

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

von Liebermann, N.; Matheja, Andreas; Schwarze, H.; Zimmermann, Claus

Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste - Wellenuntersuchungen in Midell-Lahnungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110384>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (Hg.) (1998): Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste - Wellenuntersuchungen in Midell-Lahnungen.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

04. DEZ. 1997

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

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0564

**OPTIMIERUNG VON KÜSTENSICHERUNGSARBEITEN
IM KÜSTENVORFELD DER NORDSEEKÜSTE**

Teil 3:

WELLENUNTERSUCHUNGEN IN MODELL-LAHNUNGEN

von

Dipl.-Ing. N. von Lieberman

Dr.-Ing. A. Matheja

Dr.-Ing. H. Schwarze

Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann

Hannover, Juni 1997

FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN

N^o 32816-03

UNIVERSITÄT HANNOVER

~~N^o 32473~~ lit

432 MTK 0564

Inhalt

1.	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2.	Verwendete Unterlagen	4
2.1	Allgemeine Informationen	4
2.2	Literaturhinweise der Projektpartner	4
2.3	Topographische Informationen	5
2.3.1	Testgebiet „Ockholm“	5
2.3.2	Testgebiet „Speicherkoog Süd“	5
2.4	Wasserstandsdaten	6
2.4.1	Pegel „Schlüttsiel“	6
2.4.2	Pegel „Sommerkoog Steertloch“	6
2.5	Strömungsdaten	6
2.6	Seegangdaten	6
2.7	Winddaten	7
2.7.1	Windmeßstation „Hallig Hooge“	7
2.7.2	Windmeßstation „Büsum“	7
2.8	Sedimentologische Informationen	7
3.	Stand des Wissens und der Technik zum Thema „Lahnungen/Lahnungsfelder“	8
3.1	Natürliche Vorlandbildung	8
3.2	Künstliche Vorlandbildung durch Lahnungen	15
3.3	Morphologie und Sedimentologie des Vorlandes	20
3.4	Einfluß der Lahnungscharakteristika auf die Vorlandbildung	26
3.4.1	Allgemeines	26
3.4.2	Anordnung, Geometrie, Höhe und Durchlässigkeit der Lahnung	27
3.5	Biologische, chemische und physikalische Einflüsse aus Flora und Fauna	30
3.6	Einfluß von Eis auf die Vorlandbildung	40
3.7	Vorlandmanagement	41
3.7.1	Nutzung der Vorländer	41
3.7.2	Beurteilung der Vorländer aus küsteningenieurtechnischer Sicht	42
3.7.3	Kritik zur künstlichen Vorlandbildung	44
3.7.4	Begrüppung	47
3.7.5	Unterhaltung von Lahnungen	48
3.7.6	Beweidung	51
3.7.7	Aktuelle Managementkonzepte	60

4.	Stand des Wissens und der Technik zum Thema „hydrologisch-morphologische Wechselwirkungen an Wattböden“	62
4.1	„Lahnungs-wirksame“ Parameter	62
4.2	Tide und Seegang	63
4.2.1	Sedimentations- und Erosionsprozesse von Wattsedimenten unter Tide- und Seegangseinfluß	63
4.2.2	Einfluß der Tide auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden	68
4.2.3	Einfluß des Seegangs auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden	71
4.3	Sedimentation und Erosion	72
4.3.1	Grundgleichung für den Schwebstofftransport	72
4.3.2	Der Sedimentationsprozeß	73
4.3.2.1	Ausflockung von Schwebstoffen	73
4.3.2.2	Konsolidierung von Schwebstoffen	77
4.3.3	Der Erosionsprozeß	82
4.3.4	Herkunft der Sedimente	86
5.	Untersuchungsmethodik	88
5.1	Allgemeines	88
5.2	Messungen in der Natur	88
5.3	Physikalische Simulationen	88
5.4	Numerische Simulationen	90
6.	Naturmessungen in den Testgebieten	92
6.1	Beschreibung der Testgebiete	92
6.2	Tideverhältnisse	95
6.2.1	Testgebiet „Ockholm“	95
6.2.2	Testgebiet „Speicherkoog Süd“	95
6.3	Windverhältnisse	96
6.3.1	Testgebiet „Ockholm“	96
6.3.2	Testgebiet „Speicherkoog Süd“	97
6.4	Watthöhenmessungen	98
6.4.1	Allgemeines	98
6.4.2	Testgebiet „Ockholm“	99
6.4.3	Testgebiet „Speicherkoog Süd“	99
6.5	Strömungsmessungen	100
6.6	Seegangsmessungen	104
6.6.1	Prinzip der Auswertung	104

6.6.2	Ermittlung von Eingangsparametern für die Untersuchungen	106
6.6.3	Analyse der Abhängigkeit der Wellenhöhen vom Wasserstand	110
6.6.4	Analyse der Abhängigkeit der Wellenhöhen von der Windgeschwindigkeit und -richtung	112
6.6.5	Berechnung des Energieflusses	116
6.6.6	Analyse des Transmissionsverhaltens von Lahnungen im Testgebiet „Ockholm“	120
7.	Physikalische Untersuchungen an Buschlahnungen	124
7.1	Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Buschlahnungen in der Strömungsrinne	124
7.1.1	Allgemeine Vorbemerkungen	124
7.1.2	Versuchseinrichtungen und Meßtechnik	124
7.1.3	Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse	129
7.2	Untersuchungen zur Transmission von Wellen an Buschlahnungen	134
7.2.1	Transmission von Wellen	134
7.2.2	Versuchseinrichtungen und Meßtechnik	135
7.2.3	Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse	141
7.2.4	Vergleich der Versuchsergebnisse mit Messungen in der Natur	154
7.2.5	Bewertung der Ergebnisse	159
7.3	Seegangverhalten in einem Wellenbecken	160
7.3.1	Versuchseinrichtungen und Meßtechnik	160
7.3.2	Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse	162
8	Numerische Untersuchungen in Lahnungsfeldern	165
8.1	Allgemeines	165
8.2	Grundlagen der numerischen Simulation	165
8.2.1	Grundsätzliches zur numerischen Simulation	165
8.2.2	Hydrodynamisches Modell (HD-Modul)	167
8.2.3	Seegangmodell (EMS-Modul)	174
8.2.4	Sedimenttransportmodell (MT-Modul)	180
8.3	Berücksichtigung von Systemparametern	188
8.3.1	Allgemeines	188
8.3.2	Hydrodynamisches Modell (HD-Modul)	189
8.3.3	Seegangmodell (EMS-Modul)	191
8.3.4	Sedimenttransportmodell (MT-Modul)	193
8.4	Ergebnisse der numerischen Simulation	194
8.4.1	Allgemeines	194

8.4.2	Untersuchungen im Testgebiet "Ockholm"	194
8.4.2.1	Auswahl von Systemparametern	194
8.4.2.2	Verifikation und Kalibrierung	201
8.4.2.3	Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen	203
8.4.2.4	Seegangsverhältnisse	206
8.4.2.5	Sedimentation und Erosion	207
8.4.2.6	Diskussion und Wertung der Ergebnisse	214
8.4.3	Parameterstudie	215
8.4.3.1	Allgemeines	215
8.4.3.2	Berücksichtigung von Systemparametern	217
8.4.3.3	Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen	223
8.4.3.3.1	Allgemeines	223
8.4.3.3.2	Darstellung der Varianten m_01 und m_07	224
8.4.3.3.3	Einfluß der Öffnungsweite	226
8.4.3.3.4	Einfluß der Begrüppung	229
8.4.3.3.5	Einfluß des Anwurfs	229
8.4.3.3.6	Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie - Doppelgeometrie)	230
8.4.3.4	Seegangsverhältnisse	230
8.4.3.4.1	Allgemeines	230
8.4.3.4.2	Einfluß der Öffnungsweite	230
8.4.3.4.3	Einfluß der Begrüppung	231
8.4.3.4.4	Einfluß des Anwurfs	231
8.4.3.4.5	Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie - Doppelgeometrie)	232
8.4.3.5	Sedimentations- und Erosionsprozesse	232
8.4.3.5.1	Allgemeines	232
8.4.3.5.2	Darstellung der Varianten m_01 und m_07	232
8.4.3.5.3	Einfluß der Öffnungsweite	234
8.4.3.5.4	Einfluß der Begrüppung	234
8.4.3.5.5	Einfluß des Anwurfs	235
8.4.3.5.6	Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie - Doppelgeometrie)	235
8.4.3.5.7	Bilanzierung der Sedimentmengen	235
8.4.3.6	Diskussion und Wertung der Ergebnisse	237
8.5	Übertragbarkeit auf andere Küstenabschnitte und Anwendbarkeit der numerischen Modellierung	239

9.	Zusammenfassung	240
10.	Schrifttum	248
10.1	Schrifttum zu Kapitel 3	248
10.2	Schrifttum zu Kapitel 4	261
10.3	Schrifttum zu Kapitel 5	267
10.4	Schrifttum zu Kapitel 6	268
10.5	Schrifttum zu Kapitel 7	269
10.6	Schrifttum zu Kapitel 8	270
10.7	Schrifttum zu Kapitel 9	272
10.8	Schrifttum zum Glossar	273
10.9	Schrifttum zu den Anlagen	278

GLOSSAR

ANLAGEN

Verzeichnis der Abbildungen und Tafeln

Abbildungen

Abb. 1.1:	Struktur des KFKI-Forschungsvorhabens „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“	1
Abb. 1.2:	Lage der Testgebiete „Ockholm“ und „Speicherkoog Süd“, der Tidepegel „Schlüttsiel“ und „Sommerkoog Steertloch“ sowie der Windmeßstationen „Hallig Hooge“ und „Büsum“ (Lokationen ergänzt in: LOZÁN ET AL., 1994, Taf. II)	3
Abb. 3.1:	Zonierung der Wattbereiche	9
Abb. 3.2:	Sukzessionsfolge (nach: NATIONALPARK „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 26)	12
Abb. 3.3:	An der Sedimentbildung beteiligte Wattbewohner (nach: NATIONALPARK „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 18)	15
Abb. 3.4:	Prinzipieller Aufbau eines Lahnungsfeldes mit Entwässerungssystem	17
Abb. 3.5:	Aufbau und Abmessungen einer im nördlichen Teil Schleswig-Holsteins typischen Buschlahnung	18
Abb. 3.6:	Die Entwicklung des Wattniveaus in Lahnungsfeldern am Neßmerheller (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 40)	21
Abb. 3.7:	Profile absoluter vertikaler Sedimentationen im Untersuchungsgebiet "Diecksand-Fischersiedlung" bezogen auf NN (Gesamtzeitraum schraffiert), Vermessungsjahrgänge 1937, 1951, 1952, 1968, 1975, 1978, 1981, 1984 (OSTERTHUN, 1993b, S. 209)	22
Abb. 3.8a:	Watt ohne Lahnungsfelder; nach 90 und nach 500 Tiden (ENGEL, 1963, S. 62C, 62G)	29
Abb. 3.8b:	Rechteckige Anordnung der Sedimentationsfelder; nach 90 und nach 500 Tiden (ENGEL, 1963, S. 70C, 70F)	29
Abb. 3.8c:	Fächerförmige Anordnung der Sedimentationsfelder; nach 90 und nach 500 Tiden (ENGEL, 1963, S. 75C, 75F)	29
Abb. 3.9:	Zunahme des Bodenwiderstandes mit der Durchwurzelung im Winter- und Sommerhalbjahr (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 96f)	31
Abb. 3.10:	Einflußfaktoren auf die Wattstruktur (MANZENRIEDER, 1983, S. 142)	33

Abb. 3.11:	Schematische Darstellung eines Wohnganges (nach: REINECK/SINGH, 1975, in: MANZENRIEDER, 1983, S. 147)	34
Abb. 3.12:	Biologisches Wachstum und Sturmflutbelastung (nach: MANZENRIEDER, 1983, S. 184)	36
Abb. 3.13:	Erosionsbeginn $v_{krit (mech)}$ in Abhängigkeit von der Besiedlungsdichte (NIESEL, 1981, in: MANZENRIEDER, 1983, S. 180)	37
Abb. 3.14:	Darstellung der biologischen Stabilisierung im SHIELDS-Diagramm (MANZENRIEDER, 1983, S. 177)	38
Abb. 3.15:	Darstellung der Konzentration über die Sohltiefe (ALEXIS ET AL., 1993, S. 14)	39
Abb. 3.16:	Profile der Widerstandsfähigkeit einer Sohle gegenüber Erosionen (ALEXIS ET AL., 1993, S. 15)	40
Abb. 3.17:	Durch Eisschub beschädigte Lahnung	41
Abb. 3.18:	Wirkung eines Vorlandes auf die Wellenbelastung des Deiches (nach: FÜHRBÖTER, 1974, S. 588, in: STADELMANN, 1981, S. 65)	43
Abb. 3.19:	Zusammenhang zwischen Wellenauflauf und Vorlandbreite bzw. -höhe am Störtebekerdeich in der Leybucht (KRAMER, 1967, in: KRAMER, 1990, S. 52)	44
Abb. 3.20:	Querschnitt eines natürlich entstandenen Entwässerungsgrabens Beispiel aus dem Naturschutzgebiet Elisabeth-Außengroden, Schleswig-Holstein (nach: BLINDOW, 1987, S. 21)	46
Abb. 3.21:	1935 errichtete und später verfallene Lahnung auf Neuwerk, Hamburgisches Wattenmeer	48
Abb. 3.22:	Entwicklung der Queller- und Vorlandgrenzen in den Jahren 1935 bis 1953 im Gebiet des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Kooges südlich des Hindenburgdamms (nach: FIEGE/LASS, 1995, S. 39f)	49
Abb. 3.23:	Auflandungsbilanz in den Jahren 1936 bis 1952 im Gebiet des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Kooges südlich des Hindenburgdamms (nach: FIEGE/LASS, 1995, S. 81)	50
Abb. 3.24:	Entwicklung der Teekmenge bezogen auf die Beweidungsintensität der östlichen Leybucht in den Jahren 1978 bis 1993 (ERCHINGER ET AL., 1996, S. 37)	52
Abb. 3.25:	Einfluß der Beweidung und der Bodentiefe auf die Bodenvorbelastung (HORN/ZHANG, 1995, S. 18)	54

Abb. 3.26:	Einfluß der Beweidungsintensität auf die Lagerungsdichte des Oberbodens (HORN/ZHANG, 1995, S. 86)	55
Abb. 3.27:	Räumliche Verteilung der Lagerungsdichte, August 1994 (HORN/ZHANG, 1995, S. 89)	56
Abb. 3.28:	Entwicklung des Vorlandniveaus auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ zur Definition „normal“: vgl. ERCHINGER ET AL., 1994, S. 17 (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 30)	58
Abb. 3.29:	Schematische Darstellung des Schleswig-Holsteinischen Managementkonzeptes (HOFSTEDE, 1996, S. 63)	61
Abb. 4.1:	Die Vorlandbildung beeinflussende Wechselwirkungen im Küstenvorfeld	62
Abb. 4.2:	SHIELDS-Diagramm (SHIELDS, 1936, in: RAUDKIVI, 1982, S. 15)	65
Abb. 4.3:	Schematische Darstellung der Transportvorgänge von der mobilen Suspension bis zur auskonsolidierten Sohle (PARKER, 1986, S. 273)	67
Abb. 4.4:	Transportstrecke eines Schwebstoffteilchens (nach: HICKEL, 1979, in: SRU, 1980, S. 29)	69
Abb. 4.5:	Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen Suspensionskonzentration und Strömungsgeschwindigkeit mit den dazugehörigen Transportprozessen im Verlauf einer Tide (VAN RIJN, 1993, S. 10.3)	70
Abb. 4.6:	Mittlere Sinkgeschwindigkeit w_s in Abhängigkeit von der Konzentration c (VAN RIJN, 1989, S. 12.3.1)	76
Abb. 4.7:	Schematische Darstellung eines Netzwerkes aus Flocken in seinem schwächsten Zustand (PARTHENIADES, 1986, S. 222)	76
Abb. 4.8:	Phasen des Absetzens und der Konsolidierung bindiger Böden (nach: MIGNIOT/BOULOC, 1981, S. 635)	79
Abb. 4.9:	Übersicht der theoretischen Studien über die Konsolidierung kohäsiver Böden (nach: ALEXIS ET AL., 1993, S. 6)	81
Abb. 4.10:	Verlauf des Porenwasserdrucks für $z_0 = 1,5 \cdot z_1$ (BEEN/SILLS, 1983, in: DÜRING, 1996, S. 38)	81
Abb. 4.11:	Umlagerung von Sedimenten (REINECK, 1978, S. 71)	86

Abb. 6.1:	Ausbaustufe „Herbst 1993“ (a) und „Frühjahr 1995“ (b) des Testgebietes „Ockholm“ (geänderte Grafik, LANU, 1993)	93
Abb. 6.2:	Ausbaustufe „Frühjahr 1995“ des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ (geänderte Grafik, LANU, 1993)	94
Abb. 6.3:	Mittlere Tidekurve der Jahre 1981 bis 1990, Pegel „Schlüttsiel“ (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1994)	95
Abb. 6.4:	Mittlere Tidekurve des Abflußjahres 1994, Pegel „Sommerkoog Steertloch“ (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, 1995)	96
Abb. 6.5:	Windsituation des Jahres 1983, Meßstation „Hallig Hooge“ (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)	97
Abb. 6.6:	Verteilung der Windrichtungen aller Windstärken im 6-Jahres-Mittel 1969/74, Meßstation „Büsum“ (WIELAND/FLADUNG, 1982, S. 512)	97
Abb. 6.7:	Im Testgebiet „Ockholm“ eingesetztes, hier trockenengefallenes AANDERA-Strömungsmeßgerät mit Strömungssensor (rechts) und Richtungsfahne (links)	100
Abb. 6.8:	Positionen der Strömungsmeßgeräte im Testgebiet „Ockholm“ im Zeitraum der Strömungsmeßkampagne vom 30. Oktober bis 30. November 1995	101
Abb. 6.9:	In den Testgebieten eingesetzter, hier trockenengefallener Drucksensor	104
Abb. 6.10:	Schematische Skizze der Watthöhen im Frühjahr 1995 (a) und im Sommer/Herbst 1995 (b) im Testgebiet „Ockholm“	105
Abb. 6.11:	Wellenrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten an Meßpostiton N1 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 29.12.1994 in der Zeit von 08.11 Uhr bis 11.56 Uhr; Beispiel für ein erhöhtes Tidehochwasser mit ausgeprägtem Seegang (nach: ALBERTS ET AL., 1995, S. 25; Winddaten ergänzt)	108
Abb. 6.12:	Abhängigkeit der signifikanten (H_s) und der maximalen Wellenhöhe (H_{max}) an Meßposition N1 (Testgebiet „Ockholm“) vom Wasserstand für die Tidephase am 28.02./01.03.1995 in der Zeit von 23.48 Uhr bis 04.34 Uhr; Beispiel für ein erhöhtes Thw mit ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)	111
Abb. 6.13:	Abhängigkeit der signifikanten (H_s) und der maximalen Wellenhöhe (H_{max}) an Meßposition N2 (Testgebiet „Ockholm“) von der Wassertiefe für alle im Monat Februar 1995 registrierten Tidephasen (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)	112

- Abb. 6.14: Windrosen der Meßstation "Hallig Hooge" für die Beobachtungsmonate Dezember 1994, Januar bis März 1995 sowie August und September 1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1995, 1996) 114
- Abb. 6.15: Zeitlicher Verlauf der Wellenhöhen H_s an den Meßpositionen N1 bis N3 (Testgebiet „Ockholm“) mit den zugehörigen Windgeschwindigkeiten der Meßstation "Hallig Hooge" für die registrierten Tidephasen in der Zeit vom 18.02.1995 bis 23.02.1995; Tiden mit erhöhtem Thw bis $MThw + 1,08$ m und geringem bis ausgereiftem Seegang (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996) 115
- Abb. 6.16: Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe H_s (a) sowie der maximalen Wellenhöhe H_{max} (b) von der Windgeschwindigkeit und -richtung (Meßstation "Hallig Hooge") an der Meßposition N1 (Testgebiet „Ockholm“) für die registrierten Tidephasen in der Zeit vom 01.03.1995 bis 17.03.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996) 116
- Abb. 6.17: Zeitlicher Verlauf des Energieflusses an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 27.02.1995 in der Zeit von 11.11 Uhr bis 13.26 Uhr; Beispiel für eine mittlere Tide bei geringem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996) 119
- Abb. 6.18: Zeitlicher Verlauf des Energieflusses an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 01.03.1995 in der Zeit von 00.03 Uhr bis 04.33 Uhr; Beispiel für eine erhöhte Tide bei ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996) 119
- Abb. 6.19: Zeitlicher Verlauf des Energieflusses an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 27.02.1995 in der Zeit von 11.11 Uhr bis 13.26 Uhr; Beispiel für eine Sturmflut bei küstenparallelem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996) 120
- Abb. 6.20: Zusammenhang zwischen dem Dämpfungsgrad der Wellenhöhen H_s und H_{max} (Transmissionskoeffizienten der Positionen N3 zu N2) und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q1 (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.03.1995 bis 17.03.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996) 121
- Abb. 6.21: Transmissionskoeffizienten der Positionen N2 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q3 (a) sowie der Positionen N4 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q4 (b) (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.08.1995 bis 31.08.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1997 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997) 122

Abb. 6.22:	Transmissionskoeffizienten der Positionen N2 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q3 (a) sowie der Positionen N4 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q4 (b) (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.09.1995 bis 30.09.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1997 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997)	123
Abb. 7.1:	Strömungsrinne mit Betriebseinrichtungen und Versuchseinbauten	125
Abb. 7.2:	Aufbau der Variante S-1 (Buschlahnung ohne Anwurf)	126
Abb. 7.3:	Abhängigkeit des Wasserstandes vor der Lahnung (H_{OW}) vom Wasserstand hinter der Lahnung (H_{UW}) für verschiedene Durchflüsse ($Q = 20$ l/s, 40 l/s bzw. 60 l/s) für die Lahnungsvarianten S-1 bis S-3	130
Abb. 7.4:	Im Testgebiet „Ockholm“ im Frühjahr 1997 an einer Querlahnung aufgetretene lokale Auskolkung	130
Abb. 7.5:	Vergleich der Wasserspiegeldifferenz $H_{OW} - H_{UW}$ in Abhängigkeit vom Durchfluß für die Lahnungsvarianten S-1, S-4 und S-5	131
Abb. 7.6:	Abhängigkeit des Wasserstandes vor der Lahnung (H_{OW}) vom Wasserstand hinter der Lahnung (H_{UW}) für einen Durchfluß von $Q = 80$ l/s für die Lahnungsvarianten S-1 (Buschwerk), S-4 (Langlochfilter) und S-5 (Rundlochfilter)	132
Abb. 7.7:	Annäherung des Verbauungsgrades der Variante S-5 an die der Buschlahnung (Var. S-1)	132
Abb. 7.8:	Einfluß der Pfähle der Lahnungsvariante S-1 auf die Strömungsgeschwindigkeiten im UW; $Q = 60$ l/s; $d = 0,60$ m; Messung $0,30$ m über der Rinnensohle und $1,00$ m hinter der Lahnung; dargestellt ist die in Fließrichtung gesehene linke Hälfte des Rinnenprofils; die Mitte eines Pfahls im UW ist bei $0,25$ m (x-Achse) positioniert	133
Abb. 7.9:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenperiode bei einer Wassertiefe von $0,40$ m für die Variante W-1	142
Abb. 7.10:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenperiode bei einer Wassertiefe von $0,60$ m für die Variante W-1	142
Abb. 7.11:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenperiode bei einer Wassertiefe von $0,80$ m für die Variante W-1	143
Abb. 7.12:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenperiode bei einer Wassertiefe von $1,00$ m für die Variante W-1	143
Abb. 7.13:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von $0,40$ m für die Variante W-1	144

Abb. 7.14:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 0,60 m für die Variante W-1	144
Abb. 7.15:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 0,80 m für die Variante W-1	145
Abb. 7.16:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 1,00 m für die Variante W-1	145
Abb. 7.17:	Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 1,00 m (a) und 1,20 m (b) für die Variante W-2	146
Abb. 7.18a:	Transmissionskoeffizienten der maximalen Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-1	147
Abb. 7.18b:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-1	148
Abb. 7.19:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-3	149
Abb. 7.20:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-6	150
Abb. 7.21:	Transmissionskoeffizienten der maximalen (a) signifikanten Wellenhöhen (b) in Abhängigkeit von der relativen Bauwerkshöhe h/d für die Varianten W-1 bis W-3 und W-6	151
Abb. 7.22:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-4	152
Abb. 7.23:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-5	152
Abb. 7.24:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Varianten W-3, W-4 und W-5	153
Abb. 7.25:	Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Varianten W-6 und W-7	154
Abb. 7.26:	Vergleich der Transmissionskoeffizienten der maximalen (a) und signifikanten Wellenhöhen (b) in Abhängigkeit von der Wassertiefe der Variante W-3 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen im Testgebiet „Ockholm“ im Monat Januar 1995 (Datenbasis: NLO-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)	155
Abb. 7.27:	Vergleich des Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe der Varianten W-1 und W-3 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen im Testgebiet „Ockholm“ im Monat August 1995 (Datenbasis: NLO-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)	156

- Abb. 7.28: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für eine Lahnung mit $OK = M_{Thw}$ Ergebnisse der Seegangsanalysen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“
(Datenbasis: STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ NORDEN, 1997) 157
- Abb. 7.29: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für eine Lahnung mit $OK = M_{Thw} + 0,30$ m Ergebnisse der Seegangsanalysen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“
(Datenbasis: STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ NORDEN, 1997) 158
- Abb. 7.30: Vergleich der Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der relativen Bauwerkshöhe h/d der Variante W-7 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“
(Datenbasis: STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ NORDEN, 1997) 158
- Abb. 7.31: Einbau einer Lahnung in das Wellenbecken 161
- Abb. 7.32: Seegangsverhalten für einen regelmäßigen Seegang im Ausschnitt eines Lahnungsfeldes ($H_s = 0,20$ m, $T_{Hs} = 3,00$ s, $d = 0,50$ m) 162
- Abb. 7.33: Ergebnisse der numerischen Simulation von seegangsinduzierten Strömungen für ein 200 m x 200 m großes, $1:800$ geneigtes Lahnungsfeld und einer Öffnungsweite von 25 m bei regelmäßigem Seegang ($H_s = 0,10$ m, $T_{Hs} = 3,00$ s, $d = 0,50$ m) 163
- Abb. 7.34: Strömungsverhalten im Bereich permeabler Strukturen; hier: Unterwasserwellenbrecher
(PILARCZYK/ZEIDLER, 1996, S. 21) 164
- Abb. 8.0: Indizierung von Knoten und Variablen bei Anwendung eines Finiten-Differenzen-Verfahrens 167
- Abb. 8.1: Testgebiet „Ockholm“ mit vorhandenen Lahnungsfeldern (Distanzen in x- und y-Richtung in [m]) 195
- Abb. 8.2: Mittlere Tidekurve am Pegel "Schlüttsiel" der Jahresreihe 1981 bis 1990 197
- Abb. 8.3: Am seeseitigen Modellrand eingesteuerte Tidekurve im Testgebiet "Ockholm" 197
- Abb. 8.4: Im Rahmen der Kalibrierung verwendete Bathymetrie im Testgebiet "Ockholm" in [m über Bezugshorizont] (Distanzen in x- und y-Richtung in -8 m) 198

Abb. 8.5:	Positionen der Strömungsmeßgeräte im Testgebiet „Ockholm“ in der Strömungsmeßperiode vom 30. 10. bis 30. 11.1995	201
Abb. 8.6:	Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 3	202
Abb. 8.7:	Lage ausgewählter Referenzpunkte zur Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet "Ockholm" (schematisch)	204
Abb. 8.8:	Sedimentation / Erosion im Testgebiet „Ockholm“ [g/m^2] bei auflaufender Tide (11.45 Uhr) mit einem Sedimenteintrag von $350 \text{ g}/\text{m}^3$ am seeseitigen Modellrand	208
Abb. 8.9:	Sedimentation im Testgebiet „Ockholm“ [g/m^2] bei Tidehochwasser (12.45 Uhr) mit einem Sedimenteintrag von $350 \text{ g}/\text{m}^3$ am seeseitigen Modellrand	209
Abb. 8.10:	Sedimentation im Testgebiet „Ockholm“ [g/m^2] nach Ablauf einer Tide (15.40 Uhr) mit einem Sedimenteintrag von $350 \text{ g}/\text{m}^3$ am seeseitigen Modellrand	210
Abb. 8.11:	Schnitte der Vorlandmorphologie in benachbarten Lahnungsfeldern	212
Abb. 8.12:	Ausdehnung des Modellgebietes und Lage von Referenzpunkten für Varianten mit Einfachgeometrie (einreihige Anordnung)	217
Abb. 8.13:	Ausdehnung des Modellgebietes und Lage von Referenzpunkten für Varianten mit Doppelgeometrie (zweireihige Anordnung)	218
Abb. 8.14:	Aufbau eines Lahnungsbauwerkes mit Anwurf und Grütpe und Abbildung der Geometrie (Bathymetrie) im numerischen Modell	219
Abb. 8.15:	Begrüpfung: Hauptentwässerungsgraben, Querentwässerungsgräben und Anwurfgräben (Höhenangaben in m über Bezugshorizont)	220
Abb. 8.16:	Höhenänderung des Landanschlusses für Einfach- und Doppelgeometrie (Höhenangaben in m über Bezugshorizont)	220
Abb. 8.17:	Modelltide für Einfach- und Doppelgeometrien (Wasserstand in m über Bezugshorizont)	221
Abb. 8.18:	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung am Referenzpunkt P1 in der Öffnung des küstennahen Lahnungsfeldes (Einfachgeometrie) in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (Varianten ohne Grütpen)	227
Abb. 8.19:	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung am Referenzpunkt P1 in der Öffnung des küstennahen Lahnungsfeldes (Doppelgeometrie) in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (Varianten ohne Grütpen)	228
Abb. 8.20:	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung am Referenzpunkt P5 in der Öffnung des seeseitigen Lahnungsfeldes (Doppelgeometrie) in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (Varianten ohne Grütpen)	228

Tafeln

Taf. 3.1:	Klassifizierung der Korngrößen nach DIN 4022 (nach: FNW im DNA, 1987, in: THORENZ, 1991, S. 19)	13
Taf. 3.2:	Bezeichnung der Sedimenttypen nach dem Anteil der Kornfraktion < 0,063 mm nach DIN 4022 (nach: FNW im DNA, 1987, in: THORENZ, 1991, S. 19)	14
Taf. 3.3:	Systematisierung der Lahnungsbauweisen in Ostfriesland (nach: ERCHINGER, 1976, S. 450ff)	18
Taf. 3.4:	Klassifizierung des hohen Watts oberhalb MT1/2w (nach: OSTERHUN/PARTENSKY, 1991b, S. 1108)	23
Taf. 3.5:	Einteilung der Wattarten nach den Korngrößenanteilen (nach: MÜLLER, 1960, S. 141)	24
Taf. 4.1:	Beispiele mittlerer Sinkgeschwindigkeiten w_s in Abhängigkeit von der Konzentration c (nach: VAN RIJN/LOUISSE, 1987, S. 1520f)	76
Taf. 4.2a:	Einflüsse bestimmter Parameter der Sedimente auf die erosionskritische Schubspannung (nach: RAUDKIVI, 1982, S. 128f, 132, 137)	84
Taf. 4.2b:	Einflüsse bestimmter Parameter der Sedimente auf die erosionskritische Schubspannung (nach: RAUDKIVI, 1982, S. 128f, 132, 137)	85
Taf. 5.1:	Untersuchungsmethodik im Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“	91
Taf. 6.1:	Höhenlagen der Sonden und der Geländeoberkante im Testgebiet „Ockholm“ (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1997)	106
Taf. 6.2:	Ergebnisse der Auswertung der Summenlinien und der gemeinsamen Häufigkeit der Zeitbereichsparameter H_s und T_{Hs} im Testgebiet „Ockholm“ für den Zeitraum vom 14.12.1994 bis 01.01.1995 zur Bestimmung von Ein- gangsparemtern für die physikalischen und numerischen Untersuchungen Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995)	109
Taf. 7.1a:	Darstellung der in der Strömungsrinne untersuchten Lahnungsvarianten S-1 bis S-3	127
Taf. 7.1b:	Darstellung der in der Strömungsrinne untersuchten Lahnungsvarianten S-4 und S-5	128
Taf. 7.2:	Eingangsparemtern der Untersuchungen in der Strömungsrinne	129

Taf. 7.3a:	Darstellung der im Wellenkanal untersuchten Lahnungsvarianten W-1 bis W-3	137
Taf. 7.3b:	Darstellung der im Wellenkanal untersuchten Lahnungsvarianten W-4 bis W-7	138
Taf. 7.4:	Eingangsparameter der Untersuchungen im Wellenkanal	139
Taf. 7.5:	Eingangsparameter der Untersuchungen im Wellenbecken	161
Taf. 8.1:	Wellenhöhe in Abhängigkeit von der Wassertiefe im Bereich der Lahnungsöffnung	199
Taf. 8.2:	Parameter des Sedimenttransportmodells nach Absprache mit dem FTZ-Westküste bzw. nach van Rijn (1993)	200
Taf. 8.3:	Lage der Referenzpunkte und Schnitte in x- und y-Richtung und ihre Zuordnung zu Gitterpunkten im numerischen Modell	204
Taf. 8.4:	Sedimentationsmengen in den Lahnungsfeldern des Testgebietes "Ockholm" nach Ablauf einer Modelltide (Sedimenteintrag am seeseitigen Modellrand von 350 g/m ³)	213
Taf. 8.5:	In der Parameterstudie untersuchte Fragestellungen	215
Taf. 8.6:	Varianten der Parameterstudie und zugrunde liegende Systemparameter	216
Taf. 8.7:	Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe im Bereich der Lahnungsöffnung	222
Taf. 8.8:	Lage der Referenzpunkte und Schnitte in x- und y-Richtung und ihre Lage im numerischen Modell	223
Taf. 8.9:	Zeitpunkte für die Beschreibung des Systemverhaltens (Wasserstände in [m BH] sind für die Einfachgeometrien angegeben)	223
Taf. 8.10:	Maximale Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung an den Referenzpunkten P1 und P5 in den Lahnungsöffnungen (Einfach- und Doppelgeometrie) für verschiedene Öffnungsweiten (Varianten ohne Gruppen)	227
Taf. 8.11:	Sedimentiertes Material [kg] nach Verlauf einer mittleren Tide	236

Verzeichnis der Anlagen

- A 3-1 Historische Entwicklung der Arbeiten zur Vorlandbildung an der Nordseeküste
(nach: FIEGE ET AL., 1996, S. 214ff / PROBST, 1996, S. 48ff /
STOCK ET AL., 1996, S. I-22)

- A 3-2a Ausführung von Lahnungsarbeiten an der deutschen Nordseeküste
(FIEGE ET AL., 1996, S. 339)

- A 3-2b Ausführung von Lahnungsarbeiten an der dänischen, niederländischen und britischen
Nordseeküste

- A 3-3a Mit Faschinendeckwerk verstärkte Buschlahnung;
Aufnahme im Baubezirk des ALW HEIDE, 1994

- A 3-3b Schematische Darstellung einer mit Faschinendeckwerk verstärkten Buschlahnung
(STADELMANN, 1981, S. 57)

- A 3-4a Ausführung von Lahnungsfeldern für ein "Vorland im Aufbau"
(nach: MELFF, 1995, S. 4, 9 / STOCK ET AL., 1996, S. 518f)

- A 3-4b Ausführung von Lahnungsfeldern für ein "Vorhandenes Vorland"
(nach: MELFF, 1995, S. 9 / STOCK ET AL., 1996, S. 518, 520)

- A 6-1 Entwässerungssystem im Testgebiet "Ockholm", Frühjahr 1995
(AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1997)

- A 6-2a Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s an der
Windmeßstation "Hallig Hooe" im Jahr 1983
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

- A 6-2b Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s an der
Windmeßstation "Hallig Hooe" im Jahr 1984
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

- A 6-2c Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s an der
Windmeßstation "Hallig Hooe" im Jahr 1985
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

- A 6-2d Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s an der
Windmeßstation "Hallig Hooe" im Jahr 1986
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

- A 6-2e Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s an der
Windmeßstation "Hallig Hooe" im Jahr 1987
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

- A 6-2f Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s an der
Windmeßstation "Hallig Hooe" im Jahr 1988
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

- A 6-3a Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 1
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3b Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 2
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3c Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 3
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3d Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 5
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3e Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 6
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3f Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 7
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3g Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 8
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3h Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 9a
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3i Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 9b
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3j Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 10
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3k Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm"
vom 10. November 1995 für die Position 11
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)

- A 6-3l Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm" vom 10. November 1995 für die Position 12
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3m Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm" vom 10. November 1995 für die Position 13
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-3n Ergebnisse der Strömungsmeßkampagne im Testgebiet "Ockholm" vom 10. November 1995 für die Position 14
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-4 Darstellung der Tidehochwasserstände am Pegel "Schlüttsiel" im November 1995
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96)
- A 6-5 Zusammenstellung der ausgewählten Ausschnitte der Tiden mit Kenngrößen der im Testgebiet "Ockholm" im Zeitraum von Dezember 1994 bis März 1995 sowie August bis September 1995 registrierten und ausgewerteten Seegangsdaten der Position N1
(Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995, 1996 und 1997)
- A 6-6a Gemeinsame Häufigkeit der Zeitbereichsparameter H_s ($H_{1/3}$) und T_{Hs} ($T_{H1/3}$) für die Positionen N1 bis N3 im Testgebiet Ockholm, Februar 1995
(Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-6b Gemeinsame Häufigkeit der Zeitbereichsparameter H_s ($H_{1/3}$) und T_{Hs} ($T_{H1/3}$) für die Positionen N1, N4 und N5 im Testgebiet Ockholm, Februar 1995
(Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-7a Wellenrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten an Meßpositon N1 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 14.12.1994 in der Zeit von 09.41 Uhr bis 12.26 Uhr; Beispiel für eine Tide mit mittlerem Tidehochwasser und sehr geringem Seegang
(nach: ALBERTS ET AL., 1995, S. 7; Winddaten ergänzt)
- A 6-7b Wellenrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten an Meßpositon N1 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 01.01.1995 in der Zeit von 10.52 Uhr bis 16.37 Uhr; Sturmflut
(nach: ALBERTS ET AL., 1995, S. 43; Winddaten ergänzt)
- A 6-8 Vergleich der Wellenhöhen H_s für die Positionen N1 bis N5 im Testgebiet "Ockholm" für die Tidephase am 01.01.1995 in der Zeit von 10.52 Uhr bis 16.37 Uhr; Sturmflut
(Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995)

- A 6-9 Vergleich der Wellenhöhen H_s für die Positionen N1 bis N5 im Testgebiet "Ockholm" für die Tidephase am 25.12.1994 in der Zeit von 17.43 Uhr bis 19.59 Uhr; Beispiel für eine Tide mit mittlerem Tidehochwasser und sehr geringem Seegang (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995)
- A 6-10a Histogramm der Häufigkeit der Wellenhöhen H_s für die Positionen N2 und N4 im Testgebiet "Ockholm" für eine Wasserspiegellage um NN + 1,88 m (entspricht einer mittleren Wassertiefe von rd. 1,15 m an den Positionen N2 und N4) im Zeitraum vom 14.12.1994 bis 01.01.1995 (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995)
- A 6-10b Summenlinie der Wellenhöhen H_s für die Positionen N2 und N4 im Testgebiet "Ockholm" für eine Wasserspiegellage um NN + 1,88 m (entspricht einer mittleren Wassertiefe von rd. 1,15 m an den Positionen N2 und N4) im Zeitraum vom 14.12.1994 bis 01.01.1995 (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995)
- A 6-11a Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe H_s und der maximalen Wellenhöhe H_{max} zur Wassertiefe an Position N2 im Monat Januar 1995 im Testgebiet "Ockholm" (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-11b Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe H_s und der maximalen Wellenhöhe H_{max} zur Wassertiefe an Position N2 im Monat Februar 1995 im Testgebiet "Ockholm" (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-11c Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe H_s und der maximalen Wellenhöhe H_{max} zur Wassertiefe an Position N2 im Monat März 1995 im Testgebiet "Ockholm" (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-11d Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe H_s und der maximalen Wellenhöhe H_{max} zur Wassertiefe an Position N1 im Monat August 1995 im Testgebiet "Ockholm" (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997)
- A 6-11e Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe H_s und der maximalen Wellenhöhe H_{max} zur Wassertiefe an Position N1 im Monat September 1995 im Testgebiet "Ockholm" (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997)

- A 6-12a Zeitlicher Verlauf des Energieflusses und der Wellenhöhe H_{rms} an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) sowie der Pegelwasserstände „Schlüttsiel“ für die Tidephase am 27.02.1995 in der Zeit von 11.11 Uhr bis 13.26 Uhr; Beispiel für eine mittlere Tide bei geringem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-12b Zeitlicher Verlauf des Energieflusses und der Wellenhöhe H_{rms} an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) sowie der Pegelwasserstände „Schlüttsiel“ für die Tidephase am 01.03.1995 in der Zeit von 00.03 Uhr bis 04.33 Uhr; Beispiel für eine erhöhte Tide bei ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-12c Zeitlicher Verlauf des Energieflusses und der Wellenhöhe H_{rms} an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) sowie der Pegelwasserstände „Schlüttsiel“ für die Tidephase am 10.01.1995 in der Zeit von 04.58 Uhr bis 12.28 Uhr; Beispiel für eine Sturmflut bei küstenparallelem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-13 Zusammenhang zwischen dem Dämpfungsgrad der Wellenhöhen H_s und H_{max} (Transmissionskoeffizienten der Positionen N3 zu N2) und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q1 (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.02.1995 bis 28.02.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-14a Zeitlicher Verlauf der Wellenhöhen H_s und H_{max} an den Meßpositionen N1 bis N3 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 01.03.1995 in der Zeit von 00.03 Uhr bis 04.33 Uhr; Beispiel für eine erhöhte Tide bei ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)
- A 6-14b Zeitlicher Verlauf der Wellenhöhen H_s und H_{max} an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 25.08.1995 in der Zeit von 11.44 Uhr bis 15.34 Uhr; Beispiel für eine erhöhte Tide bei ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1997 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997)

- A 7-1 Typischer Aufbau einer Buschlahnung im Amtsbezirk des ALW HUSUM
- A 7-2 Typischer Aufbau einer Buschlahnung im Amtsbezirk des STAIK NORDEN (STAIK NORDEN, 1993)
- A 8-1 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 2 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-2 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 3 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-3 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 5 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-4 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 6 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-5 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 7 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-6 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 8 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-7 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 9b (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-8 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 10 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-9 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 11 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-10 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 12 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-11 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 13 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-12 Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 14 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)
- A 8-13 Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung [m/s] an den Referenzpunkten P1 bis P4
- A 8-14 Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung [m/s] an den Referenzpunkten P5 bis P8
- A 8-15 Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung [m/s] an den Referenzpunkten P1 bis P4

- A 8-16 Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung [m/s]
an den Referenzpunkten P5 bis P8
- A 8-17 Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung [m/s]
an den Referenzpunkten P9 bis P12
- A 8-18 Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung [m/s]
an den Referenzpunkten P9 bis P12
- A 8-19 Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“
bei mittleren Tideverhältnissen zum Zeitpunkt 11.00 Uhr
(Bezugshorizont der Simulationstide: 0 m BH = 545 cm PN Pegel Schlüttsiel)
- A 8-20 Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“
bei mittleren Tideverhältnissen zum Zeitpunkt 11.45 Uhr
(Bezugshorizont der Simulationstide: 0 m BH = 545 cm PN Pegel Schlüttsiel)
- A 8-21 Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“
bei mittleren Tideverhältnissen zum Zeitpunkt 12.45 Uhr
(Bezugshorizont der Simulationstide: 0 m BH = 545 cm PN Pegel Schlüttsiel)
- A 8-22 Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“
bei mittleren Tideverhältnissen zum Zeitpunkt 13.45 Uhr
(Bezugshorizont der Simulationstide: 0 m BH = 545 cm PN Pegel Schlüttsiel)
- A 8-23 Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet „Ockholm“
bei mittleren Tideverhältnissen zum Zeitpunkt 14.45 Uhr
(Bezugshorizont der Simulationstide: 0 m BH = 545 cm PN Pegel Schlüttsiel)
- A 8-24 Wellenhöhen im Testgebiet „Ockholm“ (Schnitt S1)
für eine Wellenhöhe $H = 10$ cm und eine Wellenperiode $T = 3$ s
bei einer Wassertiefe von 50 cm im Bereich der
Lahnungsöffnung des Feldes 1 (Wellenhöhen in [m])
- A 8-25 Wellenhöhen im Testgebiet „Ockholm“ (Schnitt S2)
für eine Wellenhöhe $H = 10$ cm und eine Wellenperiode $T = 3$ s
bei einer Wassertiefe von 50 cm im Bereich der
Lahnungsöffnung des Feldes 1 (Wellenhöhen in [m])
- A 8-26 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.00 Uhr)
- A 8-27 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.30 Uhr)
- A 8-28 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.00 Uhr)
- A 8-29 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.30 Uhr)

- A 8-30 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 13.00 Uhr)
- A 8-31 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.00 Uhr)
- A 8-32 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.30 Uhr)
- A 8-33 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.00 Uhr)
- A 8-34 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.30 Uhr)
- A 8-35 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 13.00 Uhr)
- A 8-36 Strömungsgeschwindigkeiten [m/s] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 13.30 Uhr)
- A 8-37 Wellenhöhen [m] für die Variante m_01 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-38 Wellenhöhen [m] für die Variante m_01 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-39 Wellenhöhen [m] für die Variante m_06 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-40 Wellenhöhen [m] für die Variante m_06 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-41 Wellenhöhen [m] für die Variante m_13 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-42 Wellenhöhen [m] für die Variante m_13 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-43 Wellenhöhen [m] für die Variante m_18 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-44 Wellenhöhen [m] für die Variante m_18 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-45 Wellenhöhen [m] für die Variante m_25 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-46 Wellenhöhen [m] für die Variante m_25 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)

- A 8-47 Wellenhöhen [m] für die Variante m_30 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-48 Wellenhöhen [m] für die Variante m_30 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-49 Wellenhöhen [m] für die Variante m_37 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-50 Wellenhöhen [m] für die Variante m_37 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-51 Wellenhöhen [m] für die Variante m_42 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-52 Wellenhöhen [m] für die Variante m_42 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-53 Wellenhöhen [m] für die Variante m_07 im Schnitt S1
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-54 Wellenhöhen [m] für die Variante m_07 im Schnitt S2
(H = 10 cm, T = 3s)
- A 8-55 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.00 Uhr)
- A 8-56 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.30 Uhr)
- A 8-57 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.00 Uhr)
- A 8-58 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.30 Uhr)
- A 8-59 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_01
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 13.00 Uhr)
- A 8-60 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.00 Uhr)
- A 8-61 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 11.30 Uhr)
- A 8-62 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.00 Uhr)
- A 8-63 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 12.30 Uhr)

- A 8-64 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 13.00 Uhr)
- A 8-65 Sedimentation / Erosion [g/m^2] für die Variante m_07
(mittlere Tidekurve am Pegel Schlüttsiel, Zeitpunkt: 13.30 Uhr)
- A 8-66a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_01 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-66b Sedimentation und Erosion im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_01 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-66c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_01 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-67a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_02 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-67b Sedimentation und Erosion im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_02 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-67c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_02 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-68a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_03 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-68b Sedimentation und Erosion im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_03 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-68c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_03 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-69a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_04 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-69b Sedimentation und Erosion im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_04 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-69c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_04 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-70a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_05 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-70b Sedimentation und Erosion im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_05 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-70c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_05 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-71a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_06 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-71b Sedimentation und Erosion im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_06 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-71c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_06 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-72a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_07 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-72a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_07 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-72b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_07 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-72c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_07 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-73a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_08 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-73a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_08 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-73b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_08 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-73c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_08 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-74a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_09 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-74a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_09 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-74b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_09 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-74c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_09 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-75a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_10 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-75a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_10 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-75b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_10 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-75c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_10 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-76a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_11 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-76a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_11 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-76b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_11 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-76c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_11 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-77a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_12 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-77a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_12 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-77b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_12 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-77c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_12 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-78a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_13 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-78b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_13 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-78c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_13 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-79a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_14 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-79b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_14 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-79c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_14 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-80a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_15 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-80b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_15 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-80c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_15 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-81a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_16 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-81b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_16 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-81c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_16 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-82a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_17 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-82b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_17 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-82c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_17 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-83a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_18 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-83b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_18 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-83c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_18 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-84a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_19 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-84a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_19 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-84b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_19 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-84c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_19 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-85a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_20 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-85a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_20 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-85b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_20 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-85c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_20 (vgl. Taf. 8.6)
- A8-86a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_21 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-86a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_21 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-86b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_21 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-86c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_21 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-87a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_22 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-87a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_22 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-87b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_22 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-87c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_22 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-88a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_23 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-88a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_23 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-88b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_23 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-88c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_23 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-89a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_24 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-89a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x- Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_24 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-89b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_24 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-89c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_24 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-90a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_25 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-90b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_25 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-90c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_25 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-91a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_26 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-91b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_26 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-91c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_26 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-92a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_27 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-92b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_27 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-92c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_27 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-93a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_28 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-93b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_28 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-93c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_28 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-94a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_29 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-94b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_29 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-94c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_29 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-95a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_30 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-95b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_30 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-95c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_30 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-96a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_31 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-96a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_31 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-96b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_31 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-96c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_31 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-97a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_32 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-97a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_32 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-97b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_32 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-97c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_32 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-98a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_33 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-98a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_33 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-98b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_33 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-98c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_33 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-99a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_34 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-99a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_34 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-99b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_34 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-99c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_34 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-100a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_35 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-100a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_35 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-100b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_35 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-100c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_35 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-101a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_36 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-101a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_36 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-101b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8
in der Variante m_36 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-101c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_36 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-102a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_37 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-102b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_37 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-102c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_37 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-103a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_38 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-103b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_38 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-103c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_38 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-104a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_39 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-104b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_39 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-104c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_39 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-105a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_40 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-105b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_40 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-105c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_40 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-106a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_41 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-106b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_41 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-106c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_41 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-107a Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_42 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-107b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_42 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-107c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_42 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-108a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_43 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-108a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_43 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-108b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8 in der Variante m_43
(vgl. Taf. 8.6)
- A 8-108c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_43 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-109a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_44 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-109a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_44 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-109b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8 in der Variante m_44
(vgl. Taf. 8.6)
- A 8-109c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_44 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-110a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_45 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-110a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_45 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-110b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8 in der Variante m_45
(vgl. Taf. 8.6)
- A 8-110c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_45 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-111a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_46 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-111a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_46 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-111b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8 in der Variante m_46
(vgl. Taf. 8.6)
- A 8-111c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_46 (vgl. Taf. 8.6)

- A 8-112a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_47 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-112a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_47 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-112b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8 in der Variante m_47
(vgl. Taf. 8.6)
- A 8-112c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_47 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-113a1 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P1 bis P4 in der Variante m_48 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-113a2 Strömungsgeschwindigkeiten in y- und x-Richtung
an den Referenzpunkten P5 bis P8 in der Variante m_48 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-113b Sedimentationen und Erosionen im Verlaufe einer Tide
an den Referenzpunkten P1 bis P4 und P5 bis P8 in der Variante m_48
(vgl. Taf. 8.6)
- A 8-113c Sedimentation und Erosion nach Ablauf einer Tide
im gesamten Simulationsbereich in der Variante m_48 (vgl. Taf. 8.6)
- A 8-114 Sedimentiertes Material in einer Tide

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

a	Amplitude (= $H/2$)	[m]
a'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient	[-]
B	Bauwerksbreite (bei Lahnungen: lichte Breite zwischen den Pfählen)	[m]
b'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (=1 bis 10; MEHTA, 1996, in: ABDEL-MAWLA, 1997, S. 6)	[-]
c	Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der Einzelwelle	[m/s]
c_g	Gruppengeschwindigkeit	[m/s]
c^*	Suspensionskonzentration	[kg/m ³]
c_b	Bodenfeststoffgehalt	[kg/m ³]
d	Wassertiefe	[m]
d^*	Korn- bzw. Partikeldurchmesser	[m]
d_{50}	mittlerer Korndurchmesser; Korngröße, die der Ordinate 50 Gew.-% der Körnungslinie entspricht	[m]
dm/dt	zeitlicher Gradient der Massentransportrate	[m ³ /s]
du/dy	Geschwindigkeitsgradient	[1/s]
du/dz	örtliche Größe der Schubspannung	[1/s]
D_x	Diffusionskoeffizient in x-Richtung	[m ² /s]
D_y	Diffusionskoeffizient in y-Richtung	[m ² /s]
D_z	Diffusionskoeffizient in z-Richtung	[m ² /s]
E	Erosionsrate	[m ³ /s]
E_{ges}	Gesamtenergie eines unregelmäßigen Seegangs	[W·s/m]
E_{kin}	Kinematische Energie des Seegangs	[W·s/m]
E_{pot}	Potentielle Energie des Seegangs	[W·s/m]
f	Frequenz	[1/s]
F_m	mittlere Energieflußkomponente in Berechnungsfortschrittsrichtung	[W/m]
Fr^*	FROUDESche Kornzahl	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Bauwerkshöhe (z.B. der Lahnung über OK Watt)	[m]
H	Wellenhöhe	[m]
H_i	Ausgangswellenhöhe	[m]
H_{max}	maximale Wellenhöhe	[m]
H_R	Höhe der reflektierten Welle vor dem Bauwerk	[m]
H_{rms}	Wellenhöhe „ <i>root-mean-square</i> “	[m]
$H_s, H_{1/3}$	signifikante (charakteristische) Wellenhöhe, Mittel der 33% höchsten Wellen einer Messung	[m]
H_T	Wellenhöhe im Transmissionsbereich	[m]
H_v	Verlustwellenhöhe	[m]
H_{OW}	Wasserstand im Oberwasser eines Gerinnes	[m]
H_{UW}	Wasserstand im Unterwasser eines Gerinnes	[m]
i	Laufvariable	[-]
I	Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund BROWNScher Molekularbewegung	[1/s]
j	Anzahl der Wellenhöhen einer Messung	[-]
J	Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund örtlicher Schubspannungen	[1/s]

k	Wellenzahl ($= 2 \cdot \pi / L$)	[1/m]
$k_{\text{BOLTZMANN}}$	BOLTZMANN-Konstante $= 1,3803 \cdot 10^{-25}$	[J/K]
k_R	Reflexionskoeffizient	[-]
k_T	Transmissionskoeffizient	[-]
k_v	Verlustkoeffizient	[-]
k^*	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient	[-]
L	Wellenlänge	[m]
m_0	nulltes Moment des Spektrums	[m ²]
$m_{n^{\circ}}$	höhere Momente des Spektrums	[m ²]
m'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (=1 bis 3; MEHTA, 1996, in: ABDEL-MAWLA, 1997, S. 6)	[-]
m°	$= 0,5 \cdot (2 \cdot n + 1)$	[-]
n	Proportionalitätsfaktor zwischen Geschwindigkeit der Einzelwelle und Gruppengeschwindigkeit	[-]
n_{Ton}	Anzahl der Tonteilchen pro Volumeneinheit	[1/m ³]
n^*	Potenz, Konstante	[-]
n'	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (= 0,8 bis 2,5; MEHTA, 1996, in: ABDEL-MAWLA, 1997, S. 6)	[-]
n°	$= 0, 1, 2, 3, \dots$	[-]
Q	Durchfluß durch einen Gerinnequerschnitt	[m ³ /s]
q_e	Erosionsrate	[kg/(m ³ ·s)]
q_d	Sedimentationsrate	[kg/(m ³ ·s)]
R	Kollisionsradius von Partikeln	[m]
Re_*	sedimentologische REYNOLDS-Zahl	[-]
S	Sink- und Quellterm ($-q_d + q_e$)	[kg/(m ³ ·s)]
S_B	biologischer Stabilisierungsfaktor	[-]
S(f)	Energiedichtespektrum	[m ² /s]
t	Zeit	[s]
t^*	Trockenlegungs- bzw. Konsolidierungsdauer	[s]
T	Wellenperiode	[s]
T^*	Zeitfaktor	[-]
T'	absolute Temperatur	[K]
T°	analysierte Dauer eines Meßsignals	[s]
T_E	Ebbedauer	[s]
T_F	Flutdauer	[s]
$T_{H_{\text{max}}}$	Wellenperiode der maximalen Wellenhöhe H_{max}	[s]
$T_{H_s}, T_{H_{1/3}}$	Wellenperiode der signifikanten Wellenhöhe $H_s, H_{1/3}$	[s]
u	Komponente der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung	[m/s]
u_z	Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung im Abstand z von der Sohle gemessen	[m/s]
\bar{u}	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung	[m/s]
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit	[m/s]
u^*	Porenwasserdruck	[kN/m ²]
u_1	Porenwasserüberdruck in der realen Sohle	[kN/m ²]
v	Komponente der Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung	[m/s]
v_*	Schubspannungsgeschwindigkeit	[m/s]
v^*_{krit}	kritische Schubspannungsgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{\text{krit}}(\text{biologisch})$	Strömungsgeschwindigkeit über einem natürlichen Wattboden, wenn nach dem anfänglichen Transport einiger Körner eine großflächige Erosion einsetzt	[m/s]

$V_{krit} (steril)$	Strömungsgeschwindigkeit über einem sterilen Boden im Labor, wenn nach dem anfänglichen Transport einiger Körner eine großflächige Erosion einsetzt	[m/s]
V_m rechn.	Mittlere, rechnerisch aus Meßdaten des Testgebietes "Ockholm" ermittelte Strömungsgeschwindigkeit (entspricht \bar{u})	[m/s]
V_{Modell}	Geschwindigkeit im Modell (bei Maßstabsbetrachtungen)	[m/s]
V_{Natur}	Geschwindigkeit in der Natur (bei Maßstabsbetrachtungen)	[m/s]
V_1	Geschwindigkeit, bei der noch eine Sedimentation eines Schwebstoffteilchens möglich ist	[m/s]
V_2	Geschwindigkeit, die notwendig ist, um ein Schwebstoffteilchen vom Boden zu lösen	[m/s]
V_m	mittlere Geschwindigkeit der seegangsinduzierten Strömung	[m/s]
V_{max+}	maximale Geschwindigkeit der auflandigen seegangsinduzierten Strömung	[m/s]
V_{max-}	maximale Geschwindigkeit der ablandigen seegangsinduzierten Strömung	[m/s]
V_{33+}	Mittel des oberen Drittel der auflandigen seegangsinduzierten Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
V_{33-}	Mittel des oberen Drittel der ablandigen seegangsinduzierten Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
w	Komponente der Strömungsgeschwindigkeit in z-Richtung	[m/s]
w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit	[m/s]
w_{s0}	Referenzsinkgeschwindigkeit eines einzelnen Partikels	[m/s]
x	Koordinate in Hauptströmungsrichtung	[m]
y	Koordinate quer zur Hauptströmungsrichtung	[m]
y^*	Materialkoordinate	[-]
z	vertikale Koordinate	[m]
z_0	lokale Rauheitslänge (<i>zero-velocity level</i>)	[m]
z^0	Koordinate der Schichtoberfläche	[m]
z_1	reale Sohloberfläche	[m]
α	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient	[-]
α^*	Faktor in Abhängigkeit von der Korngröße der Partikel	[-]
α_1	empirische Erosionsratenkonstante	[s/cm]
α_2	empirische Konstante	[m ^{0,5} ·s/kg ^{0,5}]
β	Koeffizient (= 3 bis 5; VAN RIJN, 1993, S. 10.11)	[-]
β^*	Faktor in Abhängigkeit vom Wassermedium	[-]
Δf	$1/T^0$	[1/s]
ε_0	empirische Konstante	[m ³ /s]
φ	Phasenwinkel	[°]
κ	VON KARMAN-Konstante (= 0,4)	[-]
μ	dynamische Viskosität des Fluids	[kg/(m·s)]
ν	kinematische Viskosität des Fluids	[m ² /s]
ρ, ρ_F	Dichte des Fluids	[kg/m ³]
ρ_s	Dichte der Partikel/des Sediments	[kg/m ³]
ρ_w	Dichte des Wassers	[kg/m ³]
σ	Gesamtspannung des Bodens	[KN/m ²]
σ'	wirksame Spannung des Bodens	[KN/m ²]

Θ_3 (Theta 3)	Wellenrichtung	[°]
τ_o	Sohlschubspannung	[KN/m ²]
τ_s	vorhandener kohäsiver Scher- oder Strömungswiderstand der Sohle	[KN/m ²]
τ_{krit}	kritische Sohlschubspannung	[KN/m ²]

Abkürzungen

MHThw	Mittlerer höchster Wert des Tidehochwasser	[mNN, mPN]
MHW	Mittleres Hochwasser	[mNN, mPN]
MThw	Mittleres Tidehochwasser	[mNN, mPN]
MThw _(abc, ... - ...)	Mittleres Tidehochwasser am Pegel „abc“ im Zeitraum ... bis ...	[mNN, mPN]
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser	[mNN, mPN]
MTnw _(abc, ... - ...)	Mittleres Tideniedrigwasser am Pegel „abc“ im Zeitraum ... bis ...	[mNN, mPN]
MT1/2w	Mittleres Tidehalbwasser	[mNN, mPN]
NN	Normalnull (Bezugshorizont)	[m]
OK	Oberkante	[mNN]
PN	Pegelnul (= NN + 5,00 m)	[m]
T _E	Ebbedauer	[s]
T _F	Flutdauer	[s]
Thb	Tidehub	[m]
Thw	Tidehochwasser	[mNN, mPN]

ALW	Amt für Land- und Wasserwirtschaft
ÄLW	Ämter für Land- und Wasserwirtschaft
BMBF	Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
BMFT	Bundesminister für Forschung und Technologie (ehemals: BMBF)
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CERC	Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.
COPEDEC	Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries
DIN	Deutsches Institut für Normung
DHI	Danish Hydraulic Institute
DNA	Deutscher Normenausschuß
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
DVWW	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft
EDF	Electricité de France
FNW	Fachnormenausschuß Wasserwesen
FSK	Forschungsstelle Küste des NLO
FTZ	Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel
GfS	Gesellschaft für Strukturanalyse
IMAU	Institute for Marine and Atmospheric Research
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küstenwesen
LANU	Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
MAFF	Ministry of Agriculture, Fisheries and Food
MEDCOAST	Mediterranean Coastal Environment
MELF	Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
MELFF	Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Fischerei und Forsten
NAW	Normenausschuß Wasserwesen

NLÖ	Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie, Norderney
NMELF	Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
RWS	Rijkswaterstaat
SDN	Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste
SRU	Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
StAIK	Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VSAG	Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft
WKS	Wellenkanal des Franzius-Instituts am Schneiderberg
WWF	Worldwide Found for Nature

CIS	<i>Computerized Inspection System</i>
EMS	„ <i>Elliptic-Mild-Slope</i> “-Modul des Programms MIKE21 [®]
HD	„ <i>Hydro-Dynamic</i> “-Modul des Programms MIKE21 [®]
MT	„ <i>Mud Transport</i> “-Modul des Programms MIKE21 [®]
SET	<i>Sedimentation-Erosion-Table</i>

N1 ... N5	Bezeichnung der Drucksonden im Testgebiet „Ockholm“
S1 ... S5	Bezeichnung der Drucksonden im Testgebiet „Speicherkoog Süd“

S-1 ... S-5	Bezeichnung der in der Strömungsrinne untersuchten Lahnungsvarianten
W-1 ... W-7	Bezeichnung der im Wellenkanal untersuchten Lahnungsvarianten

erh. Tide	erhöhte Tide
mittl. Tide	mittlere Tide
niedr. Tide	niedrige Tide
ausg. Seeg.	ausgereifter Seegang
ger. Seeg.	geringer Seegang
s.ger. Seeg.	sehr geringer Seegang
W. ablandig	Wind ablandig
W. kst.-parall.	Wind küstenparallel
W. senkr.	Wind senkrecht auf die Lahnungsfelder gerichtet

Abb.	Abbildung
Agr.	<i>Agricultural</i>
Anl.	Anlage
Aufl.	Auflage
Bd.	Band
Bft.	Beaufort
BNatSchG	Bundes-Natur-Schutz-Gesetz
bzw.	beziehungsweise
Commun.	<i>Communications</i>
Dept.	<i>Department</i>
erw.	erweitert
et al.	et alii (und andere)
e.V.	eingetragener Verein

Glg.	Gleichung
H.	Heft
Hrsg.	Herausgeber
Int.	<i>International</i>
J.	<i>Journal</i>
Jg.	Jahrgang
lfd.	laufend
Ltd.	<i>limited</i>
Mar.	<i>Marine</i>
mdl.	mündlich
Misc.	<i>Miscellany</i>
Nr.	Nummer
o.V.	ohne Verfasserangabe
Pkt.	Punkt
Pos.	Position
Proc.	<i>Proceedings</i>
Publ.	<i>Publications</i>
Red.	Redaktion
Res.	<i>Research</i>
rev.	revidiert
S.	Seite
s.o.	siehe oben
Sp.	Spalte
Symp.	<i>Symposium</i>
Taf.	Tafel
TU	Technische Universität
u.a.	und andere
überarb.	überarbeitet
Var.	Variante
verb.	verbessert
vgl.	vergleiche
Z.	Zeile

Vorwort

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ wurde von 1994 bis Mitte 1997 das Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ im FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der UNIVERSITÄT HANNOVER bearbeitet. Für die großzügige Bereitstellung der erforderlichen Forschungsmittel durch den BUNDESMINISTER FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF) sei an dieser Stelle gedankt.

Unser Dank gilt dem Projektgruppenleiter, Herrn Dr. Jacobus Hofstede, sowie der Projektgruppe des KURATORIUMS FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENWESEN (KFKI), die projektbegleitend durch zahlreiche Anregungen und Diskussionen zu der erfolgreichen Bearbeitung des Projektes beigetragen haben.

Gedankt sei an dieser Stelle insbesondere den Mitarbeitern der ÄMTER FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ÄLW) in HUSUM und HEIDE sowie den Mitarbeitern des STAATLICHEN AMTES FÜR INSEL UND KÜSTENSCHUTZ (STAIK) NORDEN für die unbürokratische und sehr ergiebige Zusammenarbeit hinsichtlich Ortsbegehungen, der Weitergabe technischer Unterlagen und Datenmaterial sowie der Beantwortung von Rückfragen.

Hinsichtlich der Unterstützung in der Vorbereitung, Durchführung, Auswertung und nicht zuletzt in der Darstellung von Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen geht unser Dank an die studentischen Hilfskräfte Fritzsche, Stoschek und Visser.

Hannover, Juni 1997

FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN

Prof. Dr.-Ing. Claus Zimmermann

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Mit dem Forschungs- und Entwicklungsvertrag vom 01.01.1994 (Az.: 515-3892-MTK 0564) des BUNDESMINISTERS FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF; ehemals: BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMFT)) mit dem KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) erhielt das LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU; ehemals: LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN) als Koordinator des KFKI eine Zuwendung für das Forschungsvorhaben „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ und beauftragte das FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEZENTRUM (FTZ) WESTKÜSTE der CHRISTIAN-ALBRECHT-UNIVERSITÄT ZU KIEL (Teilprojekt „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“) und das FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der UNIVERSITÄT HANNOVER (Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“) mit der Durchführung von Untersuchungen (Abb. 1.1).

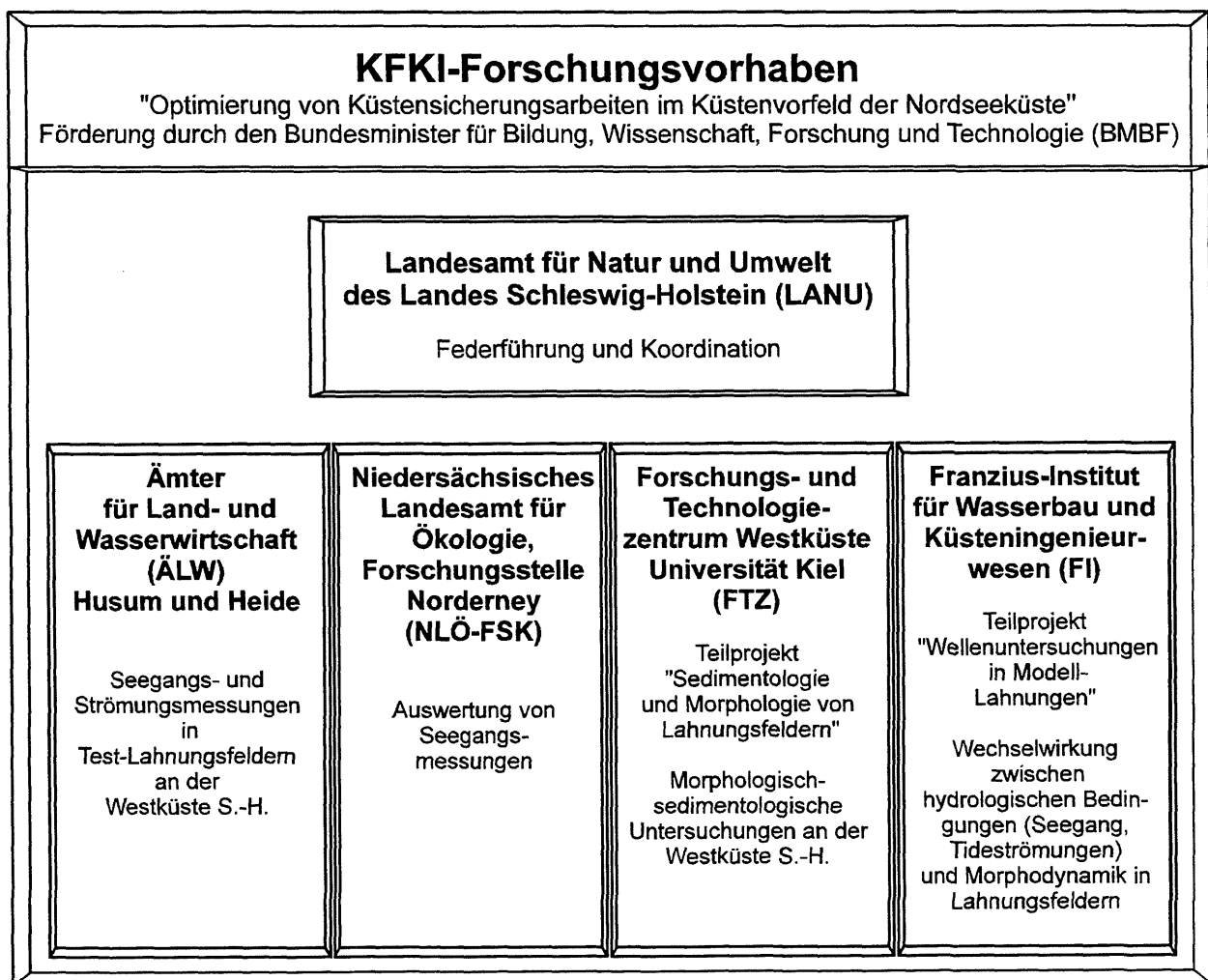


Abb. 1.1: Struktur des KFKI-Forschungsvorhabens
„Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“

Aufgabe des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ des FRANZIUS-INSTITUTS, war es, neben einem Literaturstudium zu den Themenkomplexen „Lahnungen/Lahnungsfelder“ und „hydrologisch-morphologische Wechselwirkungen an kohäsiven Wattböden“, die in Lahnungsfeldern unter bestimmten Randbedingungen auftretenden Strömungs- und Seegangsbedingungen zu erfassen und die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen zu beurteilen. Die Strömungs- und Seegangsverhältnisse wurden mit den Modulen „*Hydro-Dynamic* (HD) Module“ und „*Elliptic-Mild-Slope* (EMS) Module“ des am Institut vorhandenen Standardsoftwarepaketes MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI) simuliert, ausgewertet und interpretiert. Detailuntersuchungen zum Verständnis der hydrodynamischen Wechselwirkungen am Bauwerk einer Lahnung wurden in physikalischen Modellen durchgeführt.

In zwei eigens für das Forschungsvorhaben eingerichteten Testgebieten an der Westküste Schleswig-Holsteins (Testgebiet „Ockholm“ und Testgebiet „Speicherkoog Süd“, Abb. 1.2) wurden im Bereich der dort im Herbst 1993 bzw. Frühjahr 1995 angelegten Lahnungsfelder topographische Messungen sowie Seegangs- und Strömungsmessungen von den ÄMTERN FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ÄLW) Heide und Husum durchgeführt. Die Seegangsmessungen wurden von der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (FSK) des NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR ÖKOLOGIE NORDERNEY (NLÖ) ausgewertet. In Verbindung mit diesen Messungen in der Natur, die durch das FRANZIUS-INSTITUT analysiert wurden, und den durch das FTZ durchgeführten morphologisch/sedimentologischen Untersuchungen in den beiden Testgebieten wurden im Rahmen des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ mit dem Modul „*Mud Transport* (MT)“ des DHI-Softwarepaketes zu erwartende Erosions- und Sedimentationsvorgänge numerisch simuliert und im Hinblick auf vergleichende Aussagen bei unterschiedlichen Lahnungsgeometrien, baulichen Ausführungen sowie hydrodynamischen Randbedingungen analysiert.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Untersuchungen in den Testgebieten wurden dem FRANZIUS-INSTITUT für die physikalischen und numerischen Untersuchungen weitere Informationen durch das LANU sowie die ÄLW Heide und Husum zur Verfügung gestellt. Dazu zählen unter anderem Pegeldata der Tidepegel „Schlüttsiel“ und „Sommerkoog Steertloch“ sowie Winddaten der Windmeßstationen „Hallig Hooge“ bzw. „Büsum“ (vgl. Abb. 1.2).

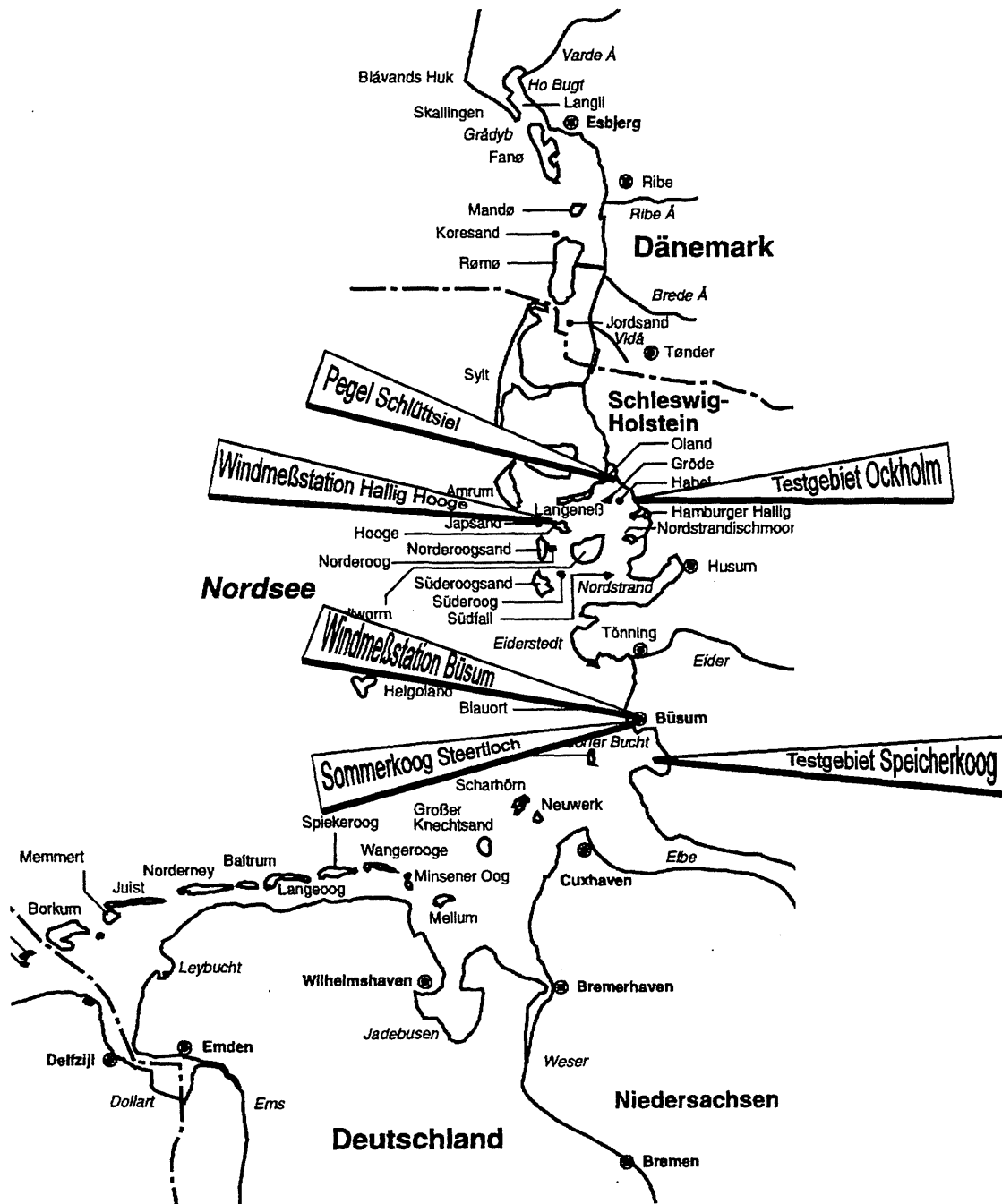


Abb. 1.2: Lage der Testgebiete „Ockholm“ und „Speicherkoog Süd“, der Tidepegel „Schlüttsiel“ und „Sommerkoog Steertloch“ sowie der Windmeßstationen „Hallig Hooge“ und „Büsum“ (Lokationen ergänzt in: LOZÁN ET AL., 1994, Taf. II)

2 Verwendete Unterlagen

2.1 Allgemeine Informationen

Planunterlagen zu den Ausbaustufen 1 (Herbst 1993) und 2 (Frühjahr 1995) des Testgebietes „Ockholm“, 2 DIN-A-4-Pläne, Maßstab rd. 1:5.000

LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU), 1993

Planunterlagen zur Ausbaustufe „Frühjahr 1995“ des Testgebietes „Speicherkoog Süd“, 1 DIN-A-4-Plan, Maßstab rd. 1:5.000

Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LANU), 1993

Auszüge aus einer Leistungsbeschreibung „Grüpparbeiten in Watt und Vorland“, 5 Seiten
AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995

Ergebnisse einer Fragebogenaktion im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Vorlandbildung an Deichen und Sicherungsdämmen“, 24 Seiten

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, BAUBEZIRK DAGEBÜLL, 1989

Prüfungsunterlagen für die verwaltungseigene Prüfung der Wasserbauarbeiterinnen/Wasserbauarbeiter an der Westküste Schleswig-Holsteins im Lehrberuf Wasserbauer, Fragen- und Antwortkatalog

MINISTER FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, FISCHEREI UND FORSTEN (MELFF), 1993.

Karte des Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuches 1989, Maßstab 1:500.000

LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU), 1992

Darstellung der im Frühjahr 1995 im Testgebiet „Ockholm“ durchgeführten Grüpparbeiten, 4 Seiten

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1997

2.2 Literaturhinweise der Projektpartner

Literaturrecherche zum Thema „Vorland: Ökologie, Entstehung und Bedeutung im Nordfriesischen Wattenmeer“, 7 Seiten und 12 Anlagen

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM (DIPL.-ING. U. DOCKHORN), o.Jg.

Literaturliste zum Thema „Vorlandfragen“, 4 Seiten

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE (DR. P. WIELAND), 1992

Zusammenfassungen aus der niederländischen Vorlandliteratur zum Thema „Lahnungsfelder und Grüppmethoden“, 6 Seiten

LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU), 1992

2.3 Topographische Informationen

2.3.1 Testgebiet „Ockholm“

Übersichtskarte über den Neubau vor dem Testgebiet „Ockholm“, 1 DIN-A-4-Plan, Maßstab 1: 25.000

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1989

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Ockholm“ im Mai 1994, 1 DIN-A-1-Plan, Maßstab 1: 1.000, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1994

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Ockholm“ im November 1994, 1 DIN-A-3-Plan, Maßstab 1: 2.500, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1994

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Ockholm“ im April 1995, 1 DIN-A-3-Plan, Maßstab 1: 2.500, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1994

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Ockholm“ im November/Dezember 1995, 1 korrigierter DIN-A-3-Plan, Maßstab 1: 2.500, 1 korrigierter Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1996

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Ockholm“ im November 1996, 1 DIN-A-3-Plan, Maßstab 1: 2.500, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1996

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Ockholm“ im April 1996, 1 DIN-A-3-Plan, Maßstab 1: 2.500, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1996

2.3.2 Testgebiet „Speicherkoog Süd“

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ im Juni 1994, 1 DIN-A-0-Plan, Maßstab 1: 1.000

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, 1994

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ im Oktober/November 1995, 1 DIN-A-0-Plan, Maßstab 1: 1.000, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, 1996

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ im November 1996, 1 DIN-A-0-Plan, Maßstab 1: 1.000, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, 1996

Daten der Topographischen Geländeaufnahme des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ im Juni 1996, 1 DIN-A-0-Plan, Maßstab 1: 1.000, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, 1996

2.4 Wasserstandsdaten

2.4.1 Pegel „Schlüttsiel“

Daten der mittleren Tidekurve am Pegel „Schlüttsiel“ im Zeitraum 1981 bis 1990, 1 DIN-A-4-Schrieb, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1994

Pegeldaten des Pegels „Schlüttsiel“ im 15-Minuten-Intervall für den Zeitraum 14. Dezember 1994 bis 2. Januar 1995, 5 Seiten

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, DEZERNAT GEWÄSSERKUNDE, 1995

Pegeldaten des Pegels „Schlüttsiel“ im 1-Minuten-Intervall für den Zeitraum 1. Januar 1995 bis 31. März 1995, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1996

Pegeldaten des Pegels „Schlüttsiel“ im 1-Minuten-Intervall für den Zeitraum 1. August 1995 bis 30. September 1995, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1997

2.4.2 Pegel „Sommerkoog Steertloch“

Daten der mittleren Tidekurve am Pegel „Sommerkoog-Steertloch“ für das Abflußjahr 1994, 1 DIN-A-3-Plott

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995

2.5 Strömungsdaten

Ergebnisse einer Strömungsmeßkampagne im Testgebiet „Ockholm“ im Herbst 1995 mit zugehörigen Wasserstandsdaten, 5 plus 8 Seiten, 2 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995/96

2.6 Seegangsdaten

Analyseergebnisse der Seegangsdaten für den Meßzeitraum 14. Dezember 1994 bis 2. Januar 1995, 1 korrigierter Datenträger (EXCEL 2.04-ZIP-Format)

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE, FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE NORDERNEY, 1995

Analyseergebnisse der Seegangsdaten für den Meßzeitraum Januar bis März 1995, 3 Datenträger (EXCEL 2.04-ZIP-Format)

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE, FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE NORDERNEY, 1996

Analyseergebnisse der Seegangsdaten für den Meßzeitraum August bis September 1995, 2 Datenträger (EXCEL 2.05-ZIP-Format)

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE, FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE NORDERNEY, 1997

Zusammenstellung der Sonden- und Geländehöhen der Seegangsmessungen im Testgebiet „Ockholm“, 1 Seite

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1997

Grafiken der Auswertung von Seegangsdaten im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“, 1 Datenträger (EXCEL 2.04-Format)

STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ (STAIK) NORDEN, 1997

2.7 Winddaten

2.7.1 Windmeßstation „Hallig Hooge“

Monatsmittel der Winddaten der Windmeßstation „Hallig Hooge“ der Jahre 1989 bis 1995, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995

Winddaten im 1-Stunden-Intervall der Windmeßstation „Hallig Hooge“ für den Monat Dezember 1994, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995

Winddaten im 1-Stunden-Intervall der Windmeßstation „Hallig Hooge“ für das Jahr 1995, 1 Datenträger (ASCII-Format)

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1996

2.7.2 Windmeßstation „Büsum“

Winddaten der Windmeßstation „Büsum“ im Zeitraum 1. September bis 31. Oktober 1994, 4 Seiten

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, DEZERNAT GEWÄSSERKUNDE BÜSUM, 1994

Windauswertungen im 5-jährigen Mittel 1979 - 1979 an der Windmeßstation „Büsum“, 6 Seiten

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, DEZERNAT GEWÄSSERKUNDE BÜSUM, 1997

2.8 Sedimentologische Informationen

Summenkurven mit Angabe der Vol.-%-Anteile je Kornklasse von 7 CIS (*Computerized Inspection System*)-Messungen aus Proben der Testgebiete „Ockholm“ und „Speicherkoog Süd“ im Sommer 1994

FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEZENTRUM WESTKÜSTE (FTZ) BÜSUM, 1994

3 Stand des Wissens und der Technik zum Thema „Lahnungen/Lahnungsfelder“

3.1 Natürliche Vorlandbildung

Das Wattenmeer vor der europäischen Festlandsküste hat eine Gesamtfläche von rd. 8.000 km². Davon entfallen rd. 10% auf Dänemark, 30% auf die Niederlande und 60% auf die Bundesrepublik Deutschland, wovon etwa die Hälfte zum schleswig-holsteinischen Bereich gehört. Diese weltweit einmalige Küstenlandschaft, bestehend aus Dünen- und Strandinseln, Halligen, Buchten, Flußmündungen, offenen und brandungsgeschützten Wattflächen, Rinnen- und Prielsystemen ist als Übergangszone zwischen Land und Meer der Dynamik des Meeres unterworfen. Seine Existenz beruht auf der halbtäglichen, von den Gezeiten abhängigen Überflutung und dem Trockenfallen der Wattflächen. Das Wattenmeer setzt sich aus den drei Teillebensräumen

1. Watt
2. Inseln mit Strand und Dünen
3. Salzwiesen / Vorland

zusammen, die aufgrund ihrer Besonderheiten jeweils spezielle Funktionen des gesamten Ökosystems Wattenmeer wahrnehmen.

Das Watt wird in vier Bereiche unterteilt (Abb. 3.1):

Der untere Wattbereich (Sublitoral) umfaßt die Gebiete unterhalb rd. MThw - 0,60 m, die auch bei Tideniedrigwasser noch mit Wasser bedeckt bleiben. Dazu gehören z.B. Wattrinnen¹, Priele² und Wattströme³ sowie zahlreichen Inseln seeseits vorgelagerte, sandige Flachwassergebiete. Prinzipiell zählt dieser Bereich nicht zum Watt, da die ökologischen Randbedingungen eher mit denen der offenen Nordsee übereinstimmen.

Das Eulitoral, der mittlere Wattbereich zwischen rd. MThw - 0,60 m und MThw, ist zweimal täglich dem Wechsel von Ebbe und Flut unterworfen. Die Grenzen zum unteren sowie zum oberen Wattbereich sind fließend, da das Eulitoral sowohl vom Prielsystem durchzogen als auch gegen die Queller-Region und die Salzwiesen nicht klar abgegrenzt ist.

¹ Als Wattrinnen werden flache Rinnen bezeichnet, die in der Regel den Oberlauf von Prielen bilden und bei Tideniedrigwasser im allgemeinen trockenfallen (STADELMANN, 1981, S. 148).

² Als Priele werden schmale und seichte Nebenwasserläufe bezeichnet, die in einen Wattstrom münden. In ihnen bleibt das Wasser während niedriger Tidewasserstände stehen und läuft nicht vollständig ab (TEN DOORNKAAT-KOOLMAN, 1879/1884, in: LÜDERS, 1984, S. 86f / STADELMANN, 1981, S. 144)

³ Wattströme sind Hauptwasserläufe im Watt, die auch bei Tideniedrigwasser nicht trockenfallen. Sie werden regional auch als Tief, Gats (Gatts), Baljen (Balgen), Leys oder Löcher bezeichnet (STADELMANN, 1981, S. 148).

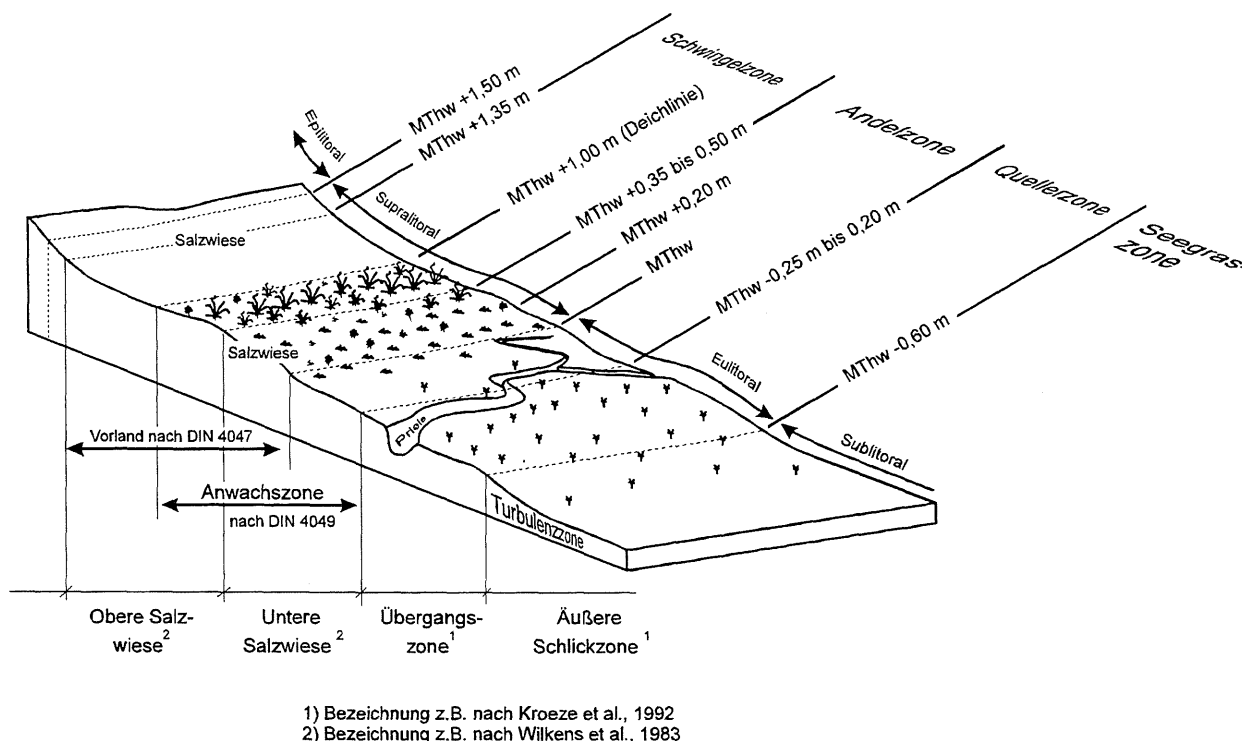


Abb. 3.1: Zonierung der Wattbereiche

Der obere Wattbereich (Supralitoral) umfaßt einen Teil der Verlandungszone (Anwachszone), Bereiche der Salzwiesen sowie den unteren Bereich der Süßwiese, die durch Akkumulationsvorgänge infolge reduzierter Strömungsgeschwindigkeiten über die Linie des mittleren Hochwassers (bis rd. MThw + 1,50 m) hinausgewachsen sind. Das Supralitoral wird nur noch unregelmäßig überflutet.

Der höchste Wattbereich oberhalb rd. MThw + 1,50 m, das Epilitoral⁴, wird außer während Sturmfluten⁵ nicht mehr überflutet, ist jedoch durch das salzhaltige Grundwasser und durch vom Wind herangetragenem Wasserstaub immer noch den maritimen Einflüssen unterworfen (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 8 / DOLDER/DOLDER, 1988, S. 20ff / JANKE/KREMER, 1990, S. 28f / WIELAND, 1990, S. 73f).

⁴ Die Bereiche Eulitoral, Supralitoral und Epilitoral werden als oberes Litoral bezeichnet.

⁵ Zur aktuellsten Definition von Sturmfluten, siehe:

GÖNNERT, G. Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe.
 FERK, U.

In: STERR, H./PREU, C. (Hrsg.): Beiträge zur aktuellen Küstenschutzforschung, Aspekte – Methoden – Perspektiven, Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft (VSAG), Bd. 18, 1996, S. 13-31.

Der ostfriesischen Küste vorgelagert ist ein Gürtel aus sieben größeren und einigen kleineren Düneninseln. Sie sind aus einem von seewärts durchbrochenen Strandwall entstanden. Die nordfriesischen Inseln vor der schleswig-holsteinischen Westküste hingegen sind überwiegend Reste des ehemaligen Festlandes (NMELF, 1985, S. 6 / NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 29). Der Strandbereich erstreckt sich von der mittleren Tideniedrigwasserlinie bis zum seeseitigen Dünenfuß bzw. am Festland bis zum Deich. Der sogenannte trockene Strand wird im Vergleich zum nassen Strand von den mittleren Tiden nicht erreicht.

Salzmarschen oder -wiesen⁶ sind die über der mittleren Hochwasserlinie gelegenen Flächen, die nur noch selten, insbesondere im Winterhalbjahr während Wind- oder Sturmfluten, mit Salzwasser bedeckt werden (LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 11ff). Es werden verschiedene Formen der Salzwiese unterschieden (KEMPF ET AL., 1988, S. 123ff/ DIJKEMA, 1984, in: PARTENSKY ET AL., 1993a, S. 1.5f):

- **Sandsalzwiesen** entstehen im Schutz von Dünen und Strandwällen, sind meist durch eine große Artenvielfalt gekennzeichnet und auf den Wattseiten von Sandinseln (z.B. Insel Amrum) zu finden.
- **Vorlandsalzwiesen** weisen im Vergleich zu den Sandsalzwiesen eine geringere Artenvielfalt auf. Sie entstehen i.d.R. durch künstliche Vorlandbildungsmaßnahmen (Lahnungsbauten).
- Die Pflanzengesellschaften der **Ästuarsalzwiesen** sind vom geringen, aber stark schwankenden Salzgehalt des Wassers geprägt. Die meisten Ästuarsalzwiesen sind bereits eingedeicht; es sind nur noch einige Flächen im Dollart sowie in der Weser- und Elbmündung zu finden.
- **Lagunensalzwiesen** (z.B. Insel Föhr) sind nur durch einen schmalen Zufluß mit dem Meer verbunden.
- **Halligsalzwiesen** sind nur im schleswig-holsteinischen Wattenmeer zu finden. Aufgrund ihrer exponierten Lage unterliegen sie extremen Belastungen und somit starken Gestaltsänderungen. In ökologischer Hinsicht nehmen sie eine Sonderstellung ein.
- Ehemalige, durch Sommerdeiche umgebene Salzwiesen werden als **Sommerpolder** bezeichnet. Da sie nur sehr selten überflutet werden, befinden sich ausschließlich in den Randbereichen Halophyten⁷.

⁶ Die Benennung der Salzwiesen bzw. des Vorlandbereiches ist regional unterschiedlich. Sie werden auch als Heller, Groden, Maifeld, Ausserdeich, Uiterdyk, Butendyk, Koog oder Vorland bezeichnet (HUNRICHS, 1782, in: LÜDERS, 1984, S. 118 / LÜDERS/LUCK, 1976, S. 222).

⁷ Halophyten bilden die Gruppe der Salzpflanzen, die sich unterhalb des mittleren Tidehochwassers ansiedeln und so zweimal täglich vom Salzwasser überflutet werden. Sie haben sich auf die tägliche Salzfracht eingestellt und sind an diesen Standorten allen anderen Konkurrenten überlegen.

Der Bereich des Supralitorals von der Linie des mittleren Tidehochwassers bis zum Deichfuß wird als Vorland, bestehend aus Anwachszone und Salzwiese, bezeichnet (Abb. 3.1). Die Salzwiesen des Vorlands werden im Laufe eines Jahres bei höheren Tiden 40- bis 250-mal überflutet und durch die innerhalb des Eulitorals liegenden zahlreichen verästelten Prielsysteme auf natürliche Weise be- und entwässert. Durch die Überflutungen werden diese Bereiche mit Salzwasser bedeckt, das auch für einen stetigen Nachschub an nährstoffreichen Sedimenten sorgt und dieses Teilsystem des Wattenmeeres im Gebiet zwischen Esbjerg in Dänemark und Den Helder in den Niederlanden zu einem der produktionsreichsten Lebensräume der Erde macht (ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER BEAUFTRAGTER FÜR NATURSCHUTZ UND LANSCHAFTSPFLEGE, 1980, S. 26 / HEYDEMANN/MÜLLER-KARCH, 1980, S. 67 / ABRAHAMSE, 1984, S. 111 / DIECKMANN, 1985, S. 142).

In den Salzwiesen brüten rd. 25 Vogelarten wie Austernfischer, Rotschenkel und verschiedene Möwen- und Seeschwalbenarten. Über 50 Arten nutzen diesen Lebensraum während ihres Zuges zu den Brutgebieten oder zu den Winterquartieren. Pfuhlschnepfe, Knutt und Alpenstrandläufer sind einige der immer wiederkehrenden Vogelarten, die während der Niedrigwasserzeiten im trockengefallenen Watt Nahrung suchen und bei Hochwasser auf den Salzwiesen rasten. Für die pflanzenfressenden Arten wie Ringelgans, Nonnengans und Pfeifente sind die Salzwiesen die wichtigsten Nahrungsplätze (HEYDEMANN/MÜLLER-KARCH, 1980, S. 72ff / NMELF, 1985, S. 48f / LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER (a)).

Im einzigartigen Ökosystem des Vorlandes können nur besonders angepasste Organismen der Flora und Fauna existieren. Die Salzwiesen sind mit zahlreichen Halophyten bedeckt und mit etwa 250 kleineren Tierarten besiedelt. Entsprechend den Tideverhältnissen tritt in der Anwachszone und im Salzwiesenbereich eine gesetzmäßige Zonierung und Sukzession von Pflanzengesellschaften auf, die primär aus salztragenden und salzresistenten Arten bestehen (Abb. 3.2). Sobald das Watt auf rd. 0,50 m unter MThw angewachsen ist, beginnt der natürliche Pflanzenwuchs. In der Anwachszone stellen sich zunächst die Pionierpflanzen Queller⁸ (*Salicornia herbacea* L.) und Schlickgras (*Spartina Townsendii*) und ab einer Vorlandhöhe von rd. 0,25 m unter MThw in der Salzwiese der Andel (*Puccinellia maritima* Parl.) ein. Erst im höher gelegenen Bereich der Salzwiese, zwischen MThw + 0,35 m und MThw + 1,30 m, bilden sich Rotschwengel- und Bottenbinsenrasen (HEYDEMANN, 1967, S. 16 / HEYDEMANN/MÜLLER-KARCH, 1980, S. 71f / KAMBECK, 1980, S. 3, 13 / STADELMANN, 1981, S. 39ff / ERCHINGER, 1982, S. 700f / JANKE/KREMER, 1990, S. 28f / KRAMER, 1990, S. 103 / DIJKEMA ET AL., 1990a, in: HOFSTEDÉ, 1992, S. 2 / OSTERTHUN/PARTENSKY, 1991a,

⁸ auch Glasschmalz, Glaskraut, Seekrappe oder in Niedersachsen Krickfuß genannt.

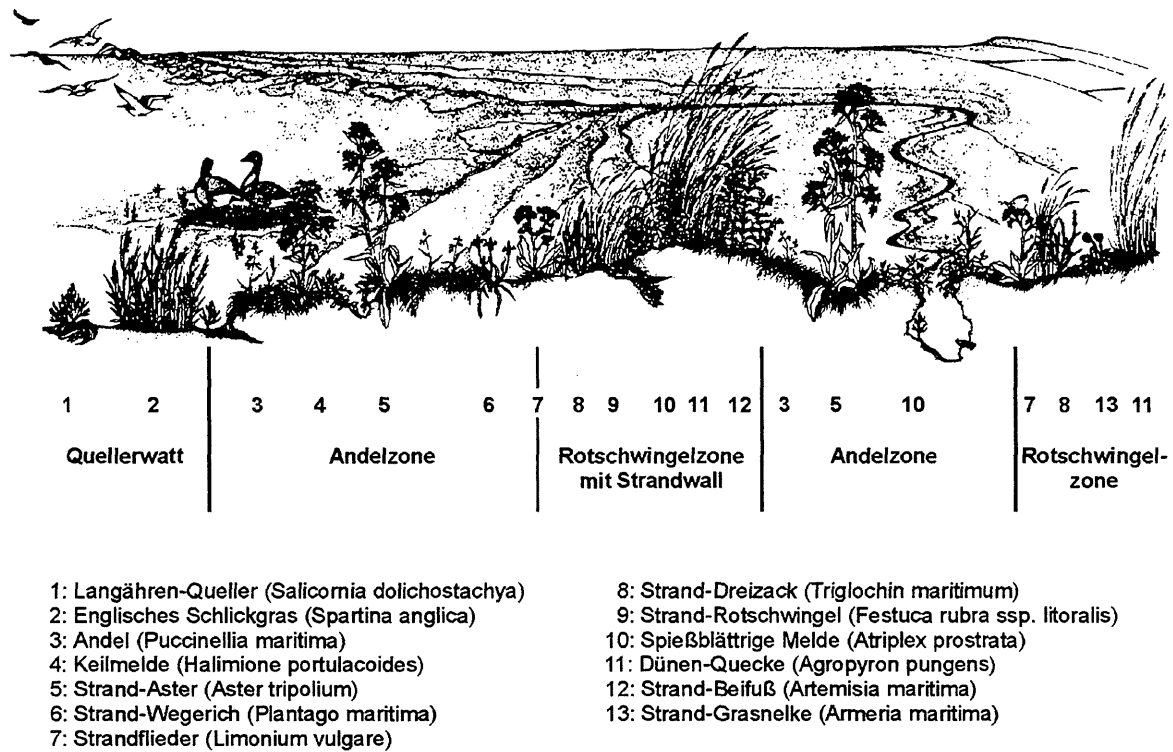


Abb. 3.2: Sukzessionsfolge

(nach: NATIONALPARK „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 26)

S. 369f / LANDESAMT NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 11f / NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 22f / STÄNDIGE ARBEITSGRUPPE BIOSPHÄRENRESERVATE, 1995, S. 17 / LANDESAMT NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER (a) / LANDESAMT NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER (b)).

Vereinzelte Quellerpflanzen halten die mit der Tidewelle transportierten Sedimente nicht wesentlich zurück, sind aber ein sicherer Indikator für den Anwachs eines Vorlandes. Im Stadium der flächigen Besiedlung reduziert der obere Körper des Quellers den Wellenschlag und mindert die Strömungsgeschwindigkeiten, so daß die Sedimentationsbedingungen begünstigt werden. Die Wurzeln der kakteenartigen Quellerpflanze binden – sogar noch im abgestorbenen Zustand – Sedimente und festigen den Boden⁹ (HEISER, 1933, S. 379 / WOHLBERG, 1933,

⁹ KAMPS (1962, S. 60) hingegen vertritt die Auffassung, daß die abgestorbene Pflanze keine bodenverfestigende Funktion mehr ausübt und das sedimentierte Material infolge Turbulenzen im Bereich des Stammes erneut erodiert und abgetragen werden kann.

S. 5 / WOHLBERG, 1954, S. 65 / DIJKEMA ET AL., 1990a, in: HOFSTED, 1992, S. 3 / ERCHINGER ET AL., 1994, S. 2).

Die zweite Pionierpflanze, das Schlickgras, bildet im Verlauf der Zeit sich radial ausweitende Horste, um daraus einen flächigen Bewuchs zu entwickeln. Dann festigt sie, genau wie der Queller, mit ihren Wurzeln den Boden, beruhigt die Turbulenz des fließenden Wassers und begünstigt dadurch den Anlandungsvorgang im Vorlandbereich sowie insbesondere auch die Ablagerung der besonders feinen Sinkstoffe, die für einen erhöhten Tongehalt des Sediments sorgen (ERCHINGER, 1971, S. 104).

Mit jeder Tide werden im Wattenmeer und insbesondere während Sturmflutereignissen Sedimente transportiert. Die natürliche Vorlandbildung beruht auf großen Mengen an organischen und anorganischen Schwebstoffen im Wasser, die im Mittel 5 mg/l bis 150 mg/l betragen, während Sturmfluten im Durchschnitt über 2.500 mg/l (WOHLBERG, 1954, S. 42ff, 49f / DIECKMANN, 1985, S. 178 / SÖNNICHSEN/MOSEBERG, 1994, S. 114). Je nach Örtlichkeit bestehen daher, wie BRAHMS (1754, S. 43) bereits erkannte, gute oder weniger gute Tendenzen zur natürlichen Anlandung.

Die Wattsedimente bestehen aus den Hauptkomponenten:

1. anorganischer Anteil (Sand, Schluff, Ton; vgl. Taf. 3.1)
2. organischer Anteil (Kohlenstoffverbindungen, Karbonate; s. hierzu auch LAANE/WOLFF, 1994)

Zusammen mit Wasser bilden sie das allgemein als Schlick bezeichnete Sediment (Taf. 3.2), dessen prozentuale Zusammensetzung regional sehr unterschiedlich ist.

KORNGRÖÖE	BEZEICHNUNG
2 mm bis 0,063 mm	Sand
0,063 mm bis 0,002 mm	Schluff
< 0,002 mm	Ton

Taf. 3.1: Klassifizierung der Korngrößen nach DIN 4022
(nach: FNW IM DNA, 1987, in: THORENZ, 1991, S. 19)

ANTEIL DER KORNFRAKTION < 0,063 mm	SEDIMENTTYP
< 10%	Wattsand
10% bis 50%	Schlickwatt
> 50%	Schlick

Taf. 3.2: Bezeichnung der Sedimenttypen nach dem Anteil der Kornfraktion < 0,063 mm nach DIN 4022
(nach: FNW IM DNA, 1987, in: THORENZ, 1991, S. 19)

Die Erosionsstabilität der Wattsedimente gegen Strömungs- und Wellenangriff ist nicht nur durch deren physikalische Parameter bestimmt. Eine ausgeprägte, wenn auch nicht immer sichtbare Besiedlung beeinflusst die Erosionsstabilität der Sedimente maßgeblich. Verschiedene Tierarten (vgl. Abb. 3.3) können die feinen organischen Bestandteile und die Tonminerale durch die Bildung kleiner schlickartiger Kotklümpchen aneinanderheften. Hierdurch wird die Ablagerung eines an Ton und organischer Substanz reichen Sediments bewirkt, das für den Anwachs des Vorlandes von großer Bedeutung ist. Entscheidend sind daran Miesmuscheln (*Mytilus edulis* L.), Herzmuscheln (*Cerastoderma edule*) und Sandklaffmuscheln (*Mya arenaria* L.) beteiligt (s. hierzu z.B. MANZENRIEDER, 1983, S. 145ff / Kap. 4.7).

Verschiedene Wurmarten haben ähnlich wie Muscheln einen stabilisierenden Einfluß auf den Boden, können jedoch durch ihre „Wühltätigkeit“ gleichzeitig eine Bioturbation¹⁰ hervorrufen. Neben Muscheln und Würmern leben ständig etwa 50 verschiedene Kieselalgen im Wattboden, die durch Schleimabsonderung einen geschlossenen Sedimentverband, einen sog. Diatomeenrasen (*Bacillariophyceae*), bilden, der den Sedimenttransport verhindert (THIEL ET AL., 1984, S. 289ff / STREBLE, 1990, S. 52).

¹⁰ Bioturbation: Verwühlung der Sedimente durch Organismen in Gewässern oder Watten (THIEL ET AL., 1984, S. 261)

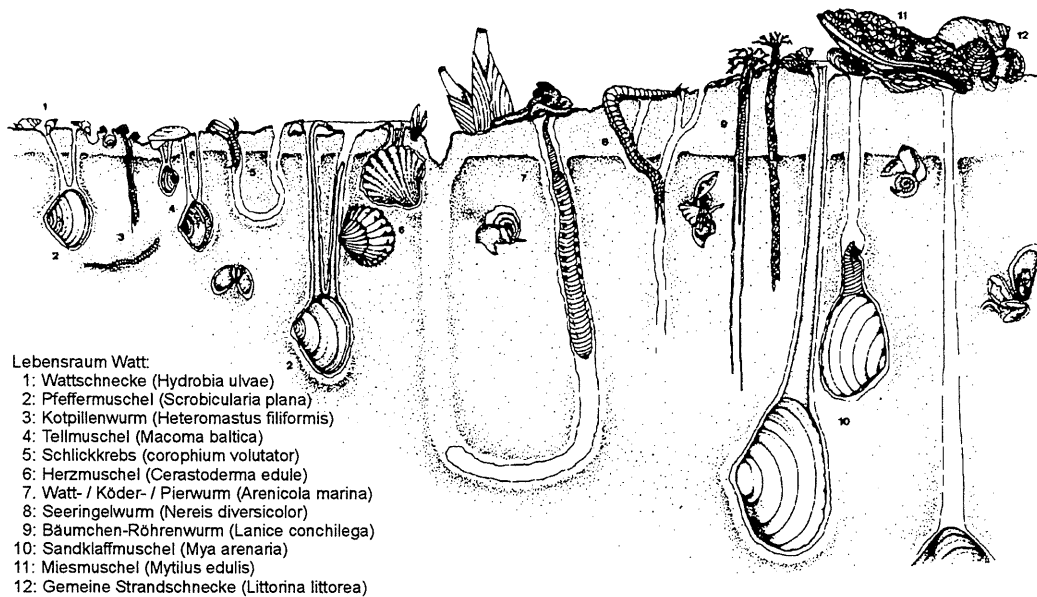


Abb. 3.3: An der Sedimentbildung beteiligte Wattbewohner
(nach: NATIONALPARK „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 18)

3.2 Künstliche Vorlandbildung durch Lahnungen

Mit der Tidewelle, die von seegangserzeugten Strömungen überlagert wird, werden Sedimente (Sinkstoffe) in den Bereich des Küstenvorfeldes transportiert, wo sie abgelagert werden, sobald die Turbulenz der Strömung reduziert wird und dadurch ihre Transportkraft verliert. Dieser Vorgang erfolgt auf natürlichem Wege in Buchten, Hafenbecken oder an den geschützten Leeseiten von Inseln, Halligen, Dämmen und sogenannten Höften oder Höftern.

Mit Hilfe planmäßiger Eingriffe kann die Ablagerung dieser Sedimente künstlich gefördert werden. So wurde in weiten Bereichen der Nordseeküste durch schachbrettartig neben- und voreinandergereihte Felder ein ausgedehntes Netz von beruhigten Wasserbereichen geschaffen. Die noch turbulente Brandung und Strömung wird von den, die sogenannten Lahnungsfelder umgebenden, in der Regel permeablen zaunartigen Bauwerken (den sogenannten Lahnungen; im folgenden auch als Lahnungsbauwerk bezeichnet), weitgehend ferngehalten und die natürliche Ablagerung der feinen Sinkstoffe aus dem Meerwasser beschleunigt.

Im weitesten Sinne ist das Jahr 1362 als Geburtsjahr der künstlichen Vorlandbildung, der „Landgewinnung“, zu bezeichnen. Vorangegangene, schwere Sturmfluten riefen gravierende Landeinbrüche an der Nordseeküste hervor. Die „Zweite Marcellusflut“ vom 16. Januar 1362 veranlaßte die Küstenbewohner deshalb, das für ihren Lebensraum und auch für die Landwirtschaft verlorene Land zurückzugewinnen; zunächst als Vorarbeiten für Eindeichungen mittels Anlage von Höftern oder Lahnungen und/oder Grütten (PROBST, 1996, S. 48f). Eine Dokumentation der ersten Arbeiten ist bei HAGEN (1878), HINRICHS (1931) oder MÜLLER/FISCHER (1955) zu finden.

Die ersten Lahnungsfelder nach dem Prinzip einer systematischen Vorlandbildung wurden im Jahr 1847 seitens der dänischen Regierung im heutigen Schleswig-Holstein angelegt (PROBST, 1996, S. 49 / vgl. Anl. A 3-1). Das Ziel der Anlage der künstlichen, buhnenartigen Lahnungsbauwerke, die je nach Örtlichkeit 100 m x 100 m bis 400 m x 400 m große Felder umfassen (Abb. 3.4), war und ist es, durch gedämpfte Strömungen und Wellenbewegungen die Anlandung von Sedimenten im Vorlandbereich zu begünstigen. In der parallel zum Deich verlaufenden Lahnung (im folgenden als Querlahnung bezeichnet) befindet sich in der Regel eine Öffnung¹¹, so daß bei steigendem Tidewasserstand die Sedimentationsfelder überflutet und bei fallenden Wasserständen wieder entwässert werden. In der Stillwasserzeit um die Kenterung der Tide nach Hochwasser lagern sich die Schweb- und Sinkstoffe am Boden ab (HINRICHS, 1931, S. 61 / ERCHINGER, 1976, S. 447 / KRAMER, 1990, S. 100 / MELFF, 1993, S. I-3, II-4 / DOCKHORN, o.Jg., S. 4). Aufgabe der senkrecht zum Deich verlaufenden Hauptlahnungen der Lahnungsfelder (im folgenden als Längslahnungen bezeichnet) ist es, die parallel zur Küste verlaufende Längsströmung zu unterbinden, während die Querlahnungen für eine Strömungs- und Seegangsberuhigung in den Lahnungsfeldern sorgen.

Bis Mitte des 20. Jahrhundert war das Ziel der „künstlichen Landgewinnung“, neue fruchtbare Flächen für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zu gewinnen (HINRICHS, 1931, S. 78ff / LORENZEN, 1938, S. 12ff / BOTHMANN, 1941, S. 317f / LORENZEN, 1955, S. 23 / LORENZEN, 1960, S. 9 / DIECKMANN, 1988, S.146). Erst seit rd. 30 Jahren ist es – abgesehen von der ökologischen Bedeutung – ausschließlich der Küstenschutz, der sich die positiven Eigenschaften des Vorlandes, d.h. die wellendämpfende und wellenbrechende Wirkung zum Nutzen macht (LORENZEN, 1939/40, S. 65 / ERCHINGER, 1971, S. 102 / MAFF, 1992, S. 2). Die 1967 von LÜDERS (in: KRAMER, 1990, S. 107) als „Vorwärts-Verteidigung“ bezeichnete Vorland-

¹¹ An der oldenburgischen Küste sind die Lahnungen meistens geschlossen (KRAMER, 1990, S. 103), so daß das Wasser nur über, bzw. je nach dem Grad der Porosität, durch die äußere, deichparallele Lahnung ein- und ausströmen kann.

bildung ist also eine aktive Küstenschutzmaßnahme¹², die als „Energiewandler-System“ den Angriffsbereich der wirkenden Kräfte weiter seewärts verschiebt (LORENZEN, 1955, S. 23 / SRU, 1980, S. 313 / DIECKMANN, 1988, S. 146 / KRAMER, 1990, S. 107).

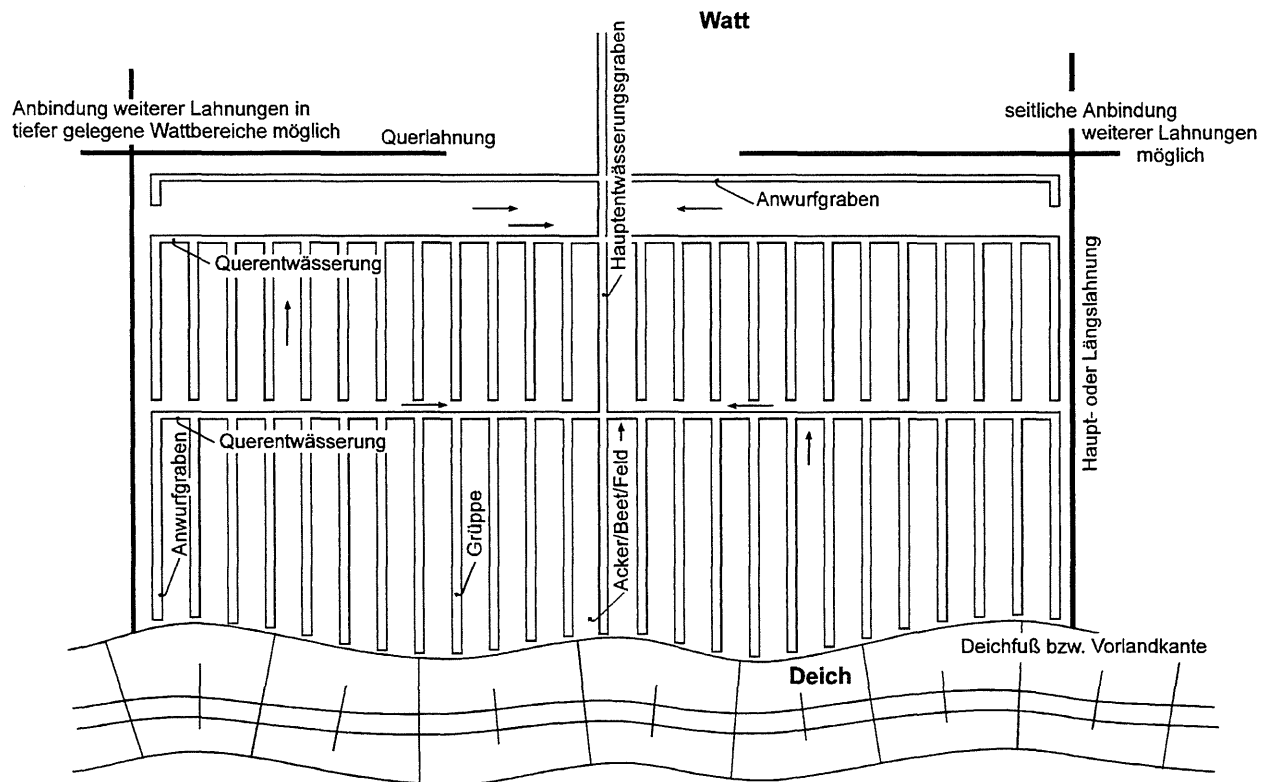


Abb. 3.4: Prinzipieller Aufbau eines Lahnungsfeldes mit Entwässerungssystem

Heute werden Lahnungen in der Regel als sogenannte Buschlahnungen ausgeführt, die aus zwei in den Wattboden gerammten Holzpfahlreihen mit versetzt angeordneten Pfählen bestehen. In den Zwischenraum der Pfahlreihen werden Faschinen gepackt und mit einem verzinkten Draht kreuzweise zwischen den Pfählen verschnürt (Abb. 3.5, vgl. Anl. A 3-2a). Die Lahnungen werden, insbesondere zum Schutz gegen Eisgang, mit Boden angeworfen. Üblicherweise liegt die Oberkante der Lahnungen auf Höhe des MThw oder $MThw + 30 \text{ cm}$. In Abhängigkeit von der Wathöhe (nach Möglichkeit nicht tiefer als $MThw - 0,70 \text{ m}$ bis $MThw - 0,80 \text{ m}$) wird in der Regel zunächst ein Lahnungsfeld vor dem Deich als Beruhigungszone errichtet, bevor mit fortschreitender Verlandung weitere Sedimentationsfelder angelegt werden.

¹² Definition aktiver / passiver Küstenschutz (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 3ff, 141f):
Ziel des aktiven Küstenschutzes ist es, den Wirkungsbereich der zerstörend wirkenden Kräfte von der Küste weg möglichst weit seewärts zu verlagern („Vorwärtsverteidigung“). Beim passiven Küstenschutz werden dagegen die Angriffskräfte der See durch unmittelbar an der zu schützenden Küstenstrecke errichtete Bauwerke aufgefangen und abgewehrt.

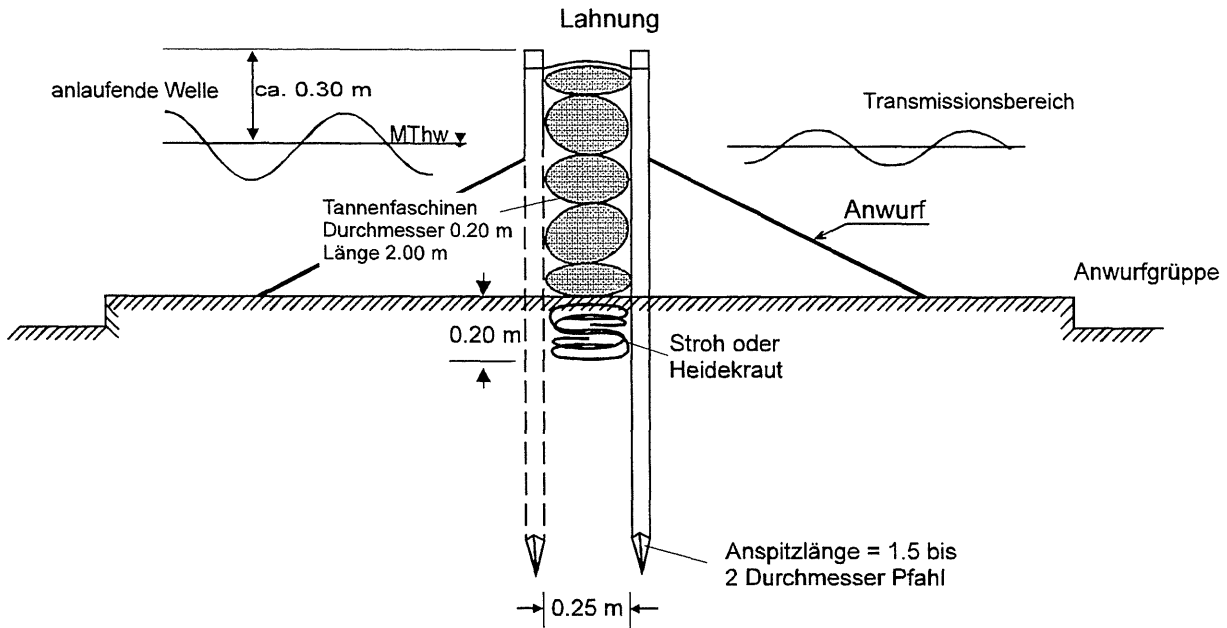


Abb. 3.5: Aufbau und Abmessungen einer im nördlichen Teil Schleswig-Holsteins typischen Buschlahnung

Eine beachtliche Vielfalt kennzeichnet die Lahnungsbauweisen an der ostfriesischen Küste (Taf. 3.3). Dort sind, anders als die zuvor beschriebenen Buschlahnungen in Schleswig-Holstein, die Lahnungen nahezu dicht, d.h. sie werden vom Seewasser nicht durchströmt, und sogar schwere, buhnenartige Konstruktionen wurden eingesetzt (vgl. Anl. A 3-2a). Innovative, von der Tradition gelöste Baukonzepte entstanden überwiegend in den sechziger und siebziger Jahren. Mit dem Ziel, effektivere Bauformen zu etablieren sowie den Arbeits- und Unterhaltungsaufwand zu minimieren, wurden vermehrt auch Kunststoffe im Lahnungsbau eingesetzt (FIEGE ET AL., 1996, S. 233ff).

LEICHTE LAHNUNGEN	<ul style="list-style-type: none"> • Buschlahnungen • Lahnungen mit geschlitzter oder gelochter Kunststoffplatte
NIEDRIGE, SCHWERE LAHNUNGEN	<ul style="list-style-type: none"> • Beton-Fertigteillahnung • Schlauchlahnung
HOHE, SCHWERE LAHNUNGEN	<ul style="list-style-type: none"> • Steindamm aus Natursteinen, ältere Bauweise • Steindamm aus Natursteinen, neuere Bauweise • Schwere Lahnung mit Betonsteinbedeckung • Schwere Lahnung mit Beton- oder Schüttsteinbedeckung und einem Kern aus Hüttenrückständen • Schwere Beton-Fertigteillahnung mit Schüttsteinvorlage • Schüttsteindamm ohne Kern auf breiter Filtermatte

Taf. 3.3: Systematisierung der Lahnungsbauweisen in Ostfriesland
(nach: ERCHINGER, 1976, S. 450ff)

Westlich der Weser, entlang der Küste Butjadingens, sind neben der Buschlahnung seit fast vierzig Jahren primär zwei schwere Lahnungstypen in Steinbauweise gebräuchlich: eine in geböschter Form und eine kastenförmige.

Im Land Wursten sind nördlich von Bremerhaven überwiegend leichte Buschlahnungen üblich, während südlich von Cuxhaven-Duhnen vorwiegend schwere Lahnungen, Erd- und Grasdämme zu finden sind (KRAMER, 1960, S. 303f).

Hat das Vorland eine gewisse Höhe (rd. MThw - 0,50 m bis MThw - 0,30 m) erreicht und sich infolge der Aufschlickung ein Gefälle zum Außenwatt eingestellt, wird traditionellerweise zur Entwässerung ein künstliches Grabensystem (vgl. Abb. 3.4), bestehend aus Hauptentwässerungsgraben, Querentwässerungsgräben, mitunter Ableitern und kleinen Gräben in das Vorland gezogen (BOTHMANN, 1941, S. 380 / ERCHINGER, 1982, S. 700f). Diese kleinen Gräben werden an der schleswig-holsteinischen Küste als „Gruppen“ bzw. „Grüppel“, in Niedersachsen häufig als „Schlöte“ bezeichnet.

Um die Räumkraft der Gruppen zu gewährleisten wird in regional unterschiedlichen Intervallen der Boden erneut ausgehoben; es wird gegrüppt. Traditionell wird der Aushub aus den Gruppen auf die Mitte des sogenannten Ackers (auch: Beete oder Felder) plaziert, so daß ein gleichmäßig hoher Wall entsteht. Der Aushubwall kann während der Tiden überflutet werden, wird jedoch im wesentlichen nicht abgetragen werden, so daß von einer – zumindest tendenziell – beschleunigten Aufhöhung der Vorlandbereiche ausgegangen wird (z.B. KAMBECK, 1980, S. 14 / ERCHINGER ET AL., 1994, S. 34). Ursprünglich wurde die Begrüppung nur von Hand vorgenommen. Seit etwa 1950 werden zudem Spezialgeräte wie Gruppenbagger und FräBrad eingesetzt.

Um eine schnellere Aufschlickung zu erzielen, wurde mit Beginn der dreißiger Jahre die natürliche Entwicklung der Vegetation beschleunigt, indem Queller- und Schlickgraspflanzen ausgesät wurden. Eigens für die Quellerpflanzungen wurde in den 40er Jahren sogar ein spezieller, von zwei Personen zu bedienender Watt-Drillschlitten entwickelt, der in den fünfziger Jahren im Rahmen von Neulandgewinnungsmaßnahmen (Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog) noch eingesetzt wurde.

Auf eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung und des derzeitigen Einsatzes von Lahnungsbauwerken in den benachbarten Ländern Dänemark, den Niederlanden und Groß-

Britannien wurde an dieser Stelle verzichtet¹³. Anlage A 3-2b gibt einen Überblick über die heute üblichen bzw. zuletzt angewandten Methoden der Vorlandbildung in Dänemark, den Niederlanden und Groß-Britannien.

Abschließend ist anzumerken, daß die historische Entwicklung der Arbeiten zur Vorlandbildung (Anl. A 3-1), die Ausführung der Lahnungsarbeiten und Gröppenprofile (Anl. A 3-2a) als auch die Begrüppungsmethoden, -maschinen und Gröppfrequenzen (s. z.B. FIEGE ET AL., 1996, S. 315ff) entlang der deutschen Nordseeküste regional sehr unterschiedlich sind, weshalb sich bislang im ingenieurtechnischen Sinne keine standardisierten Bemessungsgrößen bzw. Empfehlungen ableiten lassen.

3.3 Morphologie und Sedimentologie des Vorlandes

„Die geomorphologische Behandlung der küstennahen Wattengebiete und Vorländer ist sehr schwierig, da sich hier maritime, terrestrische und anthropogene Einflüsse überlagern (KÖSTER, 1981). Die Entwicklung dieser Gebiete ist außerdem örtlich und zeitlich sehr unterschiedlich verlaufen“ (DIECKMANN, 1985, S. 320).

Die Inselgruppen an der Ost- und Nordfriesischen Küste halten den Seegang von der hinter ihnen liegenden Festlandsküste fern. Die an der schleswig-holsteinischen Westküste zu den Inseln und Halligen führenden Verbindungsdämme, als künstliche Wattwasserscheiden wirkenden Verbindungsdämme erhöhen zusätzlich die Schutzwirkung. Demnach ist dort die natürliche Tendenz des Absetzens von Sedimenten positiv (HEISER, 1933, S. 189). Dieser Effekt wird besonders an den hohen, sturmflutfreien Dämmen wie dem Hindenburg- und Nordstrander Damm deutlich. DIJKEMA ET AL. (1990a, S. 138f) schreiben dem Schutz durch Barriere-Inseln aber auch eine negative Wirkung zu: Der Schwebstoffgehalt des Wassers ist auf der Rückseite der Inseln geringer als im Bereich ungeschützter Watten.

Der relative Einfluß der täglichen Tiden gegenüber den eher seltener eintretenden Sturmfluten auf die vorlandbildenden Prozesse ist derzeit noch nicht quantifizierbar. Sicher ist jedoch, daß für die morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld weniger extreme Ereignisse als das tägliche Tide- und Seegangsgeschehen maßgebend sind, obwohl augenfällige Schäden meist durch Sturmbedingungen in Verbindung mit extremen Wasserständen hervorgerufen werden

¹³ Eine umfassende Übersicht der Entwicklung und der Ausführungsvarianten von Lahnungsbauwerken und der zugehörigen Entwässerungssysteme in Deutschland, Dänemark, den Niederlanden und Großbritannien ist in FIEGE ET AL.: Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und Entwässerungssysteme, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Hannover, 1996, S. 209-353 zu finden.

(EAK, 1993, S. 95). So wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Erosionsfestigkeit von Hellern" für den Fall, daß die Hochwasserlinie häufig im Bereich der Hellerkante lag, eine besonders starke Erosion des Vorlandes festgestellt, während die Wirkung einer schweren Sturmflut mit hohem Wasserstand über dem Heller weniger den Bestand der Salzwiesen gefährdet (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 110). Untersuchungen im Seewasserversuchskanal Neßmersiel im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Erosionsfestigkeit von Hellern" ergaben, daß die Helleroberfläche selbst bei extremen Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 4,5 m/s keine nennenswerten Schäden aufweist.

Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft den Verlandungsfortschritt in den Lahnungsfeldern am Neßmerheller. Gerade in der Phase winterlicher Sturmtiden (Oktober 1991 bis April 1992), verbunden mit einem großen Sedimentangebot, fand auch eine beschleunigte Verlandung statt. Während der ruhigen Sommermonate konsolidiert der frisch abgelagerte, sehr wasserhaltige Schlick, und das Wattniveau stagniert oder verringert sich.

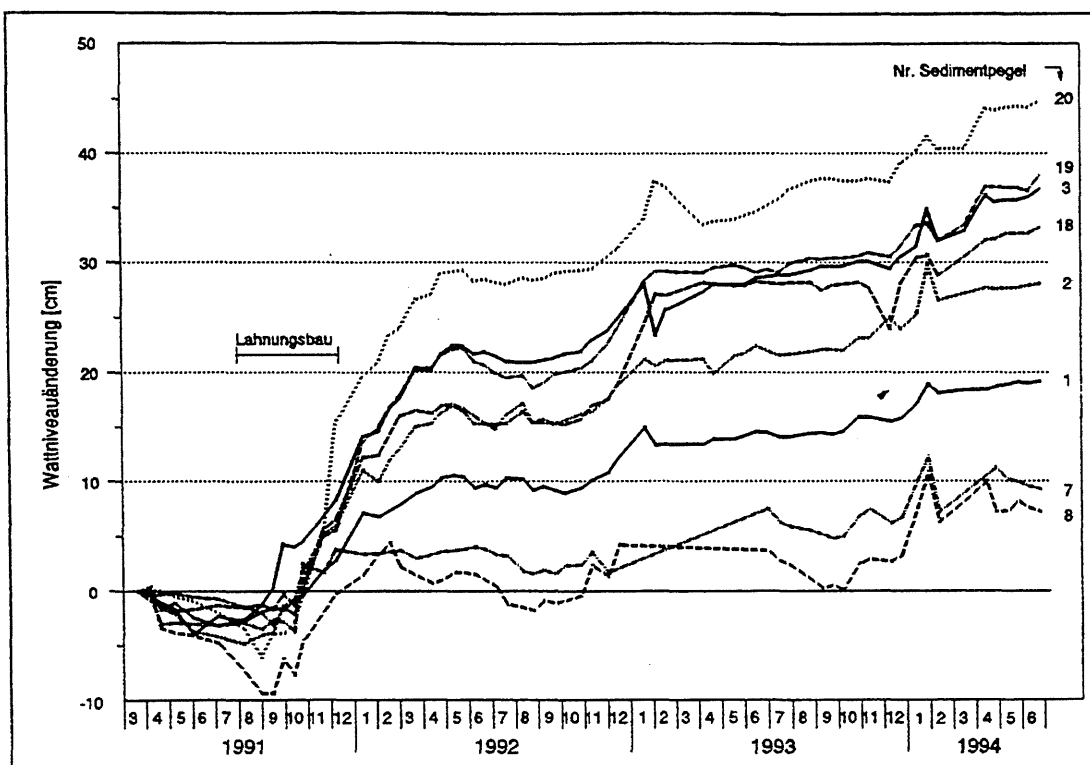


Abb. 3.6: Die Entwicklung des Wattniveaus in Lahnungsfeldern am Neßmerheller (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 40)

Für ausgewählte Vorlanduntersuchungsgebiete an der deutschen Nordseeküste wurden von OSTERTHUN (z.B. 1993b) u.a. Profile vertikaler Sedimentationen ermittelt. Die sehr differenten Profile zeigen, daß im hohen Watt¹⁴ Akkumulationsraten von bis zu 0,20 m/a auftreten können, die jedoch in den nachfolgenden Jahren durch geringere Sedimentationsraten oder Erosionen wieder ausgeglichen werden. „Langfristig stellen sich Akkumulationsraten mit normaler stetiger Abnahme über die Untersuchungsgebietstiefe ein, so daß ein gleichmäßiger Gesamtveränderungsprozeß entsteht (Abb. 3.7). Die Größe der Akkumulations- oder Erosionsraten ist von der vorhandenen Gelängeneigung abhängig. Zwischen $MT_{1/2w}$ und M_{Thw} bleibt in Abhängigkeit von der während des Entwicklungsprozesses erreichten Geländehöhe die im Untersuchungsgebiet für diese Höhe typische Geländeneigung langfristig erhalten (Taf. 3.4), so daß es zu einer quasi Parallelverschiebung des mittleren Geländeprofiles kommt“ (OSTERTHUN, 1993a, S. 58f). Am Übergang vom Vorland zum hohen Watt stellt sich ein Gefällewechsel ein, der durch abnehmende Akkumulationsraten oberhalb des M_{Thw} infolge geringerer Überflutungshäufigkeiten bei zunehmender Geländehöhe bedingt ist. Die landseitige Vorlandhöhe überschreitet bei Tidehuben $> 3,00$ m eine Grenzhöhe von $M_{Thw} + 0,54$ m nicht (OSTERTHUN, 1993a, S. 59). Daher verflacht das mittlere Profil im Vorlandbereich.

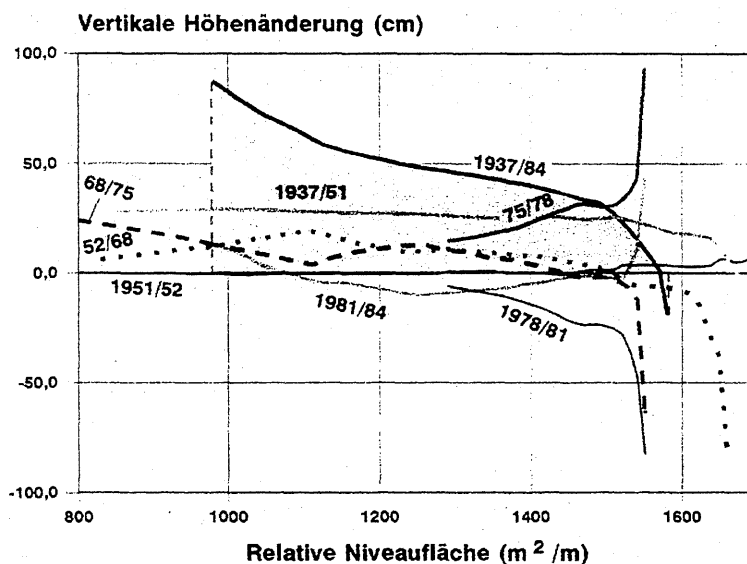
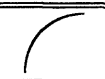
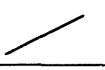

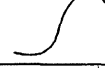



Abb. 3.7: Profile absoluter vertikaler Sedimentationen im Untersuchungsgebiet "Diecksand-Fischersiedlung" bezogen auf NN (Gesamtzeitraum schraffiert), Vermessungsjahrgänge 1937, 1951, 1952, 1968, 1975, 1978, 1981, 1984 (OSTERTHUN, 1993b, S. 209)

¹⁴ hohes Watt = Bereich unterhalb $M_{Thw} - 0,60$ m (HOFSTEDE, 1996, S. 59)

Typ	Form	Tidehub [m]		Akkumulationsraten bzw. -verlauf zwischen MThw und MT1/2w	Stabilität
		min	max		
1		2,30	3,30	im landnahen Bereich überwiegend gleichmäßig und positiv	stabilster und häufigster Formtyp
2		2,13	3,40	unregelmäßig, nur bei kleinem Tidehub gleichmäßig	im unteren High-Mesotidal-Bereich stabil
3		3,15	3,30	unregelmäßig, teilweise sehr hoch, bereichsweise wechselnd	nicht sehr stabil
4		2,80	3,55	unregelmäßig über die Vorlandtiefe	häufig nur Zwischenstadium in der Entwicklung, selten stabil
5		3,40		stark wechselnd zwischen Erosionen und Akkumulationen	tritt nur als Zwischenstadium in der Entwicklung auf

Taf. 3.4: Klassifizierung des hohen Watts oberhalb MT1/2w
 (nach: OSTERTHUN/PARTENSCKY, 1991b, S. 1108)

Kennzeichnend für die Watten ist das geringe, oftmals weniger als 1‰ betragende Gefälle und das ausgedehnte, verzweigte Prielsystem. Die Priele, die auch zur Tideniedrigwasserzeit noch mit natürlichem Gefälle Wasser führen, werden durch das bei Ebbstrom aus ihren Watteinzugsgebieten ablaufende Wasser gestaltet und unterliegen damit einem ständigen Wandel. Nach LÜDERS/LUCK (1976, S. 148) ist das Profil des Priels vom anstehenden Wattboden abhängig: Im Schlickwatt schneiden die Priele tief in das Watt ein, während sich im Sandwatt flache und breite Gerinne ausbilden. Die Priele münden in Baljen oder Wattströme, die an die offene See angeschlossen sind. Das bei Flut von See kommende Wasser benutzt bei seinem Vordringen in das Wattgebiet zunächst die Prielbetten, im weiteren Verlauf der Flut tritt es über die Prielränder und überströmt dann die Wattflächen. Dieser Füllvorgang eines Wattgebietes wird an der Form der Tidekurve mit zunächst steilerem und später flacherem Anstieg sichtbar.

Der Boden des Wattenmeeres besteht hauptsächlich aus Sand und Ton, wobei der Sand den weitaus größten Anteil an der Gesamtmenge hat. Der Tonanteil tritt selten in reiner Form als Schlickwatt auf, sondern ist oft mit Sand vermischt im sandigen Schlickwatt oder im Mischwatt vorzufinden. Im allgemeinen ist die Wattoberfläche in Küstennähe am schlickigsten und wird weiter seewärts zunehmend sandiger. Sandwatten und Strände befinden sich „in Gebieten mit starker Wasserbewegung, wo nur grobkörnige Partikel zur Ablagerung kommen. Das feinere Material (Schlick) kann erst dort abgelagert werden, wo die Bewegungsenergie des Wassers geringer wird“ (LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 15). Die Übergänge zwischen den drei Wattarten sind fließend. MÜLLER (1960, S. 141f) definiert die Wattarten anhand der Korngrößenverteilung (Taf. 3.5). Die Einteilung der Kornfraktionen in drei Klassen (< 20 µm, 20 µm bis 100 µm und > 100 µm)

stützt sich auf Untersuchungsergebnisse, nach denen die Anteile $< 20 \mu\text{m}$ und $> 100 \mu\text{m}$ sowohl für die Tierverbreitung als auch für die Zwecke der Vorlandbildung und für eine mögliche Nutzung am wichtigsten sind. Die physikalischen Faktoren wie Wassergehalt, Kohäsion, Adhäsion, Scherfestigkeit usw. hängen ebenso vorwiegend von den feinsten und größten Bestandteilen ab wie die zu berücksichtigenden Faktoren bei späterer landwirtschaftlicher Nutzung (Verschlammung, Tongehalt, Drainagefähigkeit etc.) und der Schwierigkeitsgrad der Bearbeitung während der Anlage von Lahnungsfeldern.

KORNGRÖSSE	SANDWATT	MISCHWATT (SCHLICKSANDWATT)	SCHLICKWATT
$> 100 \mu$	40% bis 100%	0% bis 60%	0% bis 40%
20 bis 100μ	0% bis 50%	25% bis 90%	15% bis 90%
$< 20 \mu$	0% bis 10%	0% bis 15%	10% bis 100%

Taf. 3.5: Einteilung der Wattarten nach den Korngrößenanteilen
(nach: MÜLLER, 1960, S. 141)

Die vorab beschriebenen Faktoren beeinflussen einerseits die Aufschlickung, andererseits die traditionelle Gestaltung der Lahnungsbauwerke. DIJKEMA ET AL. (1988, in: HOFSTEDÉ, 1992, S. 1) verweisen auf die negative Wirkung tiefer Wattströme oder Wattflächen nahe bzw. direkt vor den Anlandungsflächen. Der damit verbundene Energieeintrag läßt keine Beruhigung des Wassers zu (STEPHAN, 1985, S. 21ff), wodurch die Aufschlickung gemindert wird. Erkennbar wird dieser negative Effekt beispielsweise an den vom nördlichen Ausläufer der Süderauë beeinflussten Lahnungsfeldern bei Schlüttsiel und an der Wurster Küste, die auf Höhe des Capper Tiefs im Einflußbereich der nördlichen Arme der Robinsbalje liegt. Eine verstärkte Aufschlickung ist hingegen im Bereich von künstlichen und natürlichen Wattwasserscheiden wahrscheinlich (DIJKEMA ET AL., 1988, in: HOFSTEDÉ, 1992, S. 1). Die Wirkung der Dämme zu den Halligen und Inseln in Nordfriesland bestätigen dies. Im allgemeinen verringert sich mit ansteigendem Niveau der Wattfläche im Lahnungsfeld die Auflandungsgeschwindigkeit, weil die Überflutungshöhe und folglich auch das Tidevolumen stetig abnimmt (ERCHINGER, 1976, S. 450). Dadurch werden mit dem Flutstrom weniger Sinkstoffe antransportiert.

Die Wattart stellt in zweierlei Hinsicht Anforderungen an die Ausführung der Lahnungen und Lahnungsfelder. Bei der Buschlahnung müssen im Sandwatt die Pfähle tiefer eingeschlagen werden als im Schlickwatt (KRAMER, 1960, S. 306), die im fetten Kleiboden eingebundenen Pfähle zeigen, vor allem unter dynamischer Belastung, ein besseres Tragverhalten (HINRICHS,

1931, S. 68). Des weiteren besteht eine Beziehung zwischen den Feldgrößen und dem Untergrund. Nach Aussage des ALW HEIDE (1995, mdl.) verringern sich die Feldabmessungen mit der Zunahme des Sandanteils im Wattboden. Größere Wasserbewegungen innerhalb der Lahnungsfelder auf Sandwatten müssen angesichts des labileren Bodengefüges, welches auf die fehlenden bindigen Bestandteile zurückzuführen ist, vermieden werden (LAFRENZ, 1957, S. 98).

In den zurückliegenden Jahrhunderten konnten Watten und Salzwiesen dem Anstieg des Meeresspiegels in dynamischer Anpassung folgen und ein großskaliges morphodynamisches Gleichgewicht erhalten werden. Derzeit unterliegen weite Vorlandbereiche der Nordseeküste einer Abbruchtendenz. Pegelauswertungen an der ostfriesischen Festlandküste lassen vermuten, daß stärkere Abbrüche an den Vorlandkanten Ursache einer höheren Seegangbelastung infolge des angestiegenen MThw sind (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 3); ein Flächenverlust infolge des MThw-Anstiegs konnte jedoch bisher nicht festgestellt werden. Untersuchungen in den Niederlanden haben gezeigt, daß nahezu in allen Gebieten der Übergangszone (vgl. Abb. 2.4) die Akkumulationsrate während des letzten Jahrhunderts dem MThw-Anstieg nicht folgen konnte. Ob bei einem beschleunigten Ansteigen des relativen Meeresspiegels eine ausreichend schnelle Angleichung der Watt- und Salzwiesenhöhen eintritt und damit das morphodynamische Gleichgewicht erhalten werden kann, das hängt wesentlich von der Geschwindigkeit des Anstiegs und der Größe des Sedimentangebotes ab (DIECKMANN, 1990, S. 44ff / MISDORP ET AL., 1990, S. 126 / PARTENSKY ET AL., 1993a, S. 1.9 / NIEMEYER ET AL., 1995a, S. 66f).

Der Frage, wie angrenzende Wattgebiete auf veränderte Randbedingungen reagieren, wird derzeit u.a. im Rahmen des deutsch-niederländischen Verbund-Forschungsvorhabens „*Wadden Sea Morphological Development Due to an Accelerated Sea-Level Rise (WADE)*“ nachgegangen. Nach ersten Ergebnissen „ist davon auszugehen, daß mit einem erhöhten Sedimentbedarf eine größere Phasenverschiebung der morphologischen Anpassung gegenüber dem vorausseilenden Meeresspiegelanstieg verbunden sein wird“ (NIEMEYER ET AL., 1995a, S. 82f). Das Verhalten der Vorlandvegetation in Abhängigkeit von Vorlandbildungsmaßnahmen und einem Meeresspiegelanstieg wurden im Rahmen eines Naturmeßprogramms entlang der Niederländischen Wattenmeerküste von HOUWING ET AL. (1995) untersucht. Die Ergebnisse zeigten, daß die gezielte Anlage von Buschlahnungen prinzipiell als geeignete Maßnahme der Vorlandbildung unter Einbeziehung der positiven Eigenschaften der Salzwiesenvegetation anzusehen ist,

jedoch weitere Untersuchungen zur Optimierung der Bauwerke notwendig sind (HOUWING ET AL., 1995, S. 132ff).

3.4 Einfluß der Lahnungscharakteristika auf die Vorlandbildung

3.4.1 Allgemeines

Der Sedimentationsvorgang im Vorlandbereich ist nicht nur aufgrund hydrologischer und meteorologischer Einflüsse zeitlich, sondern auch örtlich verschieden. Die Charakteristika (Größe, Öffnungsweite etc.) der Lahnungsfelder sowie deren geographische Lage (sedimentologische und morphologische Randbedingungen) und die daraus resultierenden Stärke und Richtung des Seegangs sowie der Tideströmung beeinflussen den Sedimentations- bzw. Erosionsvorgang wesentlich.

Die für das jeweilige Küstengebiet am besten geeignete Bauweise der Lahnungen ist also, einmal abgesehen von traditionellen und regionalen Gewohnheiten, von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und muß an diese Bedingungen speziell angepaßt werden. Wichtige Kriterien für die Anordnung und Ausführung der Lahnungsbauwerke sind neben den Tide- und Seegangsverhältnissen (PRESS, 1962, S. 866) die Form und die geographische Ausrichtung der Küste, die die "Wirkung" der die Lage und Gestaltung der Lahnung bestimmenden Faktoren in ihrer Intensität beeinflussen. So werden die Dauer sowie die Häufigkeit der Überflutung von Lahnungsfeldern und die Form der Durch- bzw. Überstömung von Lahnungen maßgeblich von der Höhenlage des Watts und der Lahnungen, dem Verlauf der Tide und ihrer Fülligkeit in Abhängigkeit von Windstärke und Windrichtung beeinflusst.

In den Kapiteln 3.4.2 und 8 wird vertieft auf die Bedeutung der Lahnungsfeldgröße bezüglich Strömung und Seegang und die resultierenden Sedimentationsbedingungen eingegangen. Demnach werden sowohl die Anzahl der in Richtung See voreinandergereihten Felder als auch der seitliche Verbund mehrerer Felder längs eines Küstenabschnittes bedeutsam sein. Ebenso hat die Größe des Lahnungstores (Öffnungsweite) Einfluß auf die Erosions- und Sedimentationsverhältnisse innerhalb eines Lahnungsfeldes (vgl. Kap. 8).

3.4.2 Anordnung, Geometrie, Höhe und Durchlässigkeit der Lahnung

In einem Tidemodell des FRANZIUS-INSTITUTS (FAHSE, o.Jg. / ROSE, 1955 / ENGEL, 1963) wurde in den Jahren 1952 bis 1955 unter dem Titel „Modellversuch zur Landgewinnung“¹⁵ die Anordnung von Lahnungsbauwerken im Watt untersucht.

Die Versuchsanlage stellte ein kombiniertes Watt-Priel-System (Höhenmaßstab 1:50, Längenmaßstab 1:353), bestehend aus einem 54 m langen und 0,60 m breiten Priel, an dessen Ende sich seitlich eine 3,38 m x 8,67 m große Wattfläche anschloß, dar. Im Modell wurde u.a. der Tideverlauf in einem Priel mit zugehöriger Wattfläche untersucht.

Die Untersuchungen zeigten, daß bei mittleren Tiden der Priel (ohne angrenzende Wattfläche) auf seiner ganzen Länge zunächst von See her prielaufwärts, dann von Land her seewärts bis zur Höhe des mittleren Tidehochwassers verlandet. Die Sinkstoffablagerungen (Modellsinkstoff Vestyron/Polystyrol) im Priel verstärken im Verlauf der Verlandung die Asymmetrie der Tidekurve und die bereits vorhandene Verlandungstendenz. Während Springtiden verhält sich der Verlandungsvorgang ähnlich.

Durch den Anschluß der Wattfläche an den Priel wurden zwar die absoluten Strömungsgeschwindigkeiten vergrößert, die Tidebewegung erfuhr jedoch eine für die Verlandung des Watts ungünstige Verformung: Die Flutdauer verlängerte sich, die Ebbedauer wurde infolgedessen verkürzt. „Durch das verspätete Eintreten der Kenterung der Flut- und Ebbeströmungen fließen die Flutwassermengen bei höheren Wasserständen, die Ebbwassermengen bei niedrigeren Wasserständen durch die Meßstelle. Die Wassermengen finden also im Durchschnitt bei Flutstrom einen größeren, bei Ebbestrom einen kleineren Querschnitt vor. Die Flutstromgeschwindigkeiten werden also relativ wenig, die Ebbestromgeschwindigkeiten relativ stark vergrößert“ (ENGEL, 1963, S. 56).

Durch die Verkleinerung der Prielbreite auf 33% der Ausgangsgröße wurden die Strömungsgeschwindigkeiten, die Auflandungstendenz betreffend, derart ungünstig beeinflusst, daß „eine überwiegend wattwärts gerichtete Sinkstoffverfrachtung kaum noch stattfinden kann“ (ENGEL, 1963, S. 57). Da in diesem Fall die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten im wesentlichen ausgeglichen sind und daher auch mit einer daraus resultierenden ausgeglichenen Sinkstoffver-

¹⁵ Auftraggeber: MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN, Abteilung Wasserwirtschaft, Kiel

frachtung zu rechnen ist, kann ein relativ zur Wattfläche breiter Priel als vorteilhaft für den Verlandungsfortschritt bezeichnet werden.

Ein weitere Untersuchung mit fächerförmig angeordneten Sedimentationsfeldern zeigte keine günstigere Auflandung als in vergleichbaren rechteckigen Lahnungsfeldern (Abb. 3.8). Vergleichbare Erkenntnisse über die optimalen Abmessungen von Lahnungsfeldern liegen nicht vor (vgl. DIKEMA ET AL., 1990a, S. 133).

Im Rahmen des KFKI-Teilprojektes „Wattseegang“ (NIEMEYER ET AL., 1995b, S. 179) konnte belegt werden, daß bei erhöhten Wasserständen Wellenhöhen in einem Lahnungsfeld sowohl höher als auch niedriger als auf den vorgelagerten Wattflächen sein können. Ähnliche Beobachtungen werden von DIKEMA ET AL. (1990a, S. 136) beschrieben, die eine maximale Lahnungsfeldgröße von 200 m x 200 m zur Eingrenzung der Fetchlänge empfehlen, weil anderenfalls die durch das Lahnungsbauwerk gedämpften Wellen im Lahnungsfeld durch zu große Fetchlängen wieder angefacht werden können. Im ostfriesischen Wattenmeerraum wurden, basierend auf der gleichen Annahme, sogar 200 m x 200 m-Felder auf die Abmessungen 100 m x 100 m reduziert (STAIK, 1994, mdl.).

Die Höhe einer Lahnung ist in der Regel auf die Höhe des MThw bzw. $MThw + 0,30$ m festgelegt. Je nach Höhenlage der sie umgebenden Wattfläche wird das Bauwerk während einer Tide für begrenzte Dauer durchströmt und bei $Thw > MThw$ bzw. $MThw + 0,30$ m überströmt. Die in einigen Regionen übliche Fußdichtung der Buschlahnungen (vgl. Anl. A 3-3) bewirkt, daß das Flutwasser bis zur Höhe der Dichtung allein durch die Hauptentwässerungsgräben in das Lahnungsnetz einfließen und sich durch die Quergräben auf die Netzflächen verteilen kann. Das bedeutet eine verstärkte Strömung in den Gräben, die auch spezifisch schwere Sinkstoffe mit in die ufernahe Wattzone führen kann und die Gräben tief und rein hält. Beim weiteren Steigen der Flut werden die Buschlahnungen mitdurchströmt und nur die Sinkstoffe mitgeführt, die durch die hier etwas verminderte Stromgeschwindigkeit noch in der Schwebe gehalten werden können. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind also in und über den Hauptentwässerungsgräben größer als die allgemeine Wasserbewegung im Bereich der Lahnungen, die besonders durch die Querlahnungen gehemmt wird. Bei Ebbe findet durch die selben Gräben eine Entwässerung der Felder statt (LAFRENZ, 1957, S. 102 / SCHROEDER, 1968, S. 543 / STADELMANN, 1981, S. 51).

Auf den Einfluß der Lahnungshöhe auf die Wellendämpfung wird in den Kapiteln 6.6.7 und 7.2.3f näher eingegangen.

Abb. 3.8a:
 Watt ohne Lahnungsfelder;
 nach 90 und
 nach 500 Tiden
 (ENGEL, 1963, S. 62C, 62G)

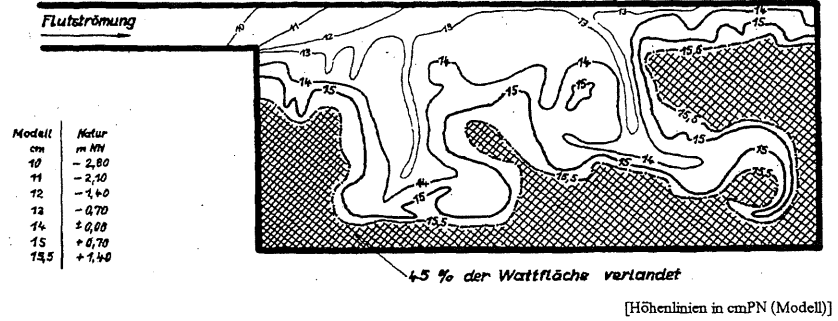
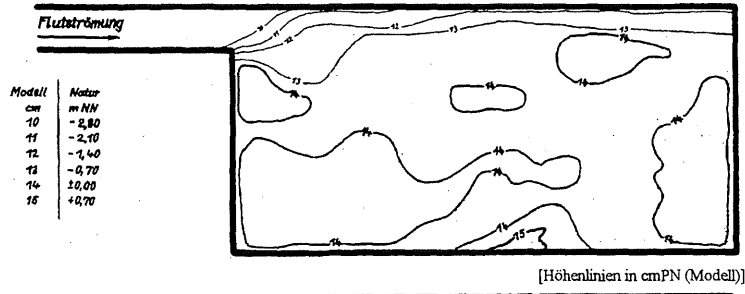


Abb. 3.8b:
 Rechteckige Anordnung der
 Sedimentationsfelder;
 nach 90 und
 nach 500 Tiden
 (ENGEL, 1963, S. 70C, 70F)

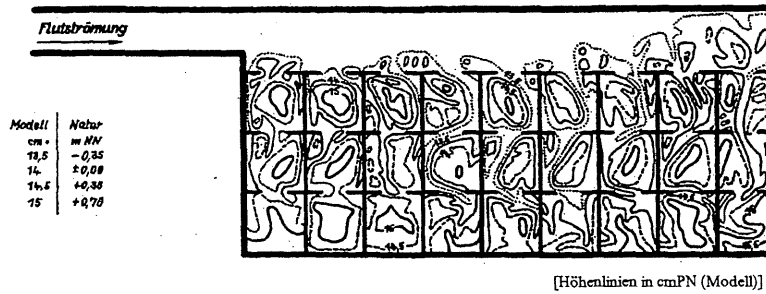
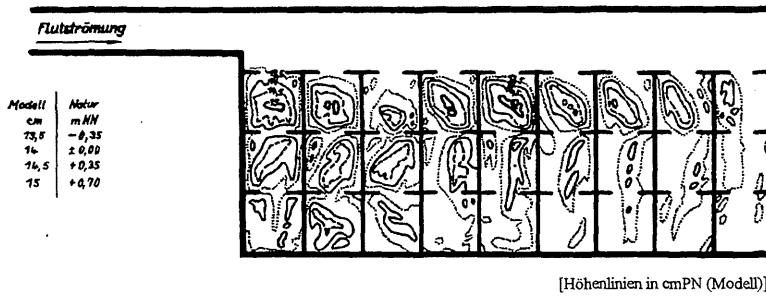


Abb. 3.8c:
 Fächerförmige Anordnung der
 Sedimentationsfelder;
 nach 90 und
 nach 500 Tiden
 (ENGEL, 1963, S. 75C, 75F)



Nicht nur von der Höhe der Lahnung, sondern auch von der Gestalt ihrer Seitenflächen ist der Grad der Wellenbewegung im Feld abhängig. Glatte, steile Seitenflächen verstärken durch ihr ungünstiges Reflexionsverhalten die Wellenunruhe, so daß der Sedimentationsprozeß behindert wird und die Aufschlickung der Felder langsamer voranschreitet. Deshalb konnten sich beispielsweise Kunststofflahnungen (vgl. Anl. A 3-1) nicht etablieren.

Die Durchlässigkeit eines Lahnungsbauwerkes, abhängig vom eingebauten Material (Faschinen, mit Spundwand gedichtete Faschinen etc.), von der zusätzlichen Verdichtung durch angeschwemmte organische und anorganische Materialien sowie dem seitlichen Anwurf aus den Grüppen, bestimmen die Geschwindigkeiten sowie den Grad der Wellendämpfung im Bereich einer Lahnung und damit die Transport- und Absetzvorgänge. Hierzu liegen bislang empirische Erfahrungen, jedoch keine wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse vor.

3.5 Biologische, chemische und physikalische Einflüsse aus Flora und Fauna

Für die chemischen und physikalischen Funktionen des Bodens ist die Korngrößenzusammensetzung des Bodens von entscheidender Bedeutung (HORN/ZHANG, 1995, S. 7). Die Pflanzen finden innerhalb von Lahnungsfeldern günstige Vegetationsbedingungen vor, weil eine möglichst geringe Strömung und die mit der Entwässerung intensivierete Bodenbelüftung Voraussetzung für ihr gutes Gedeihen ist. Sie sind in der Lage, den Auflandungsprozess ganz erheblich zu unterstützen. DIJKEMA ET AL. (1990c, in: HOFSTEDÉ, 1992, S. 4f) schreiben der Vegetation den größten Stellenwert bei der Aufschlickungsgeschwindigkeit zu. Wie Untersuchungen entlang der niederländischen Wattenmeerküste ergaben, verdoppelt sich mit der Entwicklung einer geschlossenen Pflanzendecke die Sedimentation.

Die Wurzeln der Pflanzen verringern die Lagerungsdichte des Bodens und fördern damit die vom Sauerstoffeintrag abhängige Pedogenese¹⁶, gleichzeitig vernetzen die Wurzeln das Erdreich („Bewehrte Erde“) und reduzieren hierdurch seine Erodierbarkeit (Abb. 3.9). Die oberirdischen Pflanzenteile schirmen ferner die strömungsinduzierten, hydrodynamischen Belastungen vom Untergrund ab, ihre Wirkung steigt dabei mit zunehmender Bewuchshöhe (vgl. KAMPS, 1962, S. 60). Die Pflanzen siedeln sich durch natürliche Aussamung oder verdriftete Rhizomteile¹⁷ selbsttätig an (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 78, 101, 114).

¹⁶ Pedogenese = Bodengenese; bodenbildende Prozesse, wie z.B. die Oxidation, die Entsalzung, die Umladung der Sorbenten, die Sackung oder die Gefügeausbildung (BURKHARDT, 1995, S. 92).

¹⁷ Rhizomteile = Pflanzenteile

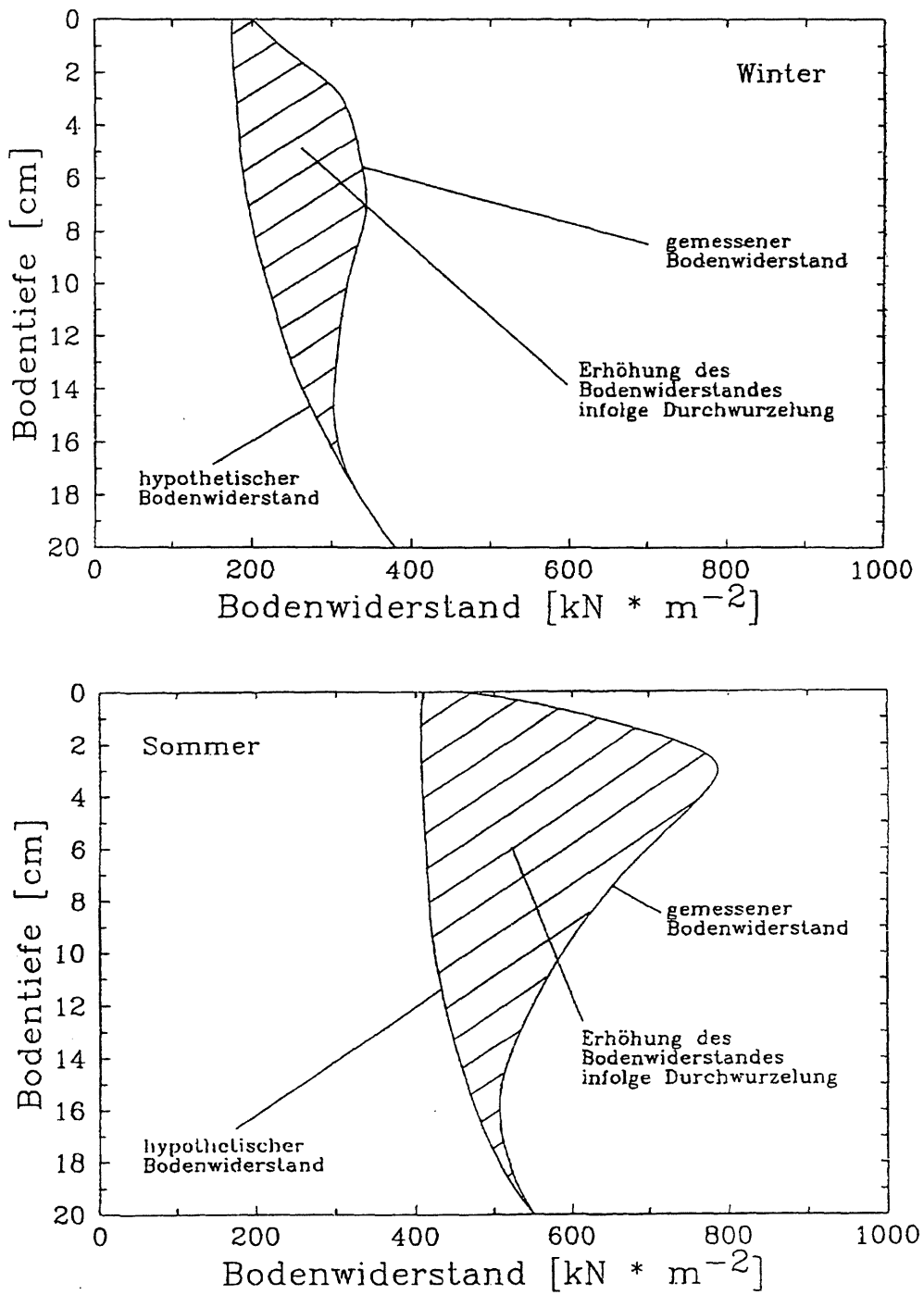


Abb. 3.9: Zunahme des Bodenwiderstandes mit der Durchwurzelung
im Winter- und Sommerhalbjahr
(ERCHINGER ET AL., 1994, S. 96f)

Die Wattbodenfläche, die sich im Verlauf des Auflandungsvorgangs innerhalb der Lahnungsfelder allmählich erhöht, durchläuft in Abhängigkeit von ihrer Höhenlage und damit von der Dauer und Frequenz ihrer tidebedingten Überflutung sowie dem Salzgehalt und der Durchlüftung des Bodens verschiedene Stadien der Vegetationsbesiedlung. Es tritt also eine gesetzmäßige Zonierung und Sukzession von Pflanzengesellschaften auf (DIJKEMA ET AL. 1990b, S. 176, S. 179ff / DOCKHORN, o.Jg., S. 1 / vgl. Kap. 3.1).

Die Überflutungshäufigkeit und die Verweildauer beeinflussen den Sedimenteintrag sowie die botanischen und pedogenen Kenngrößen. Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ konnten in Abhängigkeit von Geländehöhe und Umfang der Begrüpfung variierende Überflutungszeiten festgestellt werden. So kommt es auf den unbegrüpften Salzwiesen zu einem leicht verzögerten Zufluß, und insbesondere zu einem langsamen Rückgang des Wasserstandes, der die Verweildauer im Vergleich zu begrüpften Flächen erheblich verlängert. Nach COLDEWEY/ERCHINGER (1992, S. 185f) setzt im Sommer ein Höhenverlust durch Schrumpfung und Kompaktion des Bodens ein (vgl. Abb. 4.31).

Die Wasserbedeckungszeit des Bodens ist maßgeblich für Flora und Fauna der Grabensysteme. Die Tockenfallzeit der Bodenzone darf 95% der Gesamttidezeit nicht überschreiten, wenn Wattleben in den Prielen bzw. künstlich angelegten Gräben noch möglich sein soll (THAMDRUP, 1935, in: BLINDOW, 1987, S. 2). Mäandrierende Priele beruhigen während des Einströmvorganges das Wasser. Infolgedessen bestehen die Ablagerungen zu 90% bis 98% aus Ton und Schluff, während in begrüpften Gräben sich mehr Feinsandanteile infolge der größeren Wasserbewegung ablagern. Die Ton- und Schluffanteile betragen in regelmäßig begrüpften und beweideten Salzwiesen 53% bis 63% (BLINDOW, 1987, S. 22).

Ein hoher Ton- und Schluffanteil verursacht eine schlechte Wasserführung und Durchlüftung, schafft dagegen ein hohes Wasserhalte- und Absorptionsvermögen mit hohem Nährstoffgehalt und schlechter Durchwurzelbarkeit. Das Wasserpotential ist größer als beim Sandschlickwatt und ermöglicht damit eine höhere Feuchtigkeit. Durch Begrüpfung und Beweidung entstehen flachere V-förmige Grabenquerschnitte, die hinsichtlich Boden- und Lufttemperatur bei sonnigem Wetter und auch bei Kälte größere Differenzen als die U-förmigen Priele aufweisen. In letzteren wird die Erwärmung in der Bodensohlen- und Kleizone besser gehalten, da die Auskühlung wegen der Verdunstungskälte zum Uferrand hin zunimmt. Wegen der Verdunstung besteht in den Gräben und Prielen ein Salinitätsgefälle vom Deich zur Abbruchkante. Während der durchschnittliche Salzgehalt bei den beweideten und begrüpften Gräben der Vorlandweiden 29‰ bis 35‰ beträgt, werden in den U-förmigen, natürlichen Entwässerungsprielen 22‰ bis 31‰ gemessen wurden (HOFFMANN, 1984, in: BLINDOW, 1987, S. 22).

Die Erosionsstabilität der im Wattenmeer auftretenden Sedimente ist nicht nur durch deren physikalischen Parameter wie Korngröße und Kornverteilung bestimmt (Abb. 3.10). Eine ausgeprägte, wenn auch nicht immer sichtbare Besiedlung der Sohle durch Fauna und Flora beeinflusst die Erosionsstabilität der Sedimente maßgeblich. Durch eine Besiedlung von sowohl Ein- als auch Mehrzellern mit zum Teil großen Individuendichten und Artenvielfalten, liegt die Bio-produktion von Watten an der Spitze aller bekannten Lebensbereiche. MANZENRIEDER (1983, S. 139) bezeichnet dabei den Einfluß biologischer Komponenten im Vergleich zu sterilen Böden als biologische Stabilisierung, die sich unter anderem in Form einer Erhöhung der kritischen Schubspannung darstellt.

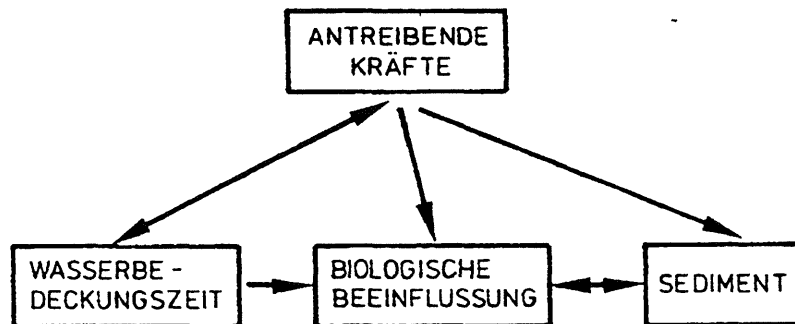


Abb. 3.10: Einflußfaktoren auf die Wattstruktur
(MANZENRIEDER, 1983, S. 142)

Mikroorganismen scheiden adhäsive Sekrete oder Fäden aus, mit denen sie Hohlräume zwischen den Sedimenten ausfüllen und diese zusätzlich binden. In diesen klebenden Substanzen verfängt sich weiteres Sediment, welches als Fracht organisches Material mitbringt. In Form von organischem Kohlenstoff dient dieses den Mikroorganismen als Nahrungsgrundlage. Eine weitere wichtige Rolle spielen Bodenorganismen in bezug auf den chemischen Haushalt der Sohle. Sie beeinflussen durch ihre Aktivitäten z.B. den pH-Wert oder die chemische Zusammensetzung des Porenwassers.

Nach MANZENRIEDER (1983, S. 147f) sind insbesondere die Bodenorganismen für die biogene Stabilität im Korngerüst von Bedeutung, die ihren ortsgebundenen Lebensraum durch Wohnbauten sichern (sessile Arten). Dabei kann zwischen Wohngängen und Wohnröhren unterschieden werden (Abb. 3.11). Wohngänge entstehen, indem der Gangbewohner das zu verdrängende Sediment an die Gangwand preßt und dieses dann durch Sekret verkittet. Hierbei können sowohl einfache Schächte, als auch komplizierte Gangsysteme entstehen. Wohngänge werden zum Beispiel von Makroorganismen wie dem Pierwurm (*Arenicola marina*), dem Watt-ringelwurm (*Nereis diversicolor*) und dem Schlickkrebs (*Corophium volutator*) gebaut.

Im Gegensatz zu Wohngängen sind die Wandungen von Wohnröhren zusätzlich zum Schleim mit ausgewählten Kornfraktionen ausgekleidet, wodurch die Festigkeit vergrößert wird. Durch

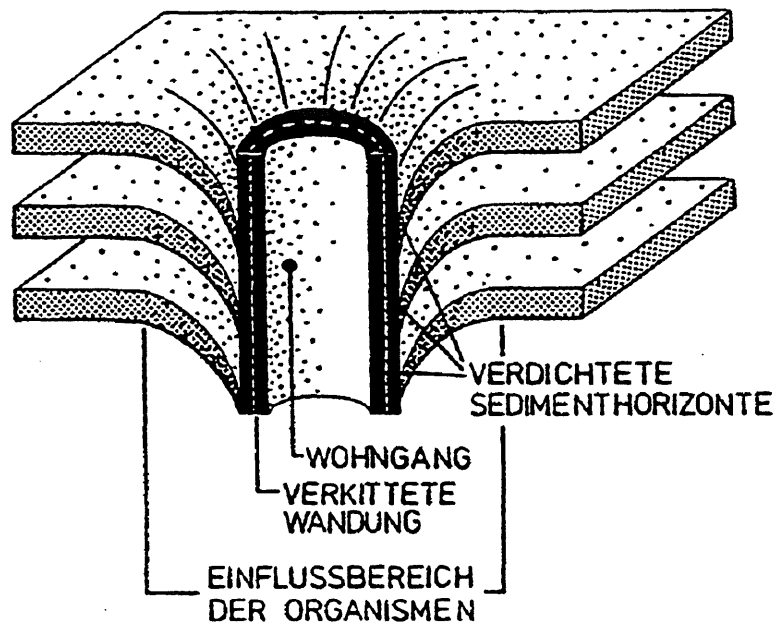


Abb. 3.11: Schematische Darstellung eines Wohnganges
(nach: REINECK/SINGH, 1975, in: MANZENRIEDER, 1983, S. 147)

diese Bauweise können die Bewohner ihre Wohnbauten auch oberhalb der Sedimentoberfläche erweitern. Stabile Wohnröhren entstehen unter anderem durch den Bäumchenröhrenwurm (*Lanice conchilega*) und den Röhrenwurm (*Pygospio elegans*).

Je nach der Beeinflussung der Bodenstruktur durch die Fauna (und auch die Flora) in Wattböden unterscheiden MANZENRIEDER (1983, S. 149) bzw. THIEL ET AL. (1984, S. 261) die folgenden Prozesse:

– Sedimentbildung

Im freien Wasser nehmen Tiere, sogenannte Filtrierer, Schwebstoffe auf, verändern ihre Größe und mineralogische Zusammensetzung durch Zermahlen und Verdauen, um sie dann durch Ausscheiden in Form von Kügelchen (Faeces, Pseudofaeces), die evtl. durch Sekrete verbunden sind, zur Ablagerung zu bringen. Es wird neues Sediment gebildet.

– Sedimentumbildung / Bioturbation

Die Bioturbation erfolgt ähnlich wie die Sedimentbildung durch Wurmarten, die während der Nahrungssuche Bodenpartikel aufnehmen, diesen die Nährstoffe entziehen und dann verschleimt sowie verdichtet ausscheiden. Im Vergleich zu den einzelnen Partikeln erhöht sich durch die größere Masse der Ansammlungen die kritische Schubgeschwindigkeit, die für einen Transport erforderlich ist.

– Sedimentbindung / Biodeposition

Eine Biodeposition wird sowohl von pflanzlichen als auch tierischen Bewohnern bewirkt. Algen und Bakterien oder auch größere Lebewesen wie Schnecken sondern Sekrete ab, welche die Sedimentoberfläche bei ausreichend großen Populationen ähnlich einem Verguß schließen und damit zu einer flächigen Verklebung führen, die als Algen- oder mikrobielle Matten bezeichnet werden. Kieselalgen (Bacillariophyceae) bilden z.B. eine hautartige Abdeckung, welche speziell als Diatomeenrasen bezeichnet wird. Eine Sonderstellung nehmen die Cyanobakterien ein. Aufgrund einer hohen Widerstandsfähigkeit können sie sich auch extremen Umweltbedingungen anpassen. Sie bilden bei großen Populationen mattenartige Verflechtungen, die sowohl an der Wattoberfläche (epibenthische Matten) oder im Korngerüst (endobenthische Matten) vorzufinden sind. In diesen Bereichen werden organische und anorganische Schwebstoffe eingefangen, welche den Mikroorganismen wiederum als Nahrung dienen. Durch diese Vorgänge wird zusätzliches Sediment an der Sohle gebunden. Sediment kann ebenso durch das Wurzelwerk salzresistenter Pflanzen wie Queller, Schlickgras oder Andel erfolgen (vgl. Kap. 3.1).

– Sedimentverfestigung / Biostabilisation

Die Biostabilisation erfolgt hauptsächlich durch die o.g. Wohngänge und -röhren. Letztere behalten auch nach Verlassen durch die Bewohner ihre Stabilität. Einige wohnröhrenbauende Wattbewohner sind dabei in der Lage, auch hohen Sedimentationsraten zu folgen, indem sie eine Öffnung an der Sedimentoberfläche erhalten. Die Verfestigung erfolgt dann nahezu parallel zur Sedimentation.

Die biologische Stabilisierung wird qualitativ durch die Lage, bezogen auf die Wasserbedeckungszeit und auf die Sedimentoberfläche unterschieden. Der Zeitraum höchster biologischer Aktivität und der damit verbundenen Verfestigung der Sedimente fällt nicht mit dem Zeitraum der größten mechanischen Belastung zusammen; es entsteht eine aus ingenieurtechnischer Sicht ungünstige Phasenverschiebung (MANZENRIEDER, 1983, S. 184 / Abb. 3.12).

Angaben über die Größe der biologischen Verfestigung liegen in der Literatur nur in geringer Zahl vor. Messungen des Erosionsbeginns auf biologisch verfestigten Wattböden finden sich bei FÜHRBÖTER (1983, S. 83ff) und MANZENRIEDER (1983, S. 157ff). Im Wattgebiet der Inseln Alte Mellum und Norderney wurde die kritische Strömungsgeschwindigkeit in jeweils drei Meßzeiträumen zwischen Tidehoch- und Tideniedrigwasser ermittelt und mit der eines sterilen Sedimentes verglichen.

FÜHRBÖTER (1983, S. 108) führt den sogenannten biologischen Stabilisierungsfaktor S_B ein:

$$S_B = \frac{V_{\text{krit (biologisch)}}}{V_{\text{krit (steril)}}} \quad (3-1)$$

Mit:

S_B biologischer Stabilisierungsfaktor [-]

$V_{krit} (biologisch)$ Strömungsgeschwindigkeit über einem natürlichen Wattboden, wenn nach dem anfänglichen Transport einiger Körner eine großflächige Erosion einsetzt [m/s]

$V_{krit} (steril)$ Strömungsgeschwindigkeit über einem sterilen Boden im Labor, wenn nach dem anfänglichen Transport einiger Körner eine großflächige Erosion einsetzt [m/s]

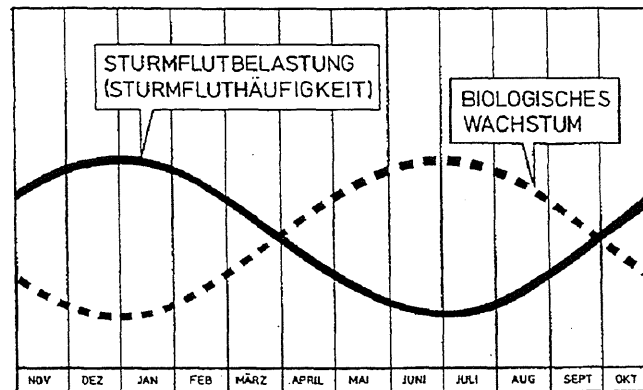


Abb. 3.12: Biologisches Wachstum und Sturmflutbelastung
(nach: MANZENRIEDER, 1983, S. 184)

Die ermittelten Stabilisierungsfaktoren bewegen sich je nach Standort zwischen 1,0 und 8,7. Für $S_B > 1$ liegt eine biologische Stabilisierung, für $S_B < 1$ eine biologische Lockerung vor. Letztere ist dabei die Ausnahme.

Laborversuche, in denen Wohnröhren durch elastische Schnüre simuliert wurden, zeigen, daß der Wohnröhrenabstand einen wesentlichen Einfluß auf die Oberflächenstabilität hat. Die kritische Geschwindigkeit bei der ein Erosionsbeginn zu verzeichnen ist, wird mit $V_{krit} (mech)$ bezeichnet, da den Wohnröhren eine biologisch-mechanische Wirkung zuzuschreiben ist. Abbildung 3.13 zeigt, daß ein Vorhandensein von Wohnröhren nicht grundsätzlich zu einer Stabilisierung der Sedimentoberfläche führt. Während eine dichtbesiedelte Wohnröhrenkolonie (40.000 Wohnröhren/m²) eine deutliche Stabilisierung durch Sedimentbindung bewirkt, also $V_{krit} (mech) > V_{krit} (steril)$, ist im Fall einer dünnen Besiedlung (4.444 Wohnröhren/m²) eine biologische Lockerung zu verzeichnen ($S_B < 1$).

Ähnliche Ergebnisse sind bei FAGER¹⁸ (1964, in: MONTAGUE, 1986, S. 253, 263) zu finden. Unter Laborbedingungen wurde hier eine Grenze von 14.500 Wohnröhren/m² festgelegt, bei der eine stabilisierende Wirkung auf die Sedimentoberfläche zu verzeichnen ist.

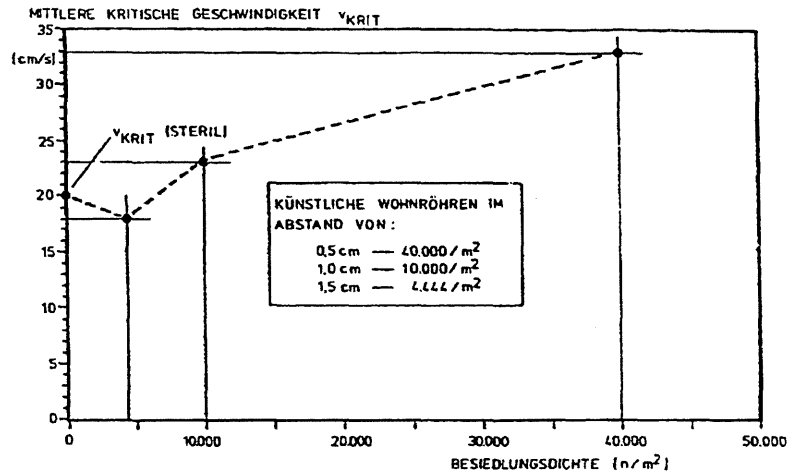


Abb. 3.13: Erosionsbeginn v_{krit} (mech) in Abhängigkeit von der Besiedlungsdichte (NIESEL, 1981, in: MANZENRIEDER, 1983, S. 180)

Die Extrapolation gemessener Erosionsraten ohne Berücksichtigung der an einem Einzelkorn wirkenden Kräfte unter Anwendung der Dimensionsanalyse führt zu einem eng begrenzten Funktionsverlauf zwischen einem dimensionslosen Widerstandsbeiwert, der FROUDESchen Kornzahl Fr_* und der dimensionslosen sedimentologischen REYNOLDS-Zahl Re_* :

$$Fr_* = \frac{\tau_{krit}}{g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_{50}} = \frac{v_{krit}^2}{g \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \cdot d_{50}} \quad (3-2)$$

$$Re_* = \frac{v_* \cdot d_{50}}{\nu} \quad (3-3)$$

¹⁸ Siehe hierzu:
 ECKMAN, J.E. ET AL. Sediment Destabilization by Animal Tubes.
 J. Mar. Res., H. 39, 1981, S. 361-374.

FAGER, E.W. Marine Sediments: Effects of a Tube-Building Polychaete.
 Science, H. 143, 1964, S. 356-359.

HEINZELMANN, C. Hydraulische Untersuchung über den Einfluß benthischer Diatomeenfilme auf Strömungswiderstand und Transportbeginn ebener Sandsohlen.
 Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, H. 48, 1992.

Mit:

Fr*	FROUDESche Kornzahl [-]
Re*	sedimentologische REYNOLDS-Zahl [-]
τ_{krit}	kritische Sohlschubspannung [KN/m ²]
v^*_{krit}	kritische Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
v^*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
d_{50}	mittlerer Korndurchmesser; Korngröße, die der Ordinate 50 Gew.-% der Körnungslinie entspricht [m]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
ρ_s	Dichte des Sedimentes [kg/m ³]
ρ_w	Dichte des Wassers [kg/m ³]

Unter Anwendung der Meßergebnisse für v_{krit} (biologisch) und der Gleichungen 3-2 und 3-3, lassen sich die biologischen Meßwerte in das technische SHIELDS-Diagramm (in: MANZENRIEDER, 1983, S. 177) übertragen (Abb. 3.14).

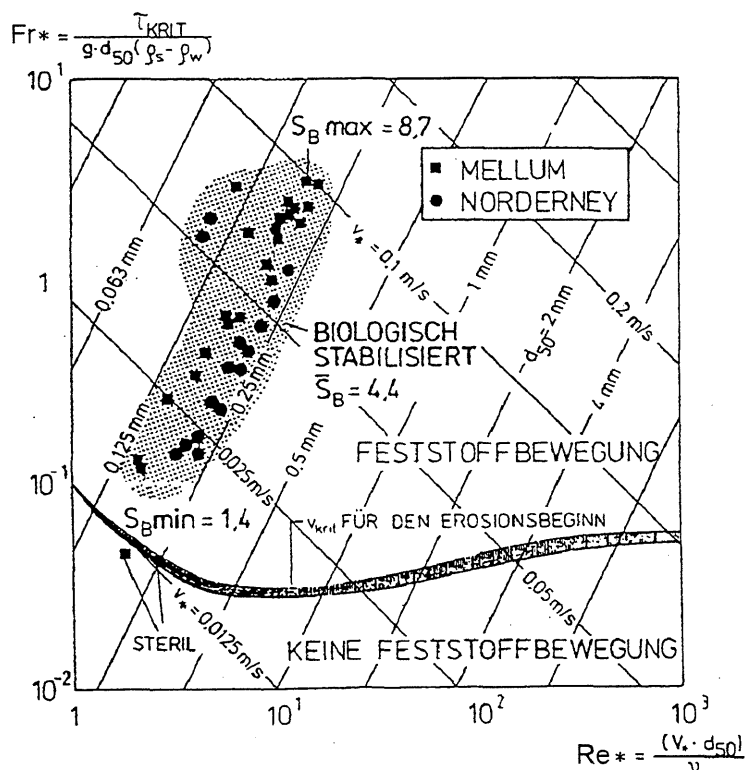


Abb. 3.14: Darstellung der biologischen Stabilisierung im SHIELDS-Diagramm (MANZENRIEDER, 1983, S. 177)

Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellen“ wurde nachgewiesen, daß durch die biologischen Prozesse im Deichvorland, die kritische Erosionsgeschwindigkeit und somit die resultierende Schubspannung im Mittel um 300%, im Extremum um etwa 800% erhöht werden kann (HEINZELMANN, 1992, in: ERCHINGER ET AL., 1994, S. 101).

TEISSON (1993, S. 13) zeigt, daß bindige Sohlen im Verlauf der Tide unterschiedlich große Werte in der Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber Erosionen aufweisen. So zeigen Messungen unmittelbar vor der Überflutung höhere Bodenfeststoffkonzentrationen (Abb. 3.15) und eine größere Erosionstabilität über die Tiefe (Abb. 3.16) als kurz nach dem Trockenlegen während der Ebbe. Dieses Phänomen ist jedoch ausschließlich in den obersten 0,02 m bis 0,03 m der Sohle wahrnehmbar.

Hinzu kommen saisonale Unterschiede in der Dichte und der Erosionswiderstandsfähigkeit einer Sohle. Es ist auffällig, daß im Winter die jeweiligen Gradienten stärker variieren als im Sommer, da der Schlick weniger konzentriert und steif ist. TEISSON (1993, S. 13) erklärt dieses mit niedrigeren Absetzraten aufgrund erhöhter Erosion anderenorts, Temperatureffekte und biologische Einflüsse. Insbesondere fehlende Aktivitäten von Kleinstlebewesen in und auf der Sohle scheinen im Winter eine große reduzierende Wirkung auf die Erosionswiderstandsfähigkeit der Sohle zu haben.

Auf die spezielle Frage des Seegangsverhaltens in Küstengebieten mit Vegetationsbesiedlung geht MASSEL (1996) ein.

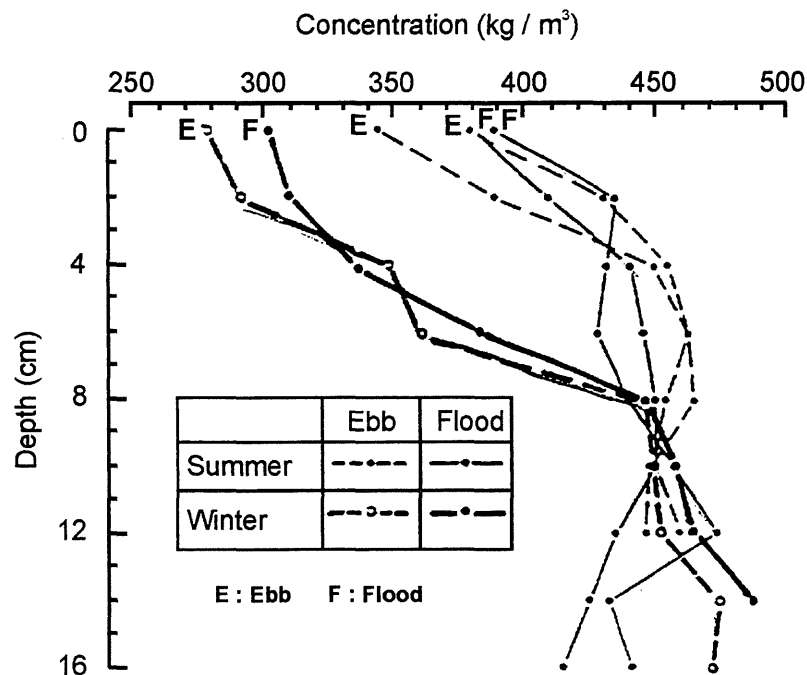


Abb. 3.15: Darstellung der Konzentration über die Sohlentiefe
 (ALEXIS ET AL., 1993, S. 14)

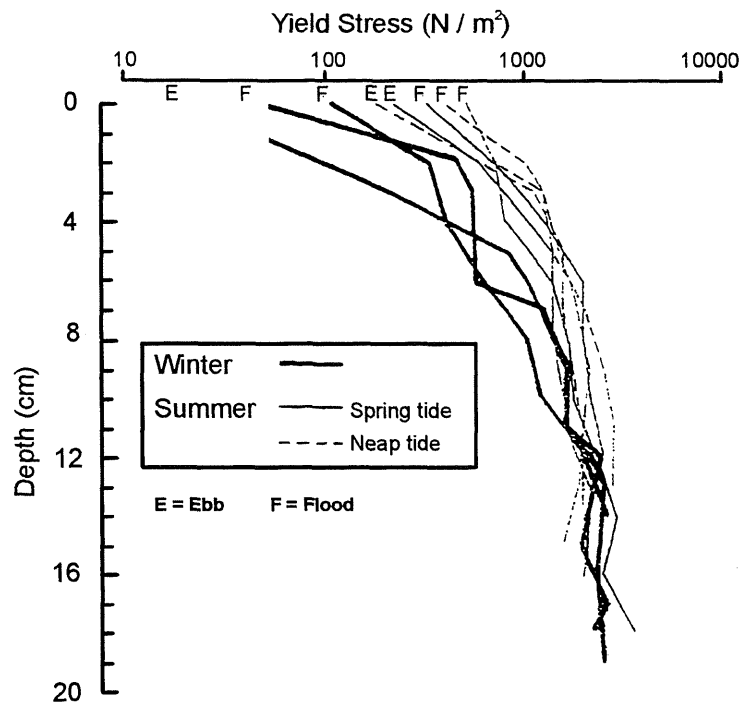


Abb. 3.16: Profile der Widerstandsfähigkeit einer Sohle gegenüber Erosionen (ALEXIS ET AL., 1993, S. 15)

3.6 Einfluß von Eis auf die Vorlandbildung

Im Vergleich zur offenen See weist das Wasser des Wattenmeeres einen geringeren Salzgehalt und größere Temperaturschwankungen auf. Messungen im Watt bei Ameland ergaben im Sommer bis zu 3°C höhere und im Winter 1,5°C bis 2°C niedrigere Temperaturen als in der Nordsee (EHLERS, 1994, S. 9). Das Wasser im flachen Wattenmeer kühlt im Winter schneller aus, wodurch die Eisbildung in der Anwachszone (vgl. Abb. 3.1) begünstigt wird. Bei strengem Frost werden die im Wasser enthaltenen Sinkstoffe dann in der Eisdecke eingefroren. Da länger anhaltende Frostperioden oftmals mit ablandigem Wind aus östlichen Richtungen verbunden sind, entstehen in diesem Zeitraum niedrigere Wasserstände, die wiederum eine verlängerte Trockenlage des Watts mit sich bringen. Auf diese Weise kann sich die Eisdecke mit dem darunter liegenden Sediment oder der Vegetation verbinden. Bei auflaufendem Wasser schwimmt die Eisdecke auf und kann dabei bereits abgelagerte Sedimente aus dem Verbund lösen und die Vegetation beschädigen. Während der nächsten Trockenfallzeit setzt sich das Eis erneut ab und der im Wechsel der Gezeiten stattfindende Vorgang des Anfrrierens findet wieder statt, so daß sich nennenswerte Sedimentmengen im Eis ansammeln können. Bei aufkommendem Westwind steigen die Wasserstände wieder, und es kommt zur Bildung von

Eisschollen, die von Tideströmung und Wind verdriftet werden und sich an Dämmen, Bühnen, Molen oder entlang der Küstenlinie ansammeln. Die Vorlandvegetation kann beim Auflanden von Eisschollen durch Abrasion stark geschädigt werden. Bei entsprechendem Wasserstand und erodiertem Anwurf, der die Eisschollen eigentlich nach oben ableiten soll, können die Buschlahnungen durch die Schubkraft driftender Eismassen schwer beschädigt werden. Dabei werden die Pfähle aus dem Lot gedrückt und dadurch gelockert oder abgebrochen. In ungünstigen Fällen ist die Lahnung weder auftriebsicher noch seegangsresistent, wodurch an den Lahnungen große Schäden entstehen können (Abb. 3.17). Ebenso können Lahnungen dem Auftrieb angefrorener Eisschollen ausgesetzt sein, der bei auflaufendem Wasser so groß werden kann, daß die Pfähle der Lahnung aus dem Boden gezogen werden.

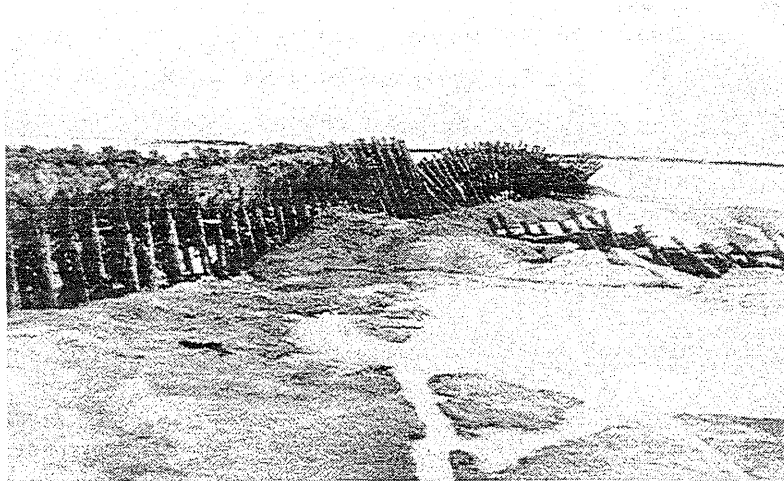


Abb. 3.17: Durch Eisschub beschädigte Lahnung

3.7 Vorlandmanagement

3.7.1 Nutzung der Vorländer

Seit Menschen an der Küste leben, wird das Vorland bewirtschaftet: Heu wurde gewonnen und die Wiesen mit Schafen, Rindern oder auch Pferden beweidet. Vereinzelt wurden sogar Gänse und nach LAFRENZ (1963, S. 84) auch Schweine auf Vorländern und Deichen gehalten. Die Beweidung von Vorländern mit Pferden war fast ausschließlich auf den Inseln zu finden. In Schleswig-Holstein war traditionell die Schafbeweidung stärker verbreitet, während in Niedersachsen die Rinderhaltung auf den Vorländern dominierte. Die landwirtschaftliche Nutzung, vor allem die Schaf- und Rinderhaltung, lag im Interesse des Küstenschutzes, weil angenommen wurde, verstärkter Viehtritt erhöhe die Verfestigung des Bodens und damit die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung. Zudem wurde eine infolge Beweidung

kurze Grasnarbe für den Erhalt von Vorlandflächen als geeignet betrachtet (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 1). So wurden bis zum Beginn der 90er Jahre Vorlandflächen intensiv beweidet.

Je nach Art und Intensität der Beweidung und der damit verbundenen Pflege und Unterhaltung stellen sich Auswirkungen auf Vegetation, Boden und Bodenfauna ein, die den Vorländern einen unterschiedlichen, nicht ausschließlich natürlichen Charakter verleihen. Mit den sich verändernden Ansprüchen der Gesellschaft und der Forderung nach dauerhaft umweltgerechten Lösungen im Bereich des Küstenschutzes, wird die ursprüngliche Form der Bewirtschaftung der Vorländer, nämlich der Beweidung, in Frage gestellt (z.B. PROBST, 1994, S. 56). Eine Übersicht über den zeitlichen Wandel der Deichvorlandbewirtschaftung gibt PROBST (1996).

3.7.2 Beurteilung der Vorländer aus küsteningenieurtechnischer Sicht

Geringe Wassertiefen über dem Vorland erzeugen eine Flächenbrandung. Die Energie des aus dem Watt anlaufenden Seegangs wird durch die Brandung energetisch umgewandelt, infolgedessen sich die Linienbrandung am Deich verringert (Abb. 3.18). Durch die reduzierten Strömungskräfte, Überlaufmengen und Druckschläge können vergleichsweise hohe Bau- und Unterhaltungskosten für schwere Ufer- und Deichdeckwerke entfallen. So kann ein deckwerksloser Vorlanddeich mit einem grünen und damit ökologisch eher akzeptablen Übergang vom Deich zum Vorland entstehen und das für Deckwerke typische Phänomen schädlicher Wellenreflexion oder Auflauf- und Überlaufschwallerosion nicht auftreten (KRAMER/JANSSEN, 1976, S. 87 / ERCHINGER ET AL., 1994, S. 1, 5).

Der für die Bemessung der Deichhöhe bedeutende, von der am Deich ankommenden Welle abhängige Wellenauflauf verringert sich mit zunehmender Vorlandbreite und -höhe bzw. seawärtig abnehmender Wassertiefe. Einmessungen der Treibselgrenze zeigen den Zusammenhang zwischen Wellenauflauf und Vorlandbreite bzw. -höhe (Abb. 3.19). Der Wellenauflauf wird mit zunehmender Vorlandbreite und -höhe in hohem Maße gedämpft. An Deichstrecken in der Leybucht mit Vorland lag z.B. die Treibselgrenze bis rd. 1,00 m tiefer als an Deichen ohne Vorland (KRAMER, 1990, S. 52, 54).

Unter der Voraussetzung, daß die Vorländer einem steigenden Meeresspiegel folgen können, gewinnt dieser Sachverhalt zunehmend an Bedeutung, zumal der Marschboden eine weitere Erhöhung der bestehenden Deiche in der Regel nicht mehr zuläßt.

Im Fall eines Deichbruchs verhindert das Deichvorland einen Strombruch, der in den Folgetiden das Seewasser weiter ein- und ausströmen läßt und sich infolgedessen zusätzlich aufweitet

(ERCHINGER ET AL., 1994, S. 5). Das höher gelegene Vorland verhindert nach dem Deichbruch das Einschwingen mittlerer Tiden (PARTENSKY ET AL., 1993b, S. 1.8), in dessen Schutz dann ein Notdeich errichtet werden kann (ERCHINGER, 1970, S. 129).

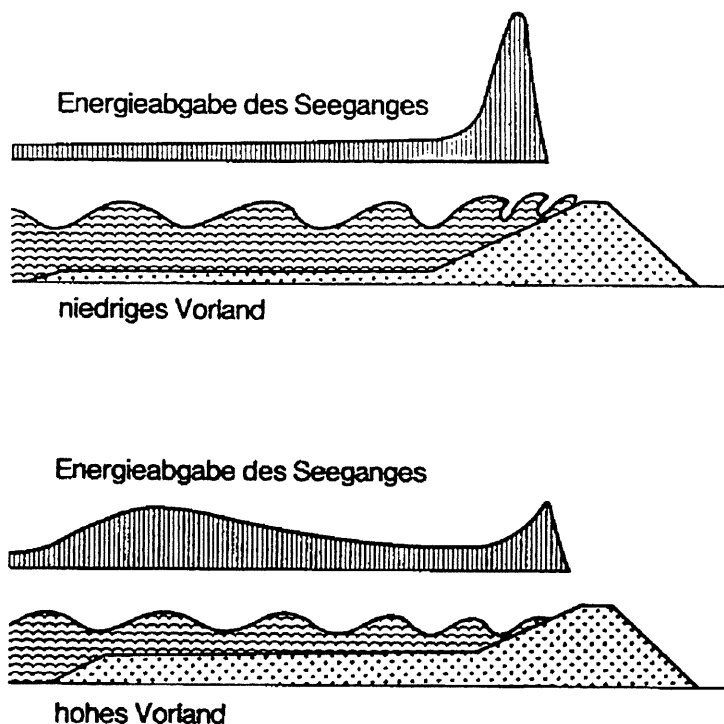


Abb. 3.18: Wirkung eines Vorlandes auf die Wellenbelastung des Deiches
(nach: FÜHRBÖTER, 1974, S. 588, in: STADELMANN, 1981, S. 65)

Aus dem Deichvorland können zur Unterhaltung des Deiches Schersoden, Rollrasen und Bodenmaterialien entnommen werden. In Fällen schwerer Sturmfluten können Klei und salzverträgliche Soden zur kurzfristig notwendigen Deichreparatur in nächster Nähe aus dem Deichvorland entnommen werden (LAFRENZ, 1957, S. 96f / NMELF, 1985, S. 40).

Mit Hilfe systematischer Vorlandarbeiten besteht die Möglichkeit, auf die Wasserführung des Watts im Bereich der Werke gestaltend einzuwirken. Mit dem Bau von Lahnungen können beispielsweise Wasserscheiden verlegt, die seewärts vorgelagerten Wateinzugsgebiete gefährlicher Priele verkleinert und das einströmende Flutvolumen bzw. die Tidestromgeschwindigkeiten dadurch gemindert werden.

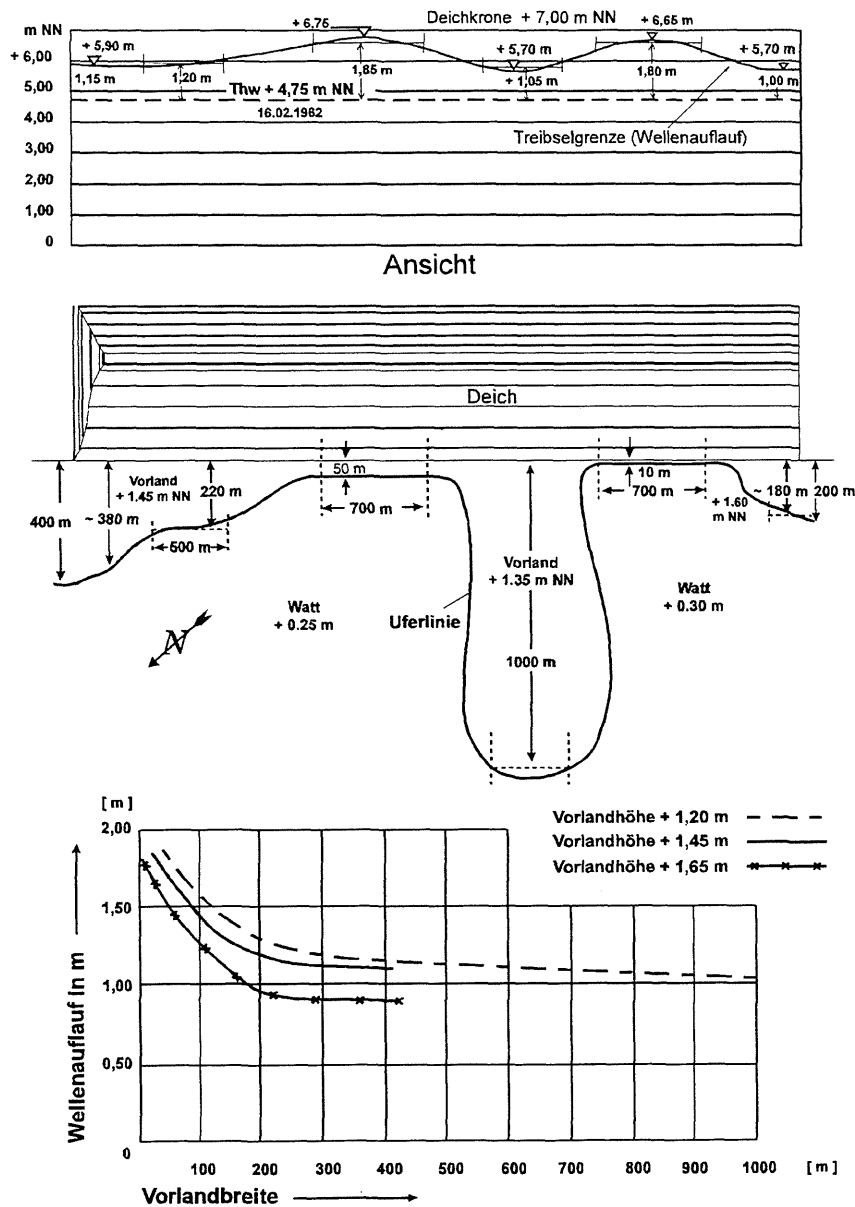


Abb. 3.19: Zusammenhang zwischen Wellenauflauf und Vorlandbreite bzw. -höhe am Störtebekerdeich in der Leybucht (KRAMER, 1967, in: KRAMER, 1990, S. 52)

3.7.3 Kritik zur künstlichen Vorlandbildung

Die deutschen Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg haben 1985, 1986 bzw. 1990 mit der Ausweisung ihrer Wattenmeergebiete zu Nationalparks Schutzvorkehrungen geschaffen, wie sie zuvor bereits in den Niederlanden und Dänemark eingeführt wurden (KEMPF ET AL., 1988, S. 5). Erste Bemühungen zum internationalen Schutz der Wattenmeer-salzwiesen wurden 1986 durch die Umweltstiftung WORLDWIDE FOUND FOR NATURE (WWF)

im Rahmen der internationalen Fachtagung „Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur?“ anlässlich des 6. Internationalen Wattenmeertages initiiert (KEMPF ET AL., 1988, S. 5 / STOCK, 1993, S. 11). Hier wurde neben der Bedeutung der Salzwiesen für den Küstenschutz, die Einmaligkeit hinsichtlich der Vielfalt von Flora und Fauna und der Bedeutung als Nahrungs-, Brut- und Rastplatz deklariert und erste Zielkonzepte zukünftiger Schutz- und Nutzungsformen von Salzwiesen herausgearbeitet. 1989 fand eine trilaterale Konferenz zum Salzwiesenmanagement in Rømø statt. Nach Auffassung der TRILATERALEN ARBEITSKONFERENZ ZUM SALZWIESENMANAGEMENT IM INTERNATIONALEN WATTENMEER (in: OVESEN, 1990, S. 11f) sind Erosionen der Deichvorländer in den Prozeß der natürlichen Dynamik einzuordnen und somit nicht generell zu unterbinden.

In Salzwiesenabschnitten mit einer natürlichen Tendenz zur Auflandung soll prinzipiell keine künstliche Vorlandbildung betrieben werden (KEMPF ET AL., 1988, S. 463). Neben der Forderung der Nationalparkverwaltungen, seitens des Küstenschutzes auf die Begrüppung in den Lahnungsfeldern und Salzwiesen zu verzichten, werden Lahnungsbauten jedoch im Hinblick auf eine wünschenswerte Naturlandschaftserhaltung als hinnehmbare, wenn auch beeinträchtigende Maßnahme zum Schutz der Salzwiesen vor Erosion anerkannt. Unter Umständen wird auch die Anlage von Buschlahnungsfeldern zur Salzwiesenneubildung akzeptiert (ZANDER, 1994, S. 72ff). Erosionsgefährdete Salzwiesen sollen jedoch ausschließlich durch flexible Materialien wie Holz, also durch die Anlage von Buschlahnungsfeldern und nicht durch schwere „Betondämme“ (WATTENMEERVEREIN NIEDERLANDE ET AL., 1994, S. 8 / SCHULZ/ZIMMERMANN, 1996, S. 362), geschützt werden. Die Einführung der schweren Bauweisen erklärt KRAMER (1990, S. 103ff) hingegen mit der aus Sicht des Küstenschutzes notwendigen Anlage von Lahnungsfeldern auch vor scharliegenden Deichen. Dafür müssen ungünstigere natürliche Verhältnisse, u.a. tiefere Wattlagen und schlechte Sedimentationsbedingungen, in Kauf genommen werden und die Lahnungen dementsprechend widerstandsfähiger gegenüber den höheren äußeren Belastungen sein. Viele Ökologen lehnen den Bau massiver Dämme im Watt ab. Zwar bieten ihre Deckwerke den Pflanzen- und Tierarten mit festsitzender Lebensweise ein Substrat, mit zunehmender „Verfelsung“ des Watts geht jedoch der ursprüngliche Charakter der Vorlandflächen verloren.

Das Hauptziel aller Managementpolitik, Entscheidungen und Techniken soll die Vermeidung, mindestens aber die Kontrolle des Einflusses menschlicher Aktivitäten im Sinne des leitenden Grundsatzes der ESBJERG-Deklaration, nämlich eines ungestörten Ablaufs der natürlichen Prozesse, sein (WATTENMEERVEREIN NIEDERLANDE ET AL., 1994, S. 6).

Hauptkritikpunkt der künstlichen Vorlandbildung scheint die systematische und technisch orientierte Begrüppung der Lahnungsfelder zu sein. Senkrecht zum Deich verlaufende Gruppen-

systeme bewirken eine flächenhafte, gleichmäßige Entwässerung der Salzwiesen. Hierdurch werden, nach Ansicht von Gegnern der Begrüppung, die Entwicklung von Prielsystemen, Blänken und die mosaikartige Strukturvielfalt von natürlichen Salzwiesen zerstört bzw. das Entstehen solcher Ökosystemausprägungen verhindert (Abb. 3.20). Eine Beziehung zwischen der Menge des beim Gruppen ausgehobenen Schlickes und der Aufhöhung der sog. Beete zwischen den Gruppen, konnte bisher nicht wissenschaftlich nachgewiesen werden. Daher werden schmale Gruppen gefordert, die der Vegetation weniger schaden. Anstelle eines flächenhaften Entwässerungssystems, sollten nach Möglichkeit ausschließlich Deichringgräben angelegt werden und die dringend erforderlichen Entwässerungsgräben so natürlich wie möglich verlaufen (WATTENMEEREREIN NIEDERLANDE ET AL., 1994, S. 8).

Seit Mitte der 80er Jahre wird auch die Beweidung von Vorländern zunehmend kritisiert: Die im Nationalpark teilweise auf Salzwiesen noch übliche Nutzung als Weidefläche oder Mähland hat eine Förderung des Bedeckungsgrades mit Gräsern und einen Rückgang von Arten und Individuenzahl der Kräuter bei der Vegetation zur Folge. Insbesondere eine intensive Beweidung (z.B. > 1,5 Rinder/ha) fördert den Graswuchs der Salzwiesen, führt zu Gehegeverlusten bei Brutvögeln, reduziert die Arten- und Individuenzahl von Kräutern und demzufolge die an sie existentiell gebundenen Kleintierarten. Eine Beweidung ist aus Sicht des Naturschutzes für die Belange des Küstenschutzes nicht erforderlich (BAKKER, 1993, S. 10 / STOCK/HANSEN, 1993, S. 23 / WATTENMEEREREIN NIEDERLANDE ET AL., 1994, S. 8).

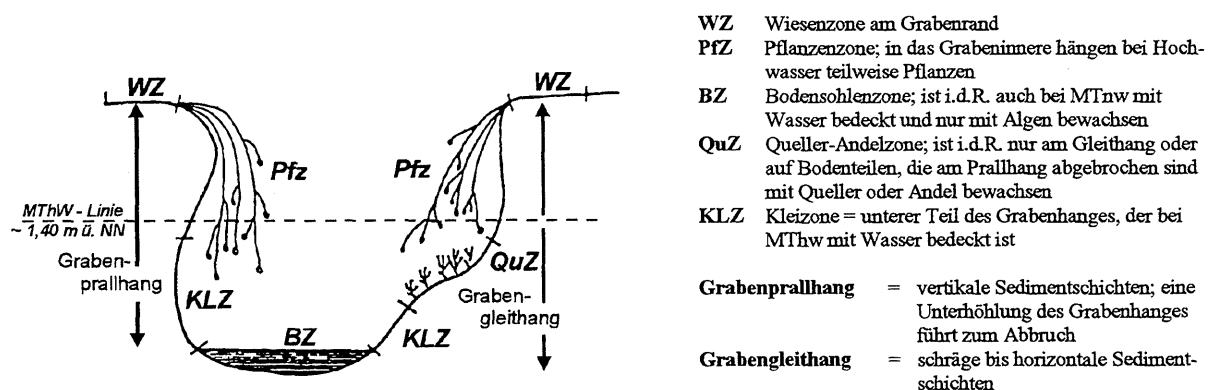


Abb. 3.20: Querschnitt eines natürlich entstandenen Entwässerungsgrabens
Beispiel aus dem Naturschutzgebiet Elisabeth-Außengroden, Schleswig-Holstein
(nach: BLINDOW, 1987, S. 21)

Ferner sollen zum Schutz des Vorlandbereiches weder Soden noch Klei aus dem Deichvorland entnommen werden sowie Deichverstärkungen prinzipiell auf der Binnenseite des Deiches und nicht im Vorlandbereich erfolgen.

3.7.4 Begrüpfung

Je nach Höhenlage des Vorlandes, der örtlichen Sedimentationsbedingungen, der Vegetation, der Beweidung sowie regionaler Besonderheiten werden Lahnungsfelder begrüpft. So steigt mit zunehmender Sedimentation, Vegetation und Beweidung die Grüppfrequenz, während sie mit zunehmender Höhe des Vorlandes, also vom Bereich der Salzwiese zur Übergangszone reduziert wird.

In den Niederlanden (DIJKEMA ET AL., 1988, in: HOFSTEDE, 1992, S. 1) wurde im Rahmen des 1982 initiierten „Experiment Naturmanagement Reichslandgewinnungswerke“ festgestellt, daß eine Begrüpfung in der äußeren Schlickzone (unterhalb MThw - 0,60 m) eine vernachlässigbare akkumulationsfördernde Wirkung zeigt. Ebenso konnte für die unbewachsene Übergangszone im Bereich von MThw - 0,60 m bis MThw - 0,20 m „keine signifikante Korrelation zwischen Begrüpfungsmethode und Aufschlickung festgestellt werden“ (KROEZE ET AL., 1992, in: HOFSTEDE, 1992, S. 6). Vermutlich beeinflußt eine Begrüpfung in der Übergangszone jedoch indirekt die Quelleransiedlung und damit den Anwachs des Vorlandes. Nach DIJKEMA ET AL. (1988, in: HOFSTEDE, 1992, S. 1) kann die äußere Vegetationsgrenze infolge einer durch Begrüpfung erzielte Entwässerung und Belüftung um rd. 0,20 m bis 0,30 m tiefer verlagert werden, während nach KROEZE ET AL. (1992, in: HOFSTEDE, 1992, S. 6) weder die Größe der Gruppen noch der Gruppenabstand Einfluß auf die Vegetation nehmen.

Im Rahmen des KFKI-Projektes „Erosionsfestigkeit von Hellern“ wurde gezeigt, daß die Wasserführung über ein Grüppensystem die Überflutungsdauer des Vorlandes und die Wassersättigung des Oberbodens reduziert. Die Bodendurchlