

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen E 26 AUG. 1998
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

Doppel

BUNDESMINISTERIUM FÜR
BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE
- Meerestechnik und Küsteningenieurwesen -

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0564
**OPTIMIERUNG VON KÜSTENSICHERUNGSARBEITEN
IM KÜSTENVORFELD DER NORDSEEKÜSTE**

Teil 1:
PROJEKTÜBERBLICK UND -SYNTHESE

von
Dr. J.L.A. Hofstede

Flintbek, April 1998

LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT
DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN

№ 32816 *lit*

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen F 26. AUG. 1998
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

Nº 328 16 *kd*

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Vorwort	II
1. Einführung	1
1.1 Anlaß	1
1.2 Ziel und Aufgabenstellung	2
1.3 Projektorganisation und -Ablauf	3
2. Die Teilprojekte	6
2.1 Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern	6
2.2 Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen	7
3. Projektsynthese	9
3.1 Teilprojekt „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“	9
3.2 Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“	11
3.3 Zusammenführung der Ergebnisse der beiden Teilprojekte	13
3.3.1 Hydrologische Wirkung der untersuchten Techniken	14
3.3.2 Morphologische Wirkung der untersuchten Techniken	15
3.3.3 Synthese der Forschungsergebnisse	17
3.4 Ausblick und Forschungsbedarf	18
4. Öffentlichkeitsarbeit	20
4.1 Veröffentlichungen	20
4.2 Sonstige Berichte	21
4.3 Wissenschaftliche Vorträge	22
4.4 Tagungsbesuche	23
5. Literaturverzeichnis	24

Vorwort

Von Januar 1994 bis Juni 1997 wurde unter Federführung des LANDESAMTES FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU) das Forschungsvorhaben „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ durchgeführt. Das Vorhaben wurde mit Mitteln des BUNDESMINISTERIUMS FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF) unter dem Kennzeichen MTK 0564 gefördert. Für die Bewilligung und die Bereitstellung der Forschungsmittel durch das BMBF sei an dieser Stelle gedankt.

Den Projektleitern und den sehr engagierten Projektbearbeiterinnen und -Bearbeitern der mit der wissenschaftlichen Durchführung des Projektes beauftragten Hochschulinstitute FORSCHUNG UND TECHNOLOGIEZENTRUM WESTKÜSTE DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL (FTZ) und FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER (FI) möchte ich ausdrücklich für Ihre Arbeit im Projekt danken.

Desweiteren möchte ich den Mitgliedern der begleitenden Projektgruppe des KURATORIUMS FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) für Ihre Unterstützung danken. Die zahlreichen Anregungen und Diskussionen während der Projektgruppensitzungen haben den Projektbearbeiterinnen und -Bearbeitern sehr geholfen.

Den Mitarbeitern der ÄMTER FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ÄLW) HUSUM und HEIDE danke ich für die Errichtung der Lahnungsfelder, den Aufbau und Betrieb der hydrologischen Meßketten sowie für die durchgeführten Nivellements. Einen persönlichen Dank möchte ich Herrn F. Jensen vom ALW HUSUM aussprechen. Sein großes fachliches Wissen und seine Bereitschaft zur aktiven Kooperation haben maßgeblich zum Erfolg des Projektes, insbesondere des hydrologischen Teiles, beigetragen.

Die Verantwortung für den Inhalt der Teilberichte dieses Endberichtes liegt bei den jeweiligen Autoren.

Flintbek, April 1998

Dr. Jacobus L.A. Hofstede

1 Einführung

1.1 Anlaß

Deichvorländer bzw. Vorlandsalzwiesen haben im Wattenmeer von jeher eine wichtige Rolle gespielt. Anfänglich lag die Bedeutung in erster Linie in der landwirtschaftlichen Nutzung der neu-entstandenen bzw. -gewonnenen Flächen. Heute liegt sie in ihrem hohen Wert für Ökologie und Küstenschutz (PROBST, 1997). HOFSTEDE UND SCHIRMACHER (1997) schreiben diesbezüglich:

„Für den Küstenschutz bewirkt das Vorland in erster Linie eine Verringerung der hydrodynamischen Beanspruchung auf die Deiche bei Sturmfluten. Das Vorland dämpft die Wellen, verringert den Wellenauflauf und reduziert dadurch die Gefahr des Wellenüberlaufs während Sturmfluten. Nach Deichbrüchen verhindert es Strombrüche und bietet die Möglichkeit, kurzfristig geeigneten Boden für die notwendige Deichreparatur zu gewinnen. Es verhindert darüberhinaus die Unterspülung der Deiche durch herandrängende Priele und ersetzt aufwendige Steindeckwerke am Deichfuß. Auf besonders ausgewiesenen Flächen bietet das Vorland schließlich die für die Deichunterhaltung notwendigen Salzgrassoden.

Aus ökologischer Sicht stellen die Salzwiesen ein essentielles und verbindendes Element des Ökosystemes Wattenmeer dar. Hier verzahnen sich die Lebensgemeinschaften des Meeres und des Landes in besonderer Weise und haben sich zu hochspezialisierten Lebensgemeinschaften ausgebildet. Darüberhinaus haben die Salzwiesen als Burt-, Nahrungs- und Rastgebiet für Vögel eine überregionale Bedeutung“.

Voraussetzungen für die Entstehung von Salzwiesen sind das Vorhandensein eines ausreichenden Feinsedimentangebotes in der Tidewassersäule sowie ein seegangs- und strömungsberuhigtes Umfeld, in dem dieses Material langfristig zur Ablagerung kommen kann (HOFSTEDE 1996). Das durch die Akkumulation verursachte Höhenwachstum führt dazu, daß das Gelände über immer längere Perioden trockenfällt und somit die Standortbedingungen für die Ansiedlung einer Pionier- und (später) Salzwiesenvegetation geschaffen werden. Eine optimale Wirkung für den Küstenschutz wird erfahrungsgemäß durch möglichst hohe und breite Deichvorländer erreicht. Es hat sich gezeigt, daß die Vorlandbildung und -stabilisierung durch die Anlage von Lahnungsfeldern zur Beruhigung der angreifenden Kräfte aus Seegang und Strömung sowie durch Begrüppung zur Entwässerung der hochgelegenen Wattflächen bzw. Anwachszone erheblich beschleunigt bzw. verbessert werden kann. Die Beruhigung führt dazu, daß sich mehr feines Sediment ablagern kann bzw. daß weniger Material erodiert. Eine verbesserte Entwässerung begünstigt die Konsolidierung des Wattbodens sowie die Ansiedlung von Pionierpflanzen wie Queller und Schlickgras. Folglich kann das Geländeniveau schneller bis über MThw anwachsen und sich eine geschlossene überjährige Vegetationsdecke einstellen. Wie Kartenvergleiche belegen, wurde mit diesen Metho-

1. Einführung

den beispielsweise in Nordfriesland zwischen 1870 und 1980 die Entstehung von etwa 8900 ha neuem Vorland gefördert (DIECKMANN, 1988).

Als Folge der intensiven Vorlandarbeiten und subsequenten Eindeichungen des letzten Jahrhunderts liegen die Landesschutzdeiche und vorgelagerten Vorländer heute zum größten Teil an Stellen, an denen eine relativ starke hydrodynamische Beanspruchung vorherrscht. Natürliche Salzwiesen entwickeln sich dagegen nur an sehr geschützten, energiearmen Stellen. Es ist daher unwahrscheinlich, daß die heutigen Salzwiesen vor den Landesschutzdeichen ohne Vorlandarbeiten entstanden wären. Im Gegenteil, Untersuchungen in den Niederlanden deuten daraufhin, daß die Einstellung der Vorlandarbeiten hier zu starken Kantenerosionen und mittel- bis langfristige sogar zu einer Aufreibung der Salzwiesen führen kann (DIKEMA, pers. Mitt.). Nach den neuesten Klimaszenarien ist mit einer Zunahme des Meeresspiegelanstieges und der Sturmtätigkeit zu rechnen. Die dadurch verursachte stärkere hydrodynamische Beanspruchung der Vorländer durch Seegang und Strömung könnte die oben beschriebene negative Entwicklung sogar noch beschleunigen. Aus diesen Gründen erscheint es zur langfristigen Erhaltung der Vorländer bzw. Salzwiesen unumgänglich, auch künftig Vorlandarbeiten durchzuführen.

Quantitative Erkenntnisse über die Wirkung von Lahnungen bei der Förderung des Anwachsens sowie über die stabilisierende Wirkung von Gruppen in bestehenden Vorländern wurden im BMBF-Vorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ (ERCHINGER *et al.*, 1996) erarbeitet. Allerdings stand eine detaillierte Ursache-Wirkungsanalyse von Vorlandarbeiten noch aus. Weiterhin fehlte bisher eine systematische Untersuchung, bei welchen geographischen Gegebenheiten und mit welchen Lahnungsgeometrien eine Optimierung der Vorlandbildung und -stabilisierung zu erzielen ist.

1.2 Ziel- und Aufgabenstellung

Übergeordnetes Ziel dieses Forschungsprojektes war, eine wissenschaftlich fundierte Antwort auf die Frage zu erhalten, bei welchen hydrodynamischen und morphologischen Gegebenheiten unter Einschluß ökologischer und wirtschaftlicher Kriterien Vorlandarbeiten im Tidegebiet in welcher Form nutzbringend sind.

