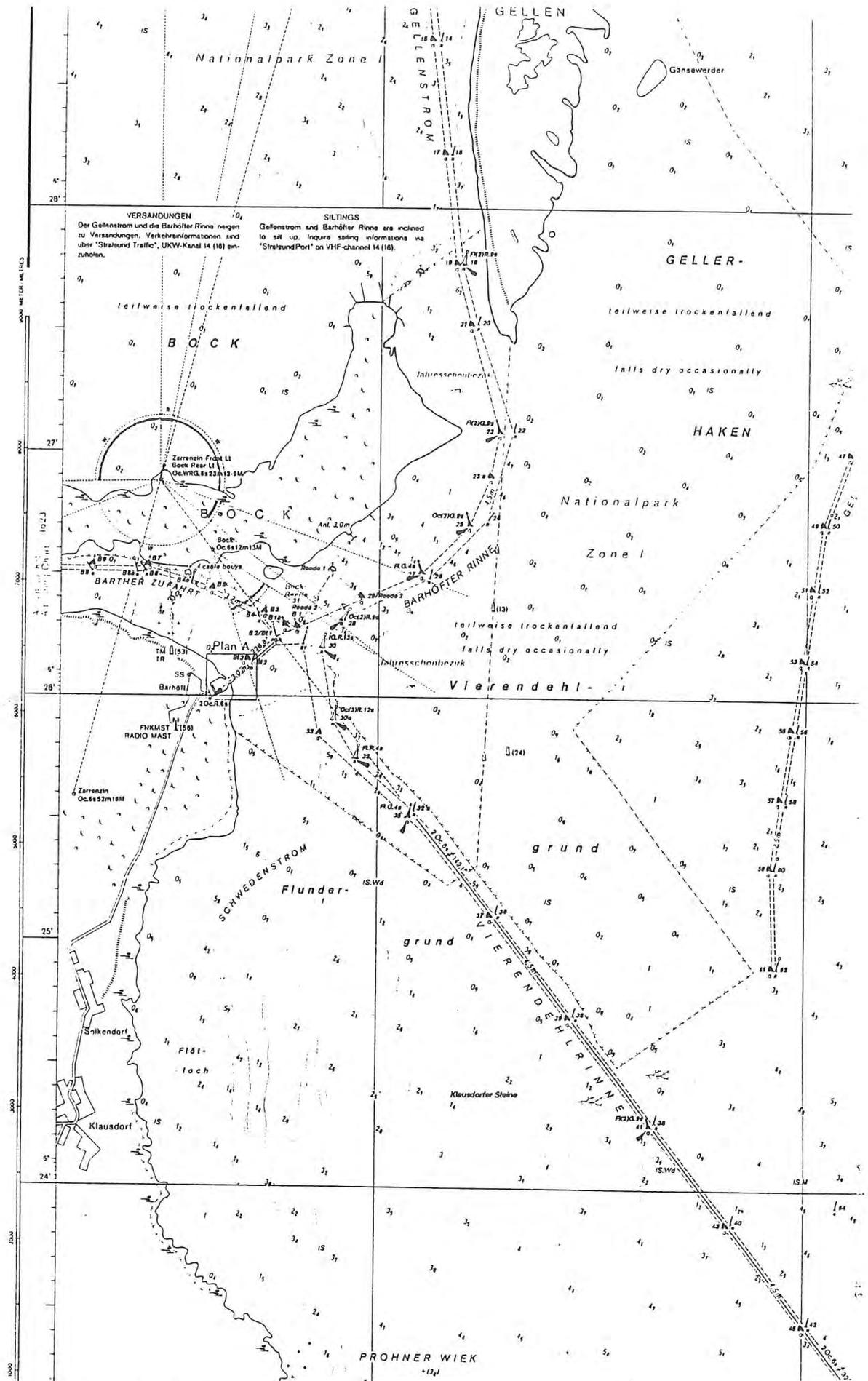


Abbildung 31: Betonungsplan

**Barhöfter Rinne**

3/92 Tn 47/42 - Tn 53  
 9/91 Tn 38/41 - Tn 48  
 1984 Tn 38/41 - Tn 53  
 5/65 Tn 19 Ufund OF Bock in Deckung  
 3/64 dto  
 8/63 dto  
 9/62 Tn 19 - Tn 25  
 3/62 UF OF Vierendehl - UF OF Bock  
 7/60 Tn 25 - Tn 20  
 3/59 Tn 25 - Tn 19  
 5/59 Tn 24a - Tn 19  
 10/58 Tn 19 - Tn 25  
 3/58 Tn 19 - Tn 24  
 9/58 Tn 19 - Tn 25  
 10/57 Tn 19 - Tn 37

**Vierendehl-Rinne**

4/91 Tn 48 - Tn 78  
 9/63 Tn 34 - Tn 21  
 9/63 UF OF Barhöft - Tn 28  
 8/60 Tn 39 - Tn 1  
 Tn 39 - Tn 25  
 2/58 Tn 39 - Tn 25  
 10/58 Tn 39 - Tn 25  
 4/58 Tn 39 - Tn 25

**Gellen Strom**

3/91 Tn 18/21 - Tn 20/23  
 3/91 Tn 10/13 - Tn 38/41  
 4/90 Tn G1 - Tn 10/13  
 3/90 Tn 10/13 - Tn 38/41  
 11/90 Tn 10/13 - Tn 38/41  
 11/89 Tn 10/13 - Tn 20/23  
 11/89 Tn 20/23 - Tn 32/35  
 12/83 Tn 20/23 - Tn 32/35  
 4/63 Tn G - Tn V  
 9/62 Tn 19 - Tn 5  
 8/60 Tn 18 - Tn 5  
 3/59 Tn G/5 - Tn 19/V  
 5/59 Tn G/5 - Tn 19/V  
 3/58 Tn G/5 - Tn 19/V  
 10/58 Tn G/5 - Tn 19/V  
 12/57 Tn G/5 - Tn 19/V  
 6/57 Tn G/5 - Tn 19/V

**Rinne am Bock**

6/90 Tn39/34 - Tn 71/42  
 Tn 53 - Tn 39/34  
 Tn 42/71 - Tn 48  
 11/86 Tn H/1 - Tn 45/36  
 8/85 Tn 91/46 - Tn 1/48  
 10/85 Tn 91/46 - Tn 1/48

**Bock Rinne (Barth - Damgarten)**

9/60  
 6/59  
 12/58

**Die Grabow**

6/90

**Reede Bock**

4/91

**Zufahrt Barhöft**

7/60  
 9/62

**Palmer Ort Rinne**

9/58  
 4/57

Tabelle 10: Peilplanbestand WSA Stralsund

Aufstellung über Seevermessungskarten des Seegebietes  
Darßer Ort - Hiddensee (Außenküste) - Stralsund

