Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen E 2 6. AUG. 1998 Hindenburgufer 247 24106 Kiel

> BUNDESMINISTERIUM FUR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE - Meerestechnik und Küsteningenieurwesen -

> > Schlußbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0564

# OPTIMIERUNG VON KÜSTENSICHERUNGSARBEITEN IM KÜSTENVORFELD DER NORDSEEKÜSTE

Teil 2:

# SEDIMENTOLOGIE UND MORPHOLOGIE VON LAHNUNGSFELDERN

von

Dipl. Geol. H.-C. Reimers Dr. K. Ricklefs cand. Geol. B. Thomas Techn. Ang. E. Grenzer

№32816 Kt

Büsum März 1998

Kuratorium für Forschung E 2 6. AUG. 1998 im Küsteningenieurwesen Hindenburgufer 247 24106 Kiel

112328166+

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

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0564

# OPTIMIERUNG VON KÜSTENSICHERUNGSARBEITEN IM KÜSTENVORFELD DER NORDSEEKÜSTE

Teil 2:

# SEDIMENTOLOGIE UND MORPHOLOGIE VON LAHNUNGSFELDERN

von

Dipl. Geol. H.-C. Reimers Dr. K. Ricklefs cand. Geol. B. Thomas Techn. Ang. E. Grenzer

Büsum März 1998

## I. Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Untersuchungskonzepte	2
<ul> <li>1.3 Geologische und geomorphologische Grundlagen</li> <li>1.3.1 Quartäre Entwicklung</li> <li>1.3.2 Geologie und Topographie des rezenten Küstenraumes</li> </ul>	2 
<ul> <li>1.4 Historische Entwicklung des Küstenschutzes</li> <li>1.4.1 Hochwasserschutz</li></ul>	
<ul> <li>1.5 Stand der Forschung</li> <li>1.5.1 Hydro- und Morphodynamik der Wattenküste</li> <li>1.5.2 Sedimenthaushalt im tidebeeinflußten Küstenvorfeld</li> <li>1.5.3 Bedeutung des Vorlandes für den Schutz der Küste</li> <li>1.5.4 Wirkungsweise von Lahnungsbauwerken</li> </ul>	
<ul> <li>1.6 Lage und Aufbau der Testgebiete</li> <li>1.6.1 Lage der Testgebiete</li> <li>1.6.2 Topographie, Sedimentologie und Hydrographie der Testgebiete</li> </ul>	
2 Material und Methoden	
<ul> <li>2.1 Sedimentologisch - morphologische Bestandsaufnahmen.</li> <li>2.1.1 Sedimentologische Kartierungen und Beprobungen</li> <li>2.1.2 Tachymetrische und nivellitische Vermessungen</li> <li>2.1.3 Bohrkerne</li></ul>	
<ul> <li>2.2 Untersuchungen zur Sediment- und Morphodynamik</li> <li>2.2.1 Der Sedimentation-Erosion-Table (SET)</li> <li>2.2.2 Bodenphysikalische Untersuchungen</li> <li>2.2.3 Messung der Umlagerungsintensität mit Tracerstiften</li> <li>2.2.4 Schwebstoffmessungen und -beprobungen</li> <li>2.2.5 Das Video-Wasserlinien-Verfahren</li> </ul>	29 30 31 33 33 33 34
<ul> <li>2.3 Hydrologische Messungen</li> <li>2.3.1 Dauermeßketten</li> <li>2.3.2 Autonom arbeitende Strömungsmesser</li> <li>2.3.3 Der Sediment-Transport-Autonomous-Recorder (STAR)</li> </ul>	

2.4 Laborardeiten	
2.4.1 Schlämm- und Siebanalysen	
2.4.2 Laseroptische Partikelanalysen	
2.4.3 Radiographien	
2.4.4 Bestimmung des Wassergehalts und des Feststoffanteils	
2.4.5 Kohlenstoffgehalt	
2.5 Weiteres Datenmaterial	
2.6 Verfahren der Datenanalyse und -auswertung	
2.6.1 Korngrößenverteilungen und -statistiken	
2.6.2 Digitale Geländemodelle und Bilanzierungen	
2.6.3 Video-Image-Processing	
2.6.4 Hydrologische Parameter	
2.6.5 Statistische Analysen	46
3 Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen und der Vorlandarbeiten	
3.1 Verlauf der Vorlandarbeiten	49
3.2 Verlauf der Untersuchungen	
3.2.1 Regelmäßig durchgeführte Untersuchungen	
3.2.2 Einzeluntersuchungen	53
4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	
<ul><li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 55
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68 71
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68 71 74
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 59 62 65 65 65 68 71 74 74
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68 71 74 74 76 77
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68 71 74 74 76 77 78
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 62 65 65 65 68 71 74 74 74 76 77 78 81
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68 71 74 74 74 76 77 78 81 81 86
<ul> <li>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse</li></ul>	55 56 56 59 62 65 65 65 68 71 74 74 74 76 77 78 81 81 86 89

4.6 Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Video-Wasserlinien-Verfahren	
4.7 Hydrodynamik	94
4.7.1 Strömung	94
4.7.2 Wellen	96
4.8 Zusammenfassende Darstellung der Veränderungen	
4.8.1 Die Ausgangssituation vor dem Lahnungsbau	
4.8.2 Die Situation nach dem Lahnungsbau	
4.9 Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Parametern	
4.9.1 Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalysen	
4.10 Klassifizierung der Sedimente	105
4.10.1 Ablagerungsbereiche und -zeiträume im Testgebiet Dithmarschen	105
4.10.2 Ablagerungsbereiche und -zeiträume im Testgebiet Nordfriesland	
4.11 Morphologische, sedimentologische und bodenphysikalische Veränderunge	n infolge
von Begrüppung	
5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse	
5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse 5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld	<b>111</b>
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li> <li>5.2 Wirkungsweise von Buschlahnungen</li> </ul>	<b>111</b> 111 115
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li> <li>5.2 Wirkungsweise von Buschlahnungen</li></ul>	<b>111</b> 111 115 115
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li> <li>5.2 Wirkungsweise von Buschlahnungen</li></ul>	111 111 115 115 118
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li> <li>5.2 Wirkungsweise von Buschlahnungen</li></ul>	<b>111</b> 111115115118121
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li></ul>	<b>111</b> 111 115 115 115 118 121 121
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li></ul>	<b>111</b> 111115115115121121124
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li></ul>	
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li> <li>5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld</li></ul>	
<ul> <li>5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse</li></ul>	

## II. Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abb. 1: Verteilungsmuster der wichtigsten paläogeographischen Einheiten des Quartärs4
Abb. 2: Verlauf des holozänen Meeresspiegelanstieges (nach MENKE 1976, STREIF & KÖSTER 1978)
Abb. 3: Zonierung der Watten und Vorländer nach der Wasserbedeckung und ihrer Ve- getationsausbildung
Abb. 4: Entwicklung der Küstenlinie in Schleswig-Holstein (nach MUUß U. PETERSEN 1974)
Abb. 5: Unterschiedliche historische Lahnungsbauweisen (aus PROBST 1996)10
Abb. 6: Lahnungsfeld mit Entwässerungsgräben (WIELAND 1990)11
Abb. 7: Unterschiedliche Grüppenprofile (ERCHINGER 1995)
Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Höhe des Tidenhubs und der morphologischen Ausprägung von Wattgebieten (EHLERS 1988)
Abb. 9: Herkunft, Erosion und Resedimentation der Wattablagerungen (REINECK 1978) 16
Abb. 10: Modell zur Veranschaulichung des landwärts gerichteten Materialtransportes im Bereich von Ästuaren und Tideküsten (POSTMA 1961; aus CARTER 1988)
Abb. 11: Wirkung eines Vorlandes auf die Wellenbelastung (STADELMANN 1981)20
Abb. 12: Abhängigkeit des Wellenauflaufes von der Wassertiefe t und der Vorlandbreite         b (ERCHINGER 1971).
<ul> <li>Abb. 13: Einfluß von Lahnungen unterschiedlicher Höhe auf die Wellendämpfung; signifikante Wellenhöhe H<sub>s</sub> bei Lahnungsoberkante = MThw (oben) und MThw + 0,3 m (unten) (Erchinger et al. 1996)</li></ul>
Abb. 14: Entwicklung des Wattniveaus in den Lahnungsfeldern nach dem Lahnungsbau (ERCHINGER et. al. 1996)
Abb. 15: Lage der Testgebiete
Abb. 16: Linien gleicher Tidehochwasserzeit (links) und gleichen Tidenhubs bei Spring- tide in der Nordsee (REINECK 1982)
Abb. 17: Messung mit dem SET
Abb. 18: Der Sedimentation-Erosion-Table
Abb. 19: Schematische Darstellung der zur Probennahme verwendeten Geräte
Abb. 20: Skizze zum Aufbau der Meßeinrichtung für das Video-Wasserlinien-Verfahren35

Abb. 21 Dauermeßeinrichtung mit Strömungs- und Drucksensor	
Abb. 22: Aanderaa Strömungsmesser und Trübungssonde auf einem Wattgrundgestell	
Abb. 23: Der Sediment-Transport-Autonomous-Recorder im offenen Watt des Testge- bietes Dithmarschen	
Abb. 24: Flußdiagramm zum Ablauf der Laborarbeiten	
Abb. 25: Vergleichende Darstellung der verwendeten Korngrößenmaße	
Abb. 26: Funktionsweise des CIS-Lasergranulometers (LOT GmbH 1989)	
Abb. 27: Gliederung der Testgebiete und Ausbaustufen der Lahnungsfelder	
Abb. 28: Untersuchungen im Jahr 199453	
Abb. 29: Vorlandarbeiten und Untersuchungen im Jahr 1995	1
Abb. 30: Vorlandarbeiten und Untersuchungen im Jahr 1996	
Abb. 31: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Dithmar- schen (Herbst 1994)	
Abb. 32: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil B im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau	
Abb. 33: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil B im Testgebiet Dithmarschen nach dem Lahnungsbau	)
Abb. 34: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Dithmar- schen (Herbst 1996)	
Abb. 35: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau	\$
Abb. 36: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Dithmarschen nach dem Lahnungsbau	1
Abb. 37: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Nordfries- land (Herbst 1994)	5
Abb. 38: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland vor dem Lahnungsbau	7
Abb. 39: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland nach dem Lahnungsbau	7
Abb. 40: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Nordfries- land (Herbst 1996)	C

Abb. 41: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Nordfriesland vor dem	
Lahnungsbau72	2
Abb. 42: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Nordfriesland nach dem         Lahnungsbau.         7:	3
Abb. 43: Schematisierte Darstellung der Schichtfolge in zwei Bohrprofilen aus den Test- gebieten Dithmarschen und Nordfriesland	5
Abb. 44: CIR-Aufnahmen der Testgebiete vor dem Lahnungsbau (links Dithmarschen; rechts Nordfriesland)	5
Abb. 45: CIR-Aufnahmen der Testgebiete nach dem Lahnungsbau (links Dithmarschen; rechts Nordfriesland)	7
Abb. 46: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Nordfriesland	2
Abb. 47: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 4 im Testgebiet Nordfriesland	)
Abb. 48: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 4 im Testgebiet Dithmarschen	2
Abb. 49: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 7 im Testgebiet Dithmarschen	;
Abb. 50: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 7 im Testgebiet Nordfriesland	ł
Abb. 51: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 2 im Testgebiet Nordfriesland	
Abb. 52: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Dithmarschen	
Abb. 53: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 6 im Testgebiet Dithmarschen	
Abb. 54: Röntgenpositiv eines Sedimentprofils mit einem Baryt-Tracerstab	5
Abb. 55: Röntgenpositive von Sedimentprofilen aus dem freien Watt (links) und aus ei- nem Lahnungsfeld (rechts). 90	
Abb. 56: Ergebnisse der hydrologischen Messungen mit dem Sediment-Transport- Autonomous- Recorder (STAR).	
Abb. 57: Korngrößenverteilung im Seston des auf- und ablaufenden Wassers auf dem Schwebstoffprofil	

Abb. 58:	Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten auf dem Schwebstoff-
	profil
Abb. 59:	Maximale Strömungsgeschwindigkeiten vor und in den Lahnungsfeldern des Testgebietes Dithmarschen
Abb. 60:	Maximale Strömungsgeschwindigkeiten vor und in den Lahnungsfeldern des Testgebietes Nordfriesland
Abb. 61:	Maximale Strömungsgeschwindigkeiten in den seewärtigen Lahnungstoren der begrüppten Felder und der angrenzenden nicht begrüppten Felder im Flut- und Ebbstrom
Abb. 62	Signifikante Wellenhöhen auf dem Profil A im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau
Abb. 63	: Signifikante Wellenhöhen auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland vor dem Ausbau der Lahnungen
Abb. 64	: Signifikante Wellenhöhen auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland nach dem Ausbau der Lahnungen
Abb. 65	: Digitalisiertes Videobild der Wellenentwicklung an einer Querlahnung
Abb. 66	: Blick nach Süden auf die Topographie im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau (20-fach überhöht)
Abb. 67	: Blick nach Süden auf die Topographie im Testgebiet Dithmarschen nach dem Lahnungsbau (20-fach überhöht)
Abb. 68	: Blick nach Norden auf die Topographie im Testgebiet Nordfriesland vor dem Lahnungsbau (20-fach überhöht)
Abb. 69	Blick nach Norden auf die Topographie im Testgebiet Nordfriesland nach dem Lahnungsbau (20-fach überhöht)
Abb. 70	: Dendrogramm nach dem Ward-Verfahren (quadrierte euklidische Distanz) für das Testgebiet Dithmarschen
Abb. 71	: Zuordnung der Proben und Meßwerte zu den 4 Clustern
Abb. 72	2: Dendrogramm nach dem Ward-Verfahren (quadrierte euklidische Distanz) für das Testgebiet Nordfriesland
Abb. 73	3: Zuordnung der Proben und Meßwerte zu den 3 Clustern
Abb. 74	Entwicklung des Wassergehalts, der Scherfestigkeit, der Morphologie sowie des Anteils < 63 μm auf 2 Profilen im voll begrüppten Lahnungsfeld südöstlich der Hauptentwässerung (vgl. Abb. 27, Kap. 4.1)

Abb. 75: Zusammenfassende Darstellung der gemessenen Parameter sowie der mittleren Tidehochwasserstände und der mittleren Windverhältnisse an der SET-
Meßstelle 5 im Testgebiet Nordfriesland
Abb. 76: Schematische Darstellung der im küstennahen Watt ablaufenden Prozesse
Abb. 77: Zusammenfassende Darstellung der gemessenen Parameter sowie der mittleren Tidehochwasserstände und der mittleren Windverhältnisse an der SET- Meßstelle 7 im Testgebiet Nordfriesland
Abb. 78: Schematische Darstellung des Einflusses einer Buschlahnung auf die im kü- stennahen Watt ablaufenden Prozesse
Abb. 79: Hypothetische Entwicklung im Testgebiet Dithmarschen bei einer naturange- paßteren Lahnungsbauweise
Abb. 80: Zusammenfassende Darstellung der gemessenen Parameter sowie der mittleren Tidehochwasserstände und der mittleren Windverhältnisse an der SET- Meßstelle 5 im Testgebiet Dithmarschen
Abb. 81: Vorland mit herkömmlichem (a) und naturnahem (b) Entwässerungssystem (HOFSTEDE & SCHIRRMACHER 1996)
Tab. 1: Sedimentzusammensetzung nach FIGGE et al. (1980).    17
Tab. 2: Richtwerte für Wassergehalte in natürlichen Böden.    41
Tab. 3: Unterschiede in der Lahnungsbauweise der beiden Testgebiete
Tab. 4: Korrelationen verschiedener Parameter    104

## III. Anlagen

Video-Wasserlinien-Karte (I), Strömungsvektorenplot (II), Datenanhang (III)

## **IV.** Vorwort

Das Wattenmeer ist mit seiner Gezeitendynamik, seinen spezifischen Sedimentations- und Erosionsprozessen sowie mit den speziell an diese Landschaft angepaßten Lebensgemeinschaften ein einzigartiges Ökosystem. Demgegenüber hat sich insbesondere der Küstenbereich zu einer seit Jahrhunderten gewachsenen Kulturlanschaft entwickelt. Deichvorländer bilden vielerorts eine Übergangszone zwischen der befestigten Küste und dem offenen Watt. Ihrer Erhaltung wie auch der Bildung neuer Vorländer vor schar liegenden Deichen ist sowohl aus der Sicht des Küstenschutzes als auch aus der Sicht des Naturschutzes eine besondere Bedeutung beizumessen. Durch ihre seegangsdämpfende Wirkung vor allem bei Sturmfluten sind Deichvorländer ein wichtiger Bestandteil des aktiven Küstenschutzes.

Die Bildung und das Aufwachsen solcher Vorländer werden in Schleswig-Holstein seit ca. 150 Jahren durch den Bau von Lahnungszäunen in Form von Sedimentationsfeldern gefördert. Die Bauweise dieser Lahnungen beruhte bisher auf wasserbaulichen Erfahrungen. Deren Wirkungsweise auf den Sedimenthaushalt und damit auch auf die Morphologie wurde wissenschaftlich zumeist nur als Nebenaspekt untersucht.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvertrages des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) vom 01.01.1994 (Az.: 515-3892-MTK 0564) wurden in zwei Testgebieten vor den Küsten Nordfrieslands und Dithmarschens sedimentologische, morphologische und hydrologische Untersuchungen durchgeführt. Diese erfolgten in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel., den Ämter für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum, der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie auf Norderney und dem Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover. Das Projekt "Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern" ist Bestandteil des KFKI<sup>1</sup>-Forschungsvorhabens "Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste", das vom Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein koordiniert wurde.

Für die finanzielle Unterstützung danken wir dem Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie sowie dem Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein recht herzlich.

Die Diskussionen mit Dr. Marcus Störtenbecker (FTZ), Dr. Jakobus Hofstede, Erik-Jan Houwing sowie Wilhelm van Duin erbrachten viele neue Sichtweisen und Denkanstöße. Diese fachlichen Gespräche haben somit nicht unwesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

Von den Mitarbeitern am FTZ-Büsum standen uns vor allem Kollegen der Arbeitsgruppen Küstengeologie / Küsteningenieurwesen und Physik / Meerestechnik mit Rat und Tat zur Seite: Während Frau Magrit Montag uns vor allem bei der Erledigung der bürokratischen Pflichten unterstützte, war Herr Burkhard Meier in nahezu allen Aufgabenbereichen eine wertvolle und ausdauernde Hilfe.

Die vielfältigen, umfangreichen Arbeiten sowohl im Watt als auch im Labor wären ohne die Mithilfe der zahlreichen studentischen Hilfskräfte kaum zu bewältigen gewesen. Wir danken den Praktikantinnen und Praktikanten Ralf Baur, Birgit Kausch, Dirk Kleist und Nicole Wechsung sowie den studentischen Hilfskräften Kerstin Bittner, Birte Gotschling, Cornelia Kuhlmann, Sönke Martens, Matthias Ressel, Myriam Schröder, Carsten Vogt und Thorsten Wittrock für ihren Einsatz.

Auch der gelegentliche Informationsaustausch mit den Kollegen der Arbeitsgruppe Küstengeologie / Küsteningenieurwesen in Kiel war für die Arbeit sehr förderlich.

Von den vielen Mitarbeitern der Ämter für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum, die bei den Untersuchungen behilflich waren und zudem die Vorlandarbeiten durchführten, können an dieser Stelle nur einige stellvertretend genannt werden: Den Herren F. Jensen, H. Großkreuz, U. Dockhorn und H. Hansen danke wir für die vielfältigen und unbürokratischen Hilfestellungen wie auch für die fachlichen Diskussionen über wasserbauliche Fragen. Die Herren L. Christiansen, K. Saßmanshausen und M. Palm stellten ebenfalls sehr unbürokratisch Meßdaten, Kartenmaterial und Luftbildaufnahmen zur Verfügung.

Die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie übernahm im Rahmen des Forschungsvorhabens, aber auch darüber hinaus die Auswertung von hydrologischen Rohdaten.

Mitarbeiter des Franziusinstitutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover führten in einem weiteren Teilprojekt mit dem Titel "Untersuchungen in Modellahnungen" physikalische und numerische Modellierungen durch. Sie waren vor allem bei Fragen zur Hydrologie hilfreiche Ansprechpartner.

Das Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer in Tönning erteilte die Ausnahmegenehmigung zum Betreten der Schutzzone I im Nationalpark.

Die Genehmigung zum Aufstellen und Betreiben von Strömungsmessern im Küstenvorfeld wurde vom Wasser- und Schiffahrtsamt Tönning ausgestellt.

Die Wehrtechnische Erprobungsstelle der Bundeswehr im südlichen Speicherkoog in Dithmarschen ermöglichte durch ihre Absicherung das Begehen des Testgebietes, zum Teil auch während der Schießversuche.

In der Vogelwarte in Schlüttsiel fand wir nach manchem langen, kalten Geländeeinsatz bei Herrn W. Block und seinen Praktikanten eine willkommene Aufwärmung bei einem Becher Tee oder sogar eine Unterkunft.

Abschließend möchte wir uns bei allen weiteren, bisher nicht genannten Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken.

## 1 Einleitung

In diesem ersten Abschnitt werden die Fragestellungen, die den Untersuchungen zugrunde liegen, sowie die für das Verständnis erforderlichen Grundlagen erläutert.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Ausreichend breite Vorländer mit einem flachen Übergang zu den offenen Watten sind vor allem in Anbetracht stark wechselnder Sturmfluthäufigkeit und eines steigenden Meeresspiegels aus der Sicht des Küstenschutzes von zunehmender Bedeutung. Derart beschaffene Vorländer sind in der Lage, den auflaufenden Fluten bereits vor den eigentlichen Küstenschutzbauwerken einen großen Teil ihrer Energie zu entziehen.

Seit vielen Jahrzehnten werden Lahnungsfelder (Sedimentationsfelder) und Grüppen (Entwässerungssysteme) zur Vorlandsicherung und -gewinnung angelegt. Bisher beruhte die Bauweise der Lahnungen und der Grüppen auf wasserbaulichen Erfahrungen. Wissenschaftliche Untersuchungen zu deren Wirkungsweise, speziell auf den Sedimenthaushalt sowie auf die Morphodynamik und Hydrodynamik der aufwachsenden Vorländer, sind für den Bereich der schleswig-holsteinischen Nordseeküste nicht bekannt.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, sedimentologische, morphologische und hydrologische Veränderungen im Küstenvorfeld während unterschiedlicher Stadien des Lahnungsbaus zu messen und zu beurteilen, um damit folgende Fragestellungen zu klären:

- 1. Welche Faktoren bestimmen maßgeblich die Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld der untersuchten Gebiete?
- 2. Welchen Einfluß haben Buschlahnungen auf den Sedimenthaushalt und die Morphologie von aufwachsenden Deichvorländern?

Im Vordergrund standen bei diesen Untersuchungen die Quantifizierung von Erosions- und Akkumulationstendenzen sowie die Erfassung von Veränderungen morphologischer Strukturen in Abhängigkeit vom Tidegeschehen, vom Seegang sowie von der Art und Menge des sedimentier- bzw. erodierbaren Materials. Des weiteren wurde die Entwicklung der Besiedlungsdichte von sedimentfestigender und sedimentationsfördernder Fauna und Flora mit einbezogen. In den Rahmen dieser Projektes wurde zudem eine Diplomarbeit mit dem Thema "Morphologie und Sedimentstabilität von begrüppten und nicht begrüppten Lahnungsfeldern" mit aufgenommen. Damit sollte eine weitere Fragestellung, die auch für den Küstenschutz von zunehmendem Interesse ist, beantwortet werden:

3. Welchen Einfluß hat das Begrüppen von Lahnungsfeldern auf die darin ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse und werden dadurch das Aufwachsen sowie die Erosionsbeständigkeit eines Vorlandes entscheidend gefördert ?

### 1.2 Untersuchungskonzepte

Die Naturvorgänge, welche die Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld, insbesondere in Lahnungsfeldern maßgeblich bestimmen, unterliegen dynamischen Veränderungen. Da sie von vielen Parametern abhängen, war es im Vorwege notwendig, eine sinnvolle Auswahl aus dieser Vielzahl möglicher Einflußgrößen zu treffen. Die ausgewählten Parameter sollten durch in-situ-Messungen und Feldbeobachtungen an unterschiedlichen Küstenabschnitten während verschiedener Ausbaustufen der Lahnungsfelder sowie unter jahreszeitlich wechselnden Temperatur-, Wind-, Seegangs- und Tidebedingungen erfaßt werden. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen über einen Zeitraum von drei Jahren in Lahnungsfeldern durchgeführt, die in Dithmarschen im Frühjahr 1995 errichtet und in Nordfriesland zur gleichen Zeit ausgebaut wurden.

Die Untersuchungen bestanden im wesentlichen aus flächenhaften sedimentologischen Beprobungen und Kartierungen der Testgebiete sowie aus Messungen der Watthöhe, der Korngrößenverteilung und bodenphysikalischer Parameter wie auch der Strömungsgeschwindigkeit, der Wellenhöhe und der Schwebstoffkonzentration an diskreten Punkten. Die Beprobungen und Kartierungen wurden halbjährlich, die übrigen Messungen monatlich und ereignisbezogen durchgeführt. Auf diese Weise sollte eine möglichst gute räumliche und zeitliche Erfassung der auftretenden Veränderungen gewährleistet werden.

## 1.3 Geologische und geomorphologische Grundlagen

Der Untersuchungsraum, die schleswig-holsteinische Westküste, liegt am südöstlichen Rand des Nordseebeckens. Dieses ist seit dem späten Paläozoikum ein Senkungsgebiet, in dem sich seitdem mächtige Sedimentschichten ablagern konnten (ZIEGLER & LOUWERENS 1979).

Das heutige Bild der deutschen Nordseeküste wird durch die Watten, die "einen ausgesprochenen Spezialfall innerhalb der Küstenregion" darstellen (SEIBOLD 1974), geprägt. Sie erstrecken sich von Esbjerg in Dänemark bis nach Den Helder in den Niederlanden und umfassen mit einer Fläche von ca. 8000 km<sup>2</sup> den Flachwassersaum der südlichen Nordsee bis zu einer Wassertiefe von - 10 m NN. Ungefähr 4500 km<sup>2</sup> dieser Fläche entfallen auf den deutschen Raum (BANTELMANN 1966, DITTMER 1954).

Die Watten verdanken ihre Entstehung, die vor ca. 5000 J. v. h. begann, einem zufälligen Zusammentreffen verschiedener Faktoren (Menke 1976, SCHWEDHELM & IRION 1985):

- dem pleistozänen und postglazialen Relief,
- den eustatischen Meerespiegeländerungen im Holozän,
- der isostatischen Landsenkung,
- der synsedimentären Kompensation,
- der Zufuhr von Feinmaterial aus der Nordsee und den Flüssen, sowie
- dem gemäßigten Klima mit entsprechender Fauna und Flora.

Später kamen anthropogene Einflüsse wie Landgewinnung und Eindeichungen hinzu.

Da bereits das pleistozäne und postglaziale Relief die Entwicklung der Watten und des Küstenraumes maßgeblich beeinflußte, wird zunächst ein kurzer Anriß der quartären Entwicklung gegeben, bevor auf die rezenten geologischen und geomorpholgischen Verhältnisse eingegangen wird.

## 1.3.1 Quartäre Entwicklung

Im Pleistozän prägten die vorstoßenden Eismassen der Glazialstadien und die anschließenden Transgressionen der Interglazialstadien das Relief des Nordseebodens. Die ältesten, im Küstenbereich sicher nachweisbaren pleistozänen Sedimente sind die der Elster-Vereisung. Diese nahm das gesamte Nordseebecken ein. Im nachfolgenden Interglazial kam es zum Absatz mariner Sedimente des Holstein-Meeres. Die Saale-Vereisung erreichte etwa die gleiche Ausdehnung wie die Vereisung zuvor. Das mitgeführte Material baute die heutige Geest auf. Im folgenden Eem-Interglazial, in dem der Küstenverlauf nahezu dem heutigen entsprach, kam es wiederum zur Ablagerung mariner Sedimente. Grobe Sande wurden vorwiegend in den Tiefwasserbereichen abgelagert (SINDOWSKI 1970). In der küstennahen Zone werden eine feinsandige Flachwasserfazies und eine sandige bis tonige Wattfazies unterschieden. Die Eisrandlagen der Weichsel-Vereisung erreichten nur das östliche Schleswig-Holstein (REINECK 1978, STREIF & KÖSTER 1978).



Abb. 1: Verteilungsmuster der wichtigsten paläogeographischen Einheiten des Quartärs in Norddeutschland und Dänemark (aus STREIF & KÖSTER 1978; Ausschnitt): 1
=Verlauf der weichseleiszeitlichen Endmoränen; 2 =Verbreitung des Eem-Meeres; 3
= Verbreitung des Holstein-Meeres.

Am Ende der Weichsel-Vereisung führten die einsetzenden Klimaänderungen zum Abschmelzen der Eismassen (GRIPP 1964, WOHLDSTEDT & DUPHORN 1974). Der erste nachgewiesene Transgressionskontakt ist an der südlichen Doggerbank bei - 45,8 m NN zu finden und wurde von BEHRE & MENKE (1969) pollenanalytisch auf 9500 - 9000 J. v. h. (Praeboreal) datiert. Der darauf folgende holozäne Meeresspiegelanstieg, der auch als "Flandrische Transgression" bezeichnet wurde, verlief zwischen 8600 und 7100 J. v. h. mit Anstiegsraten von bis zu 2 cm / Jahr relativ steil (MENKE 1976, LUDWIG et al. 1981, BEHRE et al. 1984) und verlangsamte sich im Atlantikum bis 6500 J. v. h.. Im Subboreal erreichte der damalige Meeresspiegel etwa den Bereich der heutigen Küstenlinie. Aufgrund der veränderten Vorflutverhältnisse kam es zu einer zunehmenden Vernässung des Küstenbereiches und damit zu einer ausgedehnten Vermoorung. Es bildete sich der sogenannte Basal- oder Basistorf (z.B. PRANGE 1967a, 1967b), der vielerorts im Liegenden der holozänen Schichtenabfolge anzutreffen ist. Die Öffnung des Ärmelkanals veränderte die Tideverhältnisse und beeinflußte dadurch die Sedimentation an den Küsten der südlichen Nordsee. Der Verlauf des Meeresspiegelanstieges in jüngerer Zeit ist recht umstritten. Sein stark verlangsamter Anstieg war durch eine größere Zahl von Oszillationen geprägt (Abb. 2). In einer anhaltenden Regressionsphase um ca. 2500 - 2000 J. v. h. führte der zunehmende Einfluß von Süßwasser erneut zu ausgedehnter Vermoorung im Küstenbereich und zur Ablagerung siltig-toniger Sedimente in den vorgelagerten Watten. Die in Schleswig-Holstein vor ca. 5000 Jahren begonnene Transgression dauert bis heute an. Dies belegen Wasserstandsbeobachtungen an Pegeln und Sturmflutmarken (RHODE 1975), aus denen sich für die Zeit seit dem 16. Jahrhundert ein mittlerer Anstieg von 25 cm / Jh ergibt.



Abb. 2: Verlauf des holozänen Meeresspiegelanstieges (nach MENKE 1976, STREIF & KÖSTER 1978).

## 1.3.2 Geologie und Topographie des rezenten Küstenraumes

Das Küstenholozän an der schleswig-holsteinischen Westküste, wie es sich heute darstellt, läßt sich auf küstennormalen Schnitten in drei räumlich nebeneinander liegende Komplexe gliedern (STREIF & KÖSTER 1978):

- den Klastischen Komplex, der die Offshorezone und die seeseitigen Wattgebiete umfaßt,
- den Verzahnungskomplex, in dem sich klastische Sedimente mit Torflagen verzahnen, und
- den Torfkomplex der Geestrandmoore.

Diese Unterteilung gilt vor allem für den nordfriesischen Bereich des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Dort liegt das Holozän auf flach nach Westen geneigten Sander- und Flugsandflächen, die von schmalen, aber tiefen Schmelzwasserrinnen zerschnitten sind (TIETZE 1983). In Dithmarschen ist die Gliederung in die drei Komplexe weniger ausgeprägt, da hier der Basaltorf im Zuge der Nordseeingression großflächig erodiert wurde (SCHMITDT 1975). Vom Geestrand fällt die Oberfläche des pleistozänen Untergrundes steil in Richtung Westen auf -10 m bei Meldorf, - 24 m unter dem Helmsand und bis auf - 34 m NN im Bereich Trischen ab (DITTMER 1952). An exponierten Geestrandbereichen konnten sich Haken und Nehrungen ausbilden, die sogenannten Donns (vgl. St. Michaelisdonn, Dingerdonn).

Geomorphologisch lassen sich die heutigen Watten entsprechend ihrer Lage zur offenen See in drei Typen unterteilen REINECK (1982):

- Offene Watten: Vorgelagerte Strandwälle und Sandbänke sowie ein sehr flach abfallendes Unterwasserprofil schützen sie vor schwerem Seegang (z.B. zwischen Weser und Eiderstedt).
- Buchten- und Ästuarwatten liegen im Bereich der Flußästuare oder in Meeresbuchten und können zur Brackwasserzone gehören (Elbe, Dollart, Meldorfer Bucht u. Eider).
- Rückseitenwatten liegen hinter Düneninseln bzw. Geestkerninseln (Nordfriesland, west- und ostfriesische Düneninseln).

Eine weitere Zonierung der Watten und Vorländer beruht sowohl auf der Dauer der Wasserbedeckung als auch auf den daraus resultierenden Vegetationsunterschieden (ERCHINGER 1992). Sie unterscheidet zwischen (Abb. 3):

- dem Epilitoral, dem festen Land,
- dem Supralitoral, das nur bei Sturmfluten vom Meer überflutet wird,
- dem Eulitoral, das zwischen der mittleren Tidehochwasser- (MThw) und der mittleren Tideniedrigwasserlinie (MTnw) liegt, sowie
- dem Sublitoral, das ständig vom Meer bedeckt ist.



Abb. 3: Zonierung der Watten und Vorländer nach der Wasserbedeckung und ihrer Vegetationsausbildung.

### 1.4 Historische Entwicklung des Küstenschutzes

Die Entwicklung des Lahnungsbaus als Bestandteil des Küstenschutzes war stark von der Besiedlung der Küstengebiete der Nordsee und somit von der landschaftlichen Entwicklung der letzten Jahrtausende abhängig (Abb. 4). Der wichtigste Einflußfaktor war sicherlich der Anstieg des Meeresspiegels nach der letzten Eiszeit (Abb. 2). Steinzeitliche Funde zeugen davon, daß Gebiete, die ehemals von Jägern und später auch von Bauern bewohnt waren, heute von der Nordsee überflutet sind. Der Mensch reagierte auf den relativ schnellen Anstieg des Meeres zunächst mit Zurückweichen von der Küstenlinie. Erst als es zur Verlangsamung bzw. zum begrenzten Stillstand des Meeresspiegelanstieges um etwa 4000 J. v. h. kam, begann der Mensch mit der Besiedlung der Flußmarschen von Ems, Weser und Medem sowie des westlichen Eiderstedt. Die Wohnstätten jener Zeit lagen noch ebenerdig.

Die darauf folgende Entwicklung läßt sich entsprechend der Schwerpunkte im Küstenschutzmanagement in drei Abschnitte gliedern:

- Hochwasserschutz
- Landgewinnung
- Vorlandsicherung

#### 1.4.1 Hochwasserschutz

In der Zeit um Christi Geburt dehnte sich die Besiedlung auf der Marsch und der angrenzenden Geest aus. Zu dieser Zeit wurden die ersten Schutzmaßnahmen ergriffen und die Wohnstätten auf Erdhügeln (Warfen, Warften oder Wurten genannt) erbaut. Als Folge zunehmender Bevölkerungszahlen und verstärkter Landnutzung begann man ungefähr ab der Jahrtausendwende mit der Errichtung von Deichen. Diese ersten Deiche waren niedrige Erdwälle mit steilen Böschungen, die in ausreichender Entfernung zur Uferlinie angelegt waren, so daß sie über ein entsprechendes Vorland verfügten. Während in Dithmarschen das besiedelte Gebiet annähernd zeitgleich mit einem großen Ringdeich umgeben wurde, vollzog sich der Wandel von der Natur- zu einer reinen Kulturlanschaft in Nordfriesland durch schrittweise Eindeichungen (BANTELMANN 1966). Im 13. Jahrhundert kam es erstmals zu einer nahezu geschlossenen Bedeichung des Nordseeküstengebietes.

Trotz verstärkter Bemühungen um einen verbesserten Hochwasserschutz kam es bei Sturmfluten immer wieder zu erheblichen Landverlusten. Die "Erste Mandränke" 1362 verwandelte mit ihren Wassermassen den eher festländischen Bereich zwischen Sylt und Eiderstedt in eine Insellandschaft. Vermutlich fielen mehr als 100.000 Menschen dieser Flut zum Opfer. Während der "Zweiten Mandränke" 1634 wurde die Insel Strand in ihre heutigen Reste Nordstrand, Pellworm und Nordstrandischmoor zerrisen (Abb. 4).



Abb. 4: Entwicklung der Küstenlinie in Schleswig-Holstein (nach MUUß U. PETERSEN 1974).

In der Folgezeit veränderte man den Querschnitt der Deiche erheblich, da die Brandungswirkung der Wellen auf flach geneigten Deichprofilen wesentlich geringer ist. Die Böschungen wurden zu beiden Seiten deutlich flacher angelegt, und die Deichhöhe von 2 m auf rd. 9 m angehoben (KRAMER & ROHDE 1992).

Eine stetige Vergrößerung der Landfläche in Dithmarschen ist seit dem 15. Jh. gut dokumentiert (WIELAND 1990). Die ehemalige Insel Büsum gehört seit dem Ende des 16. Jh. zum Festland. Noch bis zum Beginn des 18. Jh. verlief die Küste von Meldorf bis südlich von Marne relativ geradlinig (GAST 1998). Erst 1853/54 erfolgte die Angliederung des Dieksandes an den Kronprinzenkoog im Süden der Meldorfer Bucht (Abb. 4).

### 1.4.2 Landgewinnung

Die enormen Landverluste sowie ein zunehmender Bedarf an Kulturland drängten die Küstenbevölkerung, bestärkt durch immer effektivere Küstenschutzmaßnahmen, Teile des ihnen entrissenen Landes zurückzugewinnen.

Neulandgewinnung mit Hilfe von Lahnungen wird aber erst seit den letzten zwei Jahrhunderten betrieben. Bis dahin wurde die Vorlandbildung durch Begrüppung und das Anlegen von niedrigen Erddämmen, auch als "Bauernmethode" bezeichnet, gefördert. Lahnungsbau betrieben die Küstenbewohner dort, wo das Vorland bereits eine Höhe von ca. 40 - 60 cm unter MThw hatte. Die Lahnungen wurden aus Holzpfählen und Reisigbündeln (Faschinen) gefertigt, da diese meist innerhalb weniger Jahre verlandeten (Abb. 5). Hatte das Vorland seine "Deichreife" von 40 - 50 cm über MThw erreicht, so wurde es durch Eindeichung dem Meer entzogen. Auf diese Weise sind an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste über 170 Köge entstanden.

Die ersten Lahnungsfelder mit Grüppen wurden in Schleswig-Holstein 1855 vor den Reußenkögen im Gebiet des heutigen Sönke-Nissen-Kooges angelegt, der 1923-1925 eingedeicht wurde (DIECKMANN 1988).



Abb. 5: Unterschiedliche historische Lahnungsbauweisen (aus PROBST 1996).

Zur Vorlandgewinnung wird die natürliche Auflandung des Watts durch Anlage rechteckiger Sedimentationsfelder gefördert. Senkrecht zur Küstenlinie werden im Abstand von 200 bis 400 m Längslahnungen (Hauptlahnungen) errichtet, rechtwinklig dazu Querlahnungen (Abb. 6). Die Größe der einzelnen Lahnungsfelder sowie die Bauart der Lahnungszäune (Abb. 5 u. 6) hängt von der natürlichen Auflandungsgeschwindigkeit, den hydrodynamischen Verhältnissen und der Morphologie des Küstenabschnittes ab: je langsamer der natürliche Auflandungsprozeß abläuft, desto geringer werden die Abstände gehalten. Die Lahnungen bewirken eine Seegangsberuhigung, wodurch die Sedimentation des mitgeführten suspendierten Materials gefördert und die Bodenerosion vermindert wird (STADELMANN 1981). Die Intensität der Sedimentation hängt zudem stark von der Besiedlung des Gebietes ab (ERCHINGER 1971).



Abb. 6: Lahnungsfeld mit Entwässerungsgräben (WIELAND 1990).

Die Entwässerung der Lahnungsfelder erfolgt durch künstlich angelegte Entwässerungsgräben (Grüppen). Dazu gehören die Hauptentwässerung, die durch das Lah-nungstor zum nächsten Priel oder Wattstrom führt, und die Querentwässerung (Ableiter) senkrecht dazu sowie die Anwurfgrüppen neben der Längslahnung (Abb. 6). Das Material aus den Anwurfgrüppen wird direkt an der Lahnung abgesetzt. Der so entstehende Anwurf dient der Sicherung bzw. der Standfestigkeit der Lahnung (Abb. 6).

Da heute Vorland überwiegend vor schar liegenden Deichen gewonnen wird, wo das Watt meist tiefer liegt und ungünstige Anlandungsbedingungen herrschen, braucht man eine stärkere Bauweise der Lahnungen. Daraus entwickelte sich der Buschdamm mit beidseitigem Anwurf, der ebenfalls aus Holzpfählen und Faschinen besteht. Bei sehr niedrigen Wattlagen werden Steindämme gebaut. Auch Abdeckungen aus Betonverbundsteinen werden zum Lahnungsbau verwendet. Des weiteren benutzt man Verhüttungsrückstände aus der Stahlerzeugung als Dammkernbaustoff (ERCHINGER 1967). Ferner ersetzt man die Faschinen durch PVC-Bahnen mit Längsschlitzen oder füllt Kunststoffgewebeschläuche durch einen Spülbagger mit Sand. Die Kunststofflahnung konnte sich trotz des reduzierten Transportvolumens und der weniger aufwendigen Unterhaltung nicht gegen die sehr viel stabilere Buschlahnung durchsetzen. Die Schlauchlahnung wird nur in besonderen Fällen gebaut, etwa zum Schließen einer Lücke (STADELMANN 1981).

Die nächstfolgende Baumaßnahme im Vorlandmanagement ist nach dem Anlegen der Lahnungsfelder eine Erweiterung des Entwässerungssystems: Dazu werden parallel zur Hauptentwässerung im Abstand von ca. 10 m Grüppen gezogen, die in den nächsten seeseitigen Ableiter führen. Um die Strömungsgeschwindigkeiten in den Grüppen möglichst gering zu halten, sollte deren Länge 95 m nicht überschreiten (STADELMANN 1981).

Die Begrüppung kann sowohl manuell als auch maschinell erfolgen. Bis vor ca. 20 Jahren wurden die Gräben fast ausschließlich von Hand ausgehoben. Diese waren in der Hauptentwässerung 2 - 3 m breit und 40 cm tief, im Ableiter und in der Anwurfgrüppe dagegen nur 20 cm tief. Heute erfolgt das Begrüppen per Hand nur noch auf dem Vorland, wo der Einsatz von Maschinen technisch nicht möglich oder unrentabel ist.

Für die maschinelle Begrüppung stehen mehrere Begrüppungsgeräte mit variierendem Grüppenprofil zur Verfügung (Abb. 6). Die am häufigsten verwendeten Geräte sind der Grüppenbagger und die Grüppenfräse.



Abb. 7: Unterschiedliche Grüppenprofile (ERCHINGER 1995).

Der Grüppenbagger ist ein Hydraulikbagger, bestehend aus einem Ponton und dem aufgesetzten Greifaggregat mit Motor. Der vom Grüppenbagger ausgehobene Querschnitt (rechteckig oder trapezförmig) ist in der Regel etwa 3,3 m breit und 40-50 cm tief und damit deutlich breiter und tiefer als der, der bei manueller Begrüppung entsteht. Der Aushub wird zwischen den Grüppen auf den Beeten abgesetzt. Der Vorteil des Grüppenbaggers besteht darin, daß der ausgehobene Boden recht kompakt auf den Beeten abgesetzt wird und damit die Gefahr der Rückschwemmung geringer ist. Der Nachteil ist, daß das Gerät bzw. der massig abgesetzte Wattboden den bestehenden Pflanzenbewuchs enorm schädigt (STADELMANN 1981). Die Grüppenfräse besteht aus einem Raupenfahrzeug mit einem schräg zur Fahrtrichtung angestellten Fräsrad, welches hydraulisch bewegt wird. Der damit erzeugte Grüppenquerschnitt ist halbkreisförmig mit einer oberen Breite von 1,0 - 1,5 m und einer Tiefe von ca. 60 cm. Der Aushub wird tangential fortgeschleudert und auf diese Weise gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt. Beim Einsatz der Grüppenfräse werden durch die einzelnen Messer derart kleine Mengen Boden gelöst, daß das fein auf die Beete verteilte Material dem Pflanzenbestand kaum schadet (STADELMANN 1981).

### 1.4.3 Vorlandsicherung

Die Vorlandgewinnung durch intensive Förderung der Vorlandbildung mit Hilfe von Lahnungsbauwerken und Grüppen ist zum einen sehr arbeits- und kostenintensiv, zum anderen stellt sie einen nicht unerheblichen Eingriff in das Ökosystem Wattenmeer dar. Küstenschutzbehörden und Bevölkerung sind sich angesichts landesweiter landwirtschaftlicher Überproduktion und steigenden Umweltbewußtseins einig, daß der Lahnungsbau nur noch zur Küstensicherung und nicht mehr zur Landgewinnung betrieben wird. Vorlandgewinnung und -erhaltung dienen daher bereits seit Mitte dieses Jahrhunderts hauptsächlich dem aktiven Küstenschutz (ERCHINGER 1971). Auch die Umweltbehörden stimmen prinzipiell der Förderung und dem Erhalt eines intakten Vorlandes für einen sinnvollen und naturnahen Küstenschutz zu. Erst seit Inkrafttreten des Nationalparkgesetzes für den Nationalpark Schleswig-holsteinisches Wattenmeer am 1. Oktober 1985 ist das Vorlandmanagement wieder verstärkt zum Objekt der öffentlichen Diskussion geworden. Unklarheiten über Art und Ausmaß der möglichen Vorlandbearbeitung und -bewirtschaftung sowie über die allgemeine Zuständigkeit im Vorlandbereich haben zu heftiger Kritik am Nationalparkgesetz und vor allem an der bevorstehenden Novellierung dieses Gesetzes geführt. Obwohl das Nationalparkgesetz eindeutig den "Maßnahmen des Küstenschutzes einschließlich der Vorlandgewinnung und -sicherung den Vorrang gibt", gehen die Meinungen von Küstenbewohnern und Vertretern des klassischen des Umweltschutzes über das Aussehen solcher Vorländer weit Küstenschutzes sowie auseinander.

## 1.5 Stand der Forschung

#### 1.5.1 Hydro- und Morphodynamik der Wattenküste

Die Dynamik des Wattenmeeres ist in starkem Maße abhängig von den Gezeiten. Weitere Faktoren, wie Seegang, meteorologische Verhältnisse (Wind und Eisbildung), Besiedlung mit Fauna und Flora sowie auch anthropogene Einflüsse, bestimmen maßgeblich das Erscheinungsbild insbesondere der küstennahen Watten.

Vornehmlich werden Wind- und Dünungswellen als wichtige Elemente des Seegangs zur Beurteilung von Planungs- und Bemessungsfragen im Küstengebiet herangezogen. Während die Dünungswellen mit vergleichsweise langen Perioden von außerhalb in das zu untersuchende Gebiet eingetragen werden, entstehen Windwellen unmittelbar vor Ort. Wind- und Dünungswellen können aus unterschiedlichen Richtungen einlaufen und ergeben durch Überlagerung den resultierenden Seegang (KOHLHASE 1993).

Besonders die Wellen, die durch lokale Windfelder hervorgerufen werden, sind für die hydrologischen Bedingungen in Lahnungsfeldern von Bedeutung (HOUWING et. al. 1995). Hierbei spielen vor allem die Windstärke, die Windrichtung (auf- oder ablandig), die Winddauer und die Windwirklänge (Fetch) eine entscheidende Rolle. Die Ausprägung des Seegangs bzw. die Höhe der Wellen ist zudem durch die Wassertiefe (Brechkriterium) limitiert und liegt daher im Küstengebiet überwiegend unter einem Meter (EHLERS 1994).

Die im Wattengebiet auftretenden Strömungen lassen sich nach den Ursachen ihrer Entstehung in drei Gruppen, in Tide-, Trift- und Dichteströmungen, unterteilen (GÖHREN 1968):

- Tideströmungen in der Nordsee entstehen durch eine von der Gezeitenbewegung der Ozeane angeregte periodische Schwingung der Wassermassen. Die zweimal täglich gegen den Uhrzeigersinn in die Wattengebiete der Deutschen Bucht einlaufende sekundäre Tidewelle (REINECK 1982) wird durch Sohlreibung und Ebbwirkung der vorherigen Tide asymmetrisch verformt.
- Durch Windschubspannungen werden an der Wasseroberfläche periodische Strömungskomponenten, die Orbitalströmungen der Oberflächenwellen (Seegang), und nichtperiodische Strömungskomponenten, die Triftströmungen, erzeugt.
- 3. Dichteströmungen treten beim Zusammentreffen von Wasserkörpern unterschiedlichen spezifischen Gewichts auf, an der Nordsee besonders in den Mündungen der Tideflüsse.

Dichteströmungen sind aufgrund fehlender Flußmündungen in den Testgebieten auszuschließen. Tide- und vor allem aber Triftströmungen in Verbindung mit Seegang haben durch ihre starke Turbulenz im Flachwasser einen bedeutenden Einfluß auf den Materialtransport und somit auch auf die Morphologie (GÖHREN 1968).

Ein ebenfalls enger Zusammenhang besteht laut DAVIES (1964) und HAYES (1979) zwischen den regional auftretenden Unterschieden in der Höhe des Tidenhubs und der Morphodynamik von Wattgebieten und Küstenlandschaften. Der Tidenhub hat Einfluß auf Strömungsgeschwindigkeiten und Transportprozesse sowie auf Erosions- und Sedimentationsraten. DIECKMANN (1985) und EHLERS (1988) modifizierten das Modell von DAVIES und HAYES für den Bereich der Deutschen Bucht (Abb. 8).



Abb. 8: Zusammenhang zwischen der Höhe des Tidenhubs und der morphologischen Ausprägung von Wattgebieten (EHLERS 1988).

## 1.5.2 Sedimenthaushalt im tidebeeinflußten Küstenvorfeld

Eine Sedimentbilanz ist ein wichtiger Aspekt bei der Charakterisierung eines Faziesraumes (SCHWEDHELM & IRION 1983). Die Frage nach einem gerichteten Materialtransport aus der offenen Nordsee in die Wattengebiete wird jedoch in der Literatur recht kontrovers diskutiert (MC CAVE 1973; EISMA 1981). Es überwiegt zwar die Meinung, daß ein Transport<sup>2</sup> in das Wattenmeer stattfindet, dieser aber nicht bestimmend für die Gesamtsedimentation ist. Auch nach Ansicht von REINECK (1978) ist die Sedimentzufuhr aus Flüssen und aus der offenen See auf die heutigen Watten eher gering. Der Hauptteil der Sedimentbewegung besteht in der Umlagerung im Watt selbst.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> gemeint ist hier ein Nettoimport aus den Flüssen und der offenen Nordsee in das Wattenmeer



Abb. 9: Herkunft, Erosion und Resedimentation der Wattablagerungen (REINECK 1978).

Schätzungen gehen davon aus, daß bei jeder Tide ca. 200.000 t Material (Trockengewicht) an der schleswig-holsteinischen Westküste bewegt werden. Davon entfallen allein 20.000 t auf den Heverstrom (FIEDLER 1992). Die zuvor beschriebenen Massenangaben beziehen sich fast ausschließlich auf den Transport von suspendiertem Feinmaterial. Zum Flutbeginn und etwa zwei Stunden vor Niedrigwasser liegt naturgemäß ein Schwebstoffinaximum vor (MÜLLER 1960; KAMPS 1962). In diesen Zeiträumen ist die Erosion an den Wattstromrinnen und Prielen besonders groß (DELFF 1934).

Die in der Deutschen Bucht gemessenen Schwebstoffkonzentrationen liegen zwischen 0,2 mg/l in der offenen Nordsee und bis zu 100 mg/l in den küstennahen Gebieten (EISMA 1981). WIELAND (1990) geht sogar von Gehalten zwischen 5 und 150 mg/l aus. Im Verlauf von Sturmfluten können sich die Konzentrationen jedoch auf das bis zu 50-fache gegenüber "ruhigen" Wetterlagen erhöhen (STADELMANN 1981).

Während der Suspensionstransport im Tidewasser den Hauptanteil des Massentransportes ausmacht, tragen "bed load" und äolischer Transport (EISMA 1981) sowie Eisgang (REINECK 1956) zeitlich und räumlich begrenzt zur Verfrachtung von Material bei. Besonders in den Wintermonaten macht die Materialfracht durch Eis einen nicht unerheblichen Anteil des Transportes aus. Dabei gelangt das Sediment auf verschiedene Weise in oder auf das Eis (REINECK 1956; DIONNE 1970):

- Suspendiertes Material wird mit eingefroren.
- Wellen oder Wind tragen Sedimente auf das Eis.
- Oberfächensedimente frieren während der Niedrigwasserphase an der Unterseite von Eisschollen an.

Das eingefrorene suspendierte Material ist zumeist sehr feinkörnig (siltig-tonig) und besitzt, bedingt durch organischen Detritus und Plankton, einen hohen Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff. Die Korngrößenzusammensetzung des auf das Eis aufgeworfenen Materials entspricht dagegen eher einem gut sortierten Mischwattsediment (GAST et al. 1984).

Die Verteilung der Sedimente in den Watten wird, wie bereits beschrieben, maßgeblich von den auf sie wirkenden hydrodynamischen Kräften gesteuert. Ihre Korngrößenverteilung ist in starkem Maße abhängig von der Tideströmung und dem Seegang. Viele weitere Faktoren, wie z.B. die Ausrichtung zu den Gezeitenströmungen sowie die Neigung der Wattflächen und Organismenbesiedlung, beeinflussen zudem lokal die Sedimentablagerung. Die Korngrößenzusammensetzung kann folglich als ein wichtiger Anhaltspunkt für die zum Ablagerungszeitpunkt herrschenden hydrodynamischen Energiebedingungen angesehen werden. Der Schlickanteil, d. h. der Anteil der Ton- und Siltfraktion (Korndurchmesser < 63 µm), der zur Ablagerung von wechselnden Energieeinträgen abhängig besonderem Maße kommt. ist in (STÖRTENBECKER 1997). Für eine granulometrische Unterteilung der Wattsedimente geben FIGGE et al. (1980) folgende Stufung an:

Anteil < 63 µm	Sedimenttyp	Sedimenttyp im engeren Sinne	
< 10 Gew%	Wattsand (Sandwatt)	< 5 Gew% 5-10 Gew%	Wattsand i. e. S. schwach schlickiger Wattsand
10 - 50 Gew%	Schlicksand (Mischwatt)	10-25 Gew% 25-50 Gew%	sandiger Schlicksand (sandiges Mischwatt) schlickiger Schlicksand (schlickiges Mischwatt)
> 50 Gew%	Schlick (Schlickwatt)		

Tab. 1: Sedimentzusammensetzung nach FIGGE et al. (1980).

Angetrieben durch die zuvor beschriebenen hydrodynamischen Prozesse und die daraus resultierenden Transportvorgänge sowie bedingt durch die nachfolgend beschriebenen Sedimentations- und Erosionsmechanismen, entstand eine Korngrößenverteilung im Wattenmeer, bei der die Sedimente im allgemeinen zur Tidehochwasserlinie hin feinkörniger werden (VAN STRAATEN & KUENEN 1957, POSTMA 1961).

Eine Reihe von hydrodynamischen und biologischen Faktoren sowie physikalische und biochemische Effekte steuern die Ablagerung und Verfestigung wie auch die Resuspendierung der Sedimente im Watt. Bei der Untersuchung des landwärts gerichteten Sedimenttransportes stellten VAN STRAATEN & KUENEN (1957) zwei Phänomene fest:

Sedimentpartikel werden im Flutstrom weiter landwärts transportiert als es die Strömungsgeschwindigkeit theoretisch zuläßt (settling lag). Im Ebbstrom werden die abgelagerten Sedimentteilchen erst später wieder resuspendiert (scour lag) (Abb. 10).

Das zweite Phänomen beruht im wesentlichen auf dem bereits von HJULSTRÖM (1935) beobachteten Unterschied zwischen der Strömungsgeschwindigkeit, die noch eine Ablagerung erlaubt, und der Strömungsgeschwindigkeit, die zur Erosion eines Teilchens gleicher Größe notwendig ist.



Abb. 10: Modell zur Veranschaulichung des landwärts gerichteten Materialtransportes im Bereich von Ästuaren und Tideküsten (POSTMA 1961; aus CARTER 1988).

Für den Sedimenttransport und die anschließende Sedimentation ist nach DRONKERS (1985) vor allem die Asymmetrie der Tide verantwortlich. Abgesehen von Wettersituationen mit starkem ablandigen Wind sind die Strömungsgeschwindigkeiten während der kürzer dauernden Flutphase deutlich höher als bei der länger dauernden Ebbphase.

Ein bedeutender Teil der feinkörnigen Sedimentfracht wird in der späten Flutstromphase vor Hochwasser (Slack tide Before Flood: SBF) und in der Ebbstromphase vor Niedrigwasser (Slack tide Before Ebb: SBE), wenn die Strömungsgeschwindigkeit einen kritischen Wert unterschreitet, abgelagert. Beim Unterschreiten dieser kritischen Strömungsgeschwindigkeit überwiegen die Adhäsionskräfte am Boden gegenüber den Transportkräften (DRONKERS 1986). Zusätzlich zur Tideströmung spielt der Einfluß von Windwellen eine entscheidende Rolle bei der Resuspendierung feinkörnigen Materials (s. Kap 1.5.1). Gerade in Flachwassergebieten mit landwärts abnehmender Wassertiefe limitieren bereits kurze Wellen die Sedimentation deutlich stärker in der Zeit um SBE als in der Zeit um SBF (DRONKERS 1986).

Die Deposition und Erosion von feinkörnigen kohäsiven Sedimenten im Tidebereich wird nach Ansicht von VAN STRAATEN & KUENEN (1957) besonders durch biochemische Faktoren beeinflußt. MANZENRIEDER (1983), FÜHRBÖTER (1983) und AUGUSTINUS (1997) messen ebenfalls biogenen Einflüssen sowie den im Watt lebenden Organismen eine bedeutende Rolle bei der Sedimentbildung und -verfestigung bei. Die Einflußfaktoren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Flockenbildung aus feinkörnigen Partikeln unter biogenem Einfluß.
- Sedimentneu- und Sedimentumbildung erfolgt durch benthische Organismen und Zooplankton, die durch Filtration Material aus dem Wasser oder direkt aus dem Sediment aufnehmen und anschließend als Pellets wieder ausscheiden.
- Sedimentbindung und Sedimentverfestigung werden sowohl von in als auch auf dem Watt lebender Fauna und Flora bewirkt .

Auch PARTHENIADES (1984) geht davon aus, daß nur sehr wenig feinkörniges Material sedimentieren könnte, wenn sich die suspendierten Sedimentpartikel nicht zu Aggregaten zusammenschließen würden. Die Grenze zwischen Komponenten, die besonders zur Aggregatoder Flockenbildung neigen, und gröberen Gemengeteilen, die zumeist als einzelne Mineralkörner transportiert werden, legt RICKLEFS (1989) in den Grobsiltkornbereich bei 20 - 30 um. Die Bildung solcher Flocken erfolgt nach KRANCK (1981) und EISMA (1993) durch Kollision und Adhäsion zwischen Partikeln in einer Suspension. Die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe nimmt dabei nicht nur mit der Größe und Dichte der Teilchen, sondern auch mit steigender Temperatur und sinkendem Salzgehalt zu (RICKLEFS 1989). DYER (1989) konnte zudem durch mehrere Naturmessungen in Ästuaren nachweisen, daß die mittlere Absetzgeschwindigkeit der Flocken mit der Konzentration der suspendierten Sedimentpartikel zunimmt. Das Erosionsverhalten von nicht-kohäsiven Sedimenten wie Sand ist weitgehend geklärt (SHIELDS 1936, UNSÖLD 1984), das von kohäsiven Sedimenten wie Schlick (< 63 µm) wurde jedoch zumeist empirisch untersucht (FÜHRBÖTER 1983, METHA 1988, SCHÜNEMANN & KÜHL 1991, HOUWING et al. 1995, MITCHENER & TORFS 1996). Durch die Komplexität der Sedimentations- und Erosionsmechanismen kohäsiver Sedimente gibt es zur Zeit noch keine umfassende mathemathische Formulierung der Zusammenhänge. MITCHENER & TORFS (1996) führten Laboruntersuchungen an definierten Sand/Schlick-Gemischen durch. Danach erhöht die Beimengung von Sand zu Schlick und umgekehrt die für die Erosion notwendige Sohlschubspannung erheblich. Bei einer Zugabe von bis zu 50% Sand zu Schlick um den Faktor 2 und bei der Zugabe von 30% Schlick zu Sand sogar um den Faktor 10.

Zusätzlich wird die Erosionsbeständigkeit eines Sediments durch biogene Verfestigung entscheidend erhöht. Dies zeigen Messungen von FÜHRBÖTER (1983), die er unter Laborbedingungen sowie mit einem transportablen Strömungskanal im Sandwatt einiger ostfriesischer Inseln durchführte. Während sterilisiertes Sandwatt im Labor bei Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 20 cm/s zu erodieren begann, waren im biogen verfestigten Watt Strömungsgeschwindigkeiten notwendig, die um den Faktor 2 - 6 höher lagen.

#### 1.5.3 Bedeutung des Vorlandes für den Schutz der Küste

Während die Förderung der Vorlandbildung früher vorwiegend der Landgewinnung diente, steht seit der Mitte des 20. Jh. ausschließlich der aktive Küstenschutz im Vordergrund (ERCHINGER 1971). Die Vorteile eines intakten Vorlandes für den Küstenschutz hat man aber bereits viel früher erkannt:

- Die auflaufenden Wellen brechen schon vor dem Deich in Form von Schwallbrechern, wodurch der Energieeintrag auf den Deich stark gemindert wird (Abb. 11 und 12).
- Die Gefahr des Wellenüberlaufs und damit der rückwärtigen Deichzerstörung wird verringert.
- Es wird kein teures Deckwerk benötigt.
- Soden und Kleiboden zur Unterhaltung des Deiches konnten vor Ort entnommen werden (heute nicht mehr üblich).



Abb. 11: Wirkung eines Vorlandes auf die Wellenbelastung (STADELMANN 1981).



Abb. 12: Abhängigkeit des Wellenauflaufes von der Wassertiefe t und der Vorlandbreite b (ERCHINGER 1971).

#### 1.5.4 Wirkungsweise von Lahnungsbauwerken

Die Förderung der Vorlandbildung durch Lahnungsbauwerke ist vielfach dokumentiert. In diesen Beschreibungen wird eine seeganngsberuhigende und sedimentationsfördernde Wirkung der Lahnungen zwar angenommen, wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit dieser Frage auseinandersetzen, sind dagegen nur in geringem Umfang vorhanden. Sie beschränken sich im wesentlichen auf die Arbeiten von KAMPS (1962), ERCHINGER (1971, 1995), ER-CHINGER et al. (1996), JESPERSEN & RASMUSSEN (1989), DIJKEMA et al. (1988, 1990, 1995) und HOUWING et al. (1995).

JESPERSEN & RASMUSSEN (1989) gehen für den Bereich der südlichen dänischen Festlandsküste davon aus, daß die Anlage von Buschlahnungen (Faschinenzäunen) zum Schutz neuen Vorlandes zwar hilfreich war, jedoch kaum eine Salzmarschenbildung mit sich geführt habe, die nicht ohnehin erfolgt wäre. Die Bauweise der Lahnungen in Form von Sedimentationsfeldern würde dagegen einen potentiellen Anwachs in niedrigeren Wattgebieten deutlich fördern.

Die Untersuchungen im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Erosionsfestigkeit von Hellern", die seit 1988 durchgeführt wurden, befaßten sich ebenfalls mehr mit bereits bestehendem Vorland (ERCHINGER 1995, ERCHINGER et al. 1996). Hierbei standen die Analyse der hydrodynamischen Belastungen sowie die Untersuchung des Einflusses von Vegetation, Beweidung und Begrüppung auf die Hellerflächen (Vorlandflächen) im Vordergrund.

Auch in diesem zuvor genannten Projekt wurde bereits die Schutzwirkung von Lahnungen als ein Teilaspekt erörtert. Lahnungen, die man auf Höhe des mittleren Tidehochwassers (MThw) des betroffenen Küstenabschnittes baute, führten bei Wasserständen bis 0,85 m über MThw zu einer Wellendämpfung der signifikanten Wellenhöhe um bis zu 25 %. Lahnungen mit einer "klassischen" Lahnungshöhe von MThw + 0,3 m bewirkten bei gleichen Wasserständen sogar eine Wellendämpfung um ca. 50 % (Abb. 13).



Abb. 13: Einfluß von Lahnungen unterschiedlicher Höhe auf die Wellendämpfung; signifikante Wellenhöhe H<sub>s</sub> bei Lahnungsoberkante = MThw (oben) und MThw + 0,3 m (unten) (Erchinger et al. 1996).
Sehr einfache Messungen von Sedimentationsraten ergaben Beträge von wenigen Zentimetern / Jahr bis mehr als 20 cm / Jahr (Abb. 14).



Abb. 14: Entwicklung des Wattniveaus in den Lahnungsfeldern nach dem Lahnungsbau (ERCHINGER et. al. 1996).

Der Einfluß von hydrodynamischer Belastung und Vegetationsdynamik auf die morphologische Entwicklung von bestehenden und aufwachsenden Vorländern an der westfriesischen Küste wurde zwischen 1990 und 1995 von HOUWING et al. (1995) untersucht. Die hierbei gemessenen Sedimentationsraten liegen mit bis zu 10 cm / Jahr deutlich unter den in Ostfriesland ermittelten Werten.

#### 1.6 Lage und Aufbau der Testgebiete

## 1.6.1 Lage der Testgebiete

In diesem Abschnitt wird die Lage der Testgebiete sowie die Position der relevanten Tidepegel und der Windmeßstationen beschrieben. Die vorliegenden Untersuchungen erfolgten in zwei Testgebieten im Küstenvorfeld der schleswig-holsteinischen Nordseeküste.



Abb. 15: Lage der Testgebiete

Das Testgebiet Dithmarschen liegt am Südrand der Meldorfer Bucht, südlich des Helmsandes (Abb. 15). Der landwärts gelegene Speicherkoog wurde 1972 im südlichen und 1978 im nördlichen Teil eingedeicht. Wenige hundert Meter südwestlich des Testgebietes befindet sich der Pegel "Deichsiel Sommerkoog Steertloch". Die nächstgelegene Windmeßstation ist in Büsum zu finden.

In Nordfriesland befindet sich das Testgebiet in der Nähe des Ortes Ockholm, südlich des Hauke-Haien-Kooges (Abb. 15). Auch hier liegt das Testgebiet im Küstenvorfeld eines relativ jungen Kooges, der 1989 eingedeicht wurde. Die in diesen Untersuchungen verwendeten Wasserstandsdaten stammen von dem Pegel in Schlüttsiel. In Anbetracht des relativ weitläufigen Netzes an Windmeßstationen, erschien die seewärts auf Hallig Hooge befindliche Meßstation die geeignetste.

### 1.6.2 Topographie, Sedimentologie und Hydrographie der Testgebiete

Aufwachsende Deichvorländer, wie die in den Testgebieten, gehören in den Übergangsbereich zwischen Eulitoral und Supralitoral. In der Anfangsphase werden sie, abgesehen von extremen Wetterlagen, von fast jedem Hochwasser überflutet. Erst durch fortschreitende Sedimentation wachsen sie über die mittlere Tidehochwasserlinie hinaus.

Während das Testgebiet Nordfriesland bereits eine erste Pioniervegetation mit Salicornia und Spartina aufwies und somit ins höhere Eulitoral gehört, beschränkte sich zu Beginn der Untersuchungen die benthische Flora des Testgebietes Dithmarschen im wesentlichen auf Diatomeenrasen, womit es eher dem mittleren Eulitoral zuzuordnen ist (Kap. 1.3.2, Abb. 3). Entprechend der Watt-Typen-Gliederung von REINECK (1982) liegt das Testgebiete Nordfriesland im Bereich der Rückseitenwatten im Schutz der nordfriesischen Inseln und Halligen. Die Watten vor der Küste Dithmarschens sind sowohl den offenen Watten als auch den Buchtenund Ästuarwatten (Meldorfer Bucht; Eiderästuar) zuzuordnen. Das Testgebiet Dithmarschen am SE-Rand der Meldorfer Bucht liegt somit im Bereich eines Buchtenwattes.

Der überwiegende Teil der Oberfächensedimente im schleswig-holsteinischen Watt ist dem Sand- und Mischwatt zuzuordnen. Nur ungefähr 3% sind als typisches Schlickwatt anzusehen (WIELAND 1990).

Auch die von SCHMIDT (1975) und GAST (1980) im mittleren, östlichen und nördlichen Teil der Meldorfer Bucht in Dithmarschen untersuchten Gebiete sowie die von NOMMENSEN (1982), und STÖRTENBECKER (1997) im mittleren und südlichen Nordfriesland kartierten Flächen werden vorwiegend aus Sand- und Mischwatt aufgebaut.

Nach SCHMIDT (1975) reicht in Dithmarschen die Sedimentation der Sandwattfazies bis ins späte Atlantikum zurück und hat sich seitdem nur unwesentlich verändert. Schlickwatt kommt nur sehr untergeordnet vor. GAST (1980), der den nördlichen und mittleren Teil der Meldorfer Bucht bis zum Helmsand bearbeitet hat, fand Schlickwattvorkommen nur auf einem schmalen küstennahen Streifen und vereinzelt im seewärtigen Bereich. Der Bereich des Testgebietes in der Nähe des Deichsiels Sommerkoog-Steertloch wurde von ihm nicht erfaßt, ist aber von seiner Lage ebenfalls dem küstennahen Streifen zuzuordnen.

Schlicksedimente nehmen auch im mittleren Nordfriesland nur verhältnismäßig kleine Flächen ein (NOMMENSEN 1982, BERNER et al. 1986, STÖRTENBECKER 1997). Sie kommen zumeist im Lee größerer Inseln, in Buchten mit großer Längserstreckung und im Bereich freiliegenden Kleis vor.

In beiden Testgebieten wurde ein mittlerer Tidenhub von mehr als 3 m gemessen (Abb. 16). Das MThw erreichte in Nordfriesland ca. 1,50 m über NN und in Dithmarschen 1,60 m über NN. Unter Berücksichtigung der morphologisch-hydrodynamischen Gliederung von HAYES (1979) bzw. EHLERS (1988) (s. Kap. 1.5.1) sind die Testgebiete dem "macrotidal" zuzuordnen.



Abb. 16: Linien gleicher Tidehochwasserzeit (links) und gleichen Tidenhubs bei Springtide in der Nordsee (REINECK 1982)

Die Tidewassermassen gelangen in Nordfriesland über die südwestlich gelegene Norderhever-Gezeitenrinne, die Strandley und das Ockholmloch in das Testgebiet. Entwässert wird es über den Rochley-Priel in Richtung zur Süderaue (Abb. 15; rechts).

In Dithmarschen erfolgt sowohl der Zustrom als auch der Abfluß über die Gezeitenrinne "Piep" und das "Sommerkoog-Steertloch" (Abb. 15; links).

# 2 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die im Gelände und im Labor durchgeführten Arbeiten sowie die anschließenden Analysen beschrieben und erläutert.

Aufgrund der hohen Dynamik im Küstenbereich war zu erwarten, daß die naturbedingten sedimentologischen und morphologischen Veränderungen in kurzen Zeitintervallen erfolgen, sich räumlich aber sehr differenziert auswirken. Daher wurden zwei unterschiedliche Untersuchungsstrategien angewandt:

- Die Sedimentverteilung und die Morphologie in den Testgebieten wurde in festen Zeitabständen von einem halben Jahr in Form von Bestandsaufnahmen flächenhaft und räumlich erfaßt.
- Die Untersuchung dynamischer Vorgänge erfolgte dagegen in wesentlich k
  ürzeren Intervallen sowie ereignisbezogen. Hierzu z
  ählen vor allem Messungen mit hoher Me
  ßgenauigkeit, die an diskreten Punkten durchgef
  ührt wurden.

# 2.1 Sedimentologisch - morphologische Bestandsaufnahmen

Die Bestandsaufnahmen setzten sich im wesentlichen aus umfassenden und damit auch sehr zeitaufwendigen sedimentologischen Kartierungen sowie tachymetrischen und nivellitischen Vermessungen zusammen. Diese ergeben Momentaufnahmen, die die sedimentologischen und morphologischen Verhältnisse als Resultat mehrerer Ereignisse und (Wetter-) Situationen wiedergeben.

### 2.1.1 Sedimentologische Kartierungen und Beprobungen

Im Frühjahr 1994 und im Herbst 1996 wurden bei den einleitenden und abschließenden Bestandsaufnahmen die Lahnungsfelder mit den angrenzenden Bereichen bis zu einer Uferentfernung von 800 m sedimentologisch kartiert und beprobt. Die Wahl der Beprobungspunkte erfolgte aufgrund von sichtbaren Änderungen im Sediment, jedoch in Anlehnung an ein Raster mit Abständen von maximal 40 m in den bereits bestehenden Lahnungsfeldern und 80 m im Umfeld.

Kartiert wurde die Verteilung der Oberflächensedimente und der Sedimentstrukturen, die Tiefe des Reduktionshorizontes sowie die Besiedlungsdichte der Fauna und Flora. Grundlage der Kartierung war eine Grobansprache der Wattablagerungen im Gelände, die einen ersten Anhaltspunkt über den Sediment-Typ (s. Kap. 1.5.2) liefert und ein wichtiger Kontrollparameter für die im Labor ermittelte Sedimentzusammensetzung ist. Zum anderen wurden Beobachtungen zur Schill- und Diatomeenbedeckung sowie zur Ausbreitung der Pioniervegetation und zur Einsinktiefe aufgenommen.

Die weiteren Bestandsaufnahmen entsprachen methodisch im wesentlichen den zuvor beschriebenen, mit dem Unterschied, daß die Kartierungen und Beprobungen auf den unmittelbaren Bereich innerhalb und außerhalb der Lahnungsfelder beschränkt waren und der maximale Probenabstand auf 60 m erweitert wurde.

Die Entwicklung der Pioniervegetation konnte zudem mit Hilfe von Infrarot-Fehlfarbaufnahmen dokumentiert werden. Hierzu wurden jeweils im Spätsommer, der Zeit des Vegetationsmaximums, CIR-Aufnahmen (ColorInfraRed) von den Lahnungsfeldern gemacht. Auf derartigen Aufnahmen werden chlorophyllhaltige Pflanzen wie Queller und Schlickgras rot abgebildet, die übrigen Landschaftselemente erscheinen in grünlich-grauen Farbtönen.

#### Probennahme

Die sedimentologischen Beprobungen im Rahmen der Bestandsaufnahmen erfolgten in Form von Oberflächenproben, Minikernen und Kleinkernen:

- Die Oberflächenproben (bis 5 cm Tiefe) wurden mit einem PVC-Stechrohr mit 45 mm Durchmesser entnommen.
- (2) Die Entnahme der Minikerne erfolgte ebenfalls mit einem PVC-Rohr, jedoch mit 15 cm Länge.
- (3) Die Kleinkerne entsprachen in der Art und der Länge den Minikernen. Da an den Sedimentprofilen aus diesen Kernen auch die Tracer- und Radiographieuntersuchungen (s. Kap. 2.2.3) vorgenommen wurden, betrug ihr Durchmesser 7,5 cm.

Die Mini- und Kleinkerne dienten zur räumlichen Erfassung des Sedimentkörpers. Sie wurden für die granulometrischen Untersuchungen in 3 Einzelproben von jeweils 5 cm Länge unterteilt (Abb. 19).

#### 2.1.2 Tachymetrische und nivellitische Vermessungen

Die Testgebiete wurden vom Frühjahr 1994 bis zum Herbst 1996 in Abständen von jeweils einem halben Jahr von den Ämtern für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum tachymetrisch und nivellitisch vermessen. Während in der ersten und der letzten Vermessung die Gebiete großräumig, d.h. auch außerhalb der eigentlichen Vorlandbauwerke aufgenommen wurden, beschränkten sich die übrigen Vermessungen ausschließlich auf den Bereich der Lahnungsfelder. Der Abstand der Meßpunkte zueinander betrug in den Feldern maximal 20 m, im Bereich außerhalb 40 m.

Die Vermessungen, die im Rahmen der bereits vorgestellten Diplomarbeit (Kap. 1.1) durchgeführt wurden, erfolgten nivellitisch. Sie wurden durch die schwierige Begehbarkeit der begrüppten Lahnungsfelder auf fest definierten Profilen, dafür aber vierteljährlich durchgeführt.

#### 2.1.3 Bohrkerne

Die längerfristige Sedimentationsgeschichte der Wattflächen in den Testgebieten kann Aufschluß über örtlich bedingte Sedimentationstrends geben und somit zum Verständnis der aktuell ablaufenden Prozesse beitragen. Aus diesem Grund wurden in beiden Testgebieten jeweils zwei Sedimentkerne von bis zu 5 m Länge entnommen. Einer der beiden Kerne wurde in den Lahnungsfeldern, der zweite ca. 1500 m seewärts davon erbohrt.

Die Wattkerne wurden mit einem Vibrocorer-Bohrgerät, das seit einigen Jahren im Geologischen Institut der Universität Kiel, Arbeitsgruppe Küstengeologie, verwendet wird, entnommen (HÖCK & RUNTE 1992). Dieses Bohrgerät wurde von LANESKY in den 70er Jahren entwickelt (LANESKY et al. 1979). Der besondere Vorteil dieses Bohrverfahrens ist zum einen die Möglichkeit, weitgehend ungestörte Sedimentkerne zu entnehmen, zum anderen der geringe logistische Aufwand, der es ermöglicht, auch in unwegsamem Gelände Sedimentkerne von bis zu 6 m Länge zu entnehmen.

### 2.2 Untersuchungen zur Sediment- und Morphodynamik

Die Ergebnisse der Bestandsaufnahmen können, wie bereits erwähnt, als Resultat einer Vielzahl von Ablagerungsbedingungen und -ereignissen angesehen werden. Um die Auswirkungen von kürzerfristigen (Wetter-) Situationen oder selbst einzelnen Ereignissen zu erfassen, mußten Untersuchungsmethoden gewählt werden, mit denen sich auch dynamische Veränderungen aufnehmen lassen. Aufgrund der höheren Frequenz der durchgeführten Messungen konnten diese nur an diskreten Punkten erfolgen.

# 2.2.1 Der Sedimentation-Erosion-Table (SET)

Punktuelle morphologische Messungen mit hoher Meßgenauigkeit wurden mit einem Sedimentation-Erosion-Table (SET) durchgeführt. Bei dem SET handelt es sich um ein mechanisches Meßgerät zur Bestimmung von Höhenänderungen an einer Sedimentober-fläche. Diese Art von Meßgerät wurde von SCHOOT und JONG (1982) entwickelt. Sowohl in den Niederlanden als auch in Louisiana und Georgia (USA) sind derartige Geräte seit mehreren Jahren im Einsatz.

Der Sedimentation-Erosion-Table besteht aus einem vertikalen und einem horizontalen Arm,



Abb. 17: Messung mit dem SET.

an dem die eigentliche Meßplatte mit den 9 Meßnadeln befestigt ist (Abb. 18). Bei den Messungen wird das Gerät in stationäre Basisrohre gesteckt, die fest im Watt verankert sind. Die Messungen erfolgen in 4 Positionen (Richtungen) je Meßstelle. Hierzu läßt man die Meßnadeln bei waagerecht stehendem horizontalen Arm mit dem Kopf bis auf die Sedimentoberfläche herab und arretiert sie. Danach wird die Länge der Nadeln vom Kopf bis zur Meßplatte gemessen (Abb. 17).



Abb. 18: Der Sedimentation-Erosion-Table.

Mehrere Wiederholungsmessungen an gleicher Position, die unmittelbar nacheinander durchgeführt wurden, ergaben einen Meßfehler, der geringer als  $\pm$  1,5 mm ist. BOUMANS (1993) gibt sogar eine Genauigkeit von  $\pm$  1,0 mm für den SET an.

Mit jeweils 9 Meßpunkten (Basisrohren) je Testgebiet (s. Abb. 31 u. 37, Kap. 4.1) wurde zwar kein flächendeckendes Raster erreicht, es konnte jedoch eine Vielzahl von Meßpositionen bezüglich der Morphologie und ihrer Lage zu den Lahnungen (Luv, Lee und zentral im Feld) realisiert werden. Bei einer größeren Anzahl von Meßpunkten würde die Zeit für die Durchführung der Untersuchungen (s. a. das folgende Kap.) die Dauer eines Niedrigwassers überschreiten und somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in Frage stellen.

#### 2.2.2 Bodenphysikalische Untersuchungen

Zeitgleich mit den eigentlichen SET-Messungen wurden sedimentologische und einfache bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Die bodenphysikalischen Untersuchungen bestanden aus den Messungen der Scherfestigkeit und der Ermittlung des Wassergehaltes sowie des Feststoffanteils. Derartige Begleituntersuchungen waren erforderlich, um die mit dem SET gemessenen Höhenänderungen als echte Sedimentation oder Erosion interpretieren zu können. Kleinskalige morphologische Veränderungen sind nicht in jedem Fall mit Sedimentations- und Erosionsvorgängen gleichzusetzen. So kann eine scheinbar geringfügige Erosion auch durch Kompaktion sowie eine scheinbare Sedimentation neuen Materials durch Aufarbeitung des alten Sedimentes hervorgerufen werden.

Durch Messungen des Wassergehalts sowie des Feststoffanteils läßt sich der tatsächliche Massenzuwachs, der bei Sedimentationsvorgängen erreicht wird, differenziert von der allgemeinen Volumenzunahme untersuchen. Dies ist besonders bei der Beurteilung von Vorlandarbeiten, wie Lahnungsbau und Begrüppung, die eine beschleunigte Sedimentation bewirken sollen, von Bedeutung.

Für die Bestimmungen des Wassergehalts und des Feststoffanteils sind definierte Probenmengen erforderlich. Daher wurden die Sedimentproben mit einer entsprechend präparierten Einwegspritze entnommen (Abb. 19). Bei dieser Art der Probennahme erhält man Mischproben der obersten 5 cm des Wattbodens. Zur Aufbewahrung wurde das Material in luftdicht verschließbare Behälter gegeben. Die weitere Bearbeitung der Proben erfolgte im Labor (s. Kap. 2.4.4). Neben dem Wassergehalt wurde auch die Korngrößenverteilung und der Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff anhand der so gewonnenen Proben bestimmt.



Abb. 19: Schematische Darstellung der zur Probennahme verwendeten Geräte.

Als Scherfestigkeit eines Bodens bezeichnet man den höchsten Wert des Scherwiderstandes, den der Boden ihm aufgezwungenen Schubbeanspruchungen entgegenbringt. Dieser wird im Moment des Bruchs erreicht (DIN 18 137, T1, 1972).

Für den Scherwiderstand τ gilt nach PRINZ 1982:

 $\tau = \mathbf{c} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{tan} \ \boldsymbol{\phi}$ 

Bei nichtbindigen Böden bestimmt der von der Normalspannung unabhängige Reibungswinkel  $\varphi$  fast allein die Scherfestigkeit. Bei bindigen Böden ist die Scherfestigkeit sowohl vom Reibungswinkel  $\varphi$  als auch von der Kohäsion c abhängig. Die Kohäsion ist ein Parameter für die zwischen den Körnern wirkenden Haftkräfte. Sie ist abhängig vom Anteil der Tonminerale, dem Wassergehalt, dem Sättigungsgrad und dem Belastungszustand. So nimmt die bei zunehmendem Wassergehalt ab und ist bei breiigen Sedimenten gleich null. Ebenso lassen hohe Gehalte an quellfähigen Tonmineralen die Scherfestigkeit stark abfallen. Bei Mischsedimenten ist die Scherfestigkeit neben der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt vor allem von der Kornverteilung im Feinkorn- und im Grobkornbereich abhängig.

Die undränierte Kohäsion  $c_u$  wird allgemein als Parameter für das Festigkeitsverhalten bindiger Böden, in diesen Untersuchungen jedoch als Maß für die Konsolidierung und Erosionsfestigkeit der kohäsiven Wattablagerungen herangezogen.

Die Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit kann in Feldversuchen mit einer Flügelsonde entsprechend DIN 4014 erfolgen. Dabei wird mit einer Drehgeschwindigkeit von ca. 0.1° bis 0.5° je Sekunde ein zylindrischer Bodenkörper abgeschert und das dazugehörige Drehmoment M gemessen. Die Scherfestigkeit ( $\tau_{FL}$ ) wird dann bei einem Flügel mit h=2d (h=Flügelhöhe, d=Durchmesser des Drehkörpers) wie folgt ermittelt:

$$\tau_{\rm FL} = \frac{6M}{7\pi d^3} = \mathbf{c}_{\mathbf{u}}$$

Durch die Verwendung eines Flügels mit der Höhe h = 5 cm entsprach der Bereich, der durch die Scherfestigkeitsmessung erfaßt wurde, der Entnahmetiefe der Sedimentproben.

### 2.2.3 Messung der Umlagerungsintensität mit Tracerstiften

Auch wenn die SET-Messungen in relativ kurzen Zeitintervallen oder unmittelbar in Verbindung mit Ereignissen erfolgten, können die ermittelten Höhenänderungen wiederum durch Erosion und anschließende Sedimentation oder umgekehrt enstanden sein. Daher wurden zusätzlich Luminophoren-Tracerstäbe eingesetzt. Dies ist eine zuverlässige und bewährte Methode, um Sedimentumlagerungen zu quantifizieren (RUNTE 1989, 1991, STÖRTENBECKER 1997). Nach RUNTE (1989) lassen sich damit auch in sehr stark bioturbaten Sedimentprofilen die maximale Umlagerungstiefe und die minimale Sedimentneubildungsrate zwischen zwei Beprobungen ermitteln.

Der Tracerstab besteht aus Luminophorensanden, denen gemahlener Baryt (Bariumsulfat, BaSO<sub>4</sub>) als Röntgenkontrastmittel beigefügt wurde, und einem wasserlöslichen Bindemittel. Im Watt wird der Tracerstab senkrecht an einer markierten Position ins Sediment gedrückt. Nachdem das Bindemittel sich im Kontakt mit dem Porenwasser aufgelöst hat, können die Tracerpartikel zusammen mit dem sie umgebenden Sediment umgelagert werden. Um die Umlagerungsintensität anhand der Erosion am Tracer und an der Menge des darüber lagernden Materials zu ermitteln, wurden an den Tracerpositionen Kleinkerne (s.o.) entnommen.

#### 2.2.4 Schwebstoffmessungen und -beprobungen

Für die Untersuchungen zur Sedimentdynamik sind nicht nur die Veränderungen des Sedimentkörpers von Interesse, sondern auch der Materialtransport. Wie bereits im Kapitel 2.2.1 beschrieben, erfolgt der überwiegende Teil des Sedimenttransports im Wattenmeer als Suspensionsfracht. Unterschiedliche Sedimentationsraten sind nicht allein von den örtlichen und zeitlichen Ablagerungsbedingungen abängig, sondern werden in starkem Maße durch die Materialverfügbarkeit, die sich in der suspendierten Schwebstoffmenge widerspiegelt, limitiert. Aus diesem Grund wurde parallel zu den Strömungsmessungen (s. Kap. 2.3) die Trübung in der Wassersäule als Maß für den Schwebstoffgehalt untersucht. Um damit Aussagen über den effektiven Schwebstoffgehalt machen zu können, müssen die Messungen durch Probennahmen und anschließende Bestimmung der Schwebstoffmenge kalibriert werden.

Durch die zuvor genannten Messungen erhält man zwar Informationen über die Entwicklung des Schwebstoffgehalts im Verlauf einer Tiede bzw. über einen bestimmten Zeitraum, aber nicht über deren flächenhafte Verteilung, die möglicherweise stark von der Morphologie oder wie im Fall der vorliegenden Untersuchungen von Vorlandbauwerken beeinflußt wird. Daher bot sich eine flächenhafte Schwebstoffbeprobung der beiden Testgebiete, wie sie im September 1995 durchgeführt wurde, an. Auf jeweils 6 küstennormalen Profilen wurden zeitgleich Wasserproben zur Sestonanalyse entnommen. Die Beprobung erfolgte sowohl im auflaufenden als auch im ablaufenden Wasser. An jedem Probenpunkt wurden mit einer PE-Flasche 250 ml Meerwasser in einer Höhe von 10 cm über der Sedimentoberfläche bei einer Wassertiefe von 30 cm entnommen. Die Menge an Schwebstoffen wurde mittels Filtration bestimmt.

#### 2.2.5 Das Video-Wasserlinien-Verfahren

Bereits in anderen Forschungsprojekten haben sich Videoaufnahmen zur Visualisierung von Vorgängen und als zusätzliche Informationsquelle bewährt. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden Video-Aufnahmen von den Auf- und Ablaufphasen des Wassers als weiteres Hilfsmittel bei der Auswertung der morphologischen und hydrologischen Messungen eingesetzt.

Hierzu wurde eine Videokamera auf einem 6 m hohen Aluminium-Mast montiert (Abb. 20). Anhand der bei "ruhigem Wetter" relativ gleichmäßig voranschreitenden und zurückweichenden Wasserlinie können auf einfache Weise morphologische Gegebenheiten bzw., auf Dauer gesehen, morphologische Veränderungen erfaßt werden. Die Auf- bzw. Ablaufgeschwindigkeiten ergänzen die Strömungsmessungen, da sie Anhaltspunkte für die vom Meßgerät nicht erfaßbaren Bereiche liefern. Im Verlauf der Untersuchungen ist die videogestützte Morphologieanalyse in der Form eines einfachen Wasserlinienverfahrens durch die Aufzeichnung des Wasserstandes erweitert worden. Synchron zum Hauptvideo wurde mit einem weiteren Videoaufzeichnungsgerät der Wasserstand an einer Meßlatte aufgenommen. Durch diese Erweiterung war es möglich, den Flächenaufnahmen einen definierten Wasserstand zuzuordnen.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß man mit wenig Aufwand gleichzeitig Informationen über die Morphologie sowie über die Auflaufgeschwindigkeit des Wassers und die ungefähren Wellenhöhen erhält.



Abb. 20: Skizze zum Aufbau der Meßeinrichtung für das Video-Wasserlinien-Verfahren.

Die morphologische Karte (s. Anhang) der MThw-Felder in Dithmarschen vom August 1995 ist mit Hilfe digitalisierter Wasserlinien erstellt worden. Aufgrund der Größe des Video-Bildausschnittes lassen sich jeweils nur die Wasserlinien eines Lahnungsfeldes digitalisieren.

### 2.3 Hydrologische Messungen

### 2.3.1 Dauermeßketten

In beiden Testgebieten wurden im Bereich der nicht begrüppten Lahnungsfelder vier stationäre Druckmeßstationen sowie seewärts davor eine kombinierte Druck- und Strömungsmeßstation (Abb. 21) eingerichtet. Diese Meßeinrichtungen waren Bestandteil des KFKI-



Forschungsprojektes (s. Vorwort). Der Einbau und die Betreuung derselben erfolgten durch Mitarbeiter der Ämter für Land- und Wasserwirtschaft und des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste (FTZ) in Büsum.

Die Meßsignale gelangten über Seekabel, die unter der Wattoberfläche verlegt wurden, zu einem Computer, der sich in einer Landstation hinter dem Deich befand. Dieser steuerte die Aufzeichnung und Speicherung der Meßdaten. In Abständen von ca. einem Monat wurden die Daten auf Magnetbänder kopiert und zur Auswertung an die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie auf Norderney weitergeleitet.

Abb. 21: Dauermeßeinrichtung mit Strömungs- und Drucksensor.

# 2.3.2 Autonom arbeitende Strömungsmesser

Neben den Messungen an den fest installierten Geräten wurden monatlich und ereignisbezogen die Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung (Aanderaa / RCM 7) sowie die Schwebstofführung (Aanderaa / HydroBios-Trübungsmeßgerät) an unterschiedlichen Punkten im Lahnungsfeld gemessen. Für den Einsatz im Tidegebiet werden diese autonom arbeitenden Meßgeräte auf spezielle Wattgrundgestelle montiert (Abb. 22). Baulich bedingt können die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung ab einem Wasserstand von etwa 30 cm, die Schwebstofführung erst ab 50 cm gemessen werden. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt im 5-Minuten-Takt.



Abb. 22: Aanderaa-Strömungsmesser und Trübungssonde auf einem Wattgrundgestell.

### 2.3.3 Der Sediment-Transport-Autonomous-Recorder (STAR)

Der Sediment-Transport-Autonomous-Recorder (STAR) ist ein Flachwassermeßgerät, das in Zusammenarbeit mit der Firma Woodshole Instruments (USA) anhand von bereits bestehenden Komponenten vom FTZ, Arbeitsgruppe Küstengeologie / Küsteningenieurwesen, entwikkelt worden ist.

Das Meßgerät besteht aus dem eigentlichen Meßcomputer mit einem 8-Kanal AD-Wandler



und einem statischen RAM mit 12 MB Kapazität als Meßwertspeicher. Daran angeschlossen sind über Kabel mit 5 m Länge ein elektromagnetisch arbeitender Strömungsmesser, ein Drucksensor zur Aufnahme des Wasserstandes und der Wellenhöhen sowie ein Optical Backscatter zur Messung der Trübung (Abb. 23).

Der besondere Vorteil des Gerätes ist es, bodennahe Messungen in sehr unterschiedlichen Anordnungen der Sensoren durchführen zu können. Auch wenn sich der STAR während der Untersuchungen noch in der Erprobung befand, lieferten die damit gewonnenen Daten doch einen wichtigen Beitrag zur Beurteilung der hydrodynamischen Vorgänge im Küstenvorfeld.



#### 2.4 Laborarbeiten



Der Gang der Laborarbeiten ist dem nachfolgenden Flußdiagramm (Abb. 24) zu entnehmen.

Abb. 24: Flußdiagramm zum Ablauf der Laborarbeiten.

### 2.4.1 Schlämm- und Siebanalysen

Die Schlämm- und Siebanalysen erfolgten nach einem seit Jahren am Geologischen Institut der Universität Kiel, Arbeitsgruppe Küstengeologie, bewährten Verfahren (KÖSTER 1979) (s. Abb. 24).

Gesiebt wird im Trockensiebverfahren nach den Richtlinien der American Society of Testing and Materials (ASTM). Die Siebabstufung beträgt in der Regel 0.25 PHI<sup>o3</sup> (s. a. Abb. 25).

DIN 4022	Ton		Fein-	Sci Sci	hluft 000	Grob-	F	ein-	Sanc	0.630	Grob		Fein-	B Mit	8 8.8	Grob	63.00
mm	10070	0.002	0.004	0.008	910.0	1:000	0.063	0.125	0.250 0.250 0.254 0.354	0.500	0.707	2,000	4.000	9:000	16.000	32.000	64.000
	-	-+-		-+-	-+-	1-	111	40	411	41	ЩU	4	-+-		-+-	+	-1
ASTM, PHI	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	- 1	-2	- 3	- 4	- 5	- (

Abb. 25: Vergleichende Darstellung der verwendeten Korngrößenmaße.

# 2.4.2 Laseroptische Partikelanalysen

Um die Korngrößenfraktionen der überwiegend sehr feinkörnigen Wattsedimente zu bestimmen, wurden diese mit einem Lasergranulometer untersucht. Das verwendete CIS-Lasergranulometer ist ein aus der industriellen Produktüberwachung stammendes Partikel-Analysegerät (computerized inspection system). Mit Hilfe eines laseroptischen Verfahrens werden die Korngrößen und die Partikelzahl erfaßt (LOT GmbH 1989):

Ein Laserstrahl wird durch ein schnell rotierendes Prisma dermaßen abgelenkt, daß eine kreisförmige Strahlenebene in der Probenzelle entsteht. Diese wird von einer Photozelle detektiert. Kreuzt ein Partikel den Strahlengang, so wird über die Abschattungsdauer der Photozelle und die Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls dessen Kugel-Äquivalent-Durchmesser auf folgende Weise bestimmt :

$$S = V \cdot T$$

mit S = Korndurchmesser  $[\mu m]$ 

V = Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls [m/s]

T = Abschattungszeit der Photozelle [ns]

### <sup>3</sup> PHI<sup>o</sup> = $-\log_2 S$ ; S=Korngröße in mm

Diese Berechnung beruht auf der Annahme, daß die Bewegung des Teilchens im Strahlengang gegenüber der Rotationsgeschwindigkeit des Laserstrahls zu vernachlässigen ist. Obwohl das Gerät in der Lage ist, zwischen randlich und vollständig erfaßten Partikeln zu unterscheiden, kann es dennoch nicht die Form oder die Lage im Strahlengang erfassen (STÖRTENBECKER 1992).



Abb. 26: Funktionsweise des CIS-Lasergranulometers (LOT GmbH 1989).

Um später die Korngrößenverteilungen der einzelnen Sedimentproben miteinander vergleichen zu können, war es notwendig, den Durchmesser der Einzelkörner zu bestimmen. Aus diesem Grund wurden die Sedimentproben vor der eigentlichen Messung entsprechend vorbereitet: Zum einen mußten vorhandene Aggregate gelöst und die Bildung neuer verhindert werden. Dies wurde dadurch erreicht, daß man die Probe mit Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) aufschlämmte und mit Natriumpyrophosphat ( $Na_4P_2O_7 \cdot 10 H_2O$ ) versetzte. Das Wasserstoffperoxid wirkt dabei als Oxidationsmittel und löst vorhandene organische und anorganische Akkumulate. Das Natriumpyrophosphat verhindert als Anticoagulationsmittel erneute Aggregatbildung, indem es die Austauschflächen mit einwertigen Ionen besetzt. Direkt vor der Messung wurden die Proben ca. 10 Minuten mit einem Ultraschallgerät behandelt, um auch die letzten Aggregate auseinanderzubrechen.

Die Messung an den Wattsedimenten erfolgte im Durchflußverfahren in Form von jeweils zehn 1-minütigen Meßintervallen, die unmittelbar aufeinanderfolgten. Hierbei wurden die vorbereiteten Probenmengen quantitativ analysiert. Während eines solchen 10-minütigen Meßzeitraumes konnten so ca. 30.000 - 80.000 Partikel erfaßt werden. Da es sich bei den Sedimenten hauptsächlich um Schlickwattsedimente handelte, wurde ein Meßbereich von 0,5 µm bis 150 µm gewählt<sup>4</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Beim CIS-Lasergranulometer lassen sich zwei Meßbereich mit 0,5 - 150 μm sowie 1 - 300 μm wählen.

### 2.4.3 Radiographien

Die im Schnitt eines Sedimentkerns nicht immer deutlich zu erkennende interne Feinschichtung sowie Wechsellagerungen von tonigeren und sandigeren Schichtpaketen lassen sich mit der Radiographiemethode klar auflösen. Hierbei werden die strukturellen Inhomogenitäten eines Sedimentprofils durch die unterschiedliche Absorption von Röntgenstrahlen auf einem fotografischen Film sichtbar gemacht.

Zur Herstellung der Radiographie-Präparate wird ein frisches Sedimentprofil auf einem 100 x 60 x 8 mm Polystyrolträger fixiert und luftdicht in Folie eingeschweißt. Diese Art der Radiographie von Lockersedimenten ist besonders gut für weiche und bindige Sedimente geeignet (WERNER 1967).

# 2.4.4 Bestimmung des Wassergehalts und des Feststoffanteils

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte entsprechend der DIN 18121 T1. Dabei wird zunächst das Probengefäß mit der feuchten Probe gewogen. Anschließend wird die Probe im Trockenschrank bei 105°C bzw. bei ca. 60-65 °C (bei Proben mit hohem Anteil an organischen Substanzen) getrocknet. Da es sich bei der weitaus überwiegenden Zahl der Proben um Sedimente mit hohem organischen Gehalt handelte, wurden diese bei der geringeren Temperatur getrocknet. Danach wird durch Wägung das Trockengewicht der Probe bestimmt. Der dimensionslose Wassergehalt ergibt sich aus:

(Gewicht des Wassers in der Probe) : (Trockengewicht der Probe)

Der natürliche Wassergehalt des Bodens variiert in weiten Grenzen (Tab. 2). Er wurde in diesen Untersuchungen zusammen mit der Scherfestigkeit als Anhaltspunkt für die Konsolidierung der Wattsedimente herangezogen.

0,50 bis 5,0

erdfeuchter Sand	< 0,10
Löß	0,10 bis 0,25
Lehm	0,15 bis 0,40
Ton	0.20 bis 0.60

Tab. 2: Richtwerte für Wassergehalte in natürlichen Böden.

organische Böden

Der Feststoffanteil ist eine Volumengröße. Er beschreibt das Verhältnis vom Volumen der festen Bestandteile einer wassergesättigten Probe zum Volumen des Porenwassers. Bei Sedimentationsprozessen ist der Feststoffanteil gegenüber der absoluten Volumenzunahme ein objektiveres Maß für die eingetragene Materialmenge. Bestimmt wird zunächst das Feststoffvolumen, indem man das aus dem Gewicht des verdunsteten Wassers ermittelte Volumen von dem Volumen der Gesamtprobe (hier 5 cm<sup>3</sup>) subtrahiert. Der Feststoffanteil errechnet sich demnach aus:

(Gesamtvolumen der Probe - Volumen des Porenwassers) / (Gesamtvolumen der Probe)

#### 2.4.5 Kohlenstoffgehalt

Die bei weitem wichtigste Karbonatverbindung in marinen Sedimenten ist das Kalziumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>). Seine Gehalte können zwischen 0 und 100 % variieren. In geringen Mengen können auch Magnesiumkalzit, Dolomit und einige andere Karbonate vorhanden sein. Die Karbonatgehalte sind fast ausschließlich biogenen Ursprungs.

Die Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff (TOC) variieren zwischen  $\ll 0,1$  % in stark oxischen Sedimentschichten und 4% in vorwiegend schlickigen anoxischen Lagen. Da organisch gebundener Kohlenstoff maßgeblich an den diagenetischen Prozessen, insbesondere in den frisch abgelagerten obersten Sedimentschichten, beteiligt ist, sollte die Bestimmung dieser Kenngröße (TOC) weitere Informationen über die Erosionsfestigkeit der Sedimente liefern.

Für die Bestimmung der Karbonatgehalte wird das  $CO_2$  benutzt, das bei der Säurebehandlung oder bei der thermischen Zersetzung freigesetzt wird. Karbonat- $CO_2$  wird durch Säurezugabe zur eingewogenen Probe freigesetzt. Organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) wird durch Glühen der Probe im  $O_2$  - Strom zu  $CO_2$  oxidiert. Da hierbei auch das Karbonat- $CO_2$  quantitativ freigesetzt wird, ergibt sich die Menge an TOC aus der Differenz der Ergebnisse der Glühbestimmung und der Karbonat- $CO_2$  - Bestimmung.

Das CO<sub>2</sub> wird nach Reinigung in eine Bariumperchloratlösung eingeleitet, die auf einen pH-Wert von ca. 10 eingestellt ist. Die hierdurch bewirkte Erniedrigung des pH-Wertes wird coulometrisch auf den Ausgangs-pH-Wert zurücktitriert. Die dafür benötigte Elektrizitätsmenge ist ein unmittelbares Maß für die in der Bariumperchloratlösung absorbierte Menge an CO<sub>2</sub>.

### 2.5 Weiteres Datenmaterial

Zusätzliche Vermessungsdaten, Wattgrundkarten, Luftbilder sowie Pegel- und Winddaten wurden freundlicherweise von den Ämtern für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum zur Verfügung gestellt bzw. zur Einsicht freigegeben.

Wattgrundkarten und Luftbilder wurden herangezogen, um sich ein Bild von der Morphologie und der Beschaffenheit des Umfeldes der Testgebiete zu verschaffen. Die Lage kleinerer Zuund Abflüsse sowie von Hochflächen und kleinen Wattrücken, die auf Seekarten nicht verzeichnet sind, konnten so ermittelt werden.

Pegel- und Winddaten wurden in erster Linie zur Korrelation mit verschiedenen Parametern, die in den Testgebieten gemessen wurden, verwendet. Monatliche Mittelwerte des Tidehochwasserstandes sowie die Steig- und Fallzeiten wurden den Wasserstandslisten der Ämter für Land- und Wasserwirtschaft entnommen. Die Winddaten lagen als Stundenmittel auf Winddatenblättern des Deutschen Wetterdienstes vor.

### 2.6 Verfahren der Datenanalyse und -auswertung

### 2.6.1 Korngrößenverteilungen und -statistiken

Im Rahmen der Untersuchungen wurden ca. 2000 Sedimentproben mit dem Lasergranulometer analysiert. Das Ergebnis jeder Messung wird in einer 0,5 µm Stufung ausgegeben, woraus sich bei einem Meßbereich von 0,5 - 150 µm 300 Korngrößenintervalle ergeben. Die daraus resultierende Datenmenge ist in der Form der Rohdaten unüberschaubar und macht somit eine geeignete Zusammenfassung bzw. Parametrisierung der Meßwerte erforderlich.

Der Anteil bestimmter Kornklassen am Gesamtsediment, auch in der Form eines 3-Komponentensystems, wurde für die Daten der Partikelanalyse mit dem Programm FraPhi, das von M. Störtenbecker am FTZ entwickelt wurde, berechnet. Die Anzahlverteilung wird dabei in eine Volumenverteilung umgerechnet. Aus diesen Volumenverteilungen wurden wiederum korngrößenstatistische Parameter ermittelt. Sie geben einen schnelleren Überblick über die Korngrößenverteilung und damit auch über bestimmte Eigenschaften eines Sediments. Die korngrößenstatistischen Parameter wurden für diese Untersuchungen nach der Momenten-Methode (TUCKER 1985; MCMANUS 1991) berechnet: Das 1. Moment ist die mittlere Korngröße:

$$X = \sum f m \Phi / 100$$

Das 2. Moment gibt die Standardabweichung, bezogen auf die Korngrößenverteilung, also die Sortierung an:

$$\sigma = \sqrt{\sum f (m \Phi - \overline{X})^2 / 100}$$

Das 3. Moment beschreibt die Schiefe der Häufigkeitsverteilung :

$$\alpha_3 = \sum f(m \Phi - \overline{X})^3 / 100 \sigma^3$$

In den Formeln 1 - 3 steht f für den prozentualen Anteil jeder Korngrößenfraktion, bezogen auf das Gesamtgewicht/-volumen der Probe und m  $\Phi$  für den mittleren Wert einer jeden Korngrößenfraktion (in Phi-Einheiten).

#### 2.6.2 Digitale Geländemodelle und Bilanzierungen

Die im Kapitel 4 dargestellten morphologischen Bilanzierungen wurden aus den Daten der tachymetrischen Vermessungen berechnet.

Das Interpolieren der Watthöhen erfolgte mit dem Programm "Surfer" der Firma Golden Software. Für alle Vermessungen wurde je Lahnungsfeld ein Datengitter (Grid) von 50 \*50 Punkten (Punktabstand: 4 m) mit dem Interpolationsverfahren "Minimum Curvature" berechnet. Dieses ist neben dem Kridging das geeignetste Verfahren für geowissenschaftliche Untersuchungen (GOLDEN SOFTWARE 1995). Die Höhendifferenzen sowie die Massenbilanzierungen wurden ebenfalls mit dem Programm "Surfer" berechnet.

Vorher mußten jedoch die Daten der SW - NE (Nordfriesland) bzw. NW - SE (Dithmarschen) verlaufenden Vermessungsprofile rechnerisch um einen Bezugspunkt in die N - S - Richtung gedreht werden<sup>5</sup>. Dieser Hilfsschritt war erforderlich, um später die Watthöhe für jedes einzelne Lahnungsfeld getrennt berechnen zu können. Damit wurde gewährleistet, daß keine Interpolation über die Lahnungszäune hinweg stattfand.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Das Programm "Surfer" rechnet ausschließlich in einem N-S ausgerichteten Koordinatensystem.

#### 2.6.3 Video-Image-Processing

Aus den in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Übersichts-Videoaufnahmen wurden Standbilder entsprechend zu den jeweiligen Wasserständen mit Hilfe eines dafür ausgerüsteten Computers digitalisiert. In einem Bildbearbeitungsprogramm wurde eine Zeichenfläche im Verfahren des Color-Keying mit dem Videostandbild hinterlegt und die Wasserlinie manuell auf die Zeichenebene übertragen. Bei den Videoaufnahmen handelt es sich um Schrägansichten der Lahnungsfelder. Um aber eine Darstellung der Morphologie zu erhalten, die sich direkt mit den morphologischen Karten vergleichen läßt, wurde zu den digitalisierten Wasserlinien eine Perspektive eingefügt und diese zur Draufsicht korrigiert.

#### 2.6.4 Hydrologische Parameter

Eine ähnlich große Datenmenge wie bei den granulometrischen Untersuchungen fiel bei den hydrologischen Messungen an. Eine Parametrisierung der Meßwerte war hier ebenfalls unumgänglich.

#### Strömungskennwerte

Lokale Strömungsverhältnisse können anhand charakteristischer Strömungskennwerte beurteilt werden (Göhren 1969):

- die maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten (V<sub>f max</sub> und V<sub>e max</sub>) sowie die dazugehörige Strömungsrichtung,
- der Reststromvektor als vektorielles Integral über die Strömung einer vollen Tidephase und
- der Triftstromvektor, der sich aus der vektoriellen Differenz zwischen dem Reststrom einer windbeeinflußten Tide und dem Reststrom der mittleren Tide ergibt

Zur Beurteilung des Einflusses von Lahnungen auf die im Küstenbereich herrschenden Strömungen wurden die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet.

#### Wellenparameter

Für die Auswertung von Seegangsmessungen wird in der Literatur vielfach die signifikante Wellenhöhe ( $H_s$ ) herangezogen. Aus diesem Grund wie auch zur besseren Vergleichbarkeit der Wellendaten der stationären Dauermeßketten mit denen anderer Untersuchungen sowie mit den Messungen des STAR wurde diese Kenngröße aus der Vielzahl der ausgewerteten Wellenparameter ( $H_{max}$ ,  $H_{10}$ , etc.) ausgewählt. Die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  wird durch Mittelwertbildung aus dem Drittel der höchsten Wellen berechnet. Die Berechnung der verschiedenen Wellenparameter wurde anhand unterschiedlicher Auswerteverfahren, wie dem Zero-downcrossing, dem Zero-upcrossing und dem Crest-to-Crest-Verfahren, vorgenommen. Da die Ergebnisse der einzelnen Auswerteverfahren nicht wesentlich voneinander abwichen und die Berechnung der signifikanten Wellenhöhe für die Daten des STAR ebenfalls nach dem Zero-upcrossing - Verfahren erfogte, flossen nur die damit gewonnenen Daten in die Untersuchungen ein. Beim Zero-upcrossing werden die Wellen von einem bis zum nächsten positiven Nulldurchgang betrachtet.

#### 2.6.5 Statistische Analysen

Statistische Analysen wurden mit folgendem Ziel durchgeführt:

Es sollte überprüft werden, ob Veränderungen im Naturraum und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern, die im Gelände beobachtet wurden, auch anhand von Meßdaten mit statistischen Verfahren und mit entsprechender statistischer Sicherheit nachvollziehbar sind. Im Vordergrund standen hierbei die aus Meßwerten und durch Feldbeobachtungen gewonnenen Erkenntnisse. Die statistischen Analysen waren lediglich ein Mittel, um diese Erkenntnisse und Rückschlüsse mathematisch zu untermauern.

Mit Hilfe der Korrelationsanalyse kann der Zusammenhang zwischen zwei Datensätzen bewertet werden, wobei das Ergebnis unabhängig von den jeweiligen Maßeinheiten ist. Die Korrelation der Grundgesamtheit ergibt sich aus der Kovarianz zweier Datensätze, dividiert durch das Produkt aus deren Standardabweichungen.

Mit der Korrelationsanalyse kann untersucht werden, ob zwei Meßreihen miteinander verbunden sind, d.h., ob:

- hohe Werte des einen Datensatzes mit hohen Werten des anderen zusammenhängen (positive Korrelation),
- niedrige Werte des einen Datensatzes mit hohen Werten des anderen zusammenhängen (negative Korrelation) oder
- zwischen den Werten der beiden Datensätze kein Zusammenhang besteht.

Durch eine **Regressionsanalyse** wird der Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen beschrieben. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden lineare Regressionen durchgeführt. Dabei wird eine Gerade nach der Methode der kleinsten Quadrate durch eine Reihe von Meßwerten angepaßt.

Mit Korrelations- und Regressionsanalysen lassen sich einzelne Zusammenhänge oder Zusammenhänge zwischen wenigen Parametern untersuchen. Für komplexere Betrachtungen, die versuchen, einen Datenbestand vollständig zu beschreiben, sind multivariate Analyseverfahren notwendig. Wichtige Fragestellungen der vorliegenden Untersuchungen, die solche Analyseverfahren erforderten, waren:

- Können räumlich und zeitlich bedingte Unterschiede in der Sedimentbeschaffenheit anhand der gemessenen Parameter nachgewiesen werden?
- Lassen sich Annahmen über Wirkbeziehung von Kräften, wie Wind und Tidegeschehen, auf die am Sediment gemessenen Parameter statistisch nachvollziehen?

Um Sedimentproben durch den Vergleich verschiedener Parameter bestimmten Ablagerungsbereichen und -zeiträumen zuzuordnen, wurde das Verfahren der **Clusteranalyse** gewählt. Dies ermöglicht es, aus einer Vielzahl von Objekten (in diesem Fall Proben) die einander ähnlichen Proben in Gruppen (Cluster) zusammenzufassen.

Für eine derartige Clusterbildung schienen die im Rahmen der SET-Messungen aufgenommenen Kenngrößen besonders geeignet, da sie sowohl räumlich als auch zeitlich relativ gleichmäßig verteilt sind.

Die zur Gruppierung herangezogenen Parameter sind im einzelnen:

- die Höhenänderung der Wattoberfläche,
- der Wassergehalt, die Scherfestigkeit und der Feststoffanteil im Sediment sowie
- die Anteile der Korngrößenfraktionen Sand, Grobsilt und der Feinfraktion < 20  $\mu$ m am Gesamtsediment.

Die Clusteranalyse erfolgt in zwei Schritten:

- 1. Wahl des Proximitätsmaßes: Dabei wird für jeweils zwei Objekte die Ausprägung der acht Parameter untersucht, um die Unterschiede bzw. Übereinstimmungen durch einen Zahlenwert (Distanz) anzugeben.
- 2. Wahl des Agglomerationsalgorithmus: Hierbei erfolgt die eigentliche Verknüpfung ähnlicher Objekte zu Gruppen.

Als Proximitätsmaß diente die quadrierte euklidische Distanz, eines der am häufigsten verwendeten Ähnlichkeitsmaße. Für die anschließende Agglomeration wurde das Verfahren nach WARD (1963) verwendet. Im Gegensatz zu den Linkage-Verfahren, die Gruppen aufgrund geringer Distanzen bilden, vereinigt das Ward-Verfahren Objekte miteinander, die die Streuung (Varianz) innerhalb einer Gruppe (Cluster) am wenigsten erhöhen.

# 3 Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen und der Vorlandarbeiten

Die Erfassung der morphologischen und sedimentologischen Entwicklung im Küstenvorfeld während unterschiedlicher Stadien der Vorlandarbeiten (Ausbaustufe der Lahnungsfelder und Art der Begrüppung) waren ein zentraler Bestandteil der Fragestellung und Zielsetzung. Daher erscheint eine zeitliche Aufschlüsselung der durchgeführten Untersuchungen in Verbindung mit dem Fortschreiten der Vorlandarbeiten für die Beurteilung der Ergebnisse sinnvoll.

Die beiden Testgebiete in Dithmarschen und Nordfriesland (s. Kap. 1.6) lassen sich in eine Zone außerhalb der Vorlandbauwerke und den Bereich innerhalb der Lahnungsfelder aufteilen (Abb. 27). Letzterer ist wiederum bezüglich der Ausbaustufe der Lahnungsfelder, der Höhe der Lahnungszäune und der Begrüppung gegliedert.

### 3.1 Verlauf der Vorlandarbeiten

Da die Untersuchungen und die Gliederung der Testgebiete durch die Vorlandarbeiten bestimmt wurden, erfolgt zunächst die Beschreibung der Ausbaustufen der Lahnungen und der unterschiedlichen Lahnungsfeld-Konstruktion sowie der Art der Begrüppung.

Im Testgebiet Dithmarschen waren zu Beginn der Untersuchungen noch keine Lahnungen vorhanden. Diese wurden vom Frühjahr bis zum Herbst 1995 vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Heide errichtet (Tab. 3). Geplant war ursprünglich der Bau von zwei deichnahen und zwei seewärtigen Lahnungsfeldern mit jeweils unterschiedlicher Lahnungshöhe und einer Fläche von 200 x 200 m je Teilfeld. Die Lahnungsoberkante der südöstlichen Felder wurde bis auf die Höhe des mittleren Tidehochwassers, die des nordöstlichen Feldes einschließlich der Mittellahnung auf MThw + 0,3 m, angepaßt (Abb. 27). Beschränkungen durch das Amt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer verhinderten den Bau des seewärtigen Feldes mit einer Lahnungshöhe von MThw + 0,3 m. Der Anlage von sogenannten Schutzlahnungen, die eine Vergleichbarkeit mit dem geschlossenen Lahnungsfeldgürtel in Nordfriesland gewährleisten sollten, wurde nur zum Teil zugestimmt.

Die Ausgangssituation im Testgebiet Nordfriesland unterschied sich insofern von der in Dithmarschen, als daß hier bereits die landnahen Lahnungsfelder vorhanden waren (Abb. 27). Im gleichen Zeitraum wie in Dithmarschen wurden die seewärtigen Felder des Testgebietes und der angrenzenden Bereiche ausgebaut. Die Höhe der Lahnungsoberkante der bereits bestehenden Felder entsprach der Höhe des MThw. Die neugebauten Lahnungsfelder, die von der Mittellahnung des Testgebietes in Richtung SE errichtet wurden, erhielten die gleiche Höhe, die nach NW verlaufenden Felder wurden auf MThw + 0,3 m ausgebaut. Durch die Einbeziehung der "Begrüppungsfrage" im Rahmen einer Diplomarbeit wurde das Testgebiet um die beiden nordwestlich angrenzenden Lahnungsfelder erweitert. Das landnahe Feld wurde im Frühjahr 1996 voll- und das seewärtige sparbegrüppt. Bei der Vollbegrüppung wird, wie in Kapitel 1.4.1 beschrieben, mit dem Grüppenbagger in Abständen von 10 m jeweils ein Entwässerungsgraben zum nächsten Ableiter gegraben. Die Sparbegrüppung beschränkt sich auf zwei zusätzliche Grüppen parallel zu den seitlichen Anwurfgrüppen.

Die Bauweise und die Konstruktion der Lahnungsfelder der beiden Testgebiete wies folgende wesentliche Unterschiede auf, die z.T. auch der Abbildung 27 zu entnehmen sind:

Tab. 3	: Unters	chiede in	der	Lahnungsbauv	veise der	beiden	Testgebiete
--------	----------	-----------	-----	--------------	-----------	--------	-------------

Testgebiet:	Dithmarschen	Nordfriesland
Materialtransport	mit Loren auf Gleisen	mit Schuten und Booten
Abweiser	+	
Buschdeckwerk	+	-
(100 m)-Querentwässerung	-	+

In Dithmarschen wurden zusätzlich an den Hauptlahnungen im Abstand von 100 m und an den Querlahnungen im Bereich der Lahnungstore sogenannte "Abweiser" angebracht. Hierbei handelt es sich um kurze Lahnungsabschnitte, die quer zum eigentlichen Lahnungszaun angebracht wurden und zu beiden Seiten hin flach auslaufen.

Während in Nordfriesland das Material aus der Anwurfgrüppe einfach an der Lahnung abgesetzt wurde, stabilisierte in Dithmarschen ein darunter liegendes Buschdeckwerk zusätzlich den Anwurf. Die 100 m - Querentwässerungen (Ableiter), die in Nordfriesland die Lahnungsfelder küstenparallel teilen, fehlen in Dithmarschen. Dafür wurden hier die Anwurfgrüppen um die Abweiser herumgezogen.





Abb. 27: Gliederung der Testgebiete und Ausbaustufen der Lahnungsfelder

0,70 0.2

cm in 0,7 m Abstand

### 3.2 Verlauf der Untersuchungen

Der Komplex der Naturmessungen gliederte sich in vier Untersuchungsabschnitte:

- die Aufnahme des "Nullzustandes",
- die Untersuchungen während des Lahnungsbaus,
- die Erfassung der Veränderungen nach dem Lahnungsbau und
- die Untersuchungen bezüglich der Auswirkung verschiedener Begrüppungsarten.

Zu Beginn und zum Abschluß der Untersuchungen wurden in beiden Testgebieten umfangreiche Bestandsaufnahmen durchgeführt. Die Gebiete wurden großräumig tachymetrisch vermessen, sedimentologisch beprobt und kartiert. Zudem wurde die Besiedlungsdichte benthischer Fauna und Flora mit aufgenommen.

Die weiteren Untersuchungen erfolgten überwiegend regelmäßig in bestimmten Zeitintervallen. Sie waren räumlich auf den unmittelbaren Bereich in und um die Lahnungsfelder beschränkt. Zudem wurde eine begrenzte Anzahl von Einzeluntersuchungen durchgeführt.

# 3.2.1 Regelmäßig durchgeführte Untersuchungen

Halbjährliche Vermessungen, Bestandsaufnahmen und Besiedlungskartierungen fanden jeweils im Frühjahr und Herbst statt.

Die hydrologischen Messungen an den fest installierten Dauermeßketten erfolgte kontinuierlich vom Herbst 1994 bis zum Herbst 1996 (Nordfriesland) bzw. Sommer 1995 (Dithmarschen). Bedingt durch den Diebstahl des Meßrechners im Testgebiet Dithmarschen liegen hier keine Daten für die Zeit nach dem Lahnungsbau vor.

Strömungs- und Suspensionsmessungen mit der Gerätekombination Aanderaa RCM 7 / Hydrobios - Trübungssonde (s. Kap. 2.3.2) wurden mehrmals im Frühjahr und im Herbst durchgeführt. Die Speicherkapazität der autonom arbeitenden Meßgeräte erlaubte einen bis zu vier Wochen dauernden Einsatz, ohne das Speichermedium zu wechseln. In den Sommern verhinderte die starke Algenblüte und in den Wintern der "Eisgang" den Einsatz dieser Meßgeräte.

Die Messungen mit dem Sedimentation-Erosion-Table (SET) sowie die begleitenden sedimentologischen und bodenphysikalischen Untersuchungen erfolgten monatlich, waren aber ebenfalls während des Eisganges nicht möglich. Zusätzlich zu den sedimentologischen und bodenphysikalischen Untersuchungen wurde ab Juni 1995 der Gehalt des organisch gebundenen Kohlenstoffes und des Gesamtkohlenstoffes am Sediment annähernd vierteljährlich bestimmt. Im April 1996 wurde mit den Untersuchungen zur Morphologie und Sedimentstabilität von begrüppten Lahnungsfeldern begonnen. Die weiteren Feldarbeiten wurden vierteljährlich bis zum April 1997 fortgeführt.

# 3.2.2 Einzeluntersuchungen

Hierzu zählen Untersuchungen, die von vielen Faktoren, wie dem Wetter, der Verfügbarkeit von einer ausreichenden Anzahl an Hilfskräften, aber auch vom Entwicklungsstand neuer Meßverfahren abhingen:

- Das Video-Wasserlinien-Verfahren, das sich aus der einfachen "Überwachung" der Flutund Ebbphasen entwickelt, hatte konnte als Meßverfahren nur bei sehr ruhigen Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten angewendet werden.
- Der Defekt einer internen Sicherungs-Batterie war dafür verantwortlich, daß der Sediment-Transport-Autonomous-Recorder (STAR) nur bei einem einzigen Meßeinsatz im Untersuchungszeitraum Daten aufnehmen konnte.
- Im September 1995 wurde die flächenhafte Suspensionsbeprobung der Testgebiete sowohl im auflaufenden als auch im ablaufenden Wasser durchgeführt.
- Im Oktober 1995 und im November 1996 wurden im Testgebiet Nordfriesland bzw.
   Dithmarschen jeweils zwei Sedimentkerne von bis zu 5 m Länge erbohrt.

Eine detaillierte Übersicht über den chronologischen Ablauf der Vorlandarbeiten und Untersuchungen geben die folgenden Abbildungen.

Nordfriesland	1994													
Dithmarschen	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez		
Bestandsaufnahmen														
				in the second se						5.	1.2			
Vermessungen										den.				
Geräteentwicklung			E		States 6 3	15 25 26 8								
und -installation			6			nta internet. Anti-terret	20.20 20 20	Sea Thead						
SET - Messungen														
									2	K I		XX		
Schwebstoff-									1/ 17		al sheet			
Messungen									1.4		$ \psi _{\mu} = r_{\mu}$			
Strömungsmessungen							[1] 2B		2	isa.				
									1					
Ereignisse							Algei	nblüte		]				

Abb. 28: Untersuchungen im Jahr 1994.

Nordfriesland	1995													
Dithmarschen	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez			
Bestandsaufnahmen														
	1		1						13.3					
Vermessungen										100	54). 1			
				1.5										
SET - Messungen	L								_					
		X	X	X	X	2	X	2		X 2	K			
Schwebstoff-		的影响							MAN S	]				
Messungen		2 - 2 - M-	1-1-	$1 \leq 5^{4}$				* (24) (P)						
Strömungsmessungen								論的	123		]			
				- 14 - 4 - A										
Wellenmessung	1 I I I I I I I I I I I I I I I I I I I													
trenenneosang		-												
Lahnungshau	1								Sec. 2					
Lannungebad	0				5 A & Martin	Sidder :	196 <sup>-1</sup>	14 (zł.	100					
Ereignisse	Eis	]			Alge	enblüte					Eis			

Abb. 29: Vorlandarbeiten und Untersuchungen im Jahr 1995.

Nordfriesland	1996												
Dithmarschen	Jan Feb	Mär	Apr	Ma	i Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez		
Bestandsaufnahme		85.88	La des la la des		and the same space		a series and a series		ten en e	Reporting to the of	I YE WEAT AND I		
		1	òx .						- (				
Vermessungen			2643				_			52	1		
			£	14.0						1. 2			
SET - Messungen				-			_						
			2	6	X	2	X	2	ζ	2	K		
Schwebstoff-								_		$\{g_i\}_{i=1}^{n-1}$			
Messungen							1						
Strömungsmessungen					的现在分词				193.5	22) z			
						a							
Wellenmessung	1												
Grüppenarbeiten													
Ereignisse	Eis	1.1	(1.1		-	Alger	blüte	-	-				

Abb. 30: Vorlandarbeiten und Untersuchungen im Jahr 1996.

# 4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Beschreibung der sedimentologischen und morphologischen Ergebnisse läßt sich entsprechend der Art der durchgeführten Untersuchungen und Analysen nach drei Gesichtspunkten gliedern:

- Zunächst werden die sedimentologischen und morphologischen Gegebenheiten in den Testgebieten zu Beginn sowie zum Ende der Untersuchungen flächenhaft dargestellt und deren Veränderung von einer zur jeweils nächsten Bestandsaufnahme anhand von ausgesuchten Profilen beschrieben (vgl. Kap. 2.1). Daran schließen sich Bilanzierungen der Sedimentations- und Erosionsvorgänge für die Zeit vor und nach dem Lahnungsbau an. Die Ergebnisse sind nach Testgebieten getrennt dargestellt.
- Danach werden die Resultate der Untersuchungen zur Sediment- und Morphodynamik beschrieben und erläutert (vgl. Kap. 2.2). Dabei wird in erster Linie nach der Lage der untersuchten Wattbereiche zu den Vorlandbauwerken und erst in zweiter Linie nach den Testgebieten unterschieden.
- Schließlich wird versucht, die durch Feldbeobachtungen und -messungen gewonnenen Ergebnisse durch statistische Verfahren zu verifizieren, um damit ihre Aussagekraft für die Vorgänge und Veränderungen im Küstenvorfeld, speziell in den Lahnungsfeldern, zu festigen.

Im ersten Abschnitt sind in den Abbildungen 31 und 34 sowie 37 und 40 die flächenhafte Verteilung der Oberflächensedimente sowie die Morphologie zu Beginn und zum Ende der Untersuchungen dargestellt. Die Unterteilung der Sedimente erfolgte in Anlehnung an FIGGE et al. (1980) (s. Kap. 1.5.1). Da die Untersuchungen im Herbst (1996) endeten, wurde zur besseren Vergleichbarkeit für die Ausgangssituation ebenfalls die Sedimentverteilung im Herbst (1994) gewählt.

In den morphologisch-sedimentologischen Profilen (Abb. 32, 33, 38 u. 39) ist die Verteilung der Kornfraktion < 63  $\mu$ m in den Oberflächensedimenten wie auch in tiefer gelegenen Sedimentschichten (5 - 10 cm und 10 - 15 cm Entnahmetiefe) in Relation zur Morphologie sowie im Vergleich der Untersuchungsabschnitte veranschaulicht. Die Lage der Profile ist den jeweiligen Sedimentverteilungskarten zu entnehmen (Abb. 31 u. 34 sowie 37 u. 40).

Bei den sich anschließenden Sedimentations- und Erosionsbilanzen (Abb. 35 u. 36 sowie 41 u. 42) sind neben den abgebildeten Lahnungsfeldern die Beträge der Volumenveränderungen angegeben. Sie beziehen sich jeweils auf die Flächen des betreffenden Lahnungsfeldes bzw. auf einen Bereich, der der Größe eines Lahnungsfeldes entspricht.

### 4.1 Sedimentverteilung und Morphologie im Testgebiet Dithmarschen

Da im Testgebiet Dithmarschen bis etwa zur Hälfte des Untersuchungszeitraumes noch keine Lahnungsfelder existierten, konnten hier die unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen und morphologischen Entwicklungen im unbebauten Watt mit denen nach Errichtung der Lahnungen verglichen werden.

#### 4.1.1 Veränderungen vor dem Lahnungsbau

Zu Beginn der Untersuchungen bot sich dem Betrachter im Testgebiet Dithmarschen ein sehr gleichförmiges Bild der Wattfläche vor dem Deich. Von 1,10 m über NN an der Steinkante des Deichfußes fiel die Geländeoberfläche kaum merklich auf knapp unter 0,90 m NN in ca. 400 m Uferentfernung ab, um dann auf den folgenden 400 m wieder auf über 1,00 m NN anzusteigen. Die wesentlichen morphologischen Elemente waren eine Hochfläche im zentralen Bereich sowie zwei Prielarme, die sich von NNE in das Gebiet hineinschnitten (Abb. 31, 32 u. 70). In etwas geringerem Maße wurde das Gebiet durch einen Prielkopf im SW morphologisch geprägt.

Auch in der Sedimentverteilung zeichnete sich bei den anfänglichen Beprobungen und Kartierungen eine hohe Gleichförmigkeit ab. Über 80 % der Oberflächensedimente bestanden aus Schlickwatt. Die wenigen Mischwattflächen lagen im zentralen und im nordwestlichen Bereich des Testgebietes (Abb. 31). Sedimente mit sehr hohen Feinkornanteilen (< 63  $\mu$ m) und geringer Verfestigung waren vor allem vor dem Deichfuß und im Bereich des seewärtigen Prielarmes zu finden (Abb. 32). Entsprechend dieser Sedimentverteilung und -beschaffenheit verhielt sich auch die Verbreitung der benthischen Fauna. Die Besiedlungsdichte von *Heteromastus filiformis* und *Hydrobia ulvae* nahm vom Deichfuß aus seewärts ab, die von *Arenicola marina* stieg deutlich an.

Von den beiden nordöstlichen Prielarmen, die im April 1994 nur undeutlich zu erkennen waren, begann der seewärtige im Sommer einen Prielkopf im Bereich der späteren Mittellahnung in ca. 350 m Uferentfernung auszubilden (Abb. 32). Gleichzeitig vertiefte er sich, und sein Verlauf zeichnete sich durch zunehmend schärfere Ränder deutlicher ab. Im Spätherbst wurden die Strukturen wieder undeutlicher und verschwanden zum Winter hin ganz.

Ab dem Jahresbeginn 1995 lag das Testgebiet für einige Wochen bis zu einer Uferentfernung von 200 - 300 m unter einer kompakten, mehrere Dezimeter mächtigen Treibeisdecke, die durch starke nordwestliche Winde hier zusammengeschoben worden war.

Bis zum Herbst 1994 sedimentierten insgesamt geringere, bis zum Frühjahr 1995 deutlich größere Mengen feinkörnigeren Materials (Abb. 32). Im landnahen Bereich bis ca. 200 m Uferentfernung nahmen zudem die Gew.% - Anteile < 63  $\mu$ m mit der Tiefe geringfügig zu.



Abb. 31: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Dithmarschen (Herbst 1994).



Abb. 32: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil B im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau.
Die sedimentologischen und morphologischen Veränderungen während der Lahnungsbauarbeiten wurden in starkem Maße durch den Eingriff des Menschen beeinflußt. Eine Trennung von anthropogen und natürlich bedingten Veränderungen ist für diesen Zeitraum nicht oder nur zum Teil möglich.

## 4.1.2 Veränderungen nach dem Lahnungsbau

Nach dem Bau der Lahnungen sedimentierte in den Feldern zunehmend feinkörnigeres Material. Die Gew.% - Anteile < 63  $\mu$ m erreichten in den Oberflächensedimenten Werte zwischen 60 % und annähernd 90 % und lagen damit deutlich über denen im Liegenden (Abb. 33).

Mit der Zunahme des Feinkornanteils in den Lahnungsfeldern verschob sich auch der Übergang von der *Heteromastus*- und *Hydrobia*- Besiedlung zur *Arenicola*-Besiedlung weiter seewärts. Besonders in den Wintermonaten bildeten sich auf den Schlicksedimenten ausgedehnte Diatomeen-Rasen aus. Die bevorzugte Verbreitung im Winter läßt sich möglicherweise durch die geringeren Mengen an Phytoplankton im Wasser erklären.

Wie bereits vor dem Lahnungsbau sedimentierte im Winterhalbjahr (1995/96) deutlich mehr Material als im Sommerhalbjahr (1996). Da in dem betreffenden Winter das Eis vor Ort gebildet wurde und dort auch für fast 3 Monate liegenblieb, sind die Gründe für die größeren Ablagerungsraten eher in einem erhöhten Sedimentangebot und in der seegangsdämpfenden Wirkung der Eisdecke zu suchen. Insgesamt fiel jedoch die Geländeerhöhung im Vergleich zum Winter vor dem Lahnungsbau (1994/95) deutlich geringer aus (Abb. 33). Dies dürfte durch die anhaltenden Ostwind-Lagen (vgl. Abb. 79, Kap. 6.2.2) bedingt sein, in denen das Testgebiet zum Teil mehrere Tiden lang nicht vom Wasser überflutet wurde und somit auch keine Sedimentation erfolgen konnte.

Die Sedimentation sehr feinkörnigen Materials setzte sich auch im darauffolgenden Sommerhalbjahr in den Lahnungsfeldern fort. Im Umfeld des Testgebietes war dagegen besonders in den Frühjahrsmonaten eine flächenhafte Ausweitung von Erosionsmerkmalen zu beobachten. Diese bestanden in aufgebrochenen Diatomeenrasen und flachen Kolken, in denen Röhren des *Pygospio elegans* freigespült waren.

Eine besondere Bedeutung bei den Veränderungen durch den Lahnungsbau kam dem schon zuvor beschriebenen seewärtigen Prielarm zu. Bereits während des Baubeginns bildete sich die Rinne des Prielarmes wieder aus. Im Gegensatz zu der Zeit vor den baulichen Eingriffen sedimentierte dieser im darauffolgenden Winter



nicht wieder zu, sondern blieb gut sichtbar erhalten und vertiefte sich weiter (Abb. 33).



Abb. 33: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil B im Testgebiet Dithmarschen nach dem Lahnungsbau.

Durch die vermehrte Sedimentation feinkörnigen Materials nach dem Lahnungsbau wurden zum Ende der Untersuchungen über 90 % der Fläche im Testgebiet Dithmarschen von Schlickwatt eingenommen (Abb. 34).



Abb. 34: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Dithmarschen (Herbst 1996).

## 4.1.3 Bilanz der Sedimentations- und Erosionsvorgänge

Im Sommerhalbjahr 1994 war die durch Sedimentation bedingte Volumenzunahme mit 1300 -1600 m<sup>3</sup> je Feld relativ gleichmäßig verteilt. Im Winterhalbjahr stieg der Zuwachs im nördlichen und in den deichnahen Feldern auf 2600 - 3300 m<sup>3</sup> an, im westlichen Feld änderte er sich jedoch nicht. Der Anstieg der Volumenzunahme läßt sich im nördlichen Feld durch das Zuschlicken des Prielarmes und in den deichnahen Feldern möglicherweise durch die Eiseinwirkung erklären. Demzufolge wurde die Geländeoberfläche im Jahr vor dem Lahnungsbau im Mittel um bis zu 10 cm angehoben.

Der mittlere Höhenanstieg war nach dem Bau der Lahnungen eher rückläufig. Während die Volumenzunahme vom Frühjahr 1994 bis zum Frühjahr 1995 in den nordöstlichen Feldern 4100 bis 4600 m<sup>3</sup> je Feld betrug, sank sie im Jahr nach dem Lahnungsbau auf unter die Hälfte. In den südwestlichen Lahnungsfeldern war die Tendenz nur gering regressiv. Die erwartete Steigerung der Sedimentationsrate konnte nur an vergleichsweise wenigen Stellen gemessen werden. Bei der Beurteilung dieses Sachverhalts ist jedoch zu beachten, daß die massiven Erosionen in den Entwässerungsrinnen und am Anwurf sowie die fehlende Wasserbedeckung im Winter (1995/96, s.o.) die Bilanzen deutlich stärker beeinflussen als die relativ gleichmäßig verteilte Sedimentation auf den ebenen Flächen. Aus den zuvor genannten Gründen und in Anbetracht der Ausweitung von Erosionsmerkmalen im Umfeld müssen diese geringfügig rückläufigen Sedimentationsraten differenziert beurteilt werden. Sie sind somit nicht von vornherein als negativer Effekt der Lahnungen zu werten.

Dahingegen darf die Entwicklung im Bereich des Lahnungskopfes der Mittellahnung, zwischen dem Prielarm und dem seewärtigen Lahnungstor, schon als negative Auswirkung des Lahnungsbaus angesehen werden. Die baulich bedingte Unterbrechung und zwangsweise Veränderung der natürlichen Zu- und Abflußverhältnisse führte zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich. Zur Entlastung der Mittellahnung wurde eine zusätzliche Entwässerungsrinne um den Lahnungskopf bis zum Prielarm gegraben (Abb. 67, Kap. 4.8). Die Folge war eine überdeutlich ausgeprägte Erosion von mehr als 20 cm im Lahnungstor, am Lahnungskopf und in der Rinne des Prielarmes (Abb. 36).



Abb. 35: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau.



Abb. 36: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Dithmarschen nach dem Lahnungsbau.

## 4.2 Sedimentverteilung und Morphologie im Testgebiet Nordfriesland

Da im Testgebiet Nordfriesland bereits deichnah Lahnungen vorhanden waren, konnten hier die sedimentologischen und morphologischen Veränderungen von der ersten Ausbaustufe der Lahnungsfelder zur nächsten untersucht werden.

## 4.2.1 Veränderungen vor dem Ausbau der Lahnungen

Das Testgebiet Nordfriesland war zu Beginn der Untersuchungen innerhalb der bereits bestehenden Lahnungsfelder morphologisch wesentlich kleinräumiger strukturiert als im Bereich davor (Abb. 37). Entsprechend ihrer Entstehung lassen sich anthropogen und natürlich bedingte Strukturen unterscheiden. Die beiden bereits bestehenden Lahnungsfelder waren durch die Teilung eines großen Feldes (440 x 200 m) im Herbst 1993 entstanden. Die dabei neu angelegten Entwässerungen und Anwurfstreifen sowie die Relikte früherer Grüppenarbeiten bilden die anthropogen bedingten Strukturen. Kolke um Schlickgrasansammlungen (*Spartina anglica*) herum und Bereiche mit Queller (*Salicornia europaea*), die gegenüber dem nichtbewachsenen Umfeld etwas erhaben wirken, sind natürlichen Ursprungs.

Auch die Vorlandneigung ist in den Lahnungsfeldern mit 1:400 wesentlich größer als seewärts davor (1:1000). Vom Deichfuß mit einer Höhe von 1,40 m über NN fällt die Geländeoberfläche in den Lahnungsfeldern auf ca. 0,90 m NN ab. In den Lahnungstoren werden Tiefen von 0,60 m NN erreicht. Vor den Lahnungsfeldern liegen die Höhen bei 0,90 m NN an der Lahnung und 0,50 m NN in 800 m Uferentfernung.

Die Oberflächensedimente waren zu Beginn der Untersuchungen deutlich grobkörniger als im Testgebiet Dithmarschen. Schlickwattflächen beschränkten sich fast ausschließlich auf den Bereich der bereits bestehenden Lahnungsfelder. Deren Oberfläche war zumeist relativ glatt. Seewärts davor und in einem deichnahen Streifen herrschten grobkörnigere und auch wesentlich festere Ablagerungen vor (Abb 37). Die Oberfläche der Mischwattsedimente war durch Oszillationsrippeln und Arenicola-Kothaufen deutlich rauher als die im Schlickwatt. Üblicherweise werden die Sedimente zum Deichfuß hin feinkörniger (s.a. Testgebiet Dithmarschen). Daher sind die Sandvorkommen in unmittelbarer Nähe vor dem Deichfuß ungewöhnlich. Sie dürften jedoch als Relikte des Deichbaus angesehen werden, der erst vor einigen Jahren abgeschlossen wurde.

Während in den schlickig weichen Ablagerungen der Lahnungsfelder vorwiegend Nereis diversicolor und Hydrobia ulvae vorkamen, dominierte im Mischwatt des seewärtigen Bereiches Arenicola marina.

Die Sedimentationsraten waren auf dem untersuchten Profil A gegenüber denen auf dem Profil B in Dithmarschen deutlich geringer (s. a. Kap. 4.1.1). Die Sedimente in den Lahnungsfeldern wurden zum Hangenden, die vor den Feldern zum Liegenden hin feinkörniger (Abb. 38).



Abb. 37: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Nordfriesland (Herbst 1994).



Abb. 38: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland vor dem Lahnungsbau.

#### 4.2.2 Veränderungen nach dem Ausbau der Lahnungen

Nach dem Ausbau der Lahnungen nahmen die Sedimentationsraten in den alten Lahnungsfeldern deutlich ab (Abb. 39). Die Sedimentverteilung und -beschaffenheit änderte sich bis zum Frühjahr 1996 nur unwesentlich. Dies zeigte sich sowohl bei der Grobansprache während der Kartierungen als auch bei den granulometrischen Analysen der Sedimente. Eine Veränderung in der Besiedlung mit benthischen Organismen konnte, abgesehen von der starken Ausweitung der Pioniervegetation, ebenfalls nicht beobachtet werden.

In den neugebauten Lahnungsfeldern kamen dagegen größere Mengen meist feinkörnigeren Materials zur Ablagerung. Diese zeichneten sich im Gelände durch eine besonders lockere Lagerung aus, die oberflächlich teilweise sogar zu regelrechtem Fließverhalten neigte.

Zunächst beschränkte sich die Schlicksedimentation auf die deichnahe Hälfte der neuen Felder. Erst ab dem Sommer 1996 dehnte sie sich auf die gesamte Fläche und auch auf den Bereich der alten Lahnungsfelder aus.

Somit kam es vor allem in den neuen Feldern zu einer starken Ausdehnung der Schlickwattflächen infolge des Lahnungsbaus. In den bereits vorher bestehenden Lahnungsfeldern waren die Veränderungen vergleichsweise sehr gering. Im Bereich seewärts davor dominierte weiterhin das festere Mischwatt (Abb. 40).



Abb. 39: Entwicklung der Morphologie und der Sedimentzusammensetzung auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland nach dem Lahnungsbau.



Abb. 40: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten im Testgebiet Nordfriesland (Herbst 1996).

## 4.2.3 Bilanz der Sedimentations- und Erosionsvorgänge

Der Volumenzuwachs an Wattsedimenten im Sommerhalbjahr 1994 betrug im westlichen Feld ca. 700 m<sup>3</sup> und nahm bis auf ca. 1100 m<sup>3</sup> im östlichen Feld zu. Im folgenden Winterhalbjahr war die Sedimentationstendenz insgesamt etwas rückläufig. Sie nahm mit ca. 1200 m<sup>3</sup>/ Feld im Norden auf Werte von -450 m<sup>3</sup> im südlichen Lahnungsfeld ab. Die dort gemessene Erosion (s.a. SET-Meßstelle 7, Kap. 4.5.2) kann auf Eisdrift und die vor den Lahnungsfeldern herrschenden Abflußverhältnisse zurückgeführt werden. Aus den Volumenbilanzen ergab sich für das Jahr vor dem Ausbau der Lahnungsfelder eine mittlere Geländeerhöhung von 1 cm im südlichen Bereich des Testgebietes bis auf 5 cm im Norden. Eine Sedimentation von mehr als 10 cm und zum Teil auch über 20 cm konnte nur in den Entwässerungsgräben gemessen werden. Erosionsbeträge von mehr als 10 cm ließen sich vorwiegend im Bereich des Anwurfs ermitteln. Seewärts vor den Lahnungsfeldern beschränkte sich die Erosion auf den Bereich vor dem östlichen Feld.

Die Morphologie in den alten deichnahen Lahnungsfeldern änderte sich nach den Baumaßnahmen nur unwesentlich. Sedimentation und Erosion glichen sich annähernd aus. Dies belegt auch die Volumenbilanz; mit einem Volumenzuwachs von 80 bis 720 m<sup>3</sup> je Feld für das Jahr nach dem Lahnungsbau liegt die mittlere Sedimentationsrate bei unter einem Zentimeter.

Zu den auffälligsten Veränderungen in der Morphologie der neugebauten Lahnungsfelder kam es im Bereich der Entwässerungen und des Anwurfs. Die Ableiter und Anwurfgrüppen sedimentierten vom Ende her zu. In der Hauptentwässerung fand Erosion vor allem im Bereich der Lahnungstore mit über 20 cm statt. An fast allen Anwürfen wurde ebenfalls Erosion beobachtet. Besonders auffällig waren die Substanzverluste an der Mittellahnung (Abb. 70). Die Volumenzunahme hat sich im westlichen Feld gegenüber dem Jahr vor dem Ausbau der Lahnungen annähernd verdoppelt, im südlichen Feld sogar vervierfacht.



Abb. 41: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Nordfriesland vor dem Lahnungsbau.



Abb. 42: Morphologie und Sedimentationsbilanz im Testgebiet Nordfriesland nach dem Lahnungsbau.

#### 4.3 Sedimentationsgeschichte

In der Literatur werden im allgemeinen die Ablagerungen in Dithmarschen gegenüber denen in Nordfriesland als grobkörniger (sandiger) beschrieben (GAST 1980, NOMMENSEN 1982, WIELAND 1990). Die Kartierung der Oberflächensedimente in den Testgebieten ergab jedoch das Gegenteil. Mit Hilfe der Kernbohrungen sollte überprüft werden, ob es sich dabei um lokale Sedimentationsbedingungen handelt, oder ob sich die Sedimentverteilung im Verlauf der Zeit geändert hat.

Die Sedimentkerne, die seewärts der Testgebiete entnommen wurden, unerschieden sich von den Kernen aus den Lahnungsfeldern nur unwesentlich. Daher werden hier nur die Bohrprofile aus den Testgebieten beschrieben.

Das relativ strukturarme Sedimentprofil aus dem Testgebiet Dithmarschen ist durch eine meist feinsandige Abfolge mit wenigen z.T. silthaltigeren Lagen gekennzeichnet (Abb. 43). Vereinzelt treten Flaserschichtungen auf. In den hangenden 30 cm sind die Sedimente deutlich feinkörniger und, abgesehen von Bioturbation, fast strukturlos. Dieser Bereich läßt sich aufgrund der Korngrößenverteilung und auch der Mächtigkeit der Sedimentationsphase ab dem Lahnungsbau zuordnen. Den Abschluß der Sedimentfolge bildet eine sandigere flasergeschichtete Lage, die wahrscheinlich während des Sturmes im Oktober/November 1996 abgelagert wurde.

Die Schichtfolge im Bohrprofil aus dem Testgebiet Nordfriesland beginnt im Liegenden bei - 3.30 m NN mit einer 90 cm mächtigen Torfschicht. Darauf folgt zunächst ein sandiger Bereich mit Mytilus-Schill, der in eine bis - 0.9 m NN reichende siltige Abfolge mit 2-4 cm mächtigen sandigeren Lagen übergeht. Über dieser groben Sand-Schlick-Wechselschichtung (s. a. STÖRTENBECKER 1997) lagert eine weitere Wechselschichtung, bei der sich dünne feinkörnige Bänder (- 0.5 cm) mit Sandlagen von bis zu 5 cm ablösen. Bis 0.5 m über NN folgt dann bioturbiertes Mischwatt mit einigen Siltlagen. Den Abschluß bildet im Hangenden eine 3 cm mächtige Siltlage, die sich in den wenigen Wochen nach dem Lahnungsbau abgelagert hat.



Abb. 43: Schematisierte Darstellung der Schichtfolge in zwei Bohrprofilen aus den Testgebieten Dithmarschen und Nordfriesland.

## 4.4 Entwicklung der Pioniervegetation

Zu Beginn der Untersuchungen im Frühjahr/Sommer 1994 war im Dithmarscher Testgebiet keine und im nordfriesischen Testgebiet eine eher spärliche Pioniervegetation mit *Salicornia europaea* (Queller) und *Spartina anglica* (Schlickgras) vorhanden (Abb. 44). In Nordfriesland war bereits im folgenden Jahr eine Ausweitung des Queller- und Schlickgrasbestandes zu verzeichnen.

Die geringen Strömungsgeschwindigkeiten, die unregelmäßige Wasserbedeckung sowie das lang anhaltende Eisvorkommen des Winters 1995/96, und nicht zuletzt das Erreichen einer kritischen Geländehöhe, führten im Sommer 1996 im Testgebiet Nordfriesland zur Ausbildung eines regelrechten Quellerrasens (Abb. 45).

Im Dithmarscher Testgebiet konnte zu dieser Zeit erstmals die Ansiedlung einer Pioniervegetation beobachtet werden. Sie bestand auch hier vorwiegend aus *Salicornia europaea* und *Spartina anglica*. Zudem kamen *Sueda maritima* (Salzmelde) und *Aster tripolium* (Meerstrand-Aster) im Bereich der Mittellahnung vor(Abb. 45). Im weiteren Umfeld, in dem noch keine Lahnungsfelder errichtet wurden, blieb eine Besiedlung aus.



Abb. 44: CIR-Aufnahmen der Testgebiete vor dem Lahnungsbau (links Dithmarschen; rechts Nordfriesland).



Abb. 45: CIR-Aufnahmen der Testgebiete nach dem Lahnungsbau (links Dithmarschen; rechts Nordfriesland).

#### 4.5 Sediment- und Morphodynamik

Die dynamischen Veränderungen in der Morphologie, der Sedimentverteilung und den bodenphysikalischen Parametern an den SET-Meßstellen in Abhängigkeit von ihrer Lage zu den Lahnungsbauwerken werden in den folgenden drei Abschnitten beschrieben. In den Abbildungen 46 bis 53 sind im oberen Bereich die Sedimentverteilungen zusammen mit den korngrößenstatistischen Parametern (1. - 3. Moment) dargestellt. Darunter befinden sich die Ergebnisse der SET-Messungen und der bodenphysikalischen Untersuchungen. Die Abweichungsbalken an der Höhenänderungskurve geben die Streuungen der jeweils 36 Meßwerte an. Sie sind ein Maß für die Rauhigkeit der Wattoberfläche.

#### 4.5.1 Entwicklungen im offenen küstennahen Watt

Sedimentations- und Erosionsvorgänge sowie die damit verbundenen morphodynamischen Veränderungen im unbebauten Watt konnten sowohl im Testgebiet Dithmarschen vor dem Bau der Lahnungen als auch in beiden Gebieten im seewärtigen Bereich vor den Lahnungsfeldern untersucht werden. Von den außerhalb der Felder



liegenden Meßpositionen scheint aufgrund der Ergebnisse die SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Nordfriesland (Abb. 46) die einzige von den insgesamt 18 Meßpositionen zu sein, die von dem Bau der Lahnungen nicht nachweisbar beeinflußt wurde. Die Watthöhe schwankte zwischen 0 und 2 cm über dem Ausgangsniveau. Dabei lagen die mittleren Korngrößen (1. Moment) der Oberflächensedimente zwischen 3,7 uns 4,7 PHI°. Im April 1996 wurden nach der langen Eisbedeckung sogar über 5 PHI° bei einer Höhe von 4 cm über dem Ausgangsniveau erreicht. Der Wassergehalt war mit 0,2 - 0,8 relativ niedrig. Die Scherfestigkeit schwankte in Abhängigkeit von Umlagerung und Kompaktion zwischen 1 und 4 kN/m<sup>2</sup>. Eine verstärkte Aufarbeitung des Sediments bei gleichzeitiger Zufuhr von Grobsilt fand bei dem Sturm im November 1994 statt: die Scherfestigkeit sank, der Grobsiltanteil nahm zu, ein Höhenzuwachs blieb jedoch aus.

Eine stärkere Kompaktion der Sedimente wurde hier vor allem durch die höheren Sandgehalte in den Frühjahrs- und Herbstmonaten wie auch durch die Auflast des Eises im Winter 1995 bewirkt. Für die starke Zunahme des Feinkornanteils (< 20  $\mu$ m) und des Wassergehalts in Verbindung mit einer positiven Höhenänderung und verringerter Scherfestigkeit im März / April 1996 sind zwei Mechanismen denkbar:

- Die lang anhaltende kompakte Eisbedeckung bewirkte eine maßgebliche Dämpfung des Seegangs und förderte somit die Sedimentation von feinkörnigem Material.
- Das vor der K
  üste liegende Eis war stark mit eingefrorenen Schwebstoffen beladen, die beim Abschmelzen freigesetzt wurden.

Für den letzten Mechanismus spricht der relativ schnelle Anstieg der Feinkornfraktionen sowie der deutlich erhöhte Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff (s. Kap. 6.1). Das frisch abgelagerte Sediment zeigt zudem eine deutlich bessere Sortierung und eine geringere Schiefe der Kornhäufigkeitsverteilung. Diese zuvor genannten Aspekte können als Hinweise darauf gewertet werden, daß es sich um Suspensionsfracht handelte, die aus dem Eis ausschmolz und sich vor Ort ablagerte. Bereits GAST et al. (1984) fanden bei der Untersuchung von Sediment im See-Eis eine entsprechende Zusammensetzung der eingefrorenen Schwebstoffe (vgl. Kap. 1.5.2).



Abb. 46: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Nordfriesland.

In bezug auf die Sedimentzusammensetzung besteht eine enge Verbindung zur SET-Meßstelle 4, mit dem Unterschied, daß diese ab dem Herbst 1996 innerhalb der ausgebauten Lahnungsfelder lag. Die mittlere Korngröße, die Scherfestigkeit und der Wassergehalt der Sedimente bewegten sich hier in nahezu den gleichen Größenord-



nungen wie an der SET-Meßstelle 5. Vor dem Ausbau der Lahnungen entwickelte sich auch das Wattniveau ähnlich.

Durch den leichten Sturm im November 1994 nahm hier ebenfalls der Grobsiltanteil zu und der Sandanteil ab, wohingegen die Scherfestigkeit auf Werte von unter 1,5 kN/m<sup>2</sup> fiel. Die Tatsachen, daß der Sturm aus östlichen Richtungen kam und die Höhe sich kaum nachweisbar änderte, sprechen dafür, daß das Sediment hauptsächlich aufgearbeitet wurde, ohne daß sich größere Mengen neuen Materials ablagerten. Die mit Hilfe von Tracerstäben ermittelten Umlagerungstiefen von ca. 1,5 cm sowie eine im Sedimentprofil nicht meßbare Neusedimentation belegen dies ebenfalls. Erhöhte mittlere Windgeschwindigkeiten aus westlichen Richtungen (März 1995) bewirkten dagegen eine Zunahme des Sandgehalts und der Scherfestigkeit der SET-Meßstellen 4 und 5.



Abb. 47: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 4 im Testgebiet Nordfriesland.

Nach dem Ausbau der Lahnungen stieg der Höhenzuwachs merklich an. Die Veränderung der Sedimentzusammensetzung (zunehmender Feinkornanteil) fiel im Vergleich zu anderen SET-Meßstellen (SET 7, Abb. 50) wesentlich geringer aus. Durch die Lage der SET-Meßstelle 4 können Strömungen und Seegang aus nordwestlichen Richtungen in gerader Linie durch das Lahnhnungstor bis an diesen Ort gelangen. Hieraus läßt sich ableiten, daß die Sedimentzusammensetzung stark von der Lage zum Lahnungstor und vom seewärtigen Bereich beeinflußt, die Sedimentationsrate jedoch durch den Einfluß der Lahnungen gesteuert wurde (s. a. Kap. 4.9).

## 4.5.2 Entwicklungen in den Lahnungsfeldern

Die Ergebnisse der SET-Messungen innerhalb der Lahnungsfelder belegen, daß die Sedimentverteilung und die Morphologie sehr direkt auf Veränderungen durch äußere Eingriffe wie den Lahnungsbau reagieren. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür liefert die SET-Meßstelle 4 im Testgebiet Dithmarschen.



Vor dem Bau der Lahnungen waren die Sedimentationsraten noch relativ gering. Im Sediment dominierte bis annähernd zum Ende des Winters 1994/95 der Grobsiltanteil in der Korngrößenzusammensetzung. Die häufigen Westwindperioden ab Februar führten zu einer vermehrten Ablagerung sandigerer Sedimente. Die Scherfestigkeit war durch die kompaktierende Wirkung der Treibeisdecke im Januar 1995 sprunghaft von 1,5 auf 4 kN/m<sup>2</sup> angestiegen. Sie blieb durch den vermehrten Sandeintrag im Frühjahr 1995 gegenüber dem Herbst 1994 deutlich erhöht.

Zu Beginn der Vorlandarbeiten wurde die Mittellahnung errichtet und im Juni 1995 fertiggestellt. Sie unterbrach damit den direkten Zu- und Abfluß vom Prielarm zur SET-Meßstelle. Unmittelbar danach kam es zu einer sprunghaften Geländeerhöhung um 3 cm innerhalb von ca. 20 Tagen. Die Schließung des Lahnungsfeldes durch die seewärtige Querlahnung bewirkte einen erneuten rapiden Höhenanstieg von 7 cm innerhalb eines Monats.



Abb. 48: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 4 im Testgebiet Dithmarschen.

Die Wirkung unterschiedlicher natürlicher und baulicher Einflüsse auf das Sedimentations-verhalten und die Morphologie des Küstenvorfeldes läßt sich durch die Entwicklungen an den SET-Meßstellen 7 sowohl im Testgebiet Dithmarschen als auch im Testgebiet Nordfriesland verdeutlichen (Abb. 49 u. 50).

Der leichte Sturm im November 1994 führte in beiden Gebieten zu einer Abnahme der Scherfestigkeiten bei kaum verändertem Wattniveau. Die durch Tracermessungen ermittelten Umlagerungstiefen lagen zwischen 1 und 1,5 cm. Eine Sedimentneubildung war mit Werten von 0,2 cm kaum nachweisbar.

Die Auswirkungen des starken Sturms im Oktober / November 1996 konnten nur im Testgebiet Nordfriesland aufgenommen werden (Abb. 50). Der aus südwestlichen Richtungen in die Lahnungsfelder einlaufende Seegang verursachte einen erhöhten Eintrag sandiger Sedimente (in der Abbildung nicht dargestellt) bei gleichzeitiger Verdichtung der oberflächennahen Schichten. Im Gelände ließ sich eine kompakte, tempestitartige Deckschicht aus grobkörnige-



ren Sedimenten über weichen, feinkörnigen Schlicken beobachten. Folglich kam es unter der Einwirkung von Stürmen in Abhängigkeit von der Windstärke und der Windrichtung sowohl zur Umlagerung und Erosion der Sedimente als auch zum Eintrag grobkörnigeren Materials in die Lahnungsfelder.

Der Einfluß von Eis kann, wie bereits in Kapitel 4.5.1 dargestellt, unterschiedlicher Natur sein. Zum einen kam es durch die seegansberuhigende Wirkung der Eisdecke und durch das Ausschmelzen des eingelagerten Materials zu einer erhöhten Sedimentation (Abb. 49: Januar 1995). Zum anderen bewirkte die Auflast der Eismassen eine Kompaktion der darunterliegenden Sedimente (Abb. 49: April 1996; Abb. 50: Januar 1995), wohingegen die aus dem Eis ausschmelzenden Sedimente sich im Gelände zumeist durch eine sehr geringe Lagerungsdichte auszeichneten (Abb. 49: Januar 1995; Abb. 50: April 1996).



Abb. 49: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 7 im Testgebiet Dithmarschen.

Der Bau der Lahnungsfelder führte in der überwiegenden Zahl der Fälle zu einer sichtbaren Erhöhung der Sedimentationsrate. Im Testgebiet Dithmarschen betrug die Geländeerhöhung an der SET-Meßstelle 7 im Jahr nach dem Lahnungsbau ca. 10 cm (Abb. 49).

Noch deutlicher zeigt sich die sedimentationsfördernde Wirkung an der SET-Meßstelle 7 in Nordfriesland (Abb. 50). Diese lag ursprünglich vor den teilausgebauten Lahnungsfeldern. Durch die dort herrschenden Strömungsverhältnisse sowie durch Eisdrift kam es im Winter / Frühjahr 1995 zur Erosion. Die Veränderungen im Strömungsmilieu, die durch den Ausbau der Lahnungen bedingt waren, führten zu einem abrupten Wechsel von Erosion zu Sedimentation. Bei der sehr hohen Sedimentationsrate von über 25 cm im Jahr nach dem Lahnungsbau ist zu beachten , daß der Feststoffanteil in den Oberflächensedimenten von ca. 70 % auf zum Teil unter 50 % zurückging (s. Kap. 5.2.1). Die effektive Massenzunahme fiel damit etwas geringer aus. Ansätze einer Konsolidierung der frisch abgelagerten Sedimente waren aber auch hier noch nicht festzustellen.



Abb. 50: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 7 im Testgebiet Nordfriesland.

Die Veränderungen über einen Zeitraum von zwei Ausbaustufen der Lahnungsfelder hinweg lassen sich anhand der SET-Meßstelle 2 im Testgebiet Nordfriesland beschreiben. Die Sedimentationsraten waren mit 2 - 2,5 cm / Jahr vergleichsweise gering, dafür aber relativ stetig. Demgegenüber konnten deutliche, wahrscheinlich jahreszeitlich bedingte, Änderungen in der Lagerungsdichte sowie in der Korngrößenverteilung der Sedimente beobachtet und gemessen werden.



Abb. 51: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 2 im Testgebiet Nordfriesland.

Das frisch sedimentierte Material im Bereich der neugebauten Lahnungen zeigte eine deutliche Tendenz zu feinkörnigeren Kornzusammensetzungen. Dies ist sowohl an den mittleren Korngrößen (1. Moment) aus den Ergebnissen der SET-begleitenden granulometrischen Analysen als auch an den Gewichtsanteilen der Kornfraktion  $< 63 \mu m$  am Gesamtsediment auf den Profilen A und B abzulesen (s. Kap. 4.1 u. 4.2).

Die mittlere Korngröße lag in Nordfriesland vor dem Lahnungsausbau bei 4 - 5 PHI°. In Dithmarschen war das Sediment mit 4.5 - 5.5 PHI° etwas feinkörniger. Im Zuge des Lahnungsbaus nahm die durchschnittliche Korngöße bis auf 6 und mehr PHI° ab.

Bei allen untersuchten Sedimentproben zeigte sich eine deutlich positive, d. h. feinkörnige Schiefe (3. Moment) der Kornhäufigkeitsverteilung. Nach dem Bau der Lahnungen waren an den dadurch am stärksten beeinflußten SET-Meßstellen eine Verringerung der Schiefe und eine Verschlechterung der Sortierung im Sinne von TUCKER (1985) und MCMANUS (1991)<sup>6</sup> zu verzeichnen. Das bedeutet im Zusammenhang mit der Abnahme der mittleren Korngröße, daß sich das Kornspektrum gleichmäßiger über einen engeren Bereich der feineren Kornfraktionen verteilte.

## 4.5.3 Entwicklungen im Einflußbereich von Lahnungen

Es konnten zwei grundsätzlich unterschiedliche Auswirkungen der Lahnungsbauwerke auf die Sedimentation und Erosion in deren seewärtigen Einzugsbereichen festgestellt werden:

Die SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Dithmarschen liegt nordwestlich des seewärtigen Prielarmes und nur ca. 50 Meter vom Lahnungskopf der Mittellahnung entfernt. Vor dem Lahnungsbau verlief der Ebbstrom vorwiegend entlang dieses annähernd küstenparallel verlaufenden Prielarmes. Die künstlich angelegte Entwässerung der

-C	F
	-
0	• •
	•

Felder führt in den seewärtigen und zugleich höher gelegenen Bereich hinaus. Der dadurch erzwungene Abfluß verlief nicht in seewärtige Richtung, sondern aus morphologischhydraulischen Gründen um den Lahnungskopf der Mittellahnung herum zum Prielarm. Infolgedessen kam es nach dem Bau der Lahnungen zur Erosion am Lahnungskopf und im Bereich der SET-Meßstelle 5 (Abb. 52). Die Sedimente waren hier mit 4,3 - 5,3 PHI<sup>o</sup> etwas feinkörniger als an der vergleichbaren Position im Testgebiet Nordfriesland (SET 5). Die Scherfestigkeit und der Wassergehalt lagen geringfügig höher.

<sup>6</sup> 

 $<sup>\</sup>sigma = 0,35$  sehr gut sortiert

 $<sup>\</sup>sigma = 0,5$  gut sortiert

 $<sup>\</sup>sigma = 1,0$  mäßig sortier

 $<sup>\</sup>sigma = 2,0$  schlecht sortiert



Abb. 52: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Dithmarschen.

Die SET-Meßstelle 6 im Testgebiet Dithmarschen befindet sich in einem Winkel zwischen der Mittellahnung und der Querlahnung des östlichen Feldes. Die morphologischen, sedimentologischen und bodenphysikalischen Entwicklungen an dieser SET-Meßstelle gleichen in starkem Maße denen in den Lahnungsfeldern, die im

2.5		. 1
T		12
+	-	a

vorherigen Abschnitt beschrieben wurden. Während die Höhenänderung vor dem Lahnungsbau 1 - 2 cm betrug, stieg die Geländehöhe danach bis auf 15 cm über das Ausgangsniveau an (Abb. 53). Die Scherfestigkeit und der Sandanteil nahmen ab, der Wassergehalt nahm dagegen zu.



Abb. 53: Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Messungen an der SET-Meßstelle 6 im Testgebiet Dithmarschen.

Der Bau der Lahnungen führte somit im Testgebiet Dithmarschen im Wirkungsbereich der Lahnungsfelder sowohl zur Erosion (SET 5) als auch zur erhöhten Sedimentation (SET 6). Dagegen veränderten sich hier die Wattsedimente durch natürliche Einflüsse ähnlich wie die in Nordfriesland. Eine erhöhte Umlagerung bei dem Sturm im November 1994 und eine Konsolidierung der Sedimente im Januar 1995 infolge von Eisauflast zeigten sich an den SET-Meßstellen 4 und 5 im Testgebiet Nordfriesland wie auch in Dithmarschen an den SET-Meßstellen 5 und 6.

# 4.5.4 Sedimentumlagerungen und Schichtungsstrukturen

Da sich mit dem SET zwar die resultierende Höhenveränderung von einer zur nächsten Meßkampagne, aber nicht die effektive Erosion und Sedimentation messen ließ, wurden zusätzlich Tracerstäbe zur Untersuchung der sehr dynamisch ablaufenden Prozesse eingesetzt (vgl. Kap. 3.2.3)

Unmittelbar zu Beginn von (Sturm-) Ereignissen sowie im Rahmen der SET-Messungen wurden Tracerstifte ausgebracht und nach dem Ereignis bzw. in der darauffolgenden SET-Meßkampagne entnommen. Damit verblieben die Tracerstäbe ca. einen Monat lang im Sediment. Die Tracerlänge wurde nach der Beprobung sowohl im Sedimentprofil als auch in der Radiographie (Abb. 54) vermessen.

Die Veränderungen am Tracerkopf, die mit der tatsächlichen Umlagerungstiefe gleichzusetzen sind, waren mit 0 bis 1,5 cm recht gering (vgl. Kap. 4.5.1 u. 4.5.2). Die Mächtigkeit der Sedimente im Hangenden des Tracers, die mit der effektiven Sedimentation gleichzusetzen ist, lag dagegen zwischen 1 - 3 cm je Monat.



Abb. 54: Röntgenpositiv eines Sedimentprofils mit einem Baryt-Tracerstab.

An den Radiographien wurden zudem die Sedimentstrukturen der beiden Ablagerungsräume "im offenen Watt" und "im Lahnungsfeld" untersucht. Im freien Watt sind durch den Einfluß des Seegangs zumeist mehrere Rippelgenerationen im Sedimentprofil zu erkennen (Abb. 55). In den Lahnungsfeldern dagegen waren Rippeln als Hinweis auf Welleneinwirkungen nur relativ selten zu finden. Hier zeigte sich im oberen Bereich der Radiographien vielfach ein feinkörniger strukturarmer Bereich, der lediglich durch Bioturbation unterbrochen wurde. Höhere Energieeinträge in die Lahnungsfelder sind an oberflächennahen Flaserschichtungen zu erkennen (Abb. 55).





Abb. 55: Röntgenpositive von Sedimentprofilen aus dem freien Watt (links) und aus einem Lahnungsfeld (rechts).

# 4.5.5 Dynamik und Verteilung der Schwebstoffe

Kombinierte bodennahe Messungen von Strömungsgeschwindigkeit, Wellenhöhe, Wasserstand und Trübung mit dem Sediment-Transport-Autonomous-Recorder (STAR) des FTZ wurden im Sommer 1996 im Testgebiet Dithmarschen durchgeführt. Daraus ergaben sich einige sehr aufschlußreiche Ergebnisse (Abb. 56). Die Trübungswerte wiesen bei geringen Wellenhöhen zu Beginn und zum Ende einer Tide ausgeprägte Maxima auf.



Abb. 56: Ergebnisse der hydrologischen Messungen mit dem Sediment-Transport-Autonomous- Recorder (STAR).

Dies beschrieben bereits, wie in Kapitel 2.2.1 erwähnt, MÜLLER (1960) und KAMPS (1962). Im Bereich um den Kenterpunkt änderten sich die Werte dagegen nur geringfügig. Überschritten die signifikanten Wellenhöhen jedoch einen bestimmten Wert, so blieben die Trübungswerte über die gesamte Tide deutlich erhöht (Abb. 56). Auch bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten waren die Trübungswerte bis zum Erreichen des Hochwassers bereits wieder auf weniger als ein Viertel der Maximalwerte gefallen. Die Ergebnisse der Schwebstoffbeprobung vom September 1995 zeigen, daß die Schwebstoffgehalte ähnlich wie die Strömungsgeschwindigkeiten (Kap. 4.7.1) im Dithmarscher Testgebiet (mit bis zu 800 mg/l) um ein Vielfaches höher sind als in Nordfriesland (bis zu 200 mg/l). Dies gilt sowohl für das auflaufende als auch für das ablaufende Wasser. In Dithmarschen sind die Schwebstoffgehalte eng an die morphologischen Einheiten, wie die Prielarme, die in das Gebiet hineinreichen, und an die Lahnungsöffnungen gebunden. In diesen Bereichen wurden auch die höchsten Schwebstoffgehalte gemessen. Im nordfriesischen Testgebiet ist eine derartige Zuordnung nicht möglich.

Detailliertere Untersuchungen an diesen Schwebstoffproben, die bei relativ "ruhigem" Wetter entnommen wurden, ergaben, daß die Kornfraktionen Ton, Fein-, Mittel- und Grobschluff im Testgebiet Dithmarschen mit einer Gesamtkonzentration von über 350 mg/l im Flachwasser (30 cm Wassertiefe) des auflaufenden Wassers enthalten waren (s. Abb. 57). Innerhalb der Lahnungsfelder nahm die Konzentration relativ schnell auf Werte von unter 200 mg/l ab. Hierbei war der Grobschluff die Kornfraktion, deren Anteil proportional am stärksten abnahm. Im ablaufenden Wasser (Wassertiefe ebenfalls 30 cm) erreichten die Schwebstoffkonzentrationen dagegen maximal 80 mg/l. Auffällig ist, daß hier die Grobschlufffraktion völlig fehlte und der Mittelschluffanteil stärker als die übrigen Komponenten verringert war.



Abb. 57: Korngrößenverteilung im Seston des auf- und ablaufenden Wassers auf dem Schwebstoffprofil.

Betrachtet man daraufhin die Korngrößenverteilung in den entsprechenden Oberflächensedimenten, so zeigt sich deutlich, daß der Grobschluff, der im ablaufenden Wasser gegenüber dem auflaufenden abgereichert war, die Hauptkomponente der Oberflächensedimente bildete (Abb. 58).



Testfeld Dithmarschen: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten

Abb. 58: Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten auf dem Schwebstoffprofil.

## 4.6 Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Video-Wasserlinien-Verfahren

Ursprünglich wurden nur Übersichtsaufnahmen der Flut- und Ebbphase in den Lahnungsfeldern gemacht. Diese gaben bereits durch das unterschiedliche Vordringen der Wasserlinie und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit Aufschluß über morphologische Strukturen sowie über kleinräumige Zu- und Abflußverhältnisse. Durch den zusätzlichen Einsatz eines Videopegels (s. Kap. 2.2.5) konnte den Wasserlinien auch noch ein definierter Wasserstand zugeordnet werden. Das System ist in dieser Form das erste Verfahren, mit dem visualisierte Untersuchungen zur Vorlandentwicklung und zur gleichzeitigen grobmorphologischen Vermessung durchgeführt werden können.

Zusätzliche Informationen zu morphologischen Veränderungen, die nicht aus den tachymetrischen und nivellitischen Vermessungen zu entnehmen waren, konnten auf diese Weise gewonnen werden. So ergab die Auswertung der Videoaufnahmen aus dem Testgebiet Nordfriesland, daß nach der Anlage der Entwässerungen sich diese im Kreuzungsbereich der Quer- mit der Hauptentwässerung sowie im Bereich des Lahnungstores deutlich verbreiterten. Gleichzeitig erhöhte sich die Geländeneigung der angrenzenden Flächen zum Lahnungstor hin. Eine nennenswerte Durchströmung der Querlahnungen und eine daraus resultierende verstärkte Erosion am Anwurf fanden nicht bzw. an nur sehr wenigen Stellen statt.

Auch im Testgebiet Dithmarschen waren die Video-Wasserlinien-Vermessungen bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung sehr hilfreich. Hier verbreiterten sich die Hauptentwässerungen ebenfalls sehr stark in den Lahnungstoren. Die Erhöhung der Geländeneigung von den Flächen in den Lahnungsfeldern zu den Lahnungstoren hin war noch ausgeprägter als im Testgebiet Nordfriesland.

Den bereits vor dem Lahnungsbau beobachteten Einfluß des nordöstlichen Prielarmes sowie des im Südwesten gelegenen Prielkopfes auf die Beflutung und Entwässerung des Gebietes war auch nach den Baumaßnahmen bestehengeblieben. Damit kam es zu Staueffekten an den Längslahnungen. Die Folge war eine deutliche Erosion am Anwurf bis hin zur Freilegung des Deckwerkes. Die Zu- und Abfußverhältnisse konnten bereits vor, die genannten Staueffekte während des Lahnungsbaus mit dem Video-Wasserlinienverfahren nachgewiesen werden. Entsprechende planerische und bauliche Veränderungen hätten schon vor, aber auch noch während der Bauphase aufgrund dieser Ergebnisse vorgenommen werden können.

## 4.7 Hydrodynamik

Ein weiterer entscheidender Gesichtspunkt bei Untersuchungen zur Wirkungsweise von Buschlahnungen sind Informationen über deren strömungs- und seegangsdämpfende Eigenschaften. Zu diesem Zweck wurde die Durchlässigkeit der Buschlahnungen für Strömungen und Wellen gemessen.

## 4.7.1 Strömung

Während mehrerer Meßkampagnen wurden zunächst die Strömungen auf den unbebauten Wattflächen ermittelt (s. Strömungsvektorenplots im Anhang). Nachfolgend fanden Vergleichsmessungen statt: in Dithmarschen zwischen der Strömungsgeschwindigkeit auf höher gelegenen Flächen und der Strömungsgeschwindigkeit in der Rinne des nordöstlichen Prielarmes sowie in Nordfriesland see- und landwärts der Querlahnungen. Nach dem Neu- bzw. Ausbau der Lahnungsfelder standen Meßgeräteanordnungen im Vordergrund, die die Strömungen an unterschiedlichen Positionen innerhalb im Vergleich zu Positionen außerhalb der Lahnungsfelder erfaßten.

Die im Anhang als Zeitreihen in Form von Strömungsvektorenplots veranschaulichten Strömungsdaten scheinen aufgrund der durchgeführten Messungen charakteristisch für das jeweilige Testgebiet zu sein. Auffällig ist, daß die Strömungsgeschwindigkeit in Dithmarschen Werte erreicht, die über dem 2 - 3 fachen derer in Nordfriesland liegen. Die Unterschiede zwischen den Messungen im Prielarm und auf der Hochfläche sind vergleichsweise gering. Deutlicher ist dagegen die strömungsdämpfende Wirkung der Lahnungen. Die Abbildungen 57 und 58 zeigen die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten außerhalb im Vergleich zu denen innerhalb der Lahnungsfelder sowie die dazugehörigen Reststromrichtungen.


Abb. 59: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten vor und in den Lahnungsfeldern des Testgebietes Dithmarschen.



Abb. 60: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten vor und in den Lahnungsfeldern des Testgebietes Nordfriesland.

In Dithmarschen lagen die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten vor den Lahnungsfeldern mit bis zu 70 cm/s im Mittel über doppelt so hoch wie in Nordfriesland (unter 35 cm/s). Innerhalb der Lahnungsfelder bewegten sich die Strömungsgeschwindigkeiten jedoch mit 2 -20 cm/s in gleicher Größenordnung.

Ein weiterer Vergleich von Strömungen erfolgte in Verbindung mit den Untersuchungen zur Begrüppung (Kap. 4.11). Über einen Zeitraum von 6 Tiden wurden die Strömungsgeschwindigkeiten in den seewärtigen Lahnungstoren der begrüppten und der angrenzenden nicht begrüppten Lahnungsfelder gemessen. Bei der Auswertung dieser Daten wurden jeweils die maximalen Geschwindigkeiten für den Flut- und den Ebbstrom getrennt ermittelt (Abb. 61). Im Lahnungstor der begrüppten Felder wurden wesentlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen als in dem Lahnungstor der nicht begrüppten Lahnungsfelder. Dies muß nicht zwingend ein Effekt der Begrüppung sein, sondern kann auch seine Ursache in der Größe der Felder oder in der Tiefe der Hauptentwässerungsrinne haben. Es können damit aber nicht die Unterschiede in den Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten erklärt werden.

Während im Lahnungstor der nicht begrüppten Felder die Flutstromgeschwindigkeit deutlich höher war als die des Ebbstromes, unterschieden sich die Strömungsgeschwindigkeiten der beiden Teilströmungen der Tide im Lahnungstor der begrüppten Felder nur unwesentlich. Dies wiederum bedeutet, daß die Asymmetrie der Tide, die für den landwärts gerichteten Sedimenttransport eine entscheidende Rolle spielt (vergl. Kap. 1.5.2), in den begrüppten Feldern weniger ausgeprägt zum Tragen kam.



Abb. 61: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten in den seewärtigen Lahnungstoren der begrüppten Felder und der angrenzenden nicht begrüppten Felder im Flut- und Ebbstrom.

#### 4.7.2 Wellen

Die Auslenkung der Wasseroberfläche wurde mit Hilfe von Drucksensoren in Form von Wasserstandswerten mit einer Frequenz von 4 Hz erfaßt. Anhand dieser Messungen konnte der Seegang im freien Watt und dessen Dämpfung durch die Lahnungen ermittelt werden. Berücksichtigt wurden hierbei ausschließlich Wasserstände ab dem MThw.

In den Abbildungen 62 bis 64 sind die signifikanten Wellenhöhen von der jeweils seewärtigeren zur nächsten landwärtigen bzw. im Lahnungsfeld befindlichen Wellenmeßstation gegeneinander aufgetragen. Die Steigung der Regressionsgrade (der Wert b in der Legende) ist dabei ein Maß für den Dämpfungsgrad. Die signifikanten Wellenhöhen an den drei Wellenmessern (S1, S2, S3) im offenen Watt (s. Abb. 31 u. 35, Kap. 4.1) des Testgebietes Dithmarschen unterschieden sich vor dem Lahnungsbau nur unwesentlich voneinander (b= 0.98 bzw. 1.05). Sie erreichten Werte bis 45 cm (Abb. 62).





Abb. 62: Signifikante Wellenhöhen auf dem Profil A im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau.

Im Testgebiet Nordfriesland erfolgte vor dem Ausbau der Lahnungsfelder auf dem freien Watt vor den bereits bestehenden Feldern (N1 / N2, Kap. 4.2, Abb. 37 u. 41) eine Seegangsberuhigung von ca. 15 %. Die Wellendämpfung an der Querlahnung (N2 / N3) betrug etwa 20 % (Abb. 63).

	PIN D
+	W12
	1
	R13
	Ann



Abb. 63: Signifikante Wellenhöhen auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland vor dem Ausbau der Lahnungen.

Die Höhe der neugebauten Querlahnung (MThw + 0,3 m) zwischen N1 und N2 lag 30 cm über der Höhe der übrigen Lahnungen (MThw). Die Reduzierung der signifikanten Wellenhöhen lag hier bei über 27 %. Die bereits abgeschwächten Wellen wurden an der landnahen, niedrigeren Querlahnung nochmals um ca. 10 % gedämpft (Abb. 64).



Abb. 64: Signifikante Wellenhöhen auf dem Profil A im Testgebiet Nordfriesland nach dem Ausbau der Lahnungen.

Bei den Messungen an den stationären Geräten der Dauermeßketten ist zu beachten, daß die leeseitige Entfernung der Wellenmesser zum nächstgelegenen Lahnungszaun in Abhängigkeit von der Richtung des Wellenauflaufs mindestens 50 m betrug. Demzufolge könnten sich gedämpfte Wellen unter dem Einfluß lokaler Windfelder von der Lahnung bis zum Wellenmesser wieder erhöhen. Diese Annahme wurde durch Feldbeobachtungen bestätigt.

Zur zeitgleichen Erfassung der Wellenhöhen im Nahbereich von Lahnungen wurde die Entwicklung senkrecht auflaufenden Seegangs an Meßlatten ca. 1 m vor und hinter einem Lahnungszaun mit einer Videokamera aufgenommen. Aus den Videobildern ließen sich die Auslenkungen der Wasseroberfläche durch Einzelbilddigitalisierung mit bis zu 25 Werten pro Sekunde (PAL-System) abgreifen. Im Anschluß wurden die daraus resultierenden Transmissivitäten berechnet. Die ermittelten Wellenhöhen lagen in Luv der Lahnung zwischen 8 und 17 cm, in Lee zwischen 2 cm und 6 cm. Daraus ergaben sich für die Transmissivität



Werte zwischen ca. 22 % und 36%. Die durchschnittliche Transmissivität der untersuchten Lahnung lag somit für die genannten Wellenhöhen und einen Wasserstand von 1m bei ca. 30%.

Abb. 65: Digitalisiertes Videobild der Wellenentwicklung an einer Querlahnung.

Zum Vergleich seien hier Transmissivitäten (Transmissivitätskoeffizient  $k_T$ ) genannt, die in physikalischen Modellen an "sterilen" Lahnungszäunen, deren Durchlässigkeit nicht durch Algen und Sediment verringert war, gemessen wurden. Sie liegen mit 70 % bis 76 % über doppelt so hoch wie die unter Naturbedingungen ermittelten Werte. Obwohl die Meßgenauigkeit des Video-Meßverfahrens geringer ist als die der elektronischen Wellenmessungen, zeigt der deutliche Unterschied in den gemessenen Transmissivitäten, daß der Einfluß von Sediment und biogenen Faktoren auf die Porosität einer Buschlahnung nicht unerheblich ist.

#### 4.8 Zusammenfassende Darstellung der Veränderungen

Nach der geologisch-sedimentologischen Auswertung folgt eine statistische Analyse der Daten, um die Feldmessungen und -beobachtungen zu verifizieren. Zuvor werden jedoch die Ergebnisse der sedimentologischen, morphologischen und in gewissen Grenzen auch der hydrologischen Untersuchungen für die Zeiträume vor dem Lahnungsbau (Frühjahr 1994 - Frühjahr 1995) sowie nach dem Bau der Lahnungen (Herbst 1995 - Herbst 1996) zusammengefaßt und in Form von 3D-Ansichten veranschaulicht (Abb. 66 bis 69). Die Markierung von unterschiedlich ausgeprägten Bereichen (Art der anstehenden Wattsedimente, Lahnungen, Entwässerungsrinnen, der Bewuchs mit Pioniervegetation etc.) erfolgte in Anlehnung an Geographische-Informations-Systeme (GIS).

#### 4.8.1 Die Ausgangssituation vor dem Lahnungsbau

Das Küstenvorfeld im **Testgebiet Dithmarschen** wirkte mit seiner geringen Vorlandneigung und den überwiegend schlickig-weichen Oberflächensedimenten zu Beginn der Untersuchungen sehr gleichförmig. Erst weiter seewärts waren eine Zunahme des Sandgehaltes und eine festere Konsistenz des Wattbodens zu verzeichnen. Diese Sedimentverteilung mit den seewärts zunehmenden Korngrößen spiegelte sich auch in der benthischen Fauna wieder. Während die Besiedlungsdichte von *Heteromastus filiformis* und *Hydrobia ulvae* vom Deichfuß aus seewärts abnahm, stieg die Verbreitung von *Arenicola marina* deutlich an.

Die markantesten morphologischen Veränderungen traten im Sommer / Herbst 1994 durch die Ausbildung von zwei Prielarmen ein, die sich von NE ins Testgebiet einschnitten (Abb. 66). Der seewärtigere der beiden Prielarme sedimentierte im Winter 1994 / 95 fast vollständig mit sehr feinkörnigem Material zu, um sich dann im Frühjahr 1995 erneut wieder zu vertiefen. Diese Entwicklung legt einen gewissen Jahresgang in den Ablagerungsbedingungen dieses Wattbereichs nahe. Insgesamt waren im Testgebiet Dithmarschen bereits vor dem Bau der Lahnungen positive Sedimentationsraten von bis zu 10 cm / J. zu verzeichnen, wobei das Sedimentationsmaximum im Winter lag.

Die Ausgangssituation im Testgebiet Nordfriesland unterschied sich durch mehrere Faktoren von der in Dithmarschen. Zum einen waren hier schon deichnahe Lahnungsfelder vorhanden, in denen die Vorlandneigung deutlich größer und die Sedimente mit Ausnahme des Deichfußes merklich feinkörniger waren als im Bereich seewärts davor. Zum anderen hatte sich in den Lahnungsfeldern bereits eine spärliche Pioniervegetation mit Salicornia europaea und Spartina anglica etabliert. Seewärts der Lahnungen erwies sich die flach geneigte Mischwattfläche ebenfalls als sehr gleichförmig. Während in den schlickigen Ablagerungen in den Lahnungsfeldern vorwiegend Nereis diversicolor und Hydrobia ulvae vorkamen, beherrschte Arenicola marina das Bild im seewärtigen Bereich.

Zu den offensichtlichsten morphologischen Veränderungen gehörten hier die zum Teil auftretende Erosion an den Anwürfen und das Zuschlicken der Hauptentwässerungen. Die Sedimentationsraten lagen mit ca. 3 cm / J. deutlich unter denen im Testgebiet Dithmarschen. Auch fiel das Sedimentationsmaximum nicht in den Winter, sondern in den Sommer.

## 4.8.2 Die Situation nach dem Lahnungsbau

Nach dem Lahnungsneu- bzw. ausbau änderte sich das Bild der Testgebiete grundlegend. Die prägendsten morphologischen Veränderungen waren anthropogenen Ursprungs (Entwässerungsgräben und Anwürfe). Sedimentologisch änderte sich die Situation in beiden Gebieten durch die Zunahme und Ausbreitung von schlickig-weichen Sedimenten (Abb. 67 u. 69).

Während im **Testgebiet Dithmarschen** die Sedimentverteilung vor dem Bau der Lahnungen eng an morphologische Einheiten gebunden war, ließen sich nach dem Lahnungsbau die Sedimente innerhalb der Felder vor allem durch ihre geringere Verfestigung, aber auch durch den höheren Feinkornanteil von denen außerhalb der Lahnungsfelder unterscheiden.

Im Testgebiet Nordfriesland wechselte die Zusammensetzung der Oberflächensedimente in den neugebauten Lahnungsfeldern relativ schnell vom Mischwatt zum Schlickwatt. Auch die Besiedlung mit benthischen Organismen änderte sich entsprechend. In den Feldern, die bereits zuvor bestanden, veränderten sich die Sedimentverteilung und die Morphologie jedoch nur unwesentlich.

Der nach dem Lahnungsbau durch Sedimentation und steigenden Wassergehalt bedingte größere Höhenzuwachs konnte vor allem auf den ebenen Flächen der Felder und in den Anwurfgrüppen beobachtet werden. Im Bereich der Anwürfe und der Hauptentwässerungen war dagegen anfänglich verstärkte Erosion zu verzeichnen. Durch diese Entwicklungen wird zwar die sedimentationsfördernde Wirkung der Lahnungsfelder bestätigt, die Gesamtbilanz der positiven Ablagerungsraten wurde jedoch durch die auftretenden Erosionen im Testgebiet Nordfriesland verringert und im Testgebiet Dithmarschen sogar in eine insgesamt rückläufige Sedimentation umgewandelt. Hier kam zusätzlich noch eine sehr auffällige Erosion im Bereich des Lahnungskopfes der Mittellahnung durch die anthropogen veränderten Abflußverhältnisse hinzu (Abb. 67).

Eine weitere sehr deutliche Veränderung war die starke Ausweitung der Pioniervegetation in Nordfriesland sowie das erstmalige Auftreten einer solchen im Testgebiet Dithmarschen. Dort beschränkte sich die Verbreitung von *Salicornia europaea* und *Spartina anglica* allerdings nur auf den unmittelbaren Bereich der Lahnungsfelder.



Abb. 66: Blick nach Süden auf die Topographie im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau (20-fach überhöht).



Abb. 67: Blick nach Süden auf die Topographie im Testgebiet Dithmarschen nach dem Lahnungsbau (20-fach überhöht).



Abb. 68: Blick nach Norden auf die Topographie im Testgebiet Nordfriesland vor dem Lahnungsbau (20-fach überhöht).



Abb. 69: Blick nach Norden auf die Topographie im Testgebiet Nordfriesland nach dem Lahnungsbau (20-fach überhöht).

#### 4.9 Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Parametern

#### 4.9.1 Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalysen

Für eine erste Abschätzung eventueller Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern wurden die sedimentologischen, morphologischen und bodenphysikalischen Daten sowie die Pegel- und Winddaten einer Korrelationsanalyse unterzogen. Den Ergebnissen zufolge korrelieren die Parameter einer Parametergruppe untereinander sehr gut, zum Teil auch hoch signifikant miteinander. Die Korrelationen zwischen den Parametergruppen (Pegel- und Winddaten sowie sedimentologische, morphologische und bodenphysikalische Daten) sind dagegen in keinem Fall hoch signifikant.

Mögliche Korrelationen mehrerer Parameter miteinander wurden mit der Regressionsanalyse überprüft. Die dabei errechneten multiplen Korrelationskoeffizienten liegen ebenfalls nicht auf einem signifikanten Niveau (Tab. 4), sollten aber in Anbetracht der komplexen Vorgänge und der vielschichtigen Einflüsse im Küstenbereich doch als aussagekräftig angesehen werden.

abhängige Variable	unabhängige Variablen	Korrelations- koeffizient
Feststoffanteil (Dithmarschen: SET 6)	= f (MThw)	0,73
	$= f(mittl.V_{Wind})$	0,63
Contraction of the second	= f (MThw, mittl. $V_{Wind}$ )	0,81
Sandgehalt (Nordfriesland: SET 4)	= f (MThw)	0,62
	$= f (mittl. V_{Wind})$	0,50
	$= f (mittl. R_{Wind})$	0,59
	= f (MThw, mittl. V <sub>Wind</sub> , mittl. R <sub>Wind</sub> )	0,76
Sandgehalt (Nordfriesland: SET 7)	= f (MThw)	0,64
	$= f (mittl. V_{Wind})$	0,50
	$= f (mittl. R_{Wind})$	0,55
	= f (MThw, mittl. $V_{Wind}$ , mittl. $R_{Wind}$ )	0,75

Tab. 4: Korrelationen verschiedener Parameter

 $MThw = mittleres Tidehochwasser, mittl.V_{Wind} = mittlere Windgeschwindigkeit und mittl. R_{wind} = mittlere Windrichtung$ 

## 4.10 Klassifizierung der Sedimente

Zur Klassifizierung der Sedimente sowie ihrer Ablagerungsbereiche (Positionen in den Testgebieten) und -zeiträume wurde die Clusteranalyse herangezogen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 70 und 72 in Form von Dendrogrammen dargestellt. Die Unterschiede zwischen den Gruppen (Clustern) werden durch die Distanz wiedergegeben. Im Anschluß erfolgt eine Zuordnung der Probenpunkte und Meßzeiträume zu den ermittelten Clustern (Abb. 71 u. 73).

## 4.10.1 Ablagerungsbereiche und -zeiträume im Testgebiet Dithmarschen

Für das Testgebiet Dithmarschen wurden aus den 121 Proben und Meßwerten, die im Rahmen der SET-Messungen genommen wurden, zwei Hauptgruppen mit jeweils zwei Untergruppen errechnet (Abb. 70). Die beiden Hauptcluster lassen sich mit einer sehr hohen Distanz voneinander trennen. Die Distanz zwischen den Nebenclustern ist vergleichsweise gering.



Abb. 70: Dendrogramm nach dem Ward-Verfahren (quadrierte euklidische Distanz) für das Testgebiet Dithmarschen.

Erst durch die Zuordnung der Probenpunkte und Meßzeiträume zu den einzelnen Clustern wird deren Charakteristik deutlich. Die zusammengehörenden Cluster 1 und 4 der ersten Hauptgruppe (Abb. 70) kennzeichnen die Meßpunkte im freien Watt ohne den direkten Einfluß von Lahnungsbauwerken. Das räumliche und zeitliche Auftreten des Clusters 4 ist im wesentlichen auf landferneren Positionen in den Monaten November 1994 bis Mai / Juni 1995 beschränkt (Abb. 71). Die Proben dieses Clusters weisen mit 30 - 50 Vol.-% gegenüber dem

Cluster 1 mit 0 - 30 Vol. % deutlich höhere Sandgehalte auf. Die daraus abzuleitende Beschränkung des Clusters 4 auf die Winter- und Frühjahrsmonate läßt einen erhöhten Einfluß hydrodynamischer Kräfte vermuten. Die Proben und Meßwerte der Cluster 2 und 3, die zur zweiten Hauptgruppe gehören, stammen aus den Lahnungsfeldern oder zumindest aus deren Einflußbereich. Die Unterschiede zwischen beiden waren nicht offensichtlich.



Abb. 71: Zuordnung der Proben und Meßwerte zu den 4 Clustern.

Eine derart klare Trennung der Sedimente aus dem freien Watt von denen aus dem Einflußbereich der Lahnungen war im Gelände bei der eher subjektiven Beurteilung des Materials nicht möglich. Dies liegt möglicherweise daran, daß sowohl der Cluster 1 als auch 3 durch hohe Gehalte an den Feinfraktionen (< 20  $\mu$ m) gekennzeichnet sind.

## 4.10.2 Ablagerungsbereiche und -zeiträume im Testgebiet Nordfriesland

Für das Testgebiet Nordfriesland wurden aus den 135 Proben und Meßwerten drei Cluster gebildet (Abb. 72). Die größte Distanz weisen die Gruppen 1 und 2 gegenüber der relativ kleinen Gruppe 3 auf.

Eine ebenso deutliche Abgrenzung der Sedimente aus den Lahnungsfeldern von den Sedimenten im freien Watt ist hier nicht möglich. Nur die Proben der SET-Meßstellen 3 und 7 aus der Zeit nach dem Ausbau der Lahnungen, die den Cluster 3 bilden, lassen sich sicher der Lage in den Vorlandbauwerken zuordnen. Der Cluster 1 ist durch hohe Gehalte an Grobsilt (55 - 65 Vol.-%) gekennzeichnet. Zwar wird diese Gruppe stark durch Sedimente aus den Lahnungsfeldern geprägt, aber auch Proben aus dem seewärtigen Bereich kommen darin vor (Oktober und November 1994). Die Clustergruppe 2 dokumentiert schließlich die räumliche und zeitliche Verteilung von Sedimenten mit hohem Sandgehalt (40 - 80 Vol.-%). Proben dieses Clusters stammen überwiegend aus den Bereichen seewärts der Lahnungsfelder (SET-Meßstelle 5), dem Bereich des Deichfußes (SET-Meßstellen 1 u. 9) und dem Einflußbereich der Lahnungstore (SET-Meßstelle 4).



Abb. 72: Dendrogramm nach dem Ward-Verfahren (quadrierte euklidische Distanz) für das Testgebiet Nordfriesland.



Abb. 73: Zuordnung der Proben und Meßwerte zu den 3 Clustern.

# 4.11 Morphologische, sedimentologische und bodenphysikalische Veränderungen infolge von Begrüppung

Die Erfassung und Beurteilung von sedimentologischen und morphologischen Veränderungen infolge von Lahnungsbauarbeiten ohne eine anschließende Begrüppung waren das grundlegende Thema der vorliegenden Arbeit. Zusätzliche vergleichende morphologische, sedimentologische und bodenphysikalische Untersuchungen von begrüppten und nicht begrüppten Lahnungsfeldern wurden auf Anfrage des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Husum durchgeführt. Sie waren, wie bereits zuvor erwähnt, Gegenstand einer Diplomarbeit, die im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens (s. Vorwort) angefertigt wurde. Aufgrund der engen thematischen Verknüpfung der beiden Untersuchungen wurden die Ergebnisse an dieser Stelle mit aufgenommen.

Bei der ersten Beprobung und Vermessung der "Grüppenfelder" vor der Begrüppung zeigte sich eine recht gute Übereinstimmung der Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten mit der entsprechenden Korngrößenverteilung in den angrenzenden Lahnungsfeldern. Sowohl in den Grüppenfeldern als auch in den unbegrüppten Feldern ließ sich generell eine Dominanz der Kornfraktion im Grobsiltbereich (20-63 µm) feststellen. Dementsprechend wurden hier die Kornfraktionsgrenzen für das 3-Komponentensystem gewählt. Aber auch die Watthöhen und die Geländeneigungen entsprachen denen in den unbegrüppten Feldern.

Nach der Begrüppung wiesen die Sedimente in den Grüppen zumeist eine deutlich feinkörnigere Zusammensetzung auf als auf den Beeten (Abb. 74). In dem sparbegrüppten Feld fiel im Bereich der ebenen Flächen (ohne Entwässerungsgräben) zur Feldmitte hin ein recht großer Anteil der Kornfraktion > 63  $\mu$ m (30-60 Vol.-%) auf. Während die Scherfestigkeit der Oberflächensedimente in den Grüppenfeldern vor der Begrüppung durchschnittlich zwischen 1,8 und 3,3 kN/m<sup>2</sup> lag, stieg sie danach auf den Beeten auf Werte von 8 bis 14 kN/m<sup>2</sup> an. Die Scherfestigkeit in den Grüppen war dagegen mit der Flügelsonde nicht mehr meßbar. Durch zunehmende Sedimentation in dem seewärtigen, sparbegrüppten Feld im Sommer 1996 sank die Scherfestigkeit auf den ebenen Flächen zwischen der randlichen Sparbegrüppung und der Hauptentwässerung auf Werte von 0,3 bis 2,8 kN/m<sup>2</sup> ab. Der Wassergehalt verhielt sich umgekehrt proportional dazu. Auf den Beeten wurden Wassergehalte um 0,3, in den Grüppen zwischen 0,5 und 4 gemessen. Zum Herbst 1996 hin waren sowohl die Scherfestigkeiten als auch die Wassergehalte angestiegen.

Die morphologische Entwicklung der Grüppenfelder vom Frühjahr 1996 bis zum Frühjahr 1997 bestätigte zum überwiegenden Teil die im Vorwege getroffene Annahme, daß die Höhe auf den Beeten zu- und in den Grüppen abnehmen würde (Abb. 74). Die Höhenabnahme auf den Beeten schwankte zwischen 10 und 40 cm (maximal 80 cm). In den Grüppen lagen die Beträge der Erhöhung in etwa der gleichen Größenordnung, wobei die höheren Beträge im seewärtigen Feld zu finden waren. Auf den ebenen Flächen des sparbegrüppten Feldes war im großen und ganzen eine Erhöhung der Geländeoberfläche um 1 bis 10 cm zu verzeichnen.



Abb. 74: Entwicklung des Wassergehalts, der Scherfestigkeit, der Morphologie sowie des Anteils < 63 μm auf 2 Profilen im voll begrüppten Lahnungsfeld südöstlich der Hauptentwässerung (vgl. Abb. 27, Kap. 3.1).

## 5 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Synthese der Ergebnisse läßt sich ein konkretes Bild von den sediment- und morphodynamischen Vorgängen im Küstenvorfeld der untersuchten Gebiete und dem Einfluß von Lahnungen und Lahnungsfeldern auf diese Vorgänge nachzeichnen.

## 5.1 Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld

Mit der Bearbeitung der Frage, welche Prozesse für die Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld ausschlaggebend sind, sollten die Grundlagen für die vorliegenden Untersuchungen geschaffen werden. Eine Vielzahl von Autoren hat sich in den vergangenen 50 Jahren intensiv mit diesen Prozessen sowie auch mit Einzelaspekten der Sediment- und Morphodynamik im Watt befaßt.



Die Menge und die Zusammensetzung des sedimentierenden Materials bzw. dessen Erosion wird weitgehend durch die Lage und Exposition eines Küstenabschnittes sowie dessen hydrodynamische Belastung beeinflußt. Dies zeigt sich auch deutlich in der Sedimentationsgeschichte der beiden Testgebiete. Bis vor ca. 200 Jahren dominierten grobkörnigere Ablagerungen im Bereich des Testgebietes Dithmarschen, das bis dahin im offenen Watt lag. Durch Landzuwachs, vor allem im Süden Dithmarschens, veränderte sich das Gebiet zum Buchtenwatt mit zunehmender Sedimentation feinkörnigen Materials (GAST 1980, WIELAND 1990). Eine entsprechende Sedimentabfolge läßt sich auch in den Bohrprofilen aus diesem Testgebiet wiederfinden (vgl. Kap. 4.3.).

Das Testgebiet Nordfriesland lag bereits seit den massiven Landverlusten von 1364 und 1632 im Rückseitenwatt der Nordfriesischen Inseln und Halligen. Hier folgen auf einem wahrscheinlich erodierten Torfhorizont im Liegenden jahreszeitlich bedingte Wechselschichtungen aus vorwiegend siltig-tonigen Sedimenten und Feinsandlagen. Eine entsprechende Sedimentabfolge fand auch STÖRTENBECKER (1997) weiter seewärts in Richtung Habel vor.

Die relativ stetige Sedimentation im Testgebiet Dithmarschen vor dem Lahnungsbau bestätigt den von VAN STRAATEN & KUENEN (1957), POSTMA (1961) und DRONKERS (1985) beschriebenen landwärts gerichteten Materialtransport im Tidebereich der Nordseewatten, bei dem zugleich eine hydrodynamisch bedingte Sortierung der mitgeführten Partikel erfolgt (s. a. Kap. 1.5.2).

Der Transport der Sedimente, die vorwiegend aus dem Watt selbst stammen (REINECK 1978), erfolgt zum überwiegenden Teil als Schwebfracht in der Wassersäule (EISMA 1981). Die dabei im küstennahen Bereich auftretenden Sestonkonzentrationen wurden von EISMA (1981) und WIELAND (1990) mit 100 - 150 mg/l angegeben. Demgegenüber lagen die in Nordfriesland mit bis zu 200 mg/l und in Dithmarschen mit bis zu 800 mg/l gemessenen Schwebstoffkonzentrationen deutlich darüber. Gründe für diese unterschiedlichen Werte können die räumlich über eine Tide auftretenden Schwankungen in der Schwebstofführung sein. Die in den Testgebieten ermittelten Konzentrationen wurden in bodennah entnommenen Schwebstoffproben aus dem auf- bzw. ablaufenden Wasser gemessen. Zu diesen Zeiten liegen jedoch naturgemäß Schwebstoffmaxima vor (MULLER 1960; KAMPS 1962). Diese beiden Maxima konnten auch mit dem Sediment-Transport-Autonomous-Recorder erfaßt werden. Ein Vergleich dieser bodennahen Messungen mit Messungen in 40 cm über dem Boden (HydroBios-Sonden; s. Kap. 3.3.2 und 5.4.1) zeigt ebenfalls, daß diese besonders hohen Schwebstoffkonzentrationen auf einen sohlnahen Bereich während des auf- bzw. ablaufenden Wassers beschränkt sind. In Unterwasservideoaufnahmen ist zu beobachten, daß sich in der frühen Flutphase eine regel-rechte Schwebstofffront landwärts bewegt.

Die Ergebnisse der Trübungsmessungen mit dem STAR lassen zudem vermuten, daß ein Großteil des mitgeführten Materials bereits aus dieser Schwebstofffront sedimentiert. Bei den Schwebstoffen handelt es sich vorwiegend um Aggregate, die durch Flockenbildung aus feinkörnigem Material entstanden sind. Dies belegen Vergleichsmessungen an unbehandelten und an dispergierten Schwebstoffproben. Auch die Unterwasservideoaufnahmen zeigen Partikel, deren Durchmesser deutlich über dem der Einzelkörner liegen. Diese Flockenbildung ermöglicht nach Meinung von PARTHENIADES (1984) erst die Sedimentation. Der von KRANCK (1981) und EISMA (1993) beschriebene Flockungsmechanismus, der auf Kollision und Adhäsion der Partikel untereinander beruht, kann ebenfalls für die Sedimentation aus der Schwebstofffront angenommen werden. Dabei erhöht sich die Flockengröße mit steigender Kollisionshäufigkeit und zunehmender Konzentration der Schwebstoffpartikel (DYER 1989). Demnach nimmt auch die Sedimentation zu. Dieser Mechanismus, der in der Abbildung 76 veranschaulicht ist, würde in Verbindung mit den sehr viel höheren Schwebstoffkonzentrationen im Testgebiet Dithmarschen die dort gemessenen höheren Sedimentationsraten erklären.

Saisonal und episodisch beeinflussen vor allem die Faktoren Temperatur, Windstärke und Windrichtung sowie das Tidegeschehen die Sedimentations- und Erosionsraten. Die Untersuchungen im Rahmen der SET-Messungen zeigen, daß hierbei vor allem einzelnen Sturmereignissen sowie der Bildung und dem Transport von See-Eis mit den darin eingeschlossenen Sedimenten eine besondere Bedeutung für kurzfristige Änderungen beizumessen ist (Abb. 75 u. Abb. 77). Die Bedeutung von windinduzierten Triftströmungen und Drift-Eis für den Materialtransport wurde bereits von GÖHREN (1968), REINECK (1956) und DIONNE (1970) sowie GAST et al. (1984) beschrieben (s. Kap. 1.5.1 u. 1.5.2)



Abb. 75: Zusammenfassende Darstellung der gemessenen Parameter sowie der mittleren Tidehochwasserstände und der mittleren Windverhältnisse an der SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Nordfriesland.

> Im oberen Bereich (a) sind der Verlauf des MThws und die mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten aus den vier Windsektoren dargestellt. Darunter befinden sich die Ergebnisse der SET-Messungen und der bodenphysikalischen Untersuchungen (b). Im unteren Diagramm (c) sind die Ergebnisse der Korngrößenanalysen (3-Komponentensystem) mit den Bestimmungen des Feststoffanteils kombiniert.

Vorwiegend sandige (Abb. 75, März 1995) wie auch rein schlickige Ablagerungen (Abb. 75, April 1996) wurden im unbebauten offenen Watt zumeist leichter erodiert als vergleichbare Sedimente mit einem breiteren Korngrößenspektrum. Diese Beobachtungen decken sich mit den Untersuchungsergebnissen von MITCHENER & TORFS (1996), die im physikalischen Modell eine höhere Erosionsbeständigkeit von Sand/Schlick-Gemischen gegenüber reinen Sanden oder Schlicken festgestellt hatten.

Auch die Besiedlung der Wattflächen mit Pionierpflanzen und sedimentverfestigenden benthischen Organismen bestimmt maßgeblich deren Erosionsbeständigkeit (MANZENRIEDER 1983, FÜHRBÖTER 1983, AUGUSTINUS 1997). Starke Bioturbation kann hingegen die Umlagerung und Erosion begünstigen. Mit dem Erreichen einer kritischen Geländehöhe beginnt im Küstenvorfeld vielfach die Ansiedlung einer Pioniervegetation. Während eine solche im Testgebiet Nordfriesland zu Beginn der Untersuchungen bereits vorhanden war, kam es im Testgebiet Dithmarschen erst 1996 zu einer Ansiedlung von Pionierpflanzen. Bewachsene Bereiche wie auch Flächen, die mit einem Diatomeenrasen bedeckt waren, zeigten gegenüber angrenzenden unbesiedelten Bereichen eine erhöhte Erosionsresistenz.



Abb. 76: Schematische Darstellung der im küstennahen Watt ablaufenden Prozesse.

## 5.2 Wirkungsweise von Buschlahnungen

Nachdem der Bau von Lahnungsfeldern bisher auf Erfahrungen beruhte, sollte durch die Untersuchungen zur Wirkungsweise von Buschlahnungen geklärt werden, wie diese in Schleswig-Holstein gebräuchlichste Lahnungsform, auf den Sedimenthaushalt und die Morphodynamik der Küstenregion wirkt.



## 5.2.1 Sediment- und Morphodynamik in Lahnungsfeldern

Bei der Beurteilung der sedimentologischen und morphologischen Untersuchungsergebnisse aus den Lahnungsfeldern lassen sich mehrere Themengruppen unterscheiden:

- die Veränderungen in der Sedimentologie und Morphologie,
- die Sedimentationsmechanismen in den Lahnungsfeldern,
- die Zusammenhänge zwischen den gemessenen und untersuchten Parametern sowie
- die Klassifizierung der Ablagerungsorte und -zeitpunkte.

Infolge des Lahnungsneu- bzw. ausbaus kam es in den Lahnungsfeldern in Dithmarschen zu einer beschleunigten Erhöhung der Geländeoberfläche. In Nordfriesland verlagerte sich das Sedimentationsmaximum von den alten, ufernahen Feldern in die seewärtigen, neugebauten Lahnungsfelder. Die Sedimentationsraten nach dem Lahnungsbau lagen mit durchschnittlich 10 cm pro Jahr geringfügig über denen, die von HOUWING et al. (1995) in Westfriesland gemessen wurden, aber deutlich unter denen, die von ERCHINGER et al. (1996) in Ostfriesland ermittelt wurden. Lokal wurden jedoch auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen höhere Sedimentationsraten gemessen (Abb. 77). Gründe für die zum Teil sehr markanten Unterschiede in den Sedimentationsraten können zum einen die Lage und Exposition der Gebiete, unterschiedliche Ausgangshöhen und unterschiedliche Lahnungsfeldgrößen (s. a. Kap. 5.2.4) sowie die unterschiedlichen Meßzeiträume sein. Zum anderen wurde mit den SET-Messungen in Westfriesland und Schleswig-Holstein eine Methode mit höherer statistischer Genauigkeit gewählt.

Die Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung wurden in den zuvor genannten Untersuchungen anderer Gebiete nur untergeordnet betrachtet, so daß ein direkter Vergleich nicht möglich ist. In den beiden Testgebieten kam es durch den Bau bzw. den Ausbau der Lahnungsfelder zu einer verstärkten Sedimentation feinkörnigeren Materials (Abb. 77). Gleichzeitig sanken aber auch die Scherfestigkeit und der Feststoffanteil im Sediment. Demnach wird durch einen hohen Porenwasseranteil der noch nicht konsolidierten Sedimente



Ablagerungsrate "vorgetäuscht". Der effektive Masseneintrag, der am Feststoffanteil abzulesen ist, fällt jedoch geringer aus.

Abb. 77: Zusammenfassende Darstellung der gemessenen Parameter sowie der mittleren Tidehochwasserstände und der mittleren Windverhältnisse an der SET-Meßstelle 7 im Testgebiet Nordfriesland.

Im oberen Bereich (a) sind der Verlauf des MThws und die mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten aus den vier Windsektoren dargestellt. Darunter befinden sich die Ergebnisse der SET-Messungen und der bodenphysikalischen Untersuchungen (b). Im unteren Diagramm (c) sind die Ergebnisse der Korngrößenanalysen (3-Komponentensystem) mit den Bestimmungen des Feststoffanteils kombiniert. Aus den Ergebnissen der Schwebstoffbeprobungen, den Messungen mit dem Sediment-Transport-Autonomous-Recorder (STAR) und der Analyse der Oberflächensedimente läßt sich ein Sedimentationsmechnismus für den Bereich der Lahnungsfelder ableiten, der von der immer noch sehr verbreiteten Vorstellung deutlich abweicht. Bisher ging man davon aus, daß sich "die Schweb- und Sinkstoffe in der Stillwasserzeit um die Kenterung der Tide nach Hochwasser am Boden ablagern" (FIEGE et al. 1996). Die obengenannten Ergebnisse sprechen jedoch unterstützt durch Unterwasservideoaufnahmen- dafür, daß der bedeutendere Teil der am Boden und als Schwebstoff transportierten Partikel sich bereits aus einer Schwebstofffront im auflaufenden Wasser absetzt (s. a. Kap. 6.1). Die wellen- und strömungsdämpfende Wirkung der Lahnungen (s. Kap. 6.2.1) kommt damit schon während der Flutphase und nicht erst während der Kenterung der Tide zum Tragen. Dies läßt sich anhand verschiedener Meßergebnisse und Überlegungen nachweisen:

- (1)Die mit dem STAR gemessenen Tr
  übungswerte verringern sich bereits im auflaufenden Wasser wieder relativ schnell, wohingegen sie sich in der Hochwasserphase nur unwesentlich ver
  ändern. Die Tr
  übungswerte im ablaufenden Wasser sind in der Regel, abgesehen von Extrem-Wetterlagen, deutlich niedriger (s. Kap 4.5.5).
- (2)Die zum Teil sehr hohen Sedimentationsraten können mit einem Absinken von Partikeln aus einer wenig bewegten Wassersäule wohl kaum erklärt werden. Auch die nach PARTHE-NIADES (1984) für die Sedimentation ausschlaggebende Flockenbildung scheint allein für die Erklärung nicht ausreichend zu sein. Daher sollten die nach KRANCK (1981) und EISMA (1993) für die Flockenbildung und -vergrößerung verantwortliche Kollision und Adhäsion der Partikel untereinander ebenfalls für die Sedimentation der auf den Boden auftreffenden Schwebstoffpartikel in Betracht gezogen werden.
- (3)Der Vergleich der Korngrößenverteilungen der Schwebstoffe und der entsprechenden Oberflächensedimente zeigt, daß der landwärts in den Lahnungsfeldern abnehmende Grobsiltanteil, der in der frühen Flutphase gemessen wurde, auch in den Oberflächensedimenten dominierte. Dementsprechend ist davon auszugehen, daß das sedimentierende Material überwiegend aus Grobsilt besteht. Die in der Wassersäule verbleibenden Flocken sind hingegen aus feinkörnigeren Partikeln aufgebaut. Dies belegt die Korngrößenanalyse der Schwebstoffproben aus der Ebbphase. Demzufolge erreichen vor allem Schwebstoffe, die vorwiegend aus Grobsiltpartikeln bestehen, eine für die Sedimentation in den Lahnungsfeldern kritische Masse.

Die Prozesse, die in den Lahnungsfeldern die Sedimentation und Erosion maßgeblich beeinflussen, sind in der Abbildung 78 zusammenfassend schematisch dargestellt.



Abb. 78: Schematische Darstellung des Einflusses einer Buschlahnung auf die im küstennahen Watt ablaufenden Prozesse.

Zusammenhänge zwischen den untersuchten Parametern konnten durch Feldbeobachtungen und Naturmessungen erkannt und durch anschließende Korrelations- und Regressionsanalysen an den Daten statistisch untermauert werden.

In beiden Testgebieten korrelierten die Meßwerte an den SET-Meßstellen in den Lahnungsfeldern gut untereinander, aber nicht mit den Werten der jeweiligen Meßstelle 5 außerhalb der Felder. Dies unterstreicht die Feststellung, daß die Lahnungsfelder die Sedimentationsvorgänge meßbar beeinflussen.

Durch die Clusteranalyse ließen sich im Testgebiet Dithmarschen die Sedimente, die in den Lahnungsfeldern abgelagert wurden, klar von denen aus dem freien Watt abgrenzen. Eine ebenso eindeutige Klassifizierung der Sedimente war für das Testgebiet Nordfriesland, bedingt durch den Einfluß von Störfaktoren (wie die vom Deichbau herrührenden hohen Sandgehalte in den ufernahen Sedimenten), nicht möglich.

## 5.2.2 Sediment- und Morphodynamik im Einflußbereich von Lahnungen

Durch die solitäre Lage der Vorlandbauwerke im Testgebiet Dithmarschen (s. Kap. 3.1) konnte die Wirkungsweise von Buschlahnungen nicht nur auf den Sedimenthaushalt und die Morphologie innerhalb der Lahnungsfelder, sondern auch auf deren Umfeld beobachtet und gemessen werden.

Die Lahnungsfelder wurden in der regional üblichen, schachbrettartigen Bauweise errichtet. Außer acht blieben dabei die Morphologie sowie die lokal vorherrschenden Zu- und Abflüsse. Die Entwässerung des doppelten Lahnungsfeldes wurde seewärts in ein morphologisch höher gelegenes Gebiet hinausgeführt. Die natürlichen Entwässerungen dagegen griffen küstenparallel an die Längslahnungen an. Die hierdurch bedingten Veränderungen der Zu- und Abflußverhältnisse führten innerhalb kürzester Zeit zum Einsetzen massiver Erosion am Lahnungskopf sowie am Anwurf der Mittellahnung (s. Abb. 80).

Die hier dargestellten Entwicklungen im Testgebiet Dithmarschen zeigen deutlich, daß die natürlich vorgegebenen Zu- und Abflüsse wie auch die Morphologie bei der Planung und beim Bau neuer Lahnungen nicht außer acht gelassen werden sollten. Im vorliegenden Fall wäre eine Schließung der Querlahnung des seewärtigen Feldes sowie eine Öffnung der Mittellahnung zur natürlichen Entwässerungsrinne hin bei gleichzeitiger Verlegung der Hauptentwässerung eine durchaus denkbare Lösung (s. Abb. 79).



Abb. 79: Hypothetische Entwicklung im Testgebiet Dithmarschen bei einer naturangepaßteren Lahnungsbauweise



Abb. 80: Zusammenfassende Darstellung der gemessenen Parameter sowie der mittleren Tidehochwasserstände und der mittleren Windverhältnisse an der SET-Meßstelle 5 im Testgebiet Dithmarschen.

> Im oberen Bereich (a) sind der Verlauf des MThws und die mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten aus den vier Windsektoren dargestellt. Darunter befinden sich die Ergebnisse der SET-Messungen und der bodenphysikalischen Untersuchungen (b). Im unteren Diagramm (c) sind die Ergebnisse der Korngrößenanalysen (3-Komponentensystem) mit den Bestimmungen des Feststoffanteils kombiniert.

Im Gegensatz zu der Erosion am Lahnungskopf im Bereich der SET-Meßstelle 5 konnte im nicht ausgebauten Feld 3 (s. Abb. 27, Kap. 3.1), das zu zwei Seiten hin offen blieb (s. Kap. 3.1), ein Einflußbereich der Lahnungszäune bis zu einer Entfernung von über 50 m registriert werden. Die sedimentologischen und morphologischen Veränderungen in diesem Einflußbereich waren durchaus vergleichbar mit den Veränderungen in den Lahnungsfeldern.

## 5.2.3 Einfluß auf die Hydrodynamik

Bei der Beurteilung der Wirksamkeit von Lahnungen sind deren strömungs- und wellendämpfende Eigenschaften sicherlich mit die wichtigsten Aspekte.

Bereits die Seegangsmessungen von ERCHINGER et al. (1994) im Bereich von undurchlässigen Buschlahnungen ergaben Dämpfungsbeträge von 25 - 50 %. Diese Messungen belegen



zudem eine wellendämpfende Wirkung selbst für Wasserstände, die weit über der maximalen Lahnungshöhe liegen (Kap. 1.5.4).

Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten hydrologischen Messungen zeigen, daß auch die semipermeablen Buschlahnungen in Schleswig-Holstein eine deutliche wellenund auch strömungsdämpfende Wirkung besitzen. Während sich der Seegang im unbebauten Watt nahezu unvermindert landwärts ausbreitete, wurden die Wellen unmittelbar an den Lahnungen um bis zu 70 % gedämpft. In einer Entfernung von 50 m im Lee der Lahnung lag die Wellenhöhe dagegen nur noch 15 - 27 % unter der Ausgangswellenhöhe. Dieser Sachverhalt läßt darauf schließen, daß in den Lahnungsfeldern durch den Einfluß lokaler Windfelder erneut Wellen induziert werden. Auch HOUWING et al. (1995) beobachteten in Lahnungsfeldern in Westfriesland eine erneute Wellenbildung, die bereits nach 100 m annähernd die Ausgangswellenhöhe erreicht hatte. Es ist somit anzunehmen, daß die nach GÖHREN (1968) für den Materialtransport bedeutsamen Triftströmungen ebenso in den Lahnungsfeldern durch lokale Windfelder erzeugt werden.

Während die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten auf dem freien Watt im Testgebiet Dithmarschen mit bis zu 70 cm/s über doppelt so hoch lagen wie im Testgebiet Nordfriesland, unterschieden sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in den Lahnungsfeldern mit 4 - 20 cm/s nur unwesentlich. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch HOUWING et al. (1995) bei ihren Untersuchungen in Westfriesland. Dies legt den Schluß nahe, daß die Lahnungen durch ihre strömungsdämpfende Wirkung ein tide- und windunabhängigeres Strömungsmilieu in den Feldern erzeugen.

#### 5.2.4 Einfluß unterschiedlicher Lahnungsbauvarianten und der Begrüppung

Seit den Anfängen des Lahnungsbaus (um etwa 1850) haben sich die Lahnungskonstruktion sowie die Bauweise und Dimensionierung von Lahnungsfeldern regional unterschiedlich entwickelt. Ausschlaggebend für die Lahnungsfeldgröße und die Lahnungshöhe sind vor allem die örtlich variierende Auflandungsgeschwindigkeit, die Höhe des Vorlandes (bezogen auf MThw) und die hydrodynamische Belastung des Küstenabschnittes.



In Ostfriesland werden Lahnungen verwendet, die durch eine Holzspundwand für den Seegang undurchlässig sind (vgl. Kap. 5.2.3). Da die Lahnungsfeldgröße und die Lahnungshöhe mit denen in Dithmarschen und Nordfriesland übereinstimmen, ist die Spundwand möglicherweise für die höheren Sedimentationsraten in Ostriesland verantwortlich (Kap. 1.5.4 und 5.2). Entsprechend kann die deutlich geringere durchschnittliche Sedimentationsrate der Untersuchungsgebiete in Westfriesland auf der größeren Lahnungsfelddimensionierung von 400 m x 400 m beruhen.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bei Untersuchungen zur Wirkungsweise von Lahnungsfeldern ist die Beurteilung des Einflusses einer Erweiterung des Entwässerungssystems durch Begrüppung. Eine solche Begrüppung hat folgende Ziele:

- Die Anlage von Beeten bewirkt eine künstliche Erhöhung von Teilbereichen der Lahnungsfeldfläche und
- begünstigt somit die Ansiedlung einer Pioniervegetation.
- Gleichzeitig erfolgt eine beschleunigte Sedimentation in den als Sedimentfallen wirkenden Entwässerungsgräben (DIJKEMA 1994).

Die Ergebnisse der Diplomarbeit, die im Rahmen dieser Untersuchungen angefertigt wurde (vgl. Kap. 1.1), bestätigen in weiten Bereichen die Ziele der Begrüppung (THOMAS 1997). Der Wandel von der manuellen zur maschinellen Begrüppung hat jedoch einige nicht so offensichtliche Veränderungen in der Wirkungsweise der Grüppen mit sich gebracht. Die künstliche Geländeerhöhung sowie die bessere Entwässerung der Lahnungsfelder sind nach wie vor gegeben. Die deutlich breiteren und tieferen Grüppenquerschnitte mit zum Teil wesentlich steileren Rändern täuschen jedoch durch das rapide Zuschlicken eine höhere Sedimentationsrate vor. Betrachtet man den Feststoffanteil des neu sedimentierten Materials (vergleichbar mit dem an der SET-Meßstelle 7 im Testgebiet Nordfriesland, Kap. 6.2.1) sowie deren Konsolidierung, so wird sehr schnell deutlich, daß die Volumenzunahme zu über 50 % dem steigenden Wassergehalt zuzurechnen ist.

Obwohl sich die Begrüppung positiv auf die Sedimentstabilität eines aufwachsenden Vorlandes auswirkt, stellt sich trotzdem die Frage, ob dies nicht auch mit einem naturnahen Grüppenquerschnitt und Grüppenverlauf (Abb. 81) erreicht werden kann (THOMAS 1997).



Abb. 81: Vorland mit herkömmlichem (a) und naturnahem (b) Entwässerungssystem (HOFSTEDE & SCHIRRMACHER 1996).

#### 5.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Förderung der Vorlandbildung als Maßnahme des aktiven Küstenschutzes wird besonders in Anbetracht möglicher klimatischer Veränderungen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Seit mehreren Jahrzehnten werden Lahnungsfelder zur Vorlandsicherung errichtet. Die Bauweise der Lahnungen beruhte bisher auf wasserbaulichen Erfahrungen. Untersuchungen zu deren Wirkungsweise liegen nur in sehr begrenztem Umfang vor. Daher wurden vom Frühjahr 1994 bis zum Frühjahr 1997 sedimentologische und bodenphysikalische sowie morphologische und hydrologische Veränderungen infolge von Lahnungsbauarbeiten und Grüppenarbeiten in zwei Testgebieten in Dithmarschen (anfänglich keine Lahnungen) und Nordfriesland (teilausgebaute Lahnungsfelder) durch Naturmessungen erfaßt.

Die Analyse und Diskussion der sedimentologischen, morphologischen und hydrologischen Untersuchungsergebnisse lassen folgende Schlußfolgerungen bezüglich der in Kapitel 1.1 genannten Fragestellungen zu:

- Der Materialtransport im Watt wird im wesentlichen durch das Tidegeschehen gesteuert. 1. Dabei beeinflußt das Zusammenwirken sehr unterschiedlicher Faktoren die Sedimentation und Erosion im Küstenvorfeld. Die voneinander abweichenden Ablagerungsraten der beiden Testgebiete verdeutlichen, daß vor allem das Materialangebot, aber auch die Lage, das Relief und die Exposition eines Küstenabschnittes sowie die örtlich bedingten Tide- und Windverhältnisse limitierende Einflußgrößen für das Ausmaß der Sedimentation sind. Während Strömungen und Eisdrift mehr den Transport beeinflußten, waren Materialangebot und Seegang für die Menge der abgelagerten bzw. erodierten Sedimente bestimmend. Aus gleichzeitigen sedimentologischen und hydrologischen Messungen konnte in Verbindung mit Feld- und Videobeobachtungen ein Sedimentationsmechanismus für das küstennahe Watt abgeleitet werden, der sich aus einer Kombination von Einzelmechanismen ergibt, die von mehreren Autoren vor allem für die Sedimentation in Ästuaren angenommen werden. Hierzu gehören der von VAN STRAATEN & KUENEN (1957), POSTMA (1961) und DRONKERS (1985) beschriebene "settling-lag / scour-lag"-Mechanismus sowie der von PARTHENIADES (1984), EISMA (1993) und DYER (1989) beobachtete Flockungsmechanismus kohäsiver Partikel.
- 2. Die vielfach gemessene und auch beobachtete seegangsdämpfende Wirkung der Lahnungen sowie der sprunghafte Anstieg der Sedimentation meist feinkörnigen Materials infolge der Baumaßnahmen sprechen dafür, daß innerhalb der Felder ein "hydrodynamisches Milieu" geschaffen wird, das die Sedimentation bei einem wesentlich breiteren Wetter- und Tidespektrum erlaubt. Der unter (1) genannte Sedimentationsmechanismus wird dabei durch die Lahnungen begünstigt. Bodennahe Wellen-, Strömungs- und Trübungsmessungen sowie entsprechende Probennahmen lassen die Annahme, daß der bedeutendere Teil des sedimentierenden Materials sich bereits aus einer hoch konzentrierten Schwebstofffront während der Flutphase absetzt, als gesichert erscheinen. Demgegenüber besteht zum

Teil auch heute noch die Meinung, daß sich die Schwebstoffe in der Stillwasserzeit nach dem Kentern der Tide absetzen.

Die lokal durchgeführten Messungen auf den ebenen Flächen der Lahnungsfelder belegen generell die sedimentationsfördernde Wirkung dieser Bauwerke. Flächenhafte Vermessungen und die daraus gewonnenen Volumenbilanzen zeigen jedoch, daß die Gesamtmenge des sedimentierten Materials durch teilweise verstärkt auftretende Erosion im Bereich der Entwässerungsgräben und des Lahnungsanwurfs deutlich vermindert wird. Insbesondere wenn die künstlich angelegten Entwässerungen von den natürlichen Zu- und Abflußverhältnissen abweichen, muß mit Erosion gerechnet werden.

3. Die sedimentationsfördernde und sedimentverfestigende Wirkung der Begrüppung konnte auch bei diesen Untersuchungen festgestellt werden. Eingehendere bodenphysikalische Unteruchungen sowie ökologische Betrachtungen stellen jedoch die Notwendigkeit solcher aufwendigen Entwässerungssysteme in Frage. Einerseits beruht die gegenüber unbegrüppten Feldern erhöhte Sedimentationsrate zum Teil auf einem größeren Porenanteil im Sediment und nicht auf einem Materialzuwachs, andererseits stellt besonders die maschinelle Begrüppung einen erheblichen Eingriff in die Vorlandentwicklung dar.

Demnach sollten zukünftig das Ausmaß und die Notwendigkeit von Vorlandarbeiten noch mehr nach örtlichen Erfordernissen differenziert beurteilt werden. Bei der Durchführung der Arbeiten können durch stärkere Berücksichtigung der natürlichen morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten Folgekosten gesenkt werden. Außerdem kann das Aussehen der Vorländer naturnaher gestaltet werden.

## 6 Literaturverzeichnis

#### 6.1 Arbeitsgrundlagen

- KÖSTER, R. (1979): Bearbeitung von Sedimentproben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung in der Gruppe Küstengeologie des Geologischen Institutes der Universität Kiel (unveröff.).
- STÖRTENBECKER, M. (1992): Sedimentologische Bearbeitung von Profilen im Watt vor dem Hedwigenkoog/Büsum über Lasergranulometrie.- Diplomarbeit Univ. Kiel (unveröff.).
- THOMAS, B. (1997): Vergleichende Untersuchungen zur Sedimentstabilität und Morphologie von begrüppten und nicht begrüppten Lahnungsfeldern. - Diplomarbeit Univ. Kiel (unveröff.).

#### 6.2 Literatur

- AUGUSTINUS, P.G.E.F. (1997): Biochemical factors influencing deposition and erosion of fine grained sediment.- Forschungszentrum Terramare Berichte 2: 19-20; Wilhelmshaven.
- BANTELMANN, A. (1966): Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste, dargestellt am Beispiel Nordfriesland. - Die Küste, 14: 5-99; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- BEHRE, K.E. & DÖRJES, J. & IRION, G. (1984): Ein datierter Sedimentkern aus dem Holozän der südlichen Nordsee.- Probl. Küstenforsch., 15: 135-148.
- BERNER, H., KAUFHOLD, H., NOMMENSEN, B., PRÖBER, C. (1986): Detaillierte Kartierung der Oberflächensedimente im mittleren und südlichen Nordfriesischen Wattenmeer. - Meyniana, 38: 81-93; Kiel.
- CARTER, R.W.G. (1988): Coastal Environments. an Introduction to the Physical, Ecological and Culural systems of Coastlines: 617 S., London (Academic Press).
- DELFF, C. (1934): Nordfrieslands Werden und Vergehen. Nordelbingen 10, Teil 1 und 2: 254-275.

- DIECKMANN, R. (1985): Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Watteinzugsgebieten der Deutschen Bucht. - Mitt. Franzius Inst., 60: 133-361; Hannover.
- DIECKMANN, R. (1988): Entwicklung der Vorländer an der nordfriesischen Festlandsküste.-Wasser & Boden, 40. Jahrgang, Heft 3; Paul Parey Zeitschriftenverlag Hamburg.
- DIJKEMA, K.S. (1994): Auswirkungen des Meeresspiegelanstieges auf die Salzwiesen. In: LOZÁN, L. et al. (1994): "Warnsignale aus dem Wattenmeer",- Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin.
- DIJKEMA, K.S., BERGS, J. van den, BOSSINADE, J.H., BOUWSEMA P., GLOPPER J.R. de und MEEGEN, J.W.T.M. van (1988): Effecten van rijzendammen ob de opslibbing en de omvang van de vegetatiezones in de Friese en Groninger landaanwinningswerken. Rijkswaterstaat, Directie Groningen, Nota Gran 1988-2010, 130 S..
- DIJKEMA, K.S., BOSSINADE, J.H., BOUWSEMA P., GLOPPER J.R. de (1990): Salt marshes in the Netherlands Wadden Sea: rising high tide levels and accretation enhancement. In: BEUKEMA, J. J., WOLFF, W. J., BROUNS, J.J.W.M. (Hrsg.): Expected effects of climatic change on marine Costal ecosystems. - Kluwer, Dordrecht.
- DIJKEMA, K.S., J. VAN DEN BERGS, J. BOSSINADE AND T.A.G. KROEZE, (1995): Monitoringkwelderwerken in Groningen en Friesland: Evaluatie medio 1992- medio 1994. IBM-DLO Texel, 34 S..
- DIONNE, J.-C. (1970): Aspects morpho-sédimentologiques du glaciel, en particulier des côtes du Saint-Laurent, Québec, Can. Rech. For. Laurentides, Rapp. Infor., Q-F-X-9, 324 S..
- DITTMER, E. (1952): Die nacheiszeitliche Entwicklung der Schleswig-Holsteinischen Westküste. Meyniana 1: 138-168; Kiel.
- DITTMER, E. (1954): Zur Geschichte der Landschaft und der Warften Nordfrieslands. -Jaarsverlag van de Vereeniging voor Terpenonderzoek, Groningen.
- DRONKERS, J. (1985): Tide-induced residual transport of fine sediment.- In: KREEKE, J. van de: Proceedings of the symposium on the physiks of shallow bays and estuaries, Miami.-Springer Verlag, Berlin.
- DRONKERS, J. (1986): Tidal asymmetry and estuarine morphology.- Netherlands Journal of Sea Research 20: 117-131.
- DYER, K. R. (1989): Sediment processes in estuaries: Future research requirements. J. Geophys. Res. 94, 14: 327-339.
- EHLERS, J. (1988): The Morphodynamics of the Wadden Sea.- Balkema Verlag, Rotterdam.

EHLERS, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie.- Enke Verlag, Stuttgart.

- EISMA, D. (1981): Supply and deposition of suspended matter in the North Sea.- In: NIO, S.D.
  & SCHÜTTENHELM, R.T.E. & WEERING, T.C.E. VAN (Hrsg.): Holocene marine sedimentation in the North Sea basin, Spec. Publs. Int. Ass. Sediment., 5: 415-428.
- EISMA, D. (1993): Suspended Matter in Aquatic Environments. Springer Verlag, Berlin, 315 pp.
- ERCHINGER, H.F. (1967): Küstenschutz durch Vorlandgewinnung Neue Baustoffe und Bauverfahren.- Wasser & Boden, Heft 10; Paul Parey Zeitschriftenverlag Hamburg.
- ERCHINGER, H. F. (1971): Landgewinnung und Lahnungsbau im Wattgebiet. Die Küste 21: 102-108; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- ERCHINGER, H. F. (1995): Intaktes Deichvorland für Küstenschutz unverzichtbar.-Wasser & Boden, 47. Jahrgang, Heft 2; Paul Parey Zeitschriftenverlag Hamburg.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G. U. MEYER, C. (1996): Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im Forschungsprojekt "Erosionsfestigkeit von Hellern". - Die Küste 58: 1-45; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- FIEDLER, W. (1992): Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer.- Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- FIEGE, M., HAGMEIER, H. und SCHULZ, N. (1996): Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und Entwässerungssysteme. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover (Hrsg.), Heft 78: 209-353.
- FÜCHTBAUER, H. (1988): Transportvorgänge und Sedimentstrukturen. In: FÜCHTBAUER, H.
  [Hrsg.] (1988): Sedimentpetrologie, Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine, 1141 S., 660 Abb., 113 Tab; Stuttgart (Schweizerbart).
- FÜHRBÖTER, A. (1983): Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. - Wasser und Boden, 3: 106-116.
- GAST, R. (1980): Die Sedimente der Meldorfer Bucht (Deutsche Bucht): Ihre Sedimentpetrographie und Besiedlung, Typisierung und Schwermetallgehalte.- Diss. Univ. Kiel, 262 S., Kiel.
- GAST, R., KÖSTER, R. & RUNTE, K.H. (1984): Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. Untersuchungen zur Frage der Sedimentverteilung und

Schlicksedimentation.- Die Küste 40: 165-257; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).

GÖHREN, H. (1968): Triftströmungen im Wattenmeer. - Mitt. Franzius.Inst., H 30; Hannover.

- HAYES, M. O. (1979): Barrier Island Morphologie as a Function of Tidal and Wave Regime. -In: LEATHERMAN, S. P.: Barrier Island: - London
- HJULSTRÖM, F. (1935): The morphological activity of rivers as illustrated by River Fyris. -Bull. Geol. Inst. Uppsala, 25, chap. III.
- HÖCK, M. & RUNTE, K.-H. (1992): Sedimentologisch geochemische Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Schwermetallbelastung im Wattgebiet vor dem Morsum Kliff / Sylt.-Meynjana 44:129-137; Kiel.
- HOFSTEDE, J.L.A. und SCHIRRMACHER R. (1996): Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein. - Die Küste 58: 61-73; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- HOUWING, E.J.; WAAY, Y.V.D.; TERWINDT, J.H.J.; AUGUSTINUS P.G.E.F.; DIJKEMA, K.S.; BOSSINADE, J.H. (1995): Salt Marshes and sea level rise: Plant dynamics in Relation to accretion enhancement techniques.
- KAMPS, L.F.: Mud Distribution and Land Reclamation in the Eastern Wadden Shallows. Rijkswaterstaat Commun. 4, (1962).
- KOHLHASE, S. (1993): Seegang und Brandung. In: EAK (1993), Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Empfehlungen A:" Äußere Belastung als Grundlage für Planung und Bemessung von Küstenschutzwerken", Die Küste 55: 25-105; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- KRAMER, J. (1978): Küstenschutzwerke an der Nord- und Ostsee.- Die Küste 32: 122-139; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- KRAMER, J. & ROHDE, H. (1992): Historischer Küstenschutz.- DVWK (Hrsg.), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- KRANCK, K. (1981): Particulate matter grain-size characteristics and flocculation in a partially mixed estuary. Sedimentology 28: 107-114.
- LANESKY, D.E., LOGAN, B.W., BROWN, R.G., HINE, A.C. (1979): A new approach to portable vibrocoring underwater and on Land.- J. Sed. Petrol., 49: 654-657; Tulsa/ Oklahoma.
- LOT GmbH (1989): CIS-Computergestützte Partikelanalyse.- Teil I: Laseranalyse-Benutzerhandbuch, Version 4.0, Darmstadt.
- LUDWIG, G. & MÜLLER, H. & STREIF, H. (1981): New dates on Holocene sea-level changes in the German Bight.- In: NIO, S.D. & SCHÜTTENHELM, R.T.E. & WEERING, T.C.E. VAN ( Hrsg.): Holocene marine sedimentation in the North Sea basin, Spec. Publs. Int. Ass. Sediment., 5: 211-219.
- MANZENRIEDER, H. (1983): Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs.- Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Heft 79.
- MC CAVE, J.N. (1973): Mud in the North Sea.- In: GOLDBERG, E.D. (Hrsg.): North Sea Science: 75-100; Cambridge, Mass.
- MCMANUS, J. (1991): Grain size determination and interpretation. In: TUCKER, M. [Hrsg.] : Techniques in Sedimentology: 63 85; Oxford.
- MEHTA, A.J. (1988): Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion. pp 427 - 445 in: DRONKERS, J. & LEUSSEN, W.VAN, EDS. (1988): Physikal processes in estuaries. - Springerverlag, Berlin, XII + 560 p, 1989.
- MENKE. B. (1976): Befunde und Überlegungen zum nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieg in Dithmarschen und Eiderstedt, Schleswig-Holstein.- Probl. Küstenforsch., 11: 145-161.
- MÜLLER, C.D. (1960): Fauna und Sediment in der Leybucht Biologisch-bodenkundliche Wattuntersuchung mit Stellungnahme zur Landgewinnung. In: Jahresbericht (1959) der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Band XI.
- MUUB, U. PETERSEN, M. (1974): Die Küsten Schleswig- Holsteins. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 2. verbesserte Auflage.
- NOMMENSEN, B. (1982): Die Sedimente des südlichen Nordfriesischen Wattenmeeres.-Dissertation an der Universität Kiel.
- PARTHENIADES, E. (1984): A fundamental framework for cohesive sediment dynamics. In: METHA, A.J. (eds) Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York. 14: 219-250.
- POSTMA, H. (1961): Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea.- Netherlands Journal of Sea Research, vol 1, no 1/2: 148-190.
- PRINZ, H. (1982): Abriß der Ingenieurgeologie.- Enke Verlag, Stuttgart.
- PRANGE, W. (1967a): Geologie des Holozäns in den Marschen des nordfriesischen Festlandes, - Meyniana, 17: 45-94; Kiel.

- PRANGE, W. (1967b): Über die Beziehungen zwischen Schichtfolge und Meeresspiegelanstieg im Holozän der Nordseemarschen. - Geol. Rdsch., 56: 709-725; Stuttgart.
- PROBST, B. (1996): Deichvorlandbewirtschaftung im Wandel der Zeit. Die Küste 58: 47-60, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- REINECK, H.-E. (1956): Abschmelzreste von Treibeis an den Ufersäumen des Gezeiten-Meeres, Senckenbergiana lethea, Vol. 37: 299-304.
- REINECK, H.-E. (1978): Die Watten der deutschen Nordseeküste.- Die Küste, 32: 64-83.
- REINECK, H.-E. (1982): Das Watt, Ablagerungs- und Lebensraum.- Kramer Verlag, Frankfurt/Main.
- RICKLEFS, K. (1989): Zur Sedimentologie und Hydrographie des Eider-Ästuars.- Berichte-Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, 35: 182 S., 85 Abb., 3 Tab., Kiel.
- ROHDE, H. (1975): Wasserstandsbeobachtungen im Bereich der deutschen Nordseeküste vor der Mitte des 19. Jahrhunderts.- Die Küste, 28: 1-96.
- RUNTE, K.H. (1989): Methodische Verfahren zur Quantifizierung von Umlagerungen in intertidalen Sedimenten. Meyniana, 41: 153-165, Kiel.
- RUNTE, K.H. (1990): Sedimentologisch-Morphodynamische Untersuchungen zu den Auswirkungen der Herzmuschelfischerei mit Spüldredgen im Wattenmeer. - Diss. Univ. Kiel, 129 S., Kiel.
- SCHOOT, P. M. & JONG, J. E. A. de (1982): Sedimentatie en erosie metingen met behulp van de Sedi-Eros-Tafel (SET).- Rijkswaterstaat; Notitie.
- SCHÜNEMANN, M. & KÜHL, H. (1991): A device for erosion-measurements on naturally formed, muddy sediments: The EROMES-System.- GKSS, Geesthacht.
- SCHWEDHELM, E. & IRION, G. (1983): Heavy metal distribution in tidal flat sediments of the German part of the North Sea.- Proc. Int. Conf. " Heavy Metals in the Environment " Heidelberg 1983: 1037-1040; Publ. by CEP Consultants Ltd., Edinburgh, UK.
- SEIBOLD, E. (1974): Die Meeresregion.- In: BRINKMANN, R.: Lehrbuch der allgemeinen Geologie, Band 1, Festland Meer: 358 S.; Stuttgart (Enke).
- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. - Mitt. Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffahrt, 26, Berlin, 1936.

- SINDOWSKI, K.H. (1970): Das Quartär im Untergrund der Deutschen Bucht (Nordsee).-Eiszeitalter und Gegenwart, 21: 33-46.
- STADELMANN, R. (1981): Meer Deiche Land. Küstenschutz und Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste.- Karl Wachholz Verlag, Neumünster.
- STRAATEN, L.M.J.U. VAN & KUENEN, P.H. (1957): Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea.- Geol. en Mijnbouw, N.S., 19: 329-354.
- STREIF, H. & KÖSTER, R. (1978): Zur Geologie der deutschen Nordseeküste.- Die Küste, 32: 30-49; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- TETZE, G. (1983): Das Jungpleistozän und marine Holozän nach seismischen Messungen nordwestlich Eiderstedt/Schleswig-Holstein.- Diss. Univ. Kiel: 118 S., 37 Abb; Kiel.
- TUCKER, M. (1985): Einführung in die Sedimentpetrographie.- 265 S. 219 Abb., 20 Tab.; Stuttgart (Enke).
- UNSÖLD, G. (1984): Der Transportbeginn feinstkörnigen, rolligen Sohlmaterials in gleichförmigen, turbulenten Strömungen: Eine experimentelle Überprüfung und Erweiterung der SHIELDS - Funktion. - Lab. report for internal circulation, Univers. Kiel, SFB 95, 70, III+141p, 1984.
- WARD, J.H. (1963): Hierarchical grouping to optimize an objective function.- J. Am. Statistical Assoc. 58: 235-244.
- WERNER, F. (1967): Röntgen-Radiographie zur Untersuchung von Sedimentstrukturen. -Umschau, 16: 532; Frankfurt a. M..
- WOHLENBERG, E. (1953): Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste 2: 33-94; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).

#### 6.3 Veröffentlichungen und Vorträge im Rahmen des Projektes

- REIMERS, H.-C. (1995): Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. Jahresbericht 1994, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, 53-55: Büsum.
- REIMERS, H.-C. (1996): Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. Jahresbericht 1995, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, 61-64: Büsum.
- REIMERS, H.-C. (1997): Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. Jahresbericht 1996, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, 54-58: Büsum.
- REIMERS, H.-C. (1997): Morphological and sedimentological changes in low macrotidal environments due to land reclamation works. - Forschungszentrum Terramare Berichte 2: 92-94; Wilhelmshaven.
- REIMERS, H.-C. (1997): Sedimentological and Morphological Changes in low Macrotidal Environments due to and reclamation Work.
- REIMERS, H.-C. (in Vorbereitung): Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern. -Die Küste, 62: ?-?; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).
- RICKLEFS, K. (1997): Near bottom measurements of waves, currents and turbidity in a muddy tidal environment.- Forschungszentrum Terramare Berichte 2: 94-95; Wilhelmshaven.
- THOMAS, B. (1997): Vergleichende Untersuchungen zur Auswirgung von Grüppenarbeiten. -Jahresbericht 1996, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, 58-60: Büsum.
- THOMAS, B. & REIMERS, H.-C. (in Vorbereitung): Vergleichende Untersuchungen zur Auswirgung von Grüppenarbeiten.- Die Küste, 62: ?-?; Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide (Holst.).

#### Anlage I

Testgebiet Dithmarschen: Digitalisierte Wasserlinien (August 1995)







---- = 10 cm/sec to East

x-step 5 min

1.7.1	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN/m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffanteil [%]
Sep 94	0.00	0.5014875		10.97	57.76	31.27	66.60
Okt 94	-0.97	0.2339724	4.90	14.44	52.47	33.09	81.04
Nov 94	-1.27	0.2507115	4.21	9.40	59.40	31.20	79.95
Dez 94	-0.51	0.2416018	3.19	7.03	45.21	47.76	80.54
Jan 95	-1.01	0.2771494	3.92.	4.11	29.32	66.57	78.30
Feb 95				4.00	28.00	68.00	
Mar 95	0.18	0.2597624	4.17	3.38	26.97	69.66	79.38
Apr 95	-0.80	0.2962	5.15	10.16	43.88	45.96	77.15
Mai 95	-0.90	0.2579585	3.92	7.39	43.39	49.21	79.49
Jun 95				9.00	44.00	47.00	
Jul 95	-0.98	0.2253704	7.72	10.01	44.67	45.32	81.61
Aug 95				12.00	45.00	43.00	1
Sep 95	-1.24	0.2004873	18.88	14.07	44.23	41.70	83.30
Okt 95	-0.42	0.2444963	4.66	6.94	27.76	65.30	80.35
Nov 95	-0.49	0.285676	2.94	4.19	31.17	64.64	77.78
Dez 95			-	8.00	37.00	55.00	
Jan 96				12.00	43.00	45.00	
Feb 96				16.00	49.00	35.00	
Mar 96				20.00	55.00	25.00	
Apr 96	-0.04	0.3074	4.05	24.52	60.42	15.07	76.49
Mai 96	-0.12	0.2899949	4.90	11.76	61.30	26.95	77.52
Jun 96		1		7.32	52.73	39.95	
Jul 96	0.46	0.2645582	4.17	8.18	44.07	47.75	79.08
Aug 96			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	9.00	49.00	42.00	
Sep 96	0.55	0.3080253	5.15	9.65	53.61	36.74	76.45

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	1.10		23.49	63.09	13.42	47.53
Okt 94	-0.03	0.88	2.33	76.01	23.99	.00	53.07
Nov 94	-0.39	0.68	1.33	9.40	59.40	31.20	59.39
Dez 94	0.20	0.59	1.23	31.05	61.58	7.36	62.88
Jan 95	1.60	0.64	0.61	21.07	57.82	21.11	61.12
Feb 95				15.00	54.00	31.00	65.00
Mar 95	1.43	0.50	0.74	8.38	50.12	41.50	66.63
Apr 95	2.29	0.69	1.35	8.10	45.10	46.79	59.33
Mai 95	2.90	0.83	1.72	17.24	60.94	21.83	54.68
Jun 95				16.00	63.00	21.00	60.00
Jul 95	2.70	0.46	2.21	15.45	65.98	18.58	68.50
Aug 95				20.00	66.00	14.00	67.00
Sep 95	3.08	0.51	4.17	25.89	65.41	8.70	66 39
Okt 95	2.92	0.39	1.84	9.40	55.25	35.35	71.93
Nov 95	3.73	1.47	1.10	31.32	61.58	7.10	40.49
Dez 95				30.00	62.00	8.00	45.00
Jan 96				29.00	63.00	8.00	50.00
Feb 96				28.00	64.00	8.00	55.00
Mar 96				27.00	65.00	8.00	60.00
Apr 96	3.31	0.60	2.70	26.63	65.43	7.95	62.52
Mai 96	3.83	0.56	2.82	14.36	61.27	24.37	64.12
Jun 96				14.86	63.21	21.93	60.00
Jul 96	4.57	0.80	1.59	38.64	56.68	4.68	55.42
Aug 96				31.00	59.00	10.00	59.00
Sep 96	4.58	0.60	1.84	24.74	60.31	14.94	62.32
Okt 96						,	02.02
Nov 96	4.69						

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.67		9.98	44.37	45.65	60.05
Okt 94	0.51	0.39	3.80	13.20	59.63	27.16	72.16
Nov 94	-0.54	0.39	3.22	9.40	59.40	31.20	71.77
Dez 94	-0.29	0.29	4.54	10.48	61.39	28.13	77.70
Jan 95	-0.38	0.29	2.70	4.07	35.09	60.84	77.50
Feb 95				5.00	30.00	65.00	
Mar 95	-2.41	0.30	5.76	5.29	24.78	69.94	76.77
Apr 95	-4.46	0.58	5.88	5.11	24.97	69.92	63.32
Mai 95	-4.92	0.37	6.13	6.29	31.92	61.79	72.83
Jun 95				8.00	39.00	53.00	
Jul 95	-3.27	0.38	3.92	9.53	45.74	44.73	72.36
Aug 95				12.00	55.00	33.00	
Sep 95	-0.66	0,58	2.08	15.14	64.75	20.11	63.20
Okt 95	0.05	0.73	0.74	28.38	59.51	12.11	57.82
Nov 95	2.02	1.07	0.00	45.18	51.97	2.85	48.34
Dez 95				38.00	50.00	12.00	
Jan 96				30.00	47.00	23.00	
Feb 96				22.00	44.00	34.00	
Mar 96				14.00	40.00	46.00	
Apr 96	3.52	0.86	1.47	6.83	36.35	56.82	53.81
Mai 96	5.20	1.06	0.49	66.13	33.31	.56	48.43
Jun 96				36.07	47.87	16.06	
Jul 96	7.86	1.16	0.12	83.35	16.65	.00	46.25
Aug 96				77.00	23.00	0.00	
Sep 96	10.66	1.11	0.00	69.46	30.54	.00	47.44
Okt 96	14.51						

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.60		4.32	39.36	56.32	62.56
Okt 94	-0.09	0.28	3.43	6.12	39.24	54.64	77.87
Nov 94	-0.07	0.29	1.44	9.40	59.40	31.20	77.26
Dez 94	0.54	0.28	3.19	5.41	39.09	55.50	78.33
Jan 95	0.91	0.29	3.55	2.25	30.27	67.48	77.80
Feb 95				2.00	25.00	73.00	78.00
Mar 95	0.16	0.28	3.68	1.53	19.33	79.14	78.36
Apr 95	1.36	0.30	3.19	2.80	24.29	72.91	76.80
Mai 95	1.34	0.32	3.80	5.18	31.24	63.58	75.83
Jun 95				4.00	32.00	64.00	76.00
Jul 95	2.10	0.28	3.06	3.36	33.37	63.27	77.85
Aug 95				5.00	38.00	57.00	77.00
Sep 95	2.54	0.30	4.05	6.29	43.27	50.43	76.83
Okt 95	5.42	0.32	2.57	6.61	41.47	51.93	75.95
Nov 95	6.38	0.46	3.31	9.62	47.18	43.20	68.63
Dez 95		Sec. 19. 4	1	11.00	49.00	40.00	69.00
Jan 96				12.00	50.00	38.00	70.00
Feb 96				14.00	52.00	34.00	71.00
Mar 96				15.00	53.00	32.00	72.00
Apr 96	9.80	0.39	2.82	16.65	54.51	28.83	72.06
Mai 96	10.25	0.39	4.41	7.24	37.81	54.95	71.85
Jun 96				5.62	33.66	60.72	73.00
Jul 96	11.52	0.34	2.94	7.78	54.17	38.05	74.74
Aug 96				9.00	50.00	41.00	74.00
Sep 96	11.99	0.34	3.43	10.37	47.64	42.00	74.44

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00			9.12	55.32	35.56	77.00
Okt 94	0.00	0.29	3.06	10.71	37.88	51.41	77.47
Nov 94	-0.28	0.29	1.00	9.40	59.40	31.20	77.71
Dez 94	0.01	0.27	1.96	5.27	37.01	57.73	78.50
Jan 95	0.23	0.27	3.06	2.42	25.10	72.48	78.88
Feb 95				2.00	20.00	78.00	79.00
Mar 95	1.53	0.27	3.43	1.29	15,61	83.10	78.79
Apr 95	1.10	0.35	3.19	1.89	25.78	72.33	73.90
Mai 95	1.29	0.30	3.31	3.72	22.41	73.87	77.05
Jun 95				4.00	25.00	71.00	77.00
Jul 95	1.42	0.29	2.08	3.49	29.24	67.27	77.23
Aug 95				5.00	25.00	70.00	76.00
Sep 95	1.03	0.33	1.84	5.78	23.27	70.95	75.15
Okt 95	0.58	0.28	4.17	2.44	18.58	78.98	78.23
Nov 95	1.96	0.29	2.94	2.62	29.33	68.04	77.70
Dez 95				3.00	33.00	65.00	77.00
Jan 96				4.00	36.00	66.00	75.00
Feb 96				11.00	39.00	50.00	70.00
Mar 96				43.00	43.00	14.00	65.00
Apr 96	3.85	0.84	2.94	53.97	46.03	.00	54.41
Mai 96	2.91	0.30	4.17	4.20	26.09	69.72	76.95
Jun 96		1		3.83	29.84	66.33	77.00
Jul 96	0.59	0.29	1.47	2.32	22.57	75.11	77.79
Aug 96				3.00	28.00	69.00	77.00
Sep 96	2.28	0.31	0.61	3.24	33.85	62.91	76.09

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.67		12.81	30.59	56.60	60.03
Okt 94	0.30	0.29	3.06	9.26	52.26	38.48	77.52
Nov 94	0.47	0.28	2.22	9.40	59.40	31.20	78.18
Dez 94	1.16	0.28	2.33	5.16	35.47	59.37	78.14
Jan 95	1.41	0.28	2.94	2.50	38.58	58.92	78.19
Feb 95		2		2.00	30.00	68.00	77.00
Mar 95	2.81	0.30	3.43	2.03	21.41	76.57	76.67
Apr 95	0.47	0.37	3.68	3.46	27.32	69.23	73.04
Mai 95	0.78	0.33	3.55	2.65	25.77	71.58	75.08
Jun 95		1. Jan (* 1. 4)	Land a series of the	3.00	29.00	68.00	76.00
Jul 95	0.90	0.31	2.70	2.94	31.17	65.89	76.30
Aug 95				12.00	38.00	50.00	73.00
Sep 95	2.37	0.41	2.08	21.33	44.85	33.82	70.73
Okt 95	3.67	0.41	1.96	9.30	39.23	51.46	70.71
Nov 95	5.73	0.70	0.98	18.14	60.35	21.51	58.72
Dez 95		1.1.1.1.1.1.1.1		20.00	60.00	20.00	60.00
Jan 96				21.00	60.00	19.00	62.00
Feb 96		5	11	23.00	60.00	17.00	65.00
Mar 96				24.00	60.00	16.00	67.00
Apr 96	7.94	0.44	3.43	25.49	59.55	14.96	69.40
Mai 96	9.30	0.93	0.86	26.06	43.99	29.94	51.85
Jun 96				37.82	43.94	18.24	40.00
Jul 96	11.34	1.78	0.37	52.49	41.07	6.43	36.04
Aug 96	i terre i conseile			49.00	47.00	4.00	50.00
Sep 96		0.58	0.74	44.79	52.28	2.93	63.30
Okt 96			0.99		1		

1.11111	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m2]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.68		5.97	48.95	45.08	59.39
Okt 94	0.53	0.33	3.80	14.63	51.24	34.13	74.92
Nov 94	0.10	0.38	3.55	9.40	59.40	31.20	72.45
Dez 94	1.05	0.28	4.17	4.05	47.20	48.75	78.21
Jan 95	0.64	0.35	5.15	4.14	51.03	44.83	73.80
Feb 95	the second s	1.000		3.00	43.00	54.00	75.00
Mar 95	-1.84	0.30	5.52	2.38	33.04	64.58	76.82
Apr 95	-1.31	0.38	4.41	6.18	41.17	52.66	72.26
Mai 95	-1.84	0.45	5.15	8.04	38.45	53.51	69.20
Jun 95				13.00	47.00	40.00	68.00
Jul 95	-0.39	0.47	3.31	18.55	54.32	27.13	67.83
Aug 95				28.00	54.00	18.00	62.00
Sep 95	1.84	0.68	1.59	38.32	53.16	8.52	59.46
Okt 95	4.86	1.68	0.49	81.84	18.16	.00	37.30
Nov 95	8.89	2.38	0.25	72.13	27.87	.00	29.63
Dez 95			2	71.00	29.00	0.00	35.00
Jan 96		ni 7		70.00	30.00	0.00	40.00
Feb 96				69.00	31.00	0.00	45.00
Mar 96			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	68.00	32.00	0.00	50.00
Apr 96	19.61	0.83	1.35	66.78	33.22	0.00	54.68
Mai 96	21.11	1.20	0.74	27.77	41.89	30.34	45.51
Jun 96				59.06	37.36	3.58	44.00
Jul 96	23.01	1.28	0.00	55.30	44.70	.00	43.91
Aug 96				50.00	49.00	1.00	44.00
Sep 96	23.73	1.22	0.37	44.79	52.28	2.93	45.11
Okt 96	and the second second						1
Nov 96	28.70		4.90		2		

1 1 I	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.64		5.96	50.40	43.64	60.82
Okt 94	-0.09	0.33	4.90	12.47	53.89	33.64	74.96
Nov 94	-0.19	0.40	3.99	9.40	59.40	31.20	71.48
Dez 94	0.16	0.29	4.41	7.60	52.46	39.94	77.65
Jan 95	-0.75	0.31	4.66	6.04	45.69	48.27	76.50
Feb 95				7.00	46.00	47.00	76.00
Mar 95	-1.13	0.31	4.90	7.32	47.20	45.48	76.18
Apr 95	-0.94	0.44	5.64	5.36	57.45	37.19	69.46
Mai 95	-0.58	0.31	5.88	2.47	38.24	59.28	76.31
Jun 95		1.1.1.1.1.1		6.00	50.00	44.00	75.00
Jul 95	-0.73	0.35	6.13	10.28	59.13	30.59	74.21
Aug 95		1	The second se	11.00	61.00	28.00	74.00
Sep 95	-0.55	0.34	7.97	10.37	64.77	24.86	74.81
Okt 95	0.44	0.33	4.90	7.13	54.37	38.50	75.40
Nov 95	-0.58	0.43	3.76	7.78	46.70	45.52	69.96
Dez 95	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			8,00	52.00	40.00	70.00
Jan 96				9.00	56.00	35.00	71.00
Feb 96				9.00	61.00	30.00	72.00
Mar 96				10.00	64.00	26.00	73.00
Apr 96	2.54	0.36	2.12	10.71	66.99	22.30	73.41
Mai 96	2.90	0.43	3.27	13.49	55.07	31.44	70.12
Jun 96		1		16.32	60.21	23.47	70.00
Jul 96	3.35	0.44	1.96	12.50	57.69	29.81	69.28
Aug 96				17.00	72.00	21.00	70.00
Sep 96	3.08	0.41	3.76	22.36	63.48	14.16	71.06
Okt 96							
Nov 96	3.97						

1 (a)	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.63		5.44	47.80	46.77	61.35
Okt 94	0.40	0.32	3.31	24.42	54.82	20.76	75.89
Nov 94	0.11	0.27	1.66	9.40	59.40	31.20	78.74
Dez 94	0.42	0.26	3.80	8.00	45.49	46.51	79.23
Jan 95	-0.45	0.25	3.55	4.90	42.19	52.91	79.93
Feb 95				4.00	40.00	56.00	
Mar 95	0.28	0.26	3.43	2.89	38.64	58.47	79.20
Apr 95	-0.24	0.32	4.54	4.68	42.16	53.16	75.90
Mai 95	-0.28	0.30	4.90	5.65	28.53	65.83	76.72
Jun 95				5.00	36.00	56.00	
Jul 95	-0.02	0.27	7.23	4.38	44.90	50.72	78.95
Aug 95		1		6.00	49.00	45.00	
Sep 95	-0.13	0.28	12.14	7.48	53.73	38.79	78.28
Okt 95	-0.09	0.30	2.94	8.34	39.37	52.29	76.74
Nov 95	0.17	0.46	4.41	15.83	64.22	19.96	68.44
Dez 95				16.00	62.00	22.00	
Jan 96				16.00	60.00	24.00	
Feb 96				16.00	58.00	26.00	
Mar 96				16.00	55.00	29.00	
Apr 96	1.11	0.41	1.23	16.96	52.55	30.48	70.78
Mai 96	1.27	0.41	4.05	20.63	55.96	23.41	70.74
Jun 96				14.43	39.50	46.07	
Jul 96	2.20		1.35	20.70	58.75	20.55	70.00
Aug 96				21.00	61.00	18.00	
Sep 96	1.51	0.37	2.70	22.36	63.48	14.16	73.03

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.81		15.41	52.92	31.68	55.20
Okt 94	-0.31	0.62	3.06	30.76	51.40	17.84	61.58
Nov 94	0.03	0.54	1.72	9.40	59.40	31.20	64.90
Dez 94		The first states of					
Jan 95							
Feb 95							
Mar 95		1.13	0.25	72.32	27.68	.00	46.99
Apr95	-1.14	0.60	0.61	9.36	68.95	21.68	62.46
Mai 95	1.05	0.97	0.25	45.87	51.56	2.57	50.80
Jun 95	4.28	0.95	0.12	32.56	67.44	.00	51.28
Jul 95							
Aug 95							
Sep 95	6.35	0.99	0.86	76.16	23.84	.00	50.32
Okt 95							
Nov 95	10.48	0.86	0.49	33.46	51.15	15.39	53.70
Dez 95							
Jan 96							
Feb 96							
Mar 96							
Apr 96	10.83	0.96	0.74	53.78	45.60	.62	50.99
Mai 96	11.72	1.53	0.25	52.77	42.71	4.52	39.49
Jun 96							
Jul 96	12.58	0.83	0.49	35.30	51.38	13.32	54.71
Aug 96							
Sep 96	15.58	1.05	0.49	52.53	42.73	4.74	48.70

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.00					0.00
Okt 94		0.43	2.82	36.35	62.93	.72	69.71
Nov 94		0.00					0.00
Dez 94		0.00	2.45	9.13	41.35	49.53	0.00
Jan 95		0.00	3.92	23.05	53.37	23.59	0.00
Feb 95		1.000					
Mar 95		0.43	2.94	9.43	45.69	44.88	69.77
Apr95	0.46	0.56	3.06	30.07	42.80	27.13	64.19
Mai 95	0.49	0.46	3.31	9.57	46.57	43.86	68.38
Jun 95	0.85	0.39	2.70	11.09	51.54	37.37	72.07
Jul 95				1			
Aug 95		1. a					
Sep 95	3.19	0.63	2.70	25.57	53.66	20.77	61.25
Okt 95							
Nov 95	7.62	1.22	0.61	43.40	55.83	.76	45.01
Dez 95							
Jan 96							
Feb 96							
Mar 96							
Apr 96	8.02	1.02	0.74	73.23	26.77	.00	49.61
Mai 96	9.39	1.19	0.49	79.06	20.94	.00	45.62
Jun 96		1000					
Jul 96	11.27	1.26	0.12	76.85	23.15	.00	44.29
Aug 96							
Sep 96	13.76	1.05	0.98	51.55	48.20	.25	48.80

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.80		187-19-19-19-19-19-19-19-19-19-19-19-19-19-			55.57
Okt 94	0.65	0.69	2.82	25.01	62.71	12.28	59.05
Nov 94	1.15	0.41					71.02
Dez 94	0.39	0.42	2.45	13.91	43.10	42.99	70.43
Jan 95	0.82	0.36	3.92	10.76	48.38	40.86	73.76
Feb 95							
Mar 95	0.74	0.44	2.94	5.60	41.87	52.53	69.62
Apr95	0.95	0.51	3.06	9.88	48.94	41.18	66.07
Mai 95	2.28	0.47	3.31	12.27	47.15	40.58	68.15
Jun 95	3.59	0.49	2.70	14.98	50.62	34.40	66.97
Jul 95							
Aug 95							
Sep 95	5.77	0.65	2.70	32.09	58.13	9.78	60.46
Okt 95							
Nov 95	8.15	0.97	0.61	37.47	48.07	14.46	50.74
Dez 95							
Jan 96						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
Feb 96			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
Mar 96							
Apr 96	8.59	0.79	0.74	40.95	58.03	1.02	55.79
Mai 96	9.30	1.19	0.49	80.72	19.28	.00	45.60
Jun 96		1					
Jul 96	10.63	1.02	0.12	45.45	52.42	2.14	49.49
Aug 96		2.21					1.1012 (2)
Sep 96	12.76	0.92	0.98	49.83	48.72	1.45	52.09

0.00	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.90		30.99	54.49	14.52	52.64
Okt 94	-0.60	0.57	1.96	21.73	63.75	14.53	63.63
Nov 94	-0.37	0.40	1.23	16.48	68.58	14.94	71.34
Dez 94	-0.22	0.45	3.31	16.26	63.52	20.22	68.75
Jan 95	0.48	0.40	3.68	11.04	51.35	37.61	71.32
Feb 95				9.00	45.00	46.00	69.00
Mar 95	1.15	0.49	2.57	7.94	39.50	52.55	67.33
Apr95	1.78	0.44	2.57	11.50	49.08	39.42	69.64
Mai 95	1.93	0.44	2.70	8.05	49.62	42.34	69.40
Jun 95	4.99	0.43	2.21	14.21	49.82	35.97	70.06
Jul 95		· · · · · · ·		15.00	52.00	33.00	68.00
Aug 95				16.00	54.00	30.00	65.00
Sep 95	6.81	0.58	2.57	17.89	56.40	25.71	63.22
Okt 95				22.00	49.00	29.00	59.00
Nov 95	13.88	0.80	1.96	26.22	41.38	32.40	55.60
Dez 95				28.00	44.00	28.00	57.00
Jan 96		1		30.00	46.00	24.00	59.00
Feb 96				32.00	49.00	19.00	61.00
Mar 96				34.00	52.00	14.00	63.00
Apr 96	15.63	0.53	1.96	36.07	55.62	8.31	65.27
Mai 96	16.05	0.50	2.57	26.74	51.11	22.15	66.79
Jun 96		T		35.00	52.00	13.00	64.00
Jul 96	18.37	0.61	1.96	44.32	52.45	3.23	62.17
Aug 96				31.00	56.00	13.00	65.00
Sep 96	22.04	0.45	3.68	18.34	60.62	21.03	68.93

1.111	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.67		14.65	50.40	34.95	59.93
Okt 94	0.88	0.44	2.08	17.08	54.26	28.66	69.50
Nov 94	1.11	0.33	1.96	20.23	57.07	22.70	75.12
Dez 94	0.66	0.41	3.55	17.10	45.93	36.97	70.84
Jan 95	1.61	0.35	4.17	9.38	42.29	48.33	73.91
Feb 95				10.00	47.00	43.00	74.00
Mar 95	0.86	0.37	2.94	10.26	51.54	38.20	73.21
Apr95	1.68	0.51	2.70	9.79	45.05	45,16	66.18
Mai 95	1.41	0.52	3.19	7.44	40.28	52.28	66.01
Jun 95	0.71	0.35	3.92	8.80	40.86	50.35	74.01
Jul 95			A	10.00	45.00	45.00	74.00
Aug 95		_		12.00	49.00	39.00	74.00
Sep 95	0.36	0.35	4.54	14.23	52.72	33.05	74.34
Okt 95		·		12.00	46.00	42.00	70.00
Nov 95	-0.68	0.46	4.41	9.44	41.10	49.46	68.60
Dez 95				12.00	44.00	44.00	68.00
Jan 96				14.00	46.00	40.00	67.00
Feb 96		1		16.00	48.00	36.00	66.00
Mar 96				18.00	50.00	32.00	66.00
Apr 96	-3.71	1.24	4.54	20.00	53.00	27.00	65.00
Mai 96	-4.22	0.54	4.05	21.93	55.41	22.66	65.00
Jun 96				21.00	56.00	23.00	66.00
Jul 96	-10.00		4.53	21.05	56.80	22.14	66.00

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0,78		23.37	53.46	23.18	56.12
Okt 94	-0.06	0.53	2.08	56.16	43.84	.00	65.23
Nov 94	0.57	0.51	0.98	33.99	59.83	6.18	66.37
Dez 94	0.87	0.37	3.55	14.22	52.53	33.25	72.94
Jan 95	0.49	0.34	5.15	9.28	50.02	40.71	74.78
Feb 95		1		8.00	42.00	50.00	73.00
Mar 95	0.33	0.42	4.05	6.95	35.54	57.52	70.46
Apr95	0.65	0.57	3.31	27.81	51.76	20.43	63.50
Mai 95	1.46	0.55	3.19	27.81	51.76	20.43	64.45
Jun 95	2.77	0.49	1.72	13.30	53.59	33.10	67.17
Jul 95				20.00	50.00	30.00	67.00
Aug 95				30.00	50.00	20.00	66.00
Sep 95	4.82	0.53	1.96	42.06	46.63	11.31	65.51
Okt 95				30.00	50.00	20.00	63.00
Nov 95	7.50	0.64	2.08	21.14	55.85	23.01	60.87
Dez 95				30.00	55.00	15.00	60.00
Jan 96				40.00	50.00	10.00	60.00
Feb 96		11		45.00	45.00	10.00	59.00
Mar 96				50.00	43.00	7.00	69.00
Apr 96	11.52	0.72	1.23	52.95	42.64	4.41	58.02
Mai 96	12.04	1	1.35	45.00	50.00	5.00	59.00
Jun 96		i		35.00	60.00	5.00	59.00
Jul 96	11.86	0.69	0.98	30.01	63.36	6.63	59.14
Aug 96		n 1		30.00	64.00	6.00	60.00
Sep 96	15.12	0.65	1.35	29.82	64.23	5.95	60.54

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.71		20.00	64.07	15.94	58.63
Okt 94	0.97	0.51	1.96	40.57	56.40	3.03	66.11
Nov 94	1.12	0.41	1.47	11.74	58.08	30.18	70.89
Dez 94	0.81	0.35	3.92	9.28	41.02	49.70	74.34
Jan 95	5.29	0.37	3.43	13.70	46.76	39.54	72.94
Feb 95				14.00	40.00	45.00	70.00
Mar 95	4.88	0.49	3.31	15.01	34.10	50.89	66.93
Apr95	4.52	0.47	2.94	15.41	45.30	39.29	68.05
Mai 95	5.36	0.60	2.94	11.46	31.73	56.81	62.64
Jun 95	5.31	0.47	2.57	13.00	39.00	48.00	68.04
Jul 95				15.00	45.00	40.00	67.00
Aug 95				16.00	51.00	32.00	65.00
Sep 95	7.61	0.56	2.21	17.60	58.20	24.20	63.95
Okt 95		10000		27.00	54.00	18.00	60.00
Nov 95	11.32	0.93	0.98	37.16	50.79	12.04	51.92
Dez 95				39.00	50.00	11.00	54.00
Jan 96				41.00	50.00	9.00	56.00
Feb 96				43.00	49.00	8.00	58.00
Mar 96				45.00	49.00	6.00	60.00
Apr 96	10.59	0.64	1.72	47.40	48.25	4.35	60.95
Mai 96	11.67	0.92	2.45	40.48	59.06	.45	52.12
Jun 96				43.00	55.00	2.00	53.00
Jul 96	13.63	0.86	1.10	45.71	51.15	3.14	53.77
Aug 96				50.00	48.00	2.00	53.00
Sep 96	15.27	0.94	0.74	55.71	44.29	.00	51.42

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.75		29.00	50.87	20.13	57.02
Okt 94	-0.05	0.49	3.19	49.50	49.56	.94	67.17
Nov 94	-1.05	0.41	2.82	27.96	66.66	5.39	71.17
Dez 94	-0.32	0.38	4.29	12.77	44.65	42.59	72.58
Jan 95	2.36	0.50	2.45	16.14	51.49	32.36	66.86
Feb 95			1-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0	17.00	49.00	34.00	
Mar 95	2.77	0.41	3.80	18.49	46.95	34.55	71.13
Apr95	3.34	0.49	2.57	18.52	56.06	25.42	67.25
Mai 95	3.60	0.63	2.33	14.81	45.62	39.57	61.19
Jun 95	3.59	0.55	2.08	20.71	45.69	33.60	64.67
Jul 95				23.00	48.00	29.00	
Aug 95				26.00	50.00	24.00	
Sep 95	5.48	0.60	1.72	29.65	52.14	18.20	62.53
Okt 95				23.00	54.00	23.00	
Nov 95	8.83	0.69	0.74	16.48	55.21	28.31	59.11
Dez 95		· · · · · · · · · ·		19.00	55.00	26.00	
Jan 96			-	22.00	54.00	24.00	
Feb 96				26.00	54.00	20.00	
Mar 96				30.00	53.00	17.00	
Apr 96	11.45	0.58	1.72	33.72	52.46	13.82	63.26
Mai 96	12.05	0.72	2.21	45.04	40.75	14.21	58.01
Jun 96				37.00	48.00	15.00	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Jul 96	13.54	0.59	1.23	29.05	55.29	15.67	62.86
Aug 96	the second se			33.00	48.00	19.00	
Sep 96	15.32	0.49	2.08	37.08	40.89	22.03	67.15

	Höhe [cm] ü. Ausgangsniveau	Wassergehalt	Scherfestigkeit [kN-m <sup>2</sup> ]	Feinfraktion (< 20 µm) [%]	Grobsilt (20 - 63 µm) [%]	Sand (> 63 µm) [%]	Feststoffgehalt [%]
Sep 94	0.00	0.68		22.77	53.79	23.44	59.49
Okt 94	0.16	0.47	2.94	37.31	59.63	3.06	68.01
Nov 94	-0.17	0.51	2.21	28.30	59.34	12.36	66.39
Dez 94	-0.05	0.41	4.29	15.81	57.96	26.23	70.83
Jan 95	6.79	0.48	2.45	14.13	53.50	32.37	67.77
Feb 95				13.00	54.00	31.00	
Mar 95	6.60	0.49	1.72	12.80	54.19	33.01	67.16
Apr95	6.64	0.52	1.96	17.14	46.39	36.47	65.62
Mai 95	7.02	0.87	1.72	19.12	44.34	36.54	53.34
Jun 95	7.83	0.78	0.86	46.75	42.04	11.21	56.09
Jul 95			·	41.00	44.00	15.00	
Aug 95				35.00	46.00	19.00	
Sep 95	9.81	0.62	0.86	30.12	48.27	21.61	61.56
Okt 95				23.00	57.00	20.00	
Nov 95	12.88	0.80	0.25	16.61	65.29	18.10	55.48
Dez 95				26.00	60.00	14.00	
Jan 96				35.00	55.00	10.00	
Feb 96		4		44.00	49.00	7.00	
Mar 96				53.00	43.00	4.00	
Apr 96	19.55	0.84	0.49	61.84	38.16	.00	54.24
Mai 96	21.52	0.83	0.69	40.09	45.26	14.64	54.54
Jun 96							
Jul 96	22.68		0.43				