Durch die Erfassung der hydrodynamischen, morpho-, sedimento- und biologischen Randgrößen innerhalb und vor den Lahnungsfeldern sowie durch physikalische und numerische Modelluntersuchungen sollten vorerst folgende Fragen beantwortet werden:

- wie beeinflussen Lahnungsfelder generell die hydrologisch-morphologischen Wechselbeziehungen in der Anwachszone, d.h. der Übergangszone zwischen Deich oder Vorland und Watt und
- wie werden diese Prozesse von unterschiedlichen Lahnungsgeometrien beeinflusst.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse sollten erste Ansätze entwickelt werden, die die beobachteten Erosions-, Transport- und Sedimentationsprozesse in und vor Lahnungsfeldern mit der Hydrographie in Beziehung bringen, um letztendlich eine Objektivierung hinsichtlich der Wirksamkeit von Küstensicherungsarbeiten und Grundlagen für deren Optimierung zu ermöglichen.

Zur Erfüllung dieser Zielstellung wurde eine Kombination von Natur- und Modelluntersuchungen erforderlich. Bei den Naturuntersuchungen in zwei Testfeldern entlang der schleswig-holsteinischen Westküste (Teil 2: Abb. 15) konnten die beim Lahnungsbau auftretenden Änderungen durch umfassende hydro-, morpho- und sedimentologische Messungen direkt beobachtet und analysiert werden. Eine Einflußnahme auf die Randbedingungen war hier jedoch nur im begrenzten Umfang (Lage der Testfelder, Lahnungsfeldgeometrie) möglich. Im Modell dagegen konnten die äußeren Rahmenbedingungen vorgegeben werden und die im Lahnungsfeld auftretenden Veränderungen der Strömung und der Wellen gemessen bzw. errechnet werden. Somit konnten hier kausale Beziehungen erarbeitet werden. Zur Verifizierung bzw. zur Herstellung der Naturähnlichkeit der Modelle waren wiederum die Naturuntersuchungen unabdingbar.

1.3 Projektorganisation und -Ablauf

Die Federführung und Koordination des Forschungsvorhabens lag beim Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein.

Die wissenschaftliche Bearbeitung des Projektes fand in Teilprojekten an zwei Hochschulinstituten statt. Ein Teilprojekt „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“ wurde unter der Leitung von Prof. Dr. Köster und Dr. Ricklefs durch Dipl.-Geol. Reimers am Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ) der Universität Kiel bearbeitet. Ziel war die Erfassung, Quantifizierung und ursächliche Deutung der hydro-, morpho-, sedimento- und biologischen Veränderungen in den beiden Testfeldern nach Anlage der Lahnungsfelder. In Teil 2 des Schlußberichtes werden die Ergebnisse dieses Teilprojektes dargelegt. Das Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ wurde unter der Leitung von Prof. Dr. Zimmermann und Dr.-Ing. Schwarze durch Dipl.-Ing. von Liebermann, Dipl.-Ing. Lohmann (bis 31.12.1994), M.civ.eng. Abdel-Rahmann (vom 01.01.1995 bis 30.06.1996) und Dr.-Ing. Matheja (ab 01.07.1996) am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (FI) der Universität Hannover durchgeführt. Ziel dieses Teilprojektes war die Ermittlung und Bewertung der in ein Lahnungsfeld eingetragenen Seegangenergie bei unterschiedlichen Wasserständen (Tide, Winds-

1. Einführung

tau und Wellenstau), die Erfassung der damit verbundenen Seegangs- und Strömungsbedingungen durch Simulationen im physikalischen und numerischen Modell sowie die Ermittlung und Deutung der hydrologisch-morphologischen Wechselbeziehungen an der Sohle der Lahnungsfelder. Die Ergebnisse dieses Teilvorhabens werden in Teil 3 dieses Schlußberichtes beschrieben.

Weiterhin haben die Ämter für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum umfassend im Projekt mitgewirkt. Sie errichteten in den beiden Testfeldern die Lahnungsfelder nach vorgegebenem Muster (Teil 2: Abb. 27), errichteten und betrieben zwei Strömungsmeßketten, und führten im Halbjahresrhythmus Detailnivelements durch. Schließlich war auch die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie direkt eingebunden. Hier wurden die an den beiden Strömungsmeßketten erfaßten Rohdaten für die weiteren Analysen in den beiden Forschungsinstituten aufbereitet. In Teil 3: Abb. 1.1 ist die Struktur des BMBF-Projektes dargestellt.

Das Forschungsvorhaben wurde von einer Projektgruppe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet. Mitglieder dieser KFKI-Projektgruppe waren:

Coldewey	: Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz Norden
Gärtner (zeitlich)	: Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide
Grüne	: Großer Wellenkanal der Universität Hannover
Heinrichs	: Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum
Dr. Hofstede (Obmann)	: Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
Niemeyer	: Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste
Dr. Stephan	: Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste
Dr. Stock	: Landesamt Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer
Dr. Wieland (zeitlich)	: Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide

Die KFKI-Projektgruppe hat insgesamt sechs Mal getagt. Während dieser Sitzungen wurde der Sachstand der beiden Teilprojekte anhand von Tischvorlagen und Vorträgen der Projektbearbeiterinnen und -Bearbeiter erörtert, organisatorische Probleme angesprochen sowie das weitere Vorgehen abgestimmt.

Einige Beispiele aus diesem Vorhaben mögen die unvorhergesehenen Probleme, wie sie im Verlauf jedes Forschungsprojektes auftreten können, verdeutlichen.

Die Erfassung und Deutung der durch die Anlage von Lahnungsfeldern hervorgerufenen Änderungen in den beiden Testfeldern wurde erheblich durch das nacheinander Auftreten von zwei ungewöhnlich langen Perioden mit Eisbedeckung erschwert. Im Winter 1994/95 lagen die Testfelder über einen Monat, im Winter 1995/96 (nach Lahnungsbau) fast vier Monate unter einer Eisdecke. Es leuchtet ein, daß diese untypischen Ereignisse einen signifikanten Einfluß auf die Dynamik vor und in den Lahnungsfeldern hatten. Während dieser Eisperioden mußten die hydrologischen Meßketten abgebaut werden, was zu längeren Ausfallzeiten und erheblichem Mehraufwand für die ÄLW Husum und Heide führte. Weitere Probleme an der Strömungsmeßkette im

Testfeld Dithmarschen, wie z.B. Blitzeinschlag und Entwendung der Datenerfassungsanlage, waren der Grund, daß in diesem Testgebiet nur sehr wenige auswertbare Rohdaten erfaßt werden konnten. Die langfristigen hydrologischen Auswertungen konzentrierten sich daher notgedrungen auf die Strömungsmeßkette Nordfriesland.

Im Bewußtsein dieser Abhängigkeit der Naturuntersuchungen vom Wetter wurden parallel Modelluntersuchungen durchgeführt. Hier konnten die hydrographischen Rahmenbedingungen beliebig vorgegeben werden. Bei dem Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ gab es dafür einige organisatorische Probleme (Personalfluktuaton, Kürzung der Eigenmittel), die zu Änderungen im Projektablauf zwangen.

2. Die Teilprojekte

2 Die Teilprojekte

Wie in Kap. 1.2 begründet, wurde das Vorhaben in zwei Teilprojekte untergliedert. In diesem Kapitel werden beide Teilprojekte kurz vorgestellt. Ausführliche Erläuterungen finden sich in den Teilen 2 und 3 dieses Endberichtes.

2.1 Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern.

Das Teilprojekt wurde unter der Leitung von Prof. Dr. Köster und Dr. Ricklefs durch Dipl.-Geol. Reimers am Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel bearbeitet. Das Teilprojekt zielte auf die Erfassung, Quantifizierung und Deutung sedimentologischer und morphologischer Veränderungen ab, wie sie sich zum Einen als Folge natürlicher Prozesse auf dem hohen Watt einstellen, zum Anderen durch Vorlandarbeiten ergeben. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der sedimentologischen Bearbeitung feinkörnigschlickiger Sedimente hinsichtlich Erosions-, Transport- und Sedimentationsverhalten im Bereich von Lahnungsfeldern.

Folgende Fragestellungen wurden schwerpunktmäßig bearbeitet:

- welche Sedimente kommen in den Untersuchungsgebieten vor und welchen Variationen unterliegen sie;
- wann und wo treten welche morphologischen Veränderungen auf, mit welchen Änderungen der Sedimentzusammensetzung sind sie verbunden und welche äußeren Faktoren (natürliche und antropogene) haben diese Veränderungen bewirkt;
- wie groß ist das Angebot an suspendierten Sedimenten und welche Abhängigkeit zeigt es zu Strömungs- und Wellenintensitäten.

In zwei Testgebieten entlang der Schleswig-Holsteinischen Westküste (Teil 2, Abb. 15) wurde in einer ersten Phase (bis etwa Mitte 1995) der Nullzustand ohne Lahnungsfelder (Dithmarschen) bzw. mit einer Lahnungsfeldreihe unmittelbar vor dem neugebauten Deich (Nordfriesland) erfaßt. Anschließend wurden im Sommer 1995 in den beiden Gebieten Lahnungsfelder mit vorgegebenen Geometrien (Teil 2, Abb. 27) angelegt. In der zweiten Phase wurden die hierdurch hervorgerufenen Änderungen erfaßt, quantifiziert und ursächlich analysiert.