1. Vermessungen bis 1972		Maßstab 1 :			
331.00.11.1.59	)	Darßer Ort		341.00.11.1.81-3	)
331.00.12.1.51/52	) 10 000	Darßer Ort		341.00.11.1.83-2	)
331.00.12.1.51/52-2	)	Vor Prerow		341.00.11.1.92 *	) 5 000
331.00.12.1.72	) 5 000	Darßer Ort		341.00.11.1.92-2	)
				341.00.11.1.93 *	)
332.00.11.1.67	)	Vor Zingst		342.00.11.1.83-3	)
332.00.11.1.67-2	) 10 000	Sundische Wiese		342.00.11.1.83-4	)
332.00.11.1.67-3	)	> Bock		342.00.11.1.83-5	)
332.00.12.1.52-2	)	Sundische Wiese		342.00.11.1.92	)
				342.00.11.1.92	)
320.00.01.1.62/64	) 50 000	Prerowbucht		342.00.11.1.83	)
320.00.11.1.67-2	) 10 000	Plantagenetgrund		342.00.11.1.83-2	)
				351.00.11.1.80	)
341.00.11.1.48	) 20 000	Fahrw.nach Stralsund		351.00.11.1.80/81	)
341.00.11.1.67	) 10 000	W-lich Neuendorf		351.00.11.1.83 *	) 10 000
341.00.12.1.52	) 10 000	N-lich Bock		351.00.11.1.93 *	) 5 000
				352.00.11.1.80/81	) 10 000
342.00.11.1.51	) 25 000	Kubitzer Bodden		371.00.11.1.92-2 *	) 5 000
342.00.11.1.57	) 10 000	Prohner Wiek		371.00.11.1.92-3 *	) 5 000
342.00.12.1.52	) 10 000	Prohner Wiek			
				553.00.11.1.83	) 5 000
351.00.11.1.67	)	W-lich Vitte		553.00.11.1.83-2	) 5 000
351.00.12.1.52/53	) 10 000	W-lich Hiddensee		553.00.11.1.83-3	) 5 000
351.00.12.1.52/53-2	)	NW-lich Hiddensee			
553.00.12.1.52	) 10 000	Stralsunder Fahrwasser			
2. Vermessungen 1980 - 1993					
320.36.01.1.80-2	) 20 000	W-lich Hiddensee		13 448 / 94 *	) N-lich Dornbusch
				14 442/93-94 *	) Vitte
331.00.11.1.80	)	Prerowbank		14 444/93-94 *	) Vitter Bodden
331.00.11.1.80-2	) 10 000	N-lich Prerow		14 446/93-94 *	) Hiddensee
331.00.11.1.80-3	)	Vor Zingst		15 447/94 *	) Vierendehrinne
				15 448/94 *	) Vor Lieschow
331.00.12.1.80	) 5 000	Darßer Ort		16 441/94 *	) Prohner Wiek
331.00.12.1.80-2	)	Darßer Ort		16 442/94 *	) Schwarzer Strom
				16 444/94 *	) Parower Haken
332.00.01.1.80	) 20 000	Halbinsel Zingst		16 446/94 *	) Stralsunder Trendel
332.00.11.1.80	)	Sundische Wiese		16 448/94 *	) Dänholm
332.00.11.1.80-2	) 10 000	Framort			
332.00.11.1.80/81	)	> Bock			
341.00.11.1.80	) 10 000	Gellen			
341.00.11.1.80/81	)	Neuendorf			
341.00.11.1.83	)	Heuwiese			

3. Vermessungen ab 1994

Topographische Karten des Seegrundes	N-lich Dornbusch
13 448 / 94 *	
14 442/93-94 *	
14 444/93-94 *	
14 446/93-94 *	
15 447/94 *	
15 448/94 *	
16 441/94 *	
16 442/94 *	
16 444/94 *	
16 446/94 *	
16 448/94 *	

Die unter 1) und 2) aufgeführten Karten sind nach einem anderen Nummernsystem geordnet als die Topographischen Karten des Seegrundes.  
Alle Kartennummern enden mit dem Jahr der Vermessung.  
Die mit \* gekennzeichneten Vermessungen liegen auch als digitale Daten vor.  
Sie müßten bei einem eventuellen Bedarf auch gesondert angefordert werden.

haußig  
Pohlentz

Tabelle 11: Seevermessungskarten im Bereich Bock, Bestand BSH Rostock

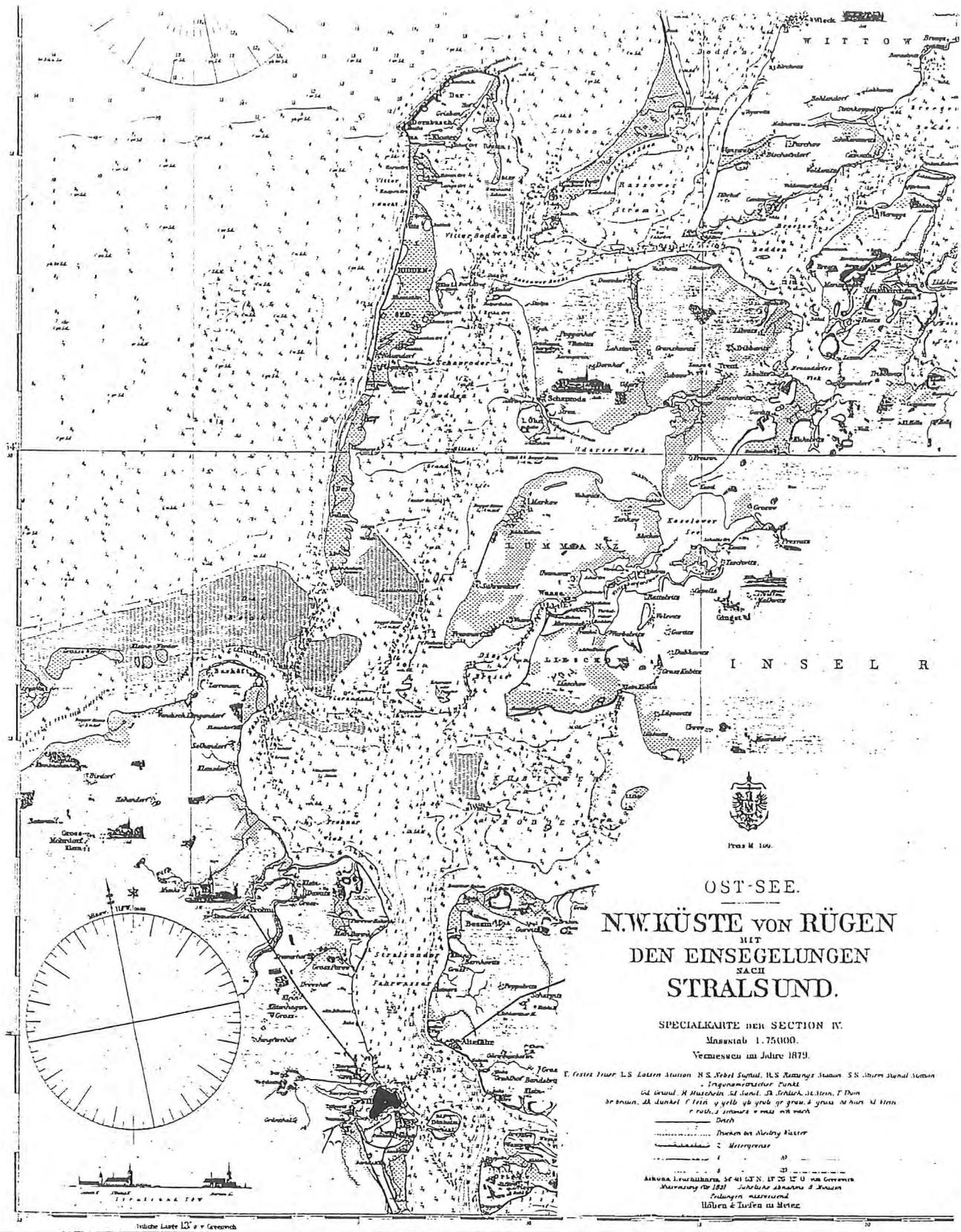


Abbildung 32: Nordfahrwasser 1879

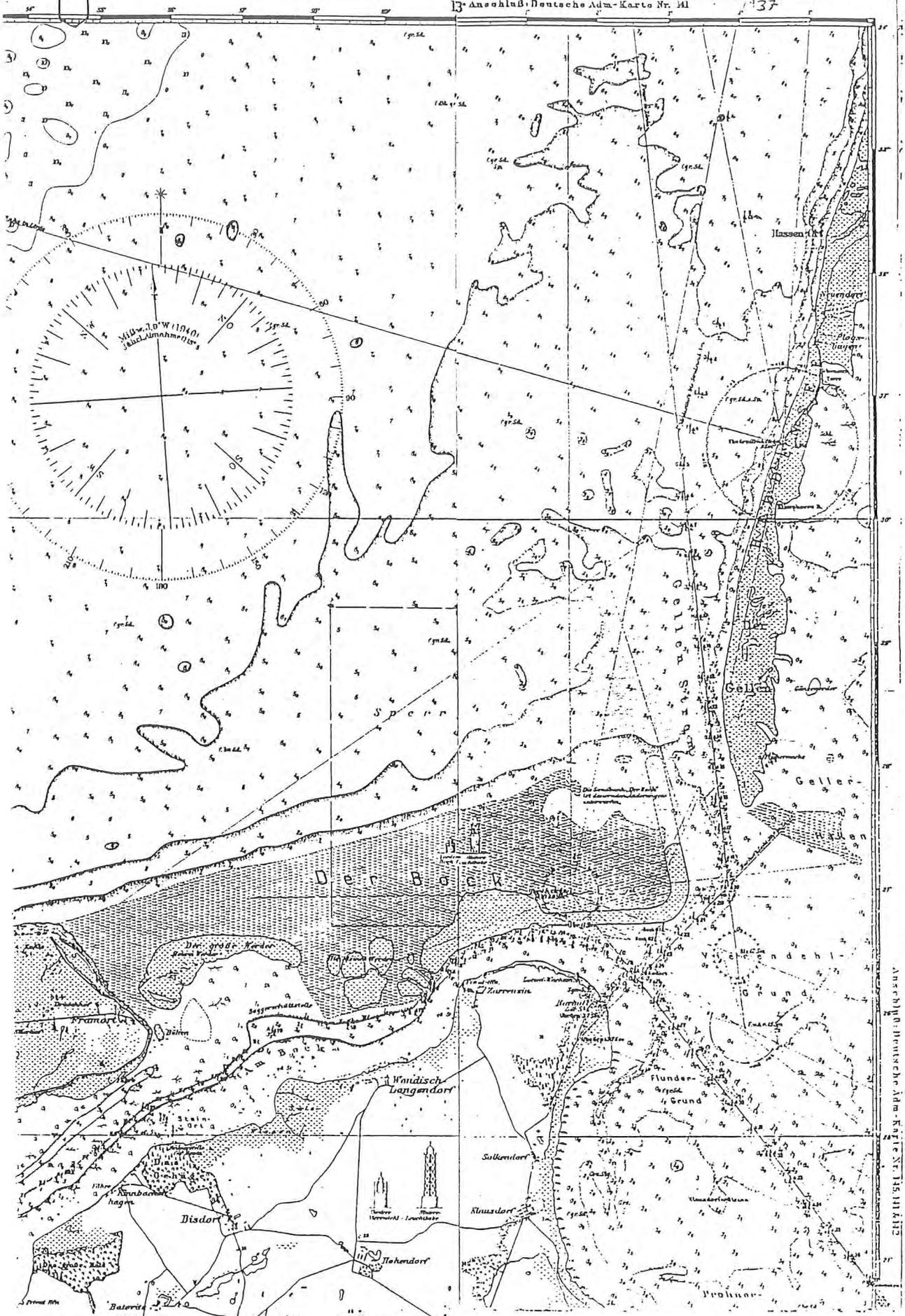


Abbildung 33: Nordfahrwasser 1905 / 1937



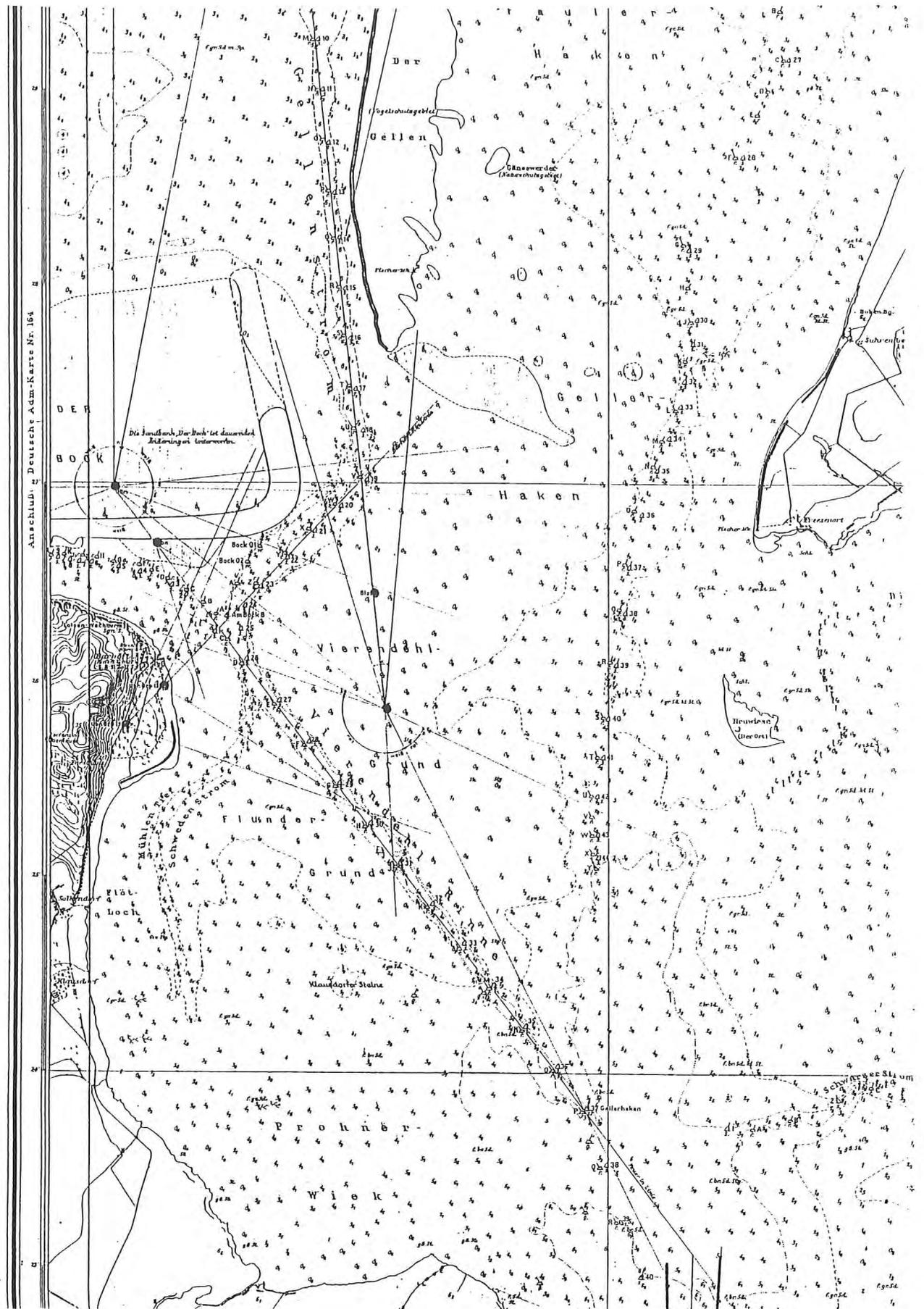


Abbildung 35: Nordfahrwasser 1935

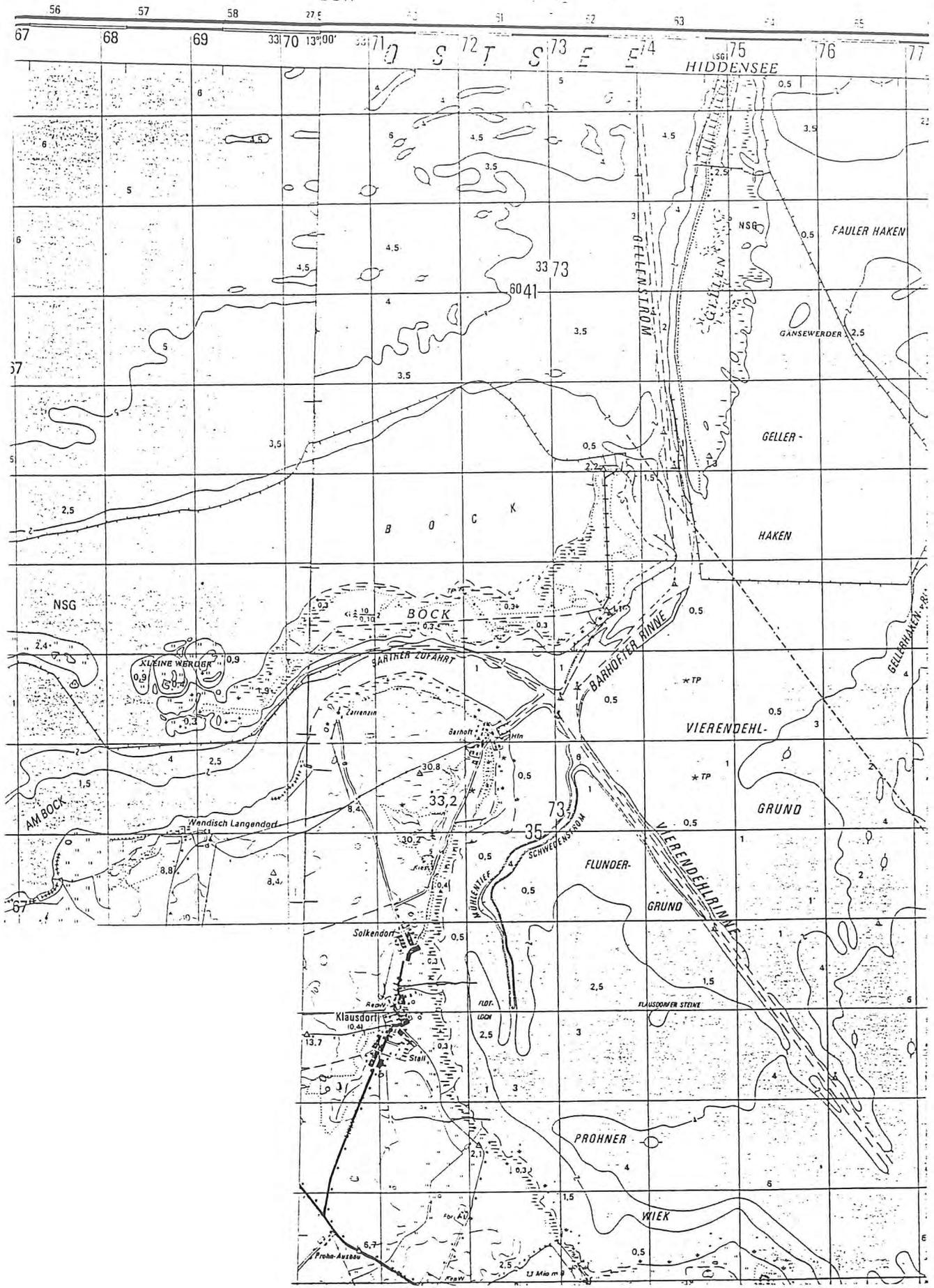


Abbildung 36: Nordfahrwasser 1986

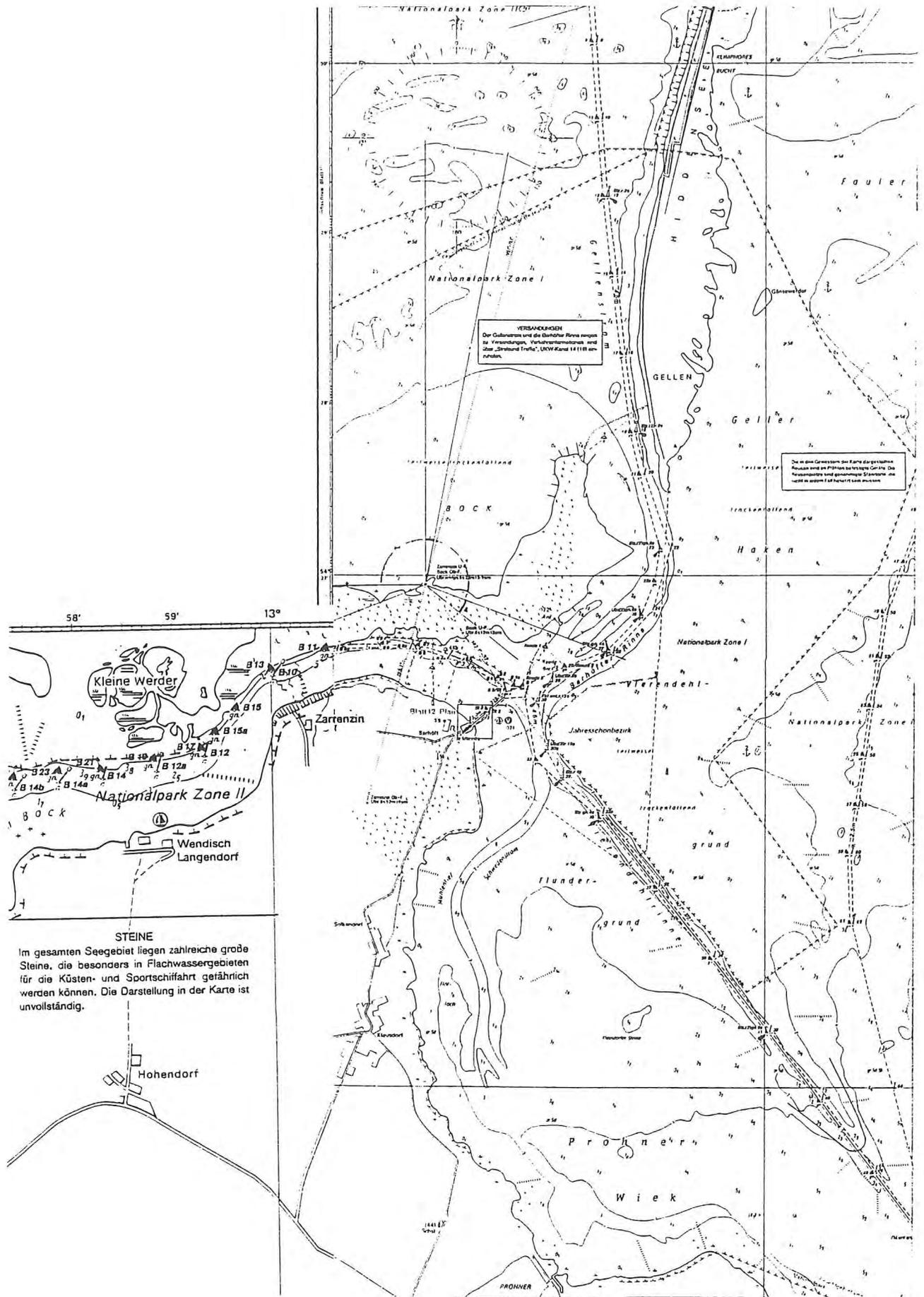


Abbildung 37: Nordfahrwasser 1993



Abbildung 38: Gewässerkundliche Pegel

LOWO : WSA Stralsund		Bestandsliste	29.02.1996	
Pegelnummer	Pegelname	Gewässername	Belegung	W von-bis
03107.0	Timmendorf	Ostsee	W..	1954-1994
03108.0	Wismar	Wismarer Bucht	W..	1946-1994
03115.0	Warnemünde	Ostsee	W..	1947-1994
03118.0	Rostock	Unterwarnow	W..	1946-1994
03124.0	Althagen	Saaler Bodden	W..	1971-1994
03125.0	Darßer Ort	Ostsee	W..	1953-1977
03126.0	Prerow	Prerower Strom	W..	1971-1988
03128.0	Zingst	Zingster Strom	W..	1971-1994
03129.0	Zingst	Ostsee	W..	1984-1994
03130.0	Barth	Barther Bodden	W..	1971-1994
03131.0	Bodstedt	Bodstedter Bodden	W..	1992-1994
03140.0	Barhöft	Prohner Wieck	W..	1971-1994
03143.0	Stralsund	Strelasund	W..	1946-1994
03145.0	Neuendorf	Ostsee	W..	1984-1994
03146.0	Neuendorf	Schaproder Bodden	W..	1986-1994
03150.0	Kloster	Vitter Bodden	W..	1971-1994
03154.0	Niek/Rügen	Wieker Bodden	W..	1971-1988
03155.0	Wittower Fähre	Rassower Strom	W..	1971-1994
03156.0	Ralswiek	Gr. Jasmunder Bodden	W..	1974-1994
03163.0	Lauterbach	Greifswalder Bodden	W..	1946-1994
03165.0	Saßnitz	Ostsee	W..	1946-1994
03167.0	Thiessow	Greifswalder Bodden	W..	1985-1994
03170.0	Stahlbrode	Strelasund	W..	1971-1988
03171.0	Glewitz	Strelasund	W..	1991-1994
03172.0	Greifswald Wieck	Greifswalder Bodden	W..	1946-1994
03173.0	Lubmin	Greifswalder Bodden	W..	1981-1986
03177.0	Ruden	Ostsee	W..	1971-1994
03178.0	Greifswalder Oie	Ostsee	W..	1994-1994
03180.0	Wolgast	Peenestrom	W..	1947-1994
03182.0	Stagnies	Achterwasser	W..	1948-1994
03184.0	Karnin	Kl. Haff-Peenestrom	W..	1948-1994
03185.0	Karlshagen	Peenestrom	W..	1993-1994
03186.0	Peenemünde	Peenestrom	W..	1994-1994
03188.0	Ueckermünde	Kleines Haff	W..	1947-1994
03189.0	Kamminke	Kleines Haff	W..	1949-1990
03193.0	Koserow	Ostsee	W..	1974-1994

Tabelle 12: Pegel-Bestandsliste WSA Stralsund

## 4.4 Vorbereitung der Pilotrechnungen

Die Digitalisierung für das Küstenmodell wurde schon früh in der Projektdefinitionsphase begonnen mit dem Ziel, die Projektvorstellung bei der KFKI Beratergruppe mit Pilotstudien zu ergänzen und die prinzipielle Anwendbarkeit der geplanten Modelle zu zeigen.

### 4.4.1 Übersichtsmodell und Detailmodell

Als Grundlage der Digitalisierung dienen die 1996 gültigen Seekarten 162, 1621, 1622, 1623, 1511 des BSH. Das resultierende grobe Gitter besteht aus 1748 Randknoten sowie 5307 Gebietsknoten (5328 inklusiv Inseln). Das Gebiet hat offene Ränder zur Ostsee zwischen Fischland (westlich Darßer Ort) und Dranske und zwischen Südperd und Ruden am Greifswalder Bodden.

Dieses Gebiet überdeckt den gesamten Bereich der Gellenbucht (Darßer Ort - Gellenstrom - Arkona) einschließlich der Prerow Bank im Westen und des Plantagenetgrundes im Norden bis hin zur 20-Meter Tiefenlinie. Mit diesem Übersichtsmodell soll die Kopplung der Modellierung im Küstenbereich an die Zirkulationsmodelle der Ostsee bzw. der Atmosphäre realisiert werden.

Die grobe Auflösung (vergl. Abbildung 39) erfasst die wesentlichen Strukturen der Rinnensysteme (vergl. Abbildung 40). Details sind aus den o.g. Seekarten jedoch nicht zu entnehmen. Sie werden später aus den vorliegenden Seevermessungsblättern (vergl. Tabelle 11) bereitgestellt. Einen Eindruck von der räumlichen Auflösung der Seevermessungsblätter vermittelt die Abbildung 41 für den Bereich der Gellenstrom und Barhöfter Rinne. Der Abstand der Datenpunkte liegt zwischen 50 und 100 Metern.

Die vorhandenen Seevermessungsblätter von 1980-83 sparen den gesamten Bereich der Sandbank Bock und des Geller Haken aus. Die letzte dokumentierte Vermessung des Bock stammt aus 1952. Daraus ergibt sich ein **dringender Bedarf zur Vermessung dieser Sandbänke** und insbesondere auch der Strandprofile, um eine verlässliche Grundlage zum Modellieren zu schaffen. Auf dieser Datengrundlage lassen sich die Gitter von Detailmodellen erzeugen, die zur morphodynamischen Modellierung geeignet sind.

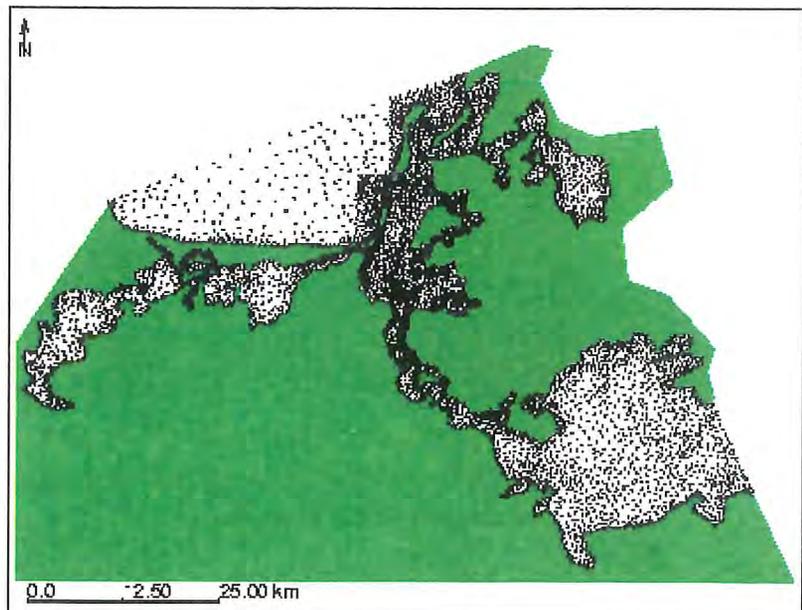


Abbildung 39: Datenbasis des Pilotmodells

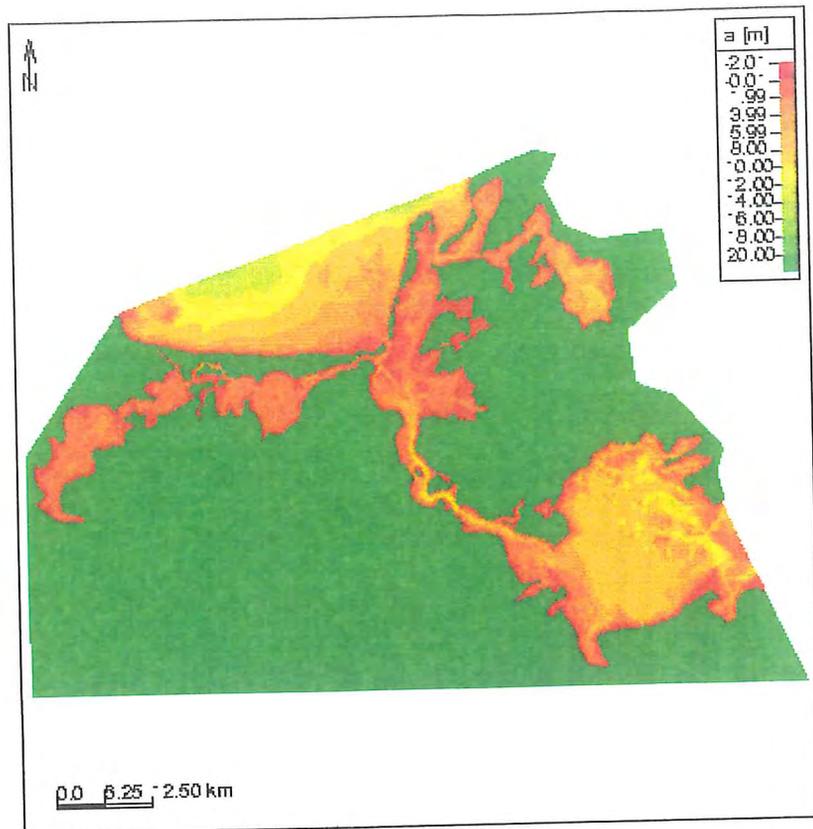


Abbildung 40: Topographie des Pilotmodells

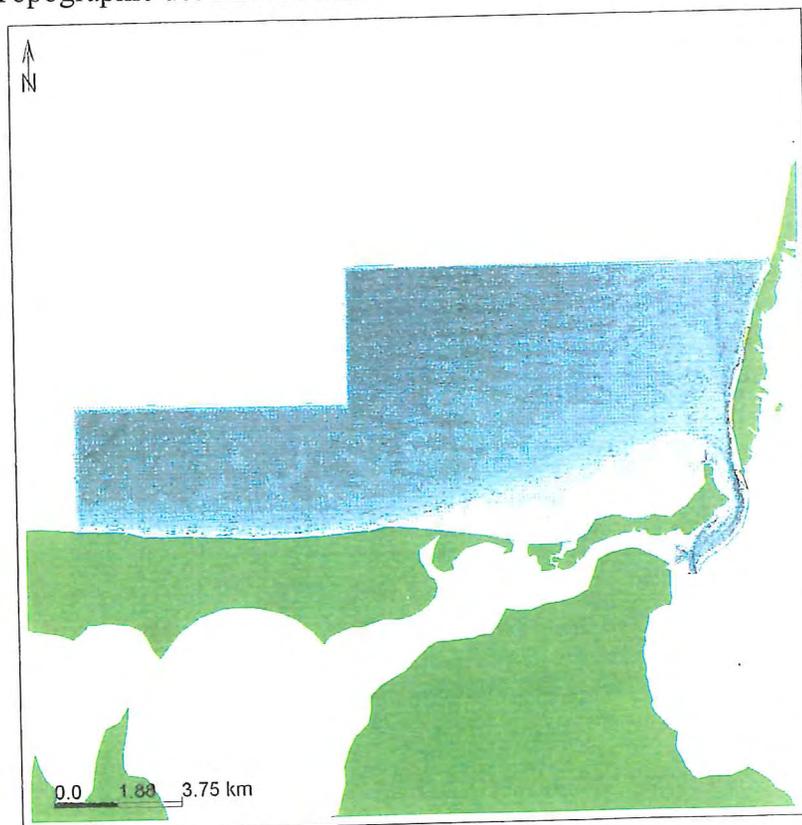


Abbildung 41: Topographie am Bock mit Gellenstrom und Barhöfter Rinne

Zur numerischen Simulation werden sämtliche Geometrie-Daten in ebene UTM-Koordinaten mit Rechts- und Hochwert auf das Hayford Ellipsoid (ED50) transformiert.

#### 4.4.2 Pegelwerte

Die Zeitreihen von Pegeln an der Außenküste für den Zeitraum 1.10.1994-31.10.1995 belegen mehrere Extremereignisse mit Wasserstandsdifferenzen von mehr als einem Meter innerhalb weniger Tage.

Darüber hinaus zeigen die Zeitreihen an der Innenküste im November 1994 deutlich das Eigenleben der einzelnen Boddengewässer bei Sturmhoch- und -niedrigwasser, während die Pegel an der Außenküste abgesehen von Laufzeiteffekten kaum Phasendifferenzen aufweisen.

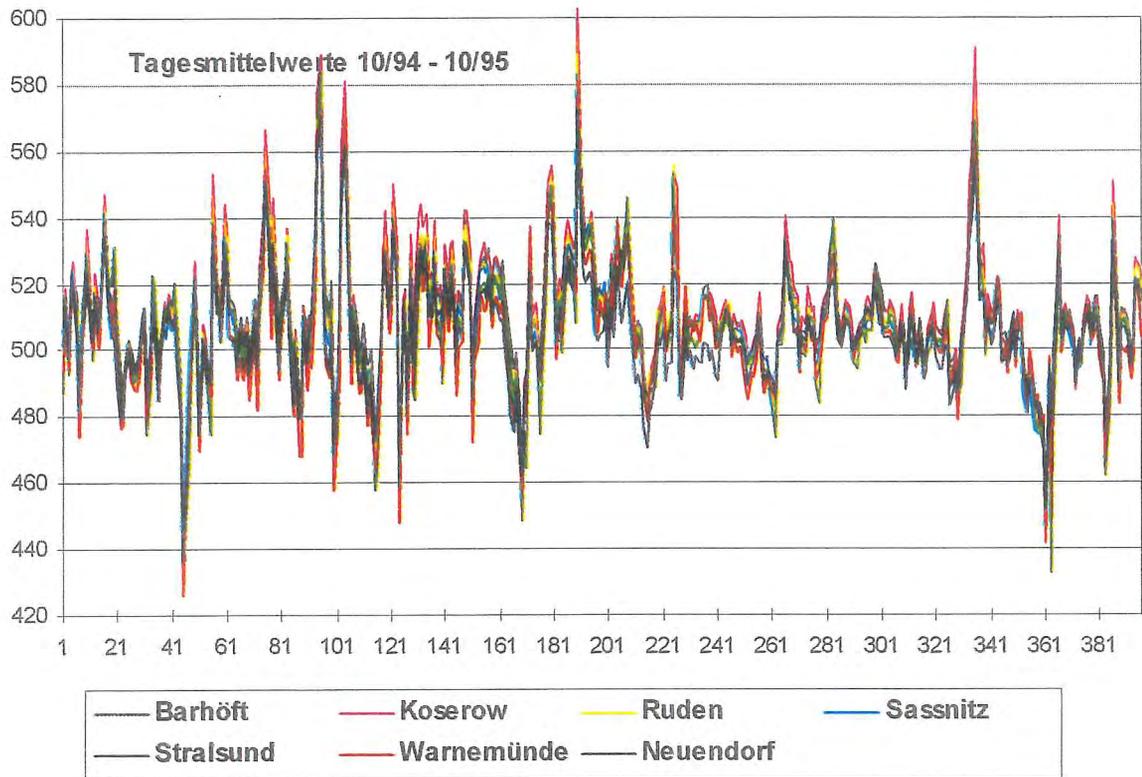


Abbildung 42: Wasserstände entlang der Außenküste 1994-1995

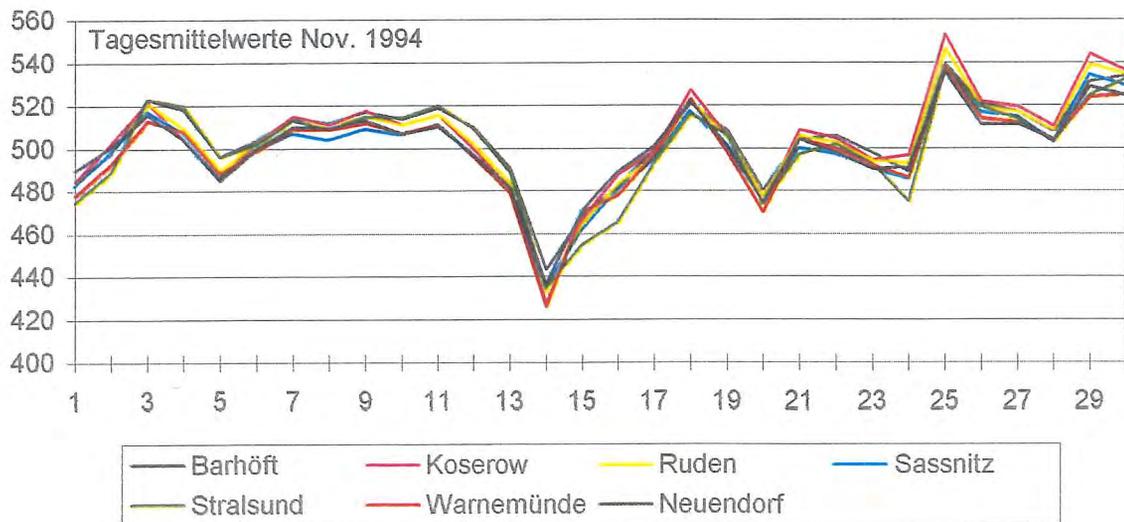


Abbildung 43: Wasserstände November 1994, Außenküste

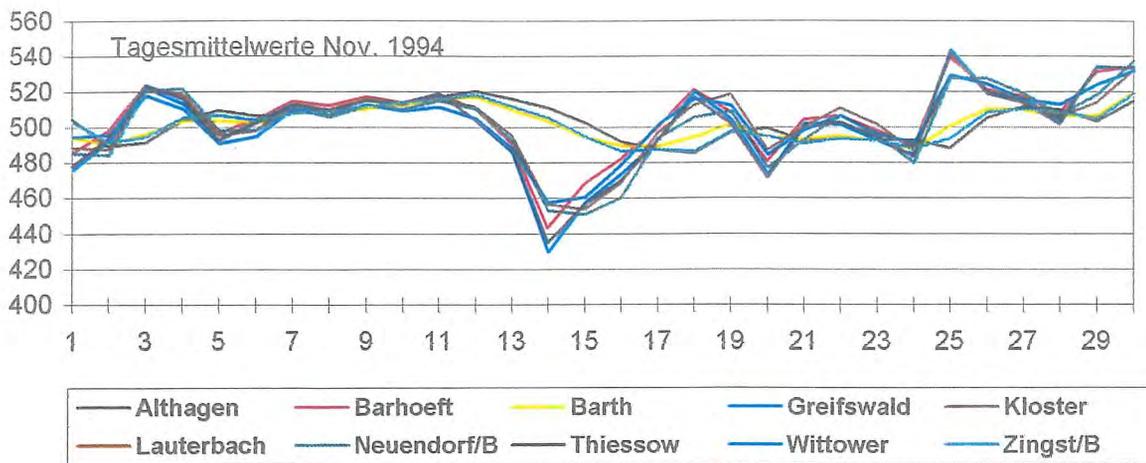


Abbildung 44: Wasserstände November 1994, Innenküste

Die Simulation der Extremereignisse im November 1994 soll zur Eichung des Pilotmodells herangezogen werden. Die Randbedingungen zum Modellbetrieb werden aus übergeordneten Zirkulationsmodellen übernommen.

#### 4.4.3 Randbedingungen

Die Randwerte für Strömung, Wasserstand, Seegang und Wind aus den übergeordneten Modellen vom IOW, BSH und DWD mit grober Auflösung, die zur Steuerung des Küstenmodells eingesetzt werden, liegen in Auflösungen zwischen 1 und 10sm im Bereich der Gellenbucht vor.

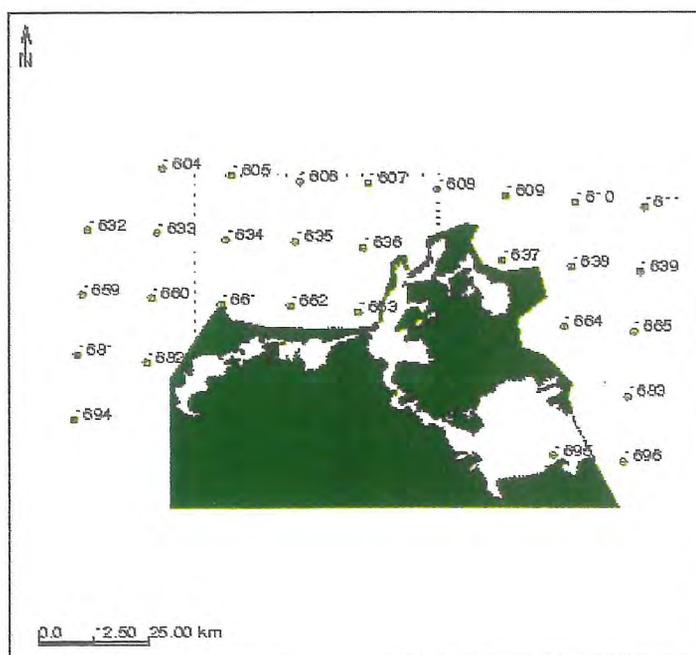


Abbildung 45: Randbedingungen für Wind

Die Abbildung 45 zeigt die Lage der Knoten im meteorologischen Modell. Die erforderlichen Steuerdaten müssen räumlich auf das wesentlich feinere Gitter des Pilotmodells interpoliert werden. Darüber hinaus muß auch zeitlich interpoliert werden, weil die Randbedingungen nur als 1-Stunden Werte für Strömung und Wasserstand bzw. 6-Stunden Werte für Wind und Seegang zur Verfügung stehen.

## 5 Literatur

- [1] Baerens, C et al., 1994, Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste, Teil 1: Sturmhochwasser. Spezialarbeiten aus der Arbeitsgruppe Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, Heft 8.
- [2] Baerens, C et al., 1995 Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste, Teil 2: Sturmniedrigwasser. Spezialarbeiten aus der Arbeitsgruppe Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, Heft 9
- [3] Battjes, JA, 1968. Refraction of water waves. J. Waterway and Harbour Division, ASCE, Vol 94, WW4, pp437-451.
- [4] Berkhoff, JWC, 1972. Computation of Combined Refraction-Diffraction. Proc. 13th Conf. Coastal Engineering, pp 471-490.
- [5] Berkhoff, JWC, 1976. Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Waves - Wave Diffraction and Refraction. Delft Hydraulics Laboratory, 163, 103p.
- [6] Birr, H-D, 1970, Hydrographie des Strelasundes, Dissertation A, Pädagogische Hochschule Potsdam.
- [7] Brøker, I et al, 1994, 3-Dimensional Processes along sandy Beaches -Dimensions of a coastal facility, Proc. Coastal Dynamics'94, Feb 21-25, Barcelona, Spain, pp 103-113
- [8] Brøker, I, 1995. Coastal Area Modelling - Integrated Presentation. G8M Technical Committee, G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk, Polen, pp2-86-2-90
- [9] Chesher TJ et al, 1993, PISCES A Morphodynamic Coastal Area Model, First Annual Report, SR-337, HR Wallingford
- [10] Danish Hydraulic Institute, 1993, Mike21, A Modelling System For Estuaries, Coastal Waters and Seas. Hydrodynamic Module  
Wave Modelling  
Sediment transport Modelling
- [11] Danish Hydraulic Institute, 1995, The Morphological Evolution around Thyboron - An Inlet at the North Sea, 8043-1/9511.bem/CED/IBH/JAZ
- [12] Deigaard, R, Fredsøe, J, Hedegaard, IB, 1986, Mathematical Model For Littoral Drift, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 112(3), pp 351-369
- [13] DeVriend, H et al, 1993, Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review, Coastal Engrg, 21, pp 225-269
- [14] DHI Software, 1993. Mike21 - A Modelling System for Estuaries, Coastal Waters and Seas: Wave Modelling - A Short Description. Hørsholm, Denmark.
- [15] DHI Software, 1993. Mike21 - A Modelling System for Estuaries, Coastal Waters and Seas:

- [16] DHI, 1995. The Morphological Evolution around Thyborøn - An Inlet at the North Sea.
- [17] DHI 1995. DHI Software User Conference. DHI Software News, 1995, No.1, p6.
- [18] DHL, 1992. Special issue on coasts. Hydro delft, 80.
- [19] DHL, 1993. Special issue on mathematical models. Hydro delft, 81
- [20] Dießner, G, Dießner, U, 1993, Küstenmorphologische Untersuchungen am Bock - Die Entwicklung einer Sandinsel unter besonderer Berücksichtigung der Baggerarbeiten im Stralsunder Nordfahrwasser, Staatsexamensarbeit für Lehramt an Gymnasien, Geographisches Institut, EMAU Greifswald
- [21] Dingemans, MW et al., 1984. Field and Laboratory Verification of the Wave Propagation Model Crediz. Proc. 19th Conf. Coastal Engineering, pp 1178-1191.
- [22] FAS (Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau) Berlin, 1955, Modellversuche für Verbesserung des Westfahrwassers nach Stralsund
- [23] Forschungsleitplan zum Verbundvorhaben KLIMAÄNDERUNG und KÜSTE des Bundesministeriums für Forschung & Technologie und der norddeutschen Küstenländer Februar 1994
- [24] Forschungsprogramm des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen, Geschäftsführung (ed), Kiel, 1991
- [25] Forschungsstandanalyse zum Projektantrag "Klimaänderung und Boddenlandschaft", Dr. Gusen, Mai 1993
- [26] Holz, K-P, Feist, M, Nöthel, H, Lehfeldt, R, Plüß, A, Zanke, U, 1990 The TICAD Toolbox Applied to Coastal Engineering Problems, Hydrosoft '90, Proc. 3rd Int. Conf. on Hydraulic Engineering Software, Massachusetts/USA, Computational Mechanics Publications.
- [27] Hydro-Consult-Hannover, 1996. Bericht zur morphodynamischen Berechnung der Elbe bei Glückstadt. Im Auftrag der WSD-Nord, Kiel.
- [28] Hydro Delft, 82, 1994. Delft Hydraulics, Delft.
- [29] Johnson, H, Brøker, I, Zyserman, JA, 1994, Identification of some relevant Processes in coastal morphological modelling, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engineering Research Council/ASCE, Oct 23-28, Kobe, Japan, pp 2871-2885
- [30] Johnson, HK, Brøker, I, Zyserman, JA, Manor, K, 1995. Morphological Response in the vicinity of offshore breakwaters. DHI, Denmark
- [31] Leitantrag KLIBO - Klimawirkung und Boddenlandschaft (Prozeß, Modell, Prognose) April 1993

- [32] Malcharek, A et al., 1995. Three dimensional numerical modelling of cohesive sediment transport processes in estuarine environments. In Weydert, M et al. (eds), Marine Sciences and Technologies. Second MAST days and EUROMAR market - Vol. 1, pp 584-596
- [33] Mangor, K et al., 1995. Morphological Impact Assessment of Artificial Islands for the Øresund Link between Denmark and Sweden. DHI, Denmark.
- [34] Peregrine, DH, 1967. Long waves on a beach. J. Fluid Mech, 27, pp .
- [35] Price, DM et al, 1995, PISCES A Morphodynamic Coastal Area Model, Final Report, SR-411, HR Wallingford
- [36] Probst, B, 1996. Küstenschutz 2000: Begleitende Untersuchungen für die Fortschreibung des Generalplans in Schleswig-Holstein. Vortrag vom MELF beim Workshop Klimaänderung und Küste.
- [37] Reinhard, H, 1953, Der Bock, VEB Geographisch.Kartographische Anstalt Gotha
- [38] Roelvink JA et al., 1995. Field validation and application of a coastal profile model. Proc. Coastal Dynamics '95, Gdansk.
- [39] Roelvink JA et al., 1995. Medium-term morphodynamic modelling. G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk, Polen, pp 7-3, 7-6
- [40] Rudolph, E, 1993, Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean im Küstenbereich, GKSS 93/E/57, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht
- [41] Rudolph, E., Winkel-Steinberg, N, Hinrichsen, A., 1991, Abschlußbericht RAMSES (Registrierung, Analyse, Modellierung von Seegang und Strömung), KFKI-Sachprogramm 31, Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuaren.
- [42] Southgate, HN, Goldberg, DG, 1989. An efficient computational model for wave refraction and diffraction using finite differences, Report SR 213, HR Wallingford.
- [43] Stigge, H-J, 1994, Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns, Die Küste, 56, 1-23
- [44] Stive, MJF , DeVriend, H, 1995, Advances in Modelling of Large Scale Coastal Evolution, G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk, Polen, pp 7-7, 7-11
- [45] Svendsen, IA, Jonsson, IG, 1980. Hydrodynamics of coastal regions. Den Private Ingeniørfond - Technical University of Denmark.
- [46] Tanguy, JM, 1995. Coastal Morphodynamics with the Finite Element Method. G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk, Polen, pp 7-94, 7-97
- [47] Tanguy, JM et al., 1995. A new Lax-Wendroff algorithm to solve the bed continuity equation with slope effect. G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk, Polen, pp 7-98, 7-101
- [48] Vorhaben (laufende, geplante und beantragte Vorhaben) im Bund-Länder-Projekt

- [49] van der Weide, J, Hoozemans, FMJ, 1993. Engineering Tools and Techniques for Coastal Zone Management. In Hillen, R, Verhagen, HJ (eds), Coastlines of the Southern North Sea, ASCE Series Coastlines of the World, pp 344-359.
- [50] Wild, BR, 1988. A numerical sand transport model with time dependent bed exchange. Report No SR 148.
- [51] Wissenschaftliches Rahmenkonzept für das Bund-Länder-Forschungsvorhaben "Klimaänderung und Boddenlandschaft", 2. überarbeitete Fassung vom 21.10.1992, in Schellnhuber, H.-J. und Sterr, H., 1993. Klimaänderung und Küste, Springer-Verlag
- [52] Yoo, D, O'Connor, BA, 1986. Ray model for caustic gravity waves. Proc. 5th Conf. of Asian and Pacific Division of IAHR, Seoul, Vol 3, pp 1-13.
- [53] Yoo, D, O'Connor, BA, 1988. Diffraction of waves in caustics. J of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, 114(6).
- [54] Zanke, U, 1994. Ein numerisches Modell für bewegliche Sohle. Wasser & Boden, 12, pp28-33.
- [55] Zanke, U, 1993. Sachstandsbericht zur Entwicklung eines numerischen Modells mit beweglicher Sohle. Hydro-Consult-Hannover
- [56] Zwischenbericht KLIBO, Projekt Strömungs- und Sedimenttransportmodellierung zur Morphodynamik der Boddengewässer, Zeitraum 01.04.1994 - 31.12.1994 Hannover und Leipzig, April 1995
- [57] Zyserman, J A, Fredsøe, J, 1994, Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment, Journal of Hydraulic Engineering, 120(9), pp 1021-1042