Bei den Untersuchungen wurde methodisch folgenderweise vorgegangen (Teil 2, Kap. 2):

- Morphologische Geländeaufnahmen:
Tachymetrische Vermessungen der beiden Testfelder in halbjährlichem Rhythmus sowie Profilmivellements im Grüppentestfeld; Messungen der Geländehöhe mit hoher Meßgenauigkeit an diskreten Punkten in den beiden Testfeldern mit dem sog. Sediment-Erosion-Table

(SET); Messungen der Geländetopographie in den Testfeldern mittels Videoaufnahmen bei verschiedenen Tidewasserständen; Messungen der Umlagerungsintensität mit Luminophoren-Tracerstäben.

- Sedimentologische und vegetationskundliche Feldarbeiten:

Kartierungen der Verteilung der Oberflächensedimente und Sedimentstrukturen, die Tiefe des Redoxhorizontes sowie die Besiedlungsdichte der Flora und Fauna; Sedimentologische Beprobungen in Form von Oberflächenproben (bis 5 cm Tiefe, 4,5 cm Durchmesser, Minikernen (bis 15 cm Tiefe, 4,5 cm Durchmesser) und Kleinkernen (bis 15 cm Tiefe, 7,5 cm Durchmesser); Beprobungen des Wassergehaltes, der Korngrößenverteilung sowie Messungen der Scherfestigkeit an den SET-Meßstellen; Entnahmen von bis zu 5 m langen Bohrkernen mit einem Vibrocorer-Bohrgerät; Beprobungen der Schwebstoffmengen in der Wassersäule; „Color-Infra-Red“ (CIR)-Aufnahmen der Vegetation in den Testfeldern.

- Hydrologische Messungen

Dauermessungen von Seegang und Strömung an diskreten Punkten (hydrologische Meßketten) in den Testfeldern ; Messungen der Strömungsgeschwindigkeit, -Richtung sowie Schwebstoffführung an verschiedenen Punkten; Messungen der Strömung, der Trübung , des Wasserstandes und der Wellenhöhen an verschiedenen Punkten mit dem „Sediment-Transport-Autonomous-Recorder“ (STAR).

- Laborarbeiten:

Korngrößenanalyse durch Schläm- und Siebanalyse sowie durch laseroptische Partikelanalyse; Bestimmung des Wasser- und Kohlenstoffgehaltes; Ermittlung der internen Feinschichtung bzw. strukturellen Inhomogenitäten im Sedimentprofil mittels Radiographien.

Die Ergebnisse dieses Teilprojektes sind ausführlich in Teil 2 umschrieben. Der Versuch einer Verknüpfung mit den Ergebnissen des zweiten Teilprojektes (Teil 3, Kap. 6, 7 und 8) bzw. eine Projetsynthese erfolgt in Kap. 3.

2.2 Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen

Dieses Teilprojekt wurde unter der Leitung von Prof. Dr. Zimmermann und Dr.-Ing. Schwarze durch Dipl.-Ing. von Liebermann, Dipl.-Ing. Lohmann (bis 31.12.1994), M.civ.eng. Abdel-Rahmann (vom 01.01.1995 bis 30.06.1996) und Dr.-Ing. Matheja (ab 01.07.1996) am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (FI) der Universität Hannover durchgeführt. Ziel war die Ermittlung und Bewertung der hydrologischen Wirkung von unterschiedlichen Lahnungsfeldgeometrien sowie die Ermittlung und Deutung der hydrologisch-morphologischen Wechselbeziehungen an der Sohle von Lahnungsfeldern durch Simulationen im physikalischen (Wellenbecken und -kanal) und im numerischen (MIKE 21) Modell.

2. Die Teilprojekte

Zur Erfüllung dieser Zielstellung wurden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Ermittlung des Kenntnisstandes (Literaturrecherche) zu den Themenkomplexen „Lahnungen/Lahnungsfelder“ und „hydrologisch-morphologischer Wechselwirkungen an kohäsiven Wattböden“;
- Auswertung der an den beiden hydrologischen Dauermeßketten erfaßten Seegangsdaten u.A. als Eingangsparameter für die Modelluntersuchungen;
- Simulation der in Lahnungsfeldern unter vorgegebenen hydrographischen Randbedingungen und Lahnungsfeldgeometrien auftretenden Strömungs- und Seegangsbedingungen zur Beurteilung der hydrodynamischen Wirksamkeit von Lahnungsfeldern;
- numerische Simulation der zu erwartenden Erosions- und Sedimentationsvorgänge in Lahnungsfeldern bei vorgegebenen hydrographischen Randbedingungen und Lahnungsfeldgeometrien.

Die Untersuchungen fanden mit physikalischen und numerischen Modellen statt. Detailluntersuchungen zum Verständnis der hydrodynamischen Wechselwirkungen an einer Lahnung (z.B. Durchlässigkeit, Wellentransmission) wurden im physikalischen Modell durchgeführt (Teil 3, Kap. 7). Für diese Untersuchungen standen eine Strömungsrinne, ein Wellenkanal und ein Wellenbecken zur Verfügung. Das Programmsystem MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE und die in ihm enthaltenen Module bildeten die Grundlage für die numerischen Modellierungen Teil 3, Kap. 8). Zur Berechnung der Strömungen wurde das „Hydro-Dynamic Module“, für die Simulation welleninduzierter Strömungen das „Elliptic-Mild-Slope Module“ verwendet. Erosions- und Sedimentationsvorgänge wurden schließlich mit Hilfe des „Mud-Transport Modules“ untersucht.

3 Projektsynthese

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der beiden Teilprojekte in Form einer Projektsynthese verknüpft. Zunächst werden die wichtigsten Ergebnisse der beiden Teilprojekte aus der Sicht des Projektleiters zusammenfassend dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse zusammengeführt, und schließlich werden in einem Ausblick Aussagen hinsichtlich Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse getroffen sowie weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

3.1 Teilprojekt „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“

Die flächenhaften Bilanzierungen im Testgebiet Dithmarschen ergaben für das auf den Lahnungsbau folgende Jahr insgesamt geringere Sedimentationsmengen als das vorangegangene Jahr. Wie Abb. 36 (Teil 2) zeigt, hängt diese scheinbare Abnahme der Sedimentation vorrangig mit Erosionen im Bereich der neuangelegten Lahnungsfeldöffnungen und Anwürfe zusammen. An den, zu meist an relativ ungestörten Stellen positionierten SET-Meßstellen in den Lahnungsfeldern konnte unmittelbar nach Lahnungsbau ein sprunghafter Anstieg der Sedimentationsraten beobachtet werden (Teil 2, Abb. 48, 49 und 53).

Im Bereich Nordfriesland nahm die Sedimentation in den neuen Lahnungsfeldern sprunghaft zu. Da das verfügbare Material somit bereits in den neuen Feldern zu Ablagerung kam, nahm die Sedimentation in den bereits vorhandenen, deichnahen Lahnungsfeldern konsequenterweise ab. Insgesamt belegen die SET-Messungen, daß die Morphologie sehr direkt auf äußere Einflüsse wie Eisgang oder gerade den Lahnungsbau reagiert. Eis im Wattenmeer ist in der Lage, viel Sediment zu binden (u.A. durch Einfrieren von Schwebstoffen und Materialaufnahme von der Wattoberfläche beim Aufschwimmen während der Flutphase). Beim Abschmelzen führt dies zu einem sprunghaften Anstieg der Sedimentationsrate. Da das Eis durch seine Auflast zudem das Sediment verfestigt, läßt es sich meistens von den unkonsolidierten Sedimenten, die sich infolge des Lahnungsbau ablagerten (s.u.) unterscheiden.

Die Ergebnisse der sedimentologischen und bodenphysikalischen Untersuchungen weisen auf einen gewissen Jahrgang in der Beschaffenheit der Wattoberfläche hin. Dieser äußerte sich in einer Vergrößerung und Konsolidierung der Oberflächensedimente im Sommerhalbjahr sowie in erhöhten Umlagerungen bzw. Sedimentationen im Winterhalbjahr. Abweichungen von diesem Jahrgang konnten kausal mit der Lage einzelner Meßpositionen und/oder singularen Wettersituationen in Beziehung gebracht werden. Die Lahnungsbauarbeiten führten zu einer Zunahme und Verbreitung von schlickig-weichen Sedimenten. Wie die Schwebstoffanalysen zeigten, setzte sich insbesondere Grobschluff ab, was zu einer starken Zunahme dieser Fraktion in den Oberflächensedimenten führte. Hierdurch nahm die mittlere Korngröße insgesamt ab, während sich das Korn-

3. Projektsynthese

spektrum gleichmäßiger über die feineren Kornfraktionen verteilte. Diese Unterschiede ließen sich mittels einer Clusteranalyse an 121 Sedimentproben für das Testgebiet Dithmarschen eindeutig belegen. Zwei Sediment-Hauptcluster ließen sich mit einer sehr hohen Distanz voneinander trennen (Teil 2, Abb. 70). Die erste Hauptgruppe kennzeichnete dabei die Meßpunkte im freien Watt ohne den direkten Einfluß von Lahnungsbauwerken. Die Proben der zweiten Hauptgruppe stammen aus den Lahnungsfeldern oder zumindest aus deren Einflußbereich. Die Proben der ersten Hauptgruppe ließen sich darüberhinaus in zwei Nebencluster voneinander trennen. Das erste Nebencluster zeigte mit 30 - 50 Vol.-% gegenüber dem zweiten Nebencluster mit 0 - 30 Vol.-% deutlich höhere Sandgehalte auf. Die Beschränkung der Proben des ersten Nebenclusters auf die Winter- und Frühjahrsmonate (Teil 2, Abb. 71) läßt einen erhöhten Einfluß hydrodynamischer Kräfte in diesem Zeitraum vermuten. Die Clusteranalyse an 135 Proben aus dem Testgebiet Nordfriesland erbrachte keine derart eindeutigen Zuordnungen wie in Dithmarschen.

Desweiteren führten die Vorlandarbeiten zu einer signifikanten Abnahme der Scherfestigkeit sowie einer Zunahme des Wassergehaltes im frisch sedimentierten Material. Wahrscheinlich konnte die Konsolidierung mit einer derart starken Sedimentationsrate nicht Schritt halten. Unterwasser-videoaufnahmen sowie Schwebstoffmessungen im auf- und ablaufenden Wasser deuten daraufhin, daß der bedeutende Teil der am Boden und als Schwebstoff transportierten Partikel sich bereits aus einer Schwebstofffront im auflaufenden Wasser absetzen. Bisher ging man allgemein davon aus, daß die Sedimentation vor allem zur Zeit des Stauwassers um den Flutstromkenterpunkt stattfindet. Insgesamt lagen die Schwebstoffgehalte ähnlich wie die Strömungsgeschwindigkeiten (s.u.) im Testfeld Dithmarschen um ein vielfaches höher als in Nordfriesland. Bedingt durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten waren die Korngrößen der Schwebstoffe in Dithmarschen ebenfalls größer als in Nordfriesland.

Im Testfeld Nordfriesland weitete sich die Pioniervegetation (*Salicornia europaea* und *Spartina anglica*) nach Lahnungsbau stark aus, während sie im Testfeld Dithmarschen im unmittelbaren Bereich der Lahnungsfelder erstmalig auftrat. Neben den nach Lahnungsbau geringeren Strömungsgeschwindigkeiten liegt der Grund für diese Entwicklung wahrscheinlich in dem Erreichen einer kritischen Geländehöhe in beiden Testgebieten.

Eigene Strömungsmessungen des FTZ in beiden Testfeldern bei ruhigen Wetterverhältnissen konnten eine signifikante dämpfende Wirkung der Lahnungen belegen (Teil 2, Abb. 59 und 60). Diese Wirkung war bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten deutlich größer als bei geringeren Geschwindigkeiten. Auffällig ist, daß die mittleren und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Testfeld Dithmarschen vor den Lahnungsfeldern im Mittel über zweimal so hoch lagen als in Nordfriesland. Innerhalb der Lahnungsfelder bewegten sie sich dagegen in der gleichen Größenordnung. Mit Hilfe von Videoaufnahmen wurde ein durchschnittlicher Wellentransmissivitätskoeffizient (k_T) von etwa 0,3 bei einem Wasserstand von 1 m und Wellenhöhen zwischen 8 und

17 cm vor der Lahnung gemessen, d.h. hinter der Lahnung hatten die Wellenhöhen im Schnitt 70% ihrer ursprünglichen Höhe verloren.

Die Folgen einer Begrüpfung in unterschiedlicher Intensität (Vollbegrüpfung des gesamten Lahnungsfeldes sowie Sparbegrüpfung mit nur zwei Gruppen neben den Lahnungen) wurden vom Frühjahr 1996 bis zum Frühjahr 1997 in Nordfriesland in zwei unmittelbar nördlich des Testgebietes liegenden Lahnungsfeldern untersucht. Nach der Begrüpfung zeigte sich über den Sommer generell eine Abnahme der Beethöhen um 10 bis 40 cm (maximal 80 cm) bei gleichzeitiger Aufhöhung der Gruppen. Insbesondere nach einer Sturmflut in Oktober wurde eine starke Reliefabnahme zwischen den Beeten und Gruppen beobachtet. Auf den ebenen Flächen des sparbegrüpten Feldes war eine Geländeerhöhung von etwa 1 bis 10 cm zu verzeichnen. Nach der Begrüpfung besaßen die Sedimente in den Gruppen eine deutlich feinkörnigere Zusammensetzung als auf den Beeten. Die Scherfestigkeit auf den neuen Beeten lag im Vergleich zum Ausgangszustand deutlich höher, während sie in den Gruppen mit der Flügelsonde nicht mehr meßbar war. Der Wassergehalt verhielt sich umgekehrt proportional dazu.

3.2 Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“

Die Auswertungen der an den hydrographischen Meßketten gesammelten Seegangsdaten ergaben eine lineare Zunahme der signifikanten und maximalen Wellenhöhen mit der Wassertiefe. Zwischen dem Verlauf der Tidekurve und dem der Wellenhöhen ist eine strenge Korrelation zu verzeichnen. Generell nahmen die signifikanten und maximalen Wellenhöhen auch mit der Windgeschwindigkeit zu. Dabei ist im Testfeld Nordfriesland erst ab Windstärken von 4 Bft (ca. 5,5 bis 7,9 m/s) aus vorwiegend südwestlicher Richtung mit einer Beanspruchung des sich bildenden Vorlandes infolge Seeganges zu rechnen. In diesem Zusammenhang ergaben Auswertungen langjähriger Winddatenreihen von zwei in der Nähe der Testfelder gelegenen Meßstationen, daß Windgeschwindigkeiten über 14 m/s (\geq Bft 7) nahezu ausschließlich in den Wintermonaten auftreten. Energieflußberechnungen vor und in den Lahnungsfeldern bei unterschiedlichen Wetterbedingungen zeigten eine mehr oder weniger deutliche Energiereduzierung durch das Lahnungsbauwerk in Abhängigkeit vom Wasserstand. Im Fall mittlerer Tiden und geringer Seegangsbelastung wurden die Energien um bis zu 55 % reduziert. Während die Energie im Fall der ausgewählten Sturmflut in der Regel noch reduziert wurde, konnte während stark erhöhter Wasserstände keine Energiereduzierung im Lahnungsfeld verzeichnet werden. Ab einer bestimmten Wassertiefe (für Testfeld Nordfriesland ab MThw + 0,70 m) hat die Lahnung demnach keine wellenenergie-reduzierende Wirkung mehr. Diese Ergebnisse sind prinzipiell vergleichbar mit denen aus dem KFKI-Projekt „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuaren der deutschen Bucht“ (NIEMEYER *et al.* 1995), wo oberhalb einer Wassertiefe von 2,55 m (\pm 1,2 m

3. Projektsynthese

über der Lahnungsoberkante) keine nennenswerte Seegangsdämpfung durch eine Betonfertigteillahnung festgestellt werden konnte. Die beobachteten Seegangsenenergiereduzierungen ergeben sich aus der errechneten Dämpfung der (signifikanten und maximalen) Wellenhöhen an einer Lahnung, wobei eine minimale k_T von rd. 0,30 (bei geringen Wassertiefen) ermittelt wurde. Die Lahnung mit Oberkante auf MThw +0,3 m reduzierte die Wellen erwartungsgemäß stärker als die auf MThw gebaute Lahnung. Schließlich waren die hydrologischen Meßdaten wesentliche Grundlage für die Kalibrierung der eingesetzten numerischen Modelle.

Die physikalischen Modelluntersuchungen dienten vorrangig zur Ermittlung von Eingangsparametern für die numerischen Simulationen. Der Porositätsbeiwert bzw. die Wasserdurchlässigkeit eines (naturgetreu nachgebauten) Lahnungsbauwerkes wurde in der Strömungsrinne zu rd. 20 % bestimmt. Durch einen Anwurf in Höhe von 30 cm wird der Durchstromwiderstand einer Lahnung wesentlich erhöht, was zu deutlich erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten im Unterwasser führen kann. In diesem Zusammenhang wird auf die in der Natur oft zu beobachtenden Auskolkungen hinter einer Lahnung hingewiesen.

Auch die physikalischen Modelluntersuchungen an einer Lahnung im Wellenkanal bestätigten, daß die Lahnungen bis zu einem (maximal simulierten) Wasserstand von 60 cm über der Bauwerkskronen bezüglich der Wellendämpfung als wirkungsvoll einzustufen sind. Hierbei zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit des k_T vom Verhältnis h/d (h = Bauwerkshöhe, d = Wassertiefe). Für h/d -Verhältnisse $< 0,5$ wurden Wellen nicht nennenswert reduziert, mit zunehmendem h/d -Verhältnis ($0,5 \leq h/d \leq 1,0$) nahm k_T im wesentlichen linear auf rd. 0,6 ab. Für noch kleinere Wassertiefen erfolgte eine Reduzierung von k_T für maximale Wellenhöhen auf rd. 0,3 und für signifikante Wellenhöhen auf ca. 0,4. Für den Bereich $0,4 \leq h/d \leq 2,5$ konnten anhand der Modellergebnisse Gleichungen zur Berechnung von k_T in Abhängigkeit vom h/d -Verhältnis für maximale und signifikante Wellenhöhen erstellt werden. Ein Vergleich mit den Naturmessungen ergab, daß die errechneten Werte für k_T im physikalischen Modell um 20 % (signifikante Wellenhöhe) bzw. 10 % (maximale Wellenhöhe) zu hoch liegen. Ursachen hierfür sind vermutlich Algen, Sedimente etc., die sich in der Lahnung festsetzen und für ihre abnehmende Durchlässigkeit verantwortlich sind. Eine Verringerung von k_T läßt sich auch durch eine Verbreiterung der Lahnung bewirken. Im Bereich niedrigerer Wasserstände (bis etwa 30 cm über der Lahnungsoberkante) reduzieren mit Rauhpunddielen gedichtete Lahnungen den Seegang wirkungsvoller als durchlässige Lahnungen. Bei höheren Wasserständen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Schließlich deuteten die Ergebnisse der Versuche im Wellenkanal daraufhin, daß für den Bereich der untersuchten Wasserstände Lahnungen mit Anwurf den Seegang wirkungsvoller reduzieren als Lahnungen ohne Anwurf. In Teil 3, S. 147 ist in diesem Zusammenhang ein Erratum aufgetreten, indem anstelle „mit seitlichem Anwurf“ fälschlicherweise „ohne seitlichen Anwurf“ geschrieben wurde. Die Verfasser bitten dies zu entschuldigen.

Die Ergebnisse der physikalischen Modelluntersuchungen belegen, wie auch die Naturmessungen, daß höhere Lahnungen (mit einer Oberkante auf Höhe von MThw +0,3 m) den Seegang wirkungsvoller dämpfen als niedrigere. Schließlich konnte mit den Untersuchungen im Wellenbecken gezeigt werden, daß das seegangsinduzierte Strömungsverhalten in Lahnungsfeldern, insbesondere im Bereich der Lahnungsfeldöffnungen unter Annahme vereinfachter Randbedingungen mit dem eingesetzten EMS-Module von MIKE21[®] wiedergegeben werden kann.

Die Simulationen mit dem numerischen Modell für das Testfeld Nordfriesland zeigten für mittlere Verhältnisse eine gute Übereinstimmung mit den während einer umfangreichen Meßkampagne gewonnenen Strömungsdaten (Teil 3: Kap. 6.5). Die Abweichungen der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen betragen maximal 10 %, im Mittel lagen sie unter 5 %. Generell waren auch die Ergebnisse der Simulationen von Erosions- und Sedimentationsvorgängen schlüssig und nachvollziehbar. So wurden zum Beispiel die in den Lahnungsfeldern eingetragenen Sedimentmengen vornehmlich in den seeseitigen Feldern abgelagert, wodurch kaum Material bis in die deichnahen Felder gelangen konnte. Dies deckt sich gut mit den Ergebnissen der Naturmessungen im Testfeld Nordfriesland, wo nach Anlage der neuen Lahnungen die Sedimentation in den alten Lahnungsfeldern stark abnahm. Einschränkend sei jedoch anzumerken, daß nur mittlere Verhältnisse unter stark vereinfachenden Annahmen simuliert wurden. Folglich erscheint eine Prüfung hinsichtlich Naturähnlichkeit mittels einem Vergleich mit den Vermessungsergebnissen insgesamt (noch) nicht sinnvoll.

Im Rahmen der Parameterstudie nahm bei allen untersuchten Varianten die Gesamtmenge des sedimentierten Materials mit zunehmender Lahnungsöffnungsweite (von 25 bis 90 m) ab, was auf das ungehinderte Einlaufen des grundsätzlich sedimentationshemmenden Seegangs zurückzuführen ist. Bei Einbau eines Anwurfs (in der Simulation programmbedingt bis zur Oberkante Lahnung) nimmt die Sedimentationsmenge im Vergleich zu Varianten ohne Anwurf ab, da die Strömungsgeschwindigkeiten im Lahnungsfeld als Folge vermehrter Walzenbildung zunehmen. Dies wiederum ist eine Folge der Konzentration des Einstromvorganges auf die Lahnungsfeldöffnung. Die Abnahme der Sedimentationsmenge nach einem Anwurf ist bei Varianten ohne Gruppen höher als bei Varianten mit Gruppen, da Gruppen im Allgemeinen die Ausbildung von Walzen in den Lahnungsfeldern behindern. Auch die Zunahme der Bodenrauigkeit bzw. Sohlschubspannungen infolge einer Begrüppung und damit die verstärkte Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten wird sicherlich hierzu beitragen.

3.3 Zusammenführung der Ergebnisse der beiden Teilprojekte

Wie aus Kap. 3.2 ersichtlich, ergänzten sich die Natur- und Modelluntersuchungen in der beabsichtigten bzw. erhofften Weise. Während die Naturuntersuchungen die integrierte Wirkung von

3. Projektsynthese

Vorlandarbeiten in den untersuchten Bauweisen dokumentierten, erbrachten die Modelluntersuchungen vor allem den Nachweis der Wirkung einzelner Baukomponenten. Dabei dienten die Naturmessungen zusätzlich der Validierung der benutzten Modelle. Wichtig ist weiterhin die Feststellung, daß es keine größere Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der Natur- und Modelluntersuchungen sowie mit den Ergebnissen vorangegangener (KFKI)-Forschungsprojekte gab.

3.3.1 Hydrologische Wirkung der untersuchten Techniken

Die Natur- und Modelluntersuchungen belegen eindeutig die seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungen bis zu einem Grenzwasserstand von etwa 0,6 m über der Lahnungsoberkante. Mit abnehmender Wassertiefe nimmt der Grad der Wellendämpfung bis maximal etwa 70 % zu. Höhere Lahnungen sind entsprechend auch bei höheren Wasserständen noch wirksam bzw. haben eine höhere Effizienz. Eine Optimierung hinsichtlich der Wellendämpfung wird ebenfalls durch breitere Lahnungen erzielt. Eine gedichtete Lahnung (Wasserdurchlässigkeit = 0) dämpft den Seegang bis zu einem Grenzwasserstand von etwa 0,4 m über der Lahnungsoberkante besser als eine nicht gedichtete Lahnung.

Auch Strömungen werden durch Lahnungen wirkungsvoll gedämpft. Allerdings konnten durch fehlende Messungen keine schweren Sturmflutereignisse mit entsprechenden Triftströmungen auf dem hohen Watt untersucht werden. Für die ausgewerteten Tiden lagen die außerhalb der Lahnungsfelder registrierten maximalen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten um ein mehrfaches höher als die innerhalb. Die Strömungsreduzierung war bei (windbeeinflussten) höheren maximalen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten stärker als bei geringeren Geschwindigkeiten. Die Modelluntersuchungen belegen ebenfalls eine deutliche Tideströmungsberuhigung durch Lahnungen. Hinsichtlich der Strömungsreduzierung einer gedichteten Lahnung wird auf die numerischen Ergebnisse mit Anwurf (s.u.) verwiesen.

Bezüglich der Lahnungsöffnungsweiten ergaben die numerischen Modelluntersuchungen folgendes. Mit zunehmender Breite nehmen erwartungsgemäß die Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung ab, während sich der Seegang zunehmend ungestört im Lahnungsfeld ausbreiten kann. Eine optimale Wirkung hinsichtlich der Seegangsdämpfung wird somit durch schmale Lahnungsfeldöffnungen erreicht. Hierdurch nehmen jedoch die Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung zu, und der Einstromvorgang wird zunehmend behindert.

Die Modelluntersuchungen zum Thema Lahnungsanwurf erbrachten in hydrologischer Hinsicht sowohl positive wie auch negative Effekte. Wie die numerische Parameterstudie ergab, führt ein (im Modell zu hoch angesetzter) Anwurf zu einer Konzentration der Be- und Entwässerung auf

die Lahnungsfeldöffnung, was durch verstärkte Walzenbildung zu relativ erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten in den Lahnungsfeldern führt. Die physikalischen Modellierungen ergaben weiter, daß die starke Erhöhung des Durchstromwiderstandes zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten im Unterwasser führen kann. Bezüglich der Wellendämpfung ergaben die physikalischen Modellierungen eine stärkere Wellendämpfung bei Lahnungen mit Anwurf.

Schließlich wurde im numerischen Modell eine Begrüppung simuliert (Teil 3: Abb. 8.15). Demnach erleichtern Grüppen das frühzeitige Einlaufen des Wassers im Lahnungsfeld. Bis zur Flutung der Grüppen verhindern sie desweiteren die Bildung von Strömungswalzen. Nach Flutung konnten keine signifikanten Einflüsse auf die Strömung mehr festgestellt werden. Allerdings wurden keine durch Grüppaushub erhöhten Beetmitten, wie sie in der Natur vorkommen, simuliert.

3.3.2 Morphologische Wirkung der untersuchten Techniken

Die oben beschriebene starke Beeinflussung der hydrologischen Prozesse durch Vorlandarbeiten muß zwingend zu morphologischen Reaktionen führen. Mit Hilfe der Natur- und Modelluntersuchungen konnten diese Änderungen umfassend dokumentiert werden. Allerdings fiel es bei den Naturuntersuchungen schwer, die Ursache-Wirkungsmechanismen auseinander zu dividieren, d.h. das gemessene morphologische Resultat ergibt sich aus der Summe aller hydrologischen Wirkungen. Folglich läßt sich eine zusätzliche Sedimentation an einer Stelle im Normalfall nicht auf eine bestimmte Maßnahme zurückverfolgen. Hinsichtlich der flächenhaften Bilanzierung kommt erschwerend hinzu, daß die letzte Vermessung im Projektzeitraum „nur“ ein Jahr nach Ende der Bauarbeiten durchgeführt wurde. So sind die Ergebnisse zu einem erheblichen Teil noch auf die hierdurch hervorgerufenen Störungen zurückzuführen (Teil 2: Abb. 36). Die Ergebnisse der SET-Messungen sind in dieser Hinsicht aussagekräftiger (Teil 2: Abb. 46 bis 53), um so mehr, da hier zwischen eis- und lahnungsbaubedingten Höhenänderungen unterschieden werden konnte.

Wenige Monate nach Lahnungsbau wurden in den Lahnungsfeldern an einigen SET-Meßstellen Sedimentationen bis maximal 20 cm gemessen (Teil 2: Abb. 50). Diese Ergebnisse decken sich gut mit den im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ in neu angelegten Lahnungsfeldern entlang der ostfriesischen Festlandsküste gemessenen Höhenänderungen (ERCHINGER *et al.* 1996). Vor den Lahnungsfeldern kam es nach Lahnungsbau lokal zu erosiven Erscheinungen, während in den alten deichnahen Lahnungsfeldern im Testgebiet Nordfriesland eine Verringerung des Höhenwachstums nach Anlage der seeseitigen Lahnungsfelder festgestellt wurde. Auffällig ist, daß im Bereich Nordfriesland die neu angelegten Entwässerungsgräben stark zusedimentierten, während sie im Bereich Dithmarschen relativ stabil blieben. Dafür blieben die Aushubwälle und die Anwürfe im Bereich Nordfriesland relativ stabil, während die in Dith-

3. Projektsynthese

marschen insgesamt erodierten. Möglicherweise sind diese gegenläufigen Entwicklungen zumindest teilweise auf die um ein mehrfaches höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich Dithmarschen zurückzuführen.

Nach der Testbegrüpfung im Testgebiet Nordfriesland nahm die Geländehöhe der aufgeworfenen Beete generell wieder ab, während das Geländeniveau in den Gruppen um etwa den gleichen Betrag zunahm. Eine direkte sedimentationsfördernde Wirkung von Begrüpfungen ließ sich demnach (zumindest über den Vergleichszeitraum von einem Jahr) nicht nachweisen.

Die numerischen Simulationen der Erosions- und Sedimentationsvorgänge in Lahnungsfeldern sind, wie bereits erwähnt, nur für mittlere Tideverhältnisse und stark vereinfachte Randbedingungen durchgeführt. Unter diesen Voraussetzungen konnte die positive morphologische Wirkung von Lahnungen nachgewiesen werden (Teil 3: Abb. 8.8 bis 8.10). Wie bei den Naturuntersuchungen wurden auch hier deutlich geringere Sedimentationsraten in den deichnahen Lahnungsfeldern gegenüber den seeseitigen festgestellt. Mit der Parameterstudie wurden desweiteren die morphologischen Effekte unterschiedlicher Techniken analysiert (Teil 3: Anlagen 8.66 bis 8.113). Mit zunehmender Breite der Lahnungsfeldöffnung dehnen sich die Bereiche sehr geringer Sedimentation in der Nähe der Öffnung aus, wodurch die Sedimentationsmengen insgesamt abnehmen. Der Einbau eines Anwurfes (bis Lahnungsoberkante) führt ebenfalls zu einer Abnahme der Sedimentationsmengen. Die morphologischen Folgen einer Begrüpfung fielen in der Parameterstudie je nach Variante unterschiedlich aus.

Die geänderten hydro- und morphologischen Verhältnisse spiegeln sich ebenfalls in der Sedimentologie wieder. Die starke Sedimentation von insbesondere Grobschluff führte generell zu einer Abnahme der Scherfestigkeit sowie zu einer Zunahme des Wassergehaltes. Obwohl somit der Erosionswiderstand abnahm, wurden keine signifikanten Erosionen an den SET-Meßstellen in den Lahnungsfeldern beobachtet. Erwartungsgemäß lag die Scherfestigkeit nach Begrüpfung auf den Beeten um ein vielfaches höher als in den Gruppen, während der Wassergehalt ein umgekehrtes Bild zeigte.

Schließlich konnte gezeigt werden, daß die untersuchten Techniken auch eine unmittelbare Wirkung auf die Ansiedlung von Pionierpflanzen haben. Im Bereich Dithmarschen siedelten sich nach Lahnungsbau erstmalig Queller und Schlickgras an. Da außerhalb der Lahnungsfelder keine Ansiedlung beobachtet wurde, muß dies als direkte Folge des Lahnungsfeldes bewertet werden. Auch im Testfeld Nordfriesland breitete sich die Pioniersvegetation in den neuen Lahnungsfeldern besser aus als außerhalb.

3.3.3 Synthese der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen deuten daraufhin, daß die zusätzliche Sedimentation in den neuen Lahnungsfeldern in erster Linie von dem erreichten Grad der Wellendämpfung abhängt. Wie die Ergebnisse der Naturuntersuchungen vermuten lassen, setzt ein Großteil der Partikel (insbesondere der Grobschluff) sich bereits frühzeitig im auflaufenden Wasser aus einer Schwebstofffront ab. Bei diesen geringen Wassertiefen ist der Grad der Wellendämpfung durch Lahnungen maximal. Die Orbitalbewegungen der Wellen, die die Ablagerung von Schwebstoffen stark behindern, werden stark reduziert wodurch ein optimales Sedimentationsumfeld geschaffen wird. Die Reduzierung der Tideströmungsgeschwindigkeiten fördert sicherlich auch die Sedimentation, erscheint aber mengenmäßig eher nachrangig. Diese Einschätzung basiert zum Einen auf der Beobachtung, daß die Tideströmungen im hohen Watt auch ohne Lahnungen bereits so gering sind, daß Sedimentationen ermöglicht werden. Zum Anderen haben die Naturuntersuchungen angedeutet, daß sich der Großteil der Sedimente bereits frühzeitig aus einer Schwebstofffront im auflaufenden Wasser absetzen. Der Netto-Effekt auf die Sedimentation dürfte somit relativ gering sein.

Einer möglichen „erosionshemmenden“ Rolle der Lahnungsfelder im Sturmflutfall konnte nicht nachgegangen werden. Während des Projektzeitraumes wurde der höchste Sturmflutwasserstand im Januar 1995 mit etwa 1,85 m über MThw im Testfeld Nordfriesland bzw. etwa 2,65 m über MThw in Dithmarschen erreicht. Nach dieser Sturmflut wurden weder in noch vor den Lahnungsfeldern signifikante Erosionen gemessen. Allerdings herrschte während dieser Sturmflut schwerer Eisgang vor. Nach GÖHREN (1968) und SIEFERT *et al.* (1980) sind während Sturmfluten Triftströmungsgeschwindigkeiten von über 80 cm/s auf dem hohen Watt keine Seltenheit. Zusammen mit dem Sturmseeegang können diese Strömungen Erosionen von bis zu 20 cm hervorrufen REINECK (1976). Obwohl bei Sturmereignissen mit stark erhöhten Wasserständen der Seegang durch Lahnungen nicht gedämpft wird, belegen die Messungen in den Testfeldern auch während Starkwindereignissen eine deutliche Reduzierung der (Tide- + Trift-) Strömungsgeschwindigkeiten durch die Lahnungsbauwerke.

Die einzelnen untersuchten Techniken lassen sich schließlich folgenderweise bewerten.

Lahnungen entfalten eine optimale Wirkung wenn sie möglichst hoch über die Wattoberfläche sowie mit großer Breite angelegt werden. Praktische Überlegungen wie Standsicherheit und Aufwand grenzen jedoch die maximal mögliche Höhe und Breite ein. Eine Optimierung der Wellendämpfung und damit der Sedimentation wird weiterhin durch möglichst schmale Lahnungsfeldöffnungen realisiert. Durch zu schmale Öffnungen werden jedoch (insbesondere im Zusammenhang mit einem Anwurf) die Strömungsgeschwindigkeiten derart erhöht, daß sie die Standsicherheit der Lahnungen an den Öffnungsändern gefährden könnten. Die bisher übliche Breite der Lahnungs-

3. Projektsynthese

feldöffnungen von etwa 25 m scheint nach den Projektergebnissen ein guter Kompromiß. Um so mehr, da die (mäßige) erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung auf natürliche Weise offenbar eine Rinnenstruktur instandhalten, die eine gute Be- und Entwässerung der Lahnungsfelder gewährleistet. Eine wasserundurchlässige Lahnung dämpft die Wellen bis zu einem Wasserstand von etwa 40 cm über der Lahnungsoberkante besser als eine durchlässige, was auf eine sedimentationsfördernde Wirkung hindeutet. Allerdings konzentriert sich der Einstromvorgang in diesem Fall auf die Lahnungsöffnung, was die Bildung von (sedimentationshemmenden) Strömungswalzen im Lahnungsfeld begünstigt. Anwürfe zeigen keine positive morphologische Wirkung. Ihre Funktion liegt bekanntlicherweise in der Stabilisierung der Lahnungen.

Direkte sedimentationsfördernde Wirkungen einer Begrüppung konnten auch in diesem Projekt nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden (siehe hierzu auch DIJKEMA *et al.* 1991). Die Ergebnisse der Grüppexperimente scheinen daraufhinzuweisen, daß die beobachtete verstärkte Sedimentation in den Gruppen sich zum größten Teil mit entsprechenden Erosionen auf den Beetmitten erklären läßt. Die Modelluntersuchungen ergaben, daß das frühzeitige Einlaufen des Wassers im Lahnungsfeld begünstigt wird und die Entstehung von Strömungswalzen im auflaufenden Wasser verhindert. Die verlängerte Verweildauer des Tidewassers sowie die verringerten Strömungen lassen somit eine direkte sedimentationsfördernde Wirkung vermuten. Wie von Dijkema *et al.* (1991) festgestellt wurde, ermöglichen die erhöhten Beetmitten eine frühere Ansiedlung von Pionierspflanzen, wodurch die Sedimentation zumindest auf indirekte Weise gefördert wird. Dieser Frage konnte in diesem Projekt wegen der zu kurzen Projektdauer nicht nachgegangen werden.

3.4 Ausblick, Forschungsbedarf

In diesem Projekt konnte die positive Wirkung von Vorlandarbeiten, insbesondere von Lahnungen, bei der Förderung des Salzwiesenwachstums durch Verbesserung der Sedimentationsbedingungen quantitativ nachgewiesen werden. Auch wurde ein wesentlicher Beitrag zum besseren Verständnis des Prozeß-Reaktionsmechanismus in Lahnungsfeldern sowie der Wirkung der einzelnen Techniken geleistet.

Die Ergebnisse der Parameterstudie geben dem Praktiker nützliche Hinweise bezüglich der Wahl einer der örtlichen Verhältnisse angepaßten Ausführungsvariante. Diese Aussagen beschränken sich jedoch auf mittlere Verhältnisse und legen stark vereinfachende Annahmen zugrunde. Im Rahmen weiterführender Modelluntersuchungen sollte der Einfluß von Extremereignissen sowie die Auswirkungen von Eisgang auf das Systemverhalten untersucht werden, um letztendlich auch das Langzeitverhalten bzw. die Langzeitwirkung bestimmter Maßnahmen vorhersagen zu können. Auch sollte die Naturähnlichkeit der Modelle durch verbesserte Annahmen (z.B. Einbau von erhöhten Beetmitten) und eine optimierte Modelltechnik weiter vorangetrieben werden.

Wie bei jedem Forschungsprojekt mußten einige Fragen unbeantwortet bleiben, während die Projektergebnisse auch neue Fragestellungen aufriefen. Die Frage, ob Vorlandarbeiten neben der sedimentationsfördernden Wirkung auch eine direkte erosionshemmende Funktion besitzen, konnte durch das Ausbleiben solcher (Erosions-)Ereignisse auf dem hohen Watt nicht bearbeitet werden. Diese Frage hat insbesondere unter dem Aspekt der erwarteten Klimaänderungen und die damit möglicherweise verbundene Zunahme des Energieeintrages eine übergeordnete Bedeutung. Bereits GÖHREN (1968) hat darauf hingewiesen, daß im hohen Watt eine gewisse Grenzhöhe der Geländeoberfläche existiert, die durch das Verhältnis „Sedimentation bei ruhigen Wetterbedingungen“ zu „Erosion durch Seegang und Triftströmungen“ bestimmt wird. Wie Profil A (Teil 2, Abb. 38) im Testfeld Nordfriesland und die Ergebnisse der niederländischen Vorlanduntersuchungen (DIKEMA *et al.* 1991) zeigen, liegt diese Grenzhöhe in den Lahnungsfeldern um bis zu 40 cm höher als außerhalb. Im Hinblick auf eine mögliche Zunahme des Energieeintrages im System wird es von entscheidender Bedeutung sein, ob flächenhafte Erosionen durch Vorlandarbeiten verhindert bzw. verringert werden können. Wie DIKEMA *et al.* (1990) nachgewiesen haben, ist es gerade diese noch unbewachsene Übergangszone zwischen den Salzwiesen und dem hohen Watt, die besonders sensibel auf Änderungen des Energieeintrages reagiert. Hier besteht dringender Forschungsbedarf.

Weiterhin konnte im Hinblick auf den begrenzten Projektzeitraum die langfristige Wirkung von Grüpparbeiten „in der Natur“ nicht eingehend untersucht werden. Mit Anlage der unbegrüpften Lahnungstestfelder in Nordfriesland bietet sich nun jedoch die Möglichkeit, langfristig die Entwicklung dieser Felder mit den angrenzenden begrüpften Feldern zu vergleichen um somit zu einer Beurteilung der Wirkung von Grüpparbeiten zu gelangen. Ähnliches gilt für die morphologische Wirkung unterschiedlicher Lahnungshöhen. Wegen des begrenzten Projektzeitraumes konnten auch hier keine signifikanten morphologischen Unterschiede zwischen den Lahnungen auf MThw und denen auf MThw +0,3 m ermittelt werden. Langfristig sind solche Unterschiede jedoch zu erwarten. Hierfür werden regelmäßige Vermessungen benötigt, die das Land Schleswig-Holstein durchführen sollte. Konsequenterweise sollten die Testfelder auch künftig nicht begrüpft werden. Dementsprechende Vereinbarungen sind inzwischen getroffen. Die erforderliche wissenschaftliche Begleitung bzw. Analyse sollte sichergestellt werden.

Resumierend läßt sich feststellen, daß die Ergebnisse dieses Vorhabens in Zusammenhang mit den KFKI-Forschungsprojekten „Erosionsfestigkeit von Hellern“ (ERCHINGER *et al.* 1996) und „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der deutschen Bucht“ (NIEMEYER *et al.* 1995) einen entscheidenden Schritt zum besseren Verständnis der hydrologisch-morphologischen Wechselwirkungen in und vor Lahnungsfeldern gebracht haben.

4. Öffentlichkeitsarbeit

4 Öffentlichkeitsarbeit

Neben den beteiligten Küstenschutzbehörden, die in den KFKI-Projektgruppensitzungen regelmäßig die neuesten Erkenntnisse aus dem Projekt präsentiert bekamen, ist die fachlich interessierte Öffentlichkeit im Laufe des Projektes auf vielfältige Weise informiert worden.

4.1 Veröffentlichungen

- FIEGE, M., HAGMEIER, H., SCHULZ, N., 1996. Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und Entwässerungssysteme. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 78: 209-353.
- HOFSTEDÉ, J., 1996a. Saltmarsh management for coastal defence in Schleswig-Holstein, Germany. Proc. 31st MAFF Conf. of River and Coastal Engineers, London: 6.2.1-6.2.10.
- HOFSTEDÉ, J., 1996b. Systemanalyse der Salzwiesen im Wattenmeer von Schleswig-Holstein. Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, 18: 53-64.
- HOFSTEDÉ, J. und SCHIRMACHER, R., 1996. Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein. Die Küste, 58: 61-74.
- MATHEJA, A., VON LIEBERMAN, N. und ZIMMERMANN, C., 1997. Land Reclamation and Coastal Protection in Shallow Tidal Waters – A Numerical Case Study in the German Wadden Sea Area. Proceedings of the First International Conference Port – Coast – Environment, 30. Juni - 4. Juli 1997 in Varna, Bulgarien.
- MATHEJA, A. SCHWARZE, H. und ZIMMERMANN, C., in Vorb. Simulation von Sedimentation und Erosion in Lahnungsfeldern. Die Küste, 60.
- REIMERS, Chr., in Vorb. Wirkungsweise von Buschlahnungen auf den Sedimenthaushalt von aufwachsenden Deichvorländern an der schleswig-holsteinischen Westküste. Berichte FTZ Westküste d. Universität Kiel, Nr. 17.
- REIMERS, Chr., in Vorb. Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. Die Küste, 61.
- SCHWARZE, H., und VON LIEBERMAN, N., 1996. Lahnungen als Küstenschutzmaßnahme. BWK-Tagung „Küstenschutz in der Zukunft“, Tagungsband, 5: 115-138.
- SCHULZ, N., 1994. Optimierung von Küstensicherungsarbeiten (z.B. Lahnungen) im Küstenvorfeld der Nordseeküste. Kurzbericht, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 75: 198-200.
- SCHULZ, N. und ZIMMERMANN, C., 1994 Morphological Effects from Waves and Tides on Artificially Stabilized Forelands in the Wadden Sea. Proceedings of the 1st International Symposium on Habitat Hydraulics, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway: 625-637. Ebenso in: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 78: 355-368.

- SCHWARZE, H. und SCHULZ, N., 1995. Lahnungen als Küstenschutzmaßnahme. HTG-Kongress '95, Hannover: Häfen, Wasserstraßen, Küstenschutz, Tagungsband: 291-300.
- VON LIEBERMANN, N., MATHEJA, A. und ZIMMERMANN, C., 1997. Land reclamation and coastal protection in shallow tidal waters - a numerical case study in the German Wadden Sea area. Proceedings of the first Int. Conference Port-Coast-Environment, Varna, Bulgarien: 62-75.
- VON LIEBERMAN, N., MATHEJA, A., SCHWARZE, H., 1997. Foreland Stabilisation by Brushwood Fences as a Sustainable Natural Method. Proceedings of the First German-Chinese Joint Seminar on Recent Developments in Coastal Engineering, Rostock.
- VON LIEBERMAN, N., MATHEJA, A. und ZIMMERMANN, C., 1997. Foreland Stabilization under Waves in Shallow Tidal Waters. Proceedings of the Second Indian National Conference on Harbour and Ocean Engineering, Thiruvananthapuram, Indien: 1236-1245.
- VON LIEBERMANN, N., MATHEJA, A., SCHWARZE, H. UND ZIMMERMANN, C., in Vorb. Interdisziplinäres Forschungsvorhaben: „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“. Untersuchungen zur Wirksamkeit von Lahnungen durch Simulation der hydromechanisch-morphodynamischen Wechselwirkungen in physikalischen und numerischen modellen. Mitt. des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover.
- VON LIEBERMANN, N., SCHWARZE, H. und ZIMMERMANN, C., in Vorb. Ausführung und Wirkungsweise von Lahnungen. Die Küste, 60.

4.2 Sonstige Berichte

- ABDEL-RAHMAN, K., SCHULZ, N., SCHWARZE, H. und ZIMMERMANN, C., 1995. Teilprojekt Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen. FI-Hannover, Zwischenbericht 1994.
- ABDEL-RAHMAN, K., SCHULZ, N., SCHWARZE, H. und ZIMMERMANN, C., 1995. Teilprojekt Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen. FI-Hannover, Zwischenbericht 1995.
- AHRBECKER, F. Vergleich der Wellentransmission an Buschlahnung und Unterwasserwellenbrecher. (Studien-Arbeit).
- ALBERTS, H., FLEßNER, J., HARTKENS, TH., KAISER, R., MÜNKEWARF G. und NIEMEYER, H.D., 1995. Dokumentation von Seegangsmessungen bei Ockholm / Nordfriesland. Berichte zum KFKI - Forschungsvorhaben Optimierung von Küstensicherungsarbeiten, Nr. 1. NLO- Forschungsstelle Küste, Norderney.
- CHRISTIANSEN, B. Anwendung des numerischen Modells MIKE 21 zur Untersuchung des Sedimenttransportes im Bereich von Lahnungen. (Studien-Arbeit).
- DÜRING, Th. Ansätze und Untersuchungen für die Beschreibung der Erosion und Sedimentation – insbesondere der Konsolidierung – von Wattsedimenten unter Strömungs- und Welleneinfluß. (Studien-Arbeit).

4. Öffentlichkeitsarbeit

- FIEGE, M. und HAGMEIER, H. Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und Entwässerungssysteme. (Diplom-Arbeit).
- FIEGE, M. und LASS, B. Analyse der Vorlandentwicklung im Gebiet des heutigen Friedrich-Wilhelm Lübke-Koogs. (Studien-Arbeit).
- HOFSTEDÉ, J.L.A., 1995. Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste. LANU Schleswig-Holstein, Zwischenbericht 1994.
- GÄTJE, B. Entwässerung künstlich gewonnener Vorländer – Ansätze zur Dimensionierung der Entwässerungssysteme –. (Studien-Arbeit).
- REIMERS, Chr., RICKLEFS, K. und KÖSTER, R., 1995. Teilprojekt Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. FTZ Westküste, Zwischenbericht 1994.
- REIMERS, Chr., RICKLEFS, K. und KÖSTER, R., 1995. Teilprojekt Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. FTZ Westküste, Zwischenbericht 1995.
- STOSCHEK, O. Numerische Untersuchung: Strömung und Seegang im Bereich von Lahnungen. (Diplom-Arbeit).
- THOMAS, B. Vergleichende Untersuchungen zur Sedimentstabilität und Morphologie von begrünten und nicht begrünten Lahnungsfeldern. (Diplom-Arbeit).
- VISSER, M. Physikalische Untersuchungen zur Optimierung der konstruktiven Ausbildung von Lahnungen. (Diplom-Arbeit).
- WECHSUNG, N. Sedimentologische und geochemische Untersuchungen zur Schwermetallbelastung in der Meldorfer Bucht. (Diplom-Arbeit).
- WITTE, J.-O. Wellentransmission an einer Buschlahnung. (Studien-Arbeit).

4.3 Wissenschaftliche Vorträge

- ABDEL-RAHMAN, Kh. und SCHULZ, N. Simulation des Einflusses von Strömung und Seegang in Lahnungsfeldern. Vortrag im Rahmen der Förderertagung des Franzius-Instituts am 30. Mai 1996 im Audimax der Universität Hannover.
- HOFSTEDÉ, J. Saltmarsh management in the Federal State of Schleswig-Holstein, Germany. Vortrag im Rahmen des NRA Saltmarsh Seminars am 28. November 1995 in London. England.
- HOFSTEDÉ, J. Development and management of saltmarshes in Schleswig-Holstein. Vortrag im Rahmen des „28th Int. Geographical Congress“ am 08. August 1996 im Kongreßzentrum Den Haag, Niederlande.
- REIMERS, Chr. Morphological and sedimentological changes in low macrotidal environments due to landreclamation works. Poster im Rahmen der Internationalen Senckenberg Konferenz „Muddy Coast“, 01. bis 05. September 1997 in Wilhelmshaven.

SCHWARZE, H. und VON LIEBERMAN, N. Foreland Stabilization in Shallow Tidal Waters. Vortrag im Rahmen der Tagung der Estuary Study Group (ESG) am 18. Juni 1997 im Vortragsraum der Bundesanstalt für Wasserbau der Außenstelle Küste, Hamburg.

VON LIEBERMAN, N. Leitbilder für einen naturnahen Wasserbau. Vortrag im Rahmen der Förderertagung des Franzius-Instituts am 30. Mai 1996 im Audimax der Universität Hannover.

4.4 Tagungsbesuche

REIMERS, Chr. Sediment '94. Mai 1994, Greifswald

SCHULZ, N. 1st International Symposium on Habitat Hydraulics. 18. bis 20. August 1994, Trondheim, Norwegen.

SCHULZ, N. Studientage des Kring von Zeewerende Ingenieurs 1994. 25. bis 27. September 1994, Norwich, England.

HOFSTEDÉ, J., ABDEL-RAHMAN, Kh., REIMERS, Chr., SCHULZ, N. Workshop „Deichvorlandsicherung und Salzwiesenmanagement an der Nordseeküste" mit Vorstellung der Ergebnisse des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern". 21. und 22. Februar 1995, Norden.

SCHWARZE, H. HTG-Kongress '95: Häfen, Wasserstraßen, Küstenschutz. 24. bis 26. September 1995, Hannover.

HOFSTEDÉ, J. NRA Saltmarsh Seminar. 28. November 1995, London, England

HOFSTEDÉ, J. 14. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten". 16. bis 18. Mai 1996, Oldenburg

VON LIEBERMAN, N., SCHWARZE, H. Internationale Küstenschutzkonferenz. 3. Juni 1996, Cuxhaven.

HOFSTEDÉ, J. 31st MAFF Conf. of River and Coastal Eng. 03. bis 05. Juli, Keele, England.

HOFSTEDÉ, J. 28th Int. Geographical Congress. 05. bis 09. August 1996, Den Haag, Niederlande.

HOFSTEDÉ, J., VON LIEBERMAN, N., MATHEJA, A., REIMERS, Chr., RICKLEFS, K., SCHWARZE, H., ZIMMERMANN, C. BWK-Tagung: Küstenschutz in der Zukunft. 1. Oktober 1996, Buisum.

VON LIEBERMAN, N. GKSS-Veranstaltung: Introduction to Coastal Morphodynamics and its Mathematical Modelling. 30. und 31. Januar 1997, Geesthacht.

VON LIEBERMAN, N. 1st International Symposium on Large Scale Constructions in Coastal Environments. 21. bis 25. April 1997, Norderney.

ZIMMERMANN, C. 1st International Conference Port – Coast – Environment. 30. Juni bis 4. Juli 1997, Varna, Bulgarien

HOFSTEDÉ, J., REIMERS, Chr., RICKLEFS, K. Int. Senckenberg Conf. „Muddy Coast". 01. bis 05. September 1997, Wilhelmshaven

5 Literaturverzeichnis

- DIECKMANN, R., 1988. Entwicklung der Vorländer an der nordfriesischen Festlandsküste. *Wasser und Boden*, 3: 146-150.
- DIJKEMA, K.S., J.H. BOSSINADE, P. BOUWSEMA & R.J. DE GLOPPER, 1990. Salt marshes in the Netherlands Wadden Sea: rising high tide levels and accretion enhancement. In: BEUKEMA, J.J., W.J. WOLFF & J.J.W.M. BROUNS (EDS.). *Expected effects of climate change on marine coastal ecosystems*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- DIJKEMA, K.S., J.H. BOSSINADE, J. VAN DEN BERGS & T.A.G. KROEZE, 1991. *Natuurtechnisch beheer van kweldergronden in de Friese en Groninger Waddenzee: greppelonderhoud en overig grondwerk*. Nota GRAN 1991-2002.
- ERCHINGER, H.F., H.-G. COLDEWEY & C. MEYER, 1996. Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“. *Die Küste*, 58: 1-46.
- GÖHREN, H., 1968. Triftströmungen im Wattenmeer. *Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover*, 30.
- HOFSTEDE, J.L.A., 1996. Systemanalyse der Salzwiesen im Wattenmeer von Schleswig-Holstein. In: STERR, H. & C. PREU (Hrsgb.): *Beiträge zur aktuellen küstenforschung, Aspekte - Methoden - Perspektiven*. *Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaften*, 18: 53-64.
- HOFSTEDE, J.L.A. & R. SCHIRMACHER, 1997. Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein. *Die Küste*, 58: 61-73.
- NIEMEYER, H.D., G. BRANDT, J. GÄRTNER, D. GLASER, J. GRÜNE, F. JENSEN & R. KAISER, 1995. *Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste*. *Berichte der Forschungsstelle Küste*, 40: 145-186.
- PROBST, B., 1996. Deichvorlandbewirtschaftung im Wandel der Zeit. *Die Küste*, 58: 47-60.
- REINECK, H.-E., 1976. Einwirkungen der vier Sturmfluten im Januar 1976 auf die Wattsedimente zwischen dem Festland und der Insel Neuwerk. *Hamburger Küstenforschung*, 35: 25-36.
- SIEFERT, W, H. FAHSE, F. MIESSNER, H.-H. RICHTER, A. TAUBERT & P. WIELAND, 1980. *Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins - Ergebnisse über ein Forschungsprojekt des KFKI*. *Die Küste*, 35: 147-186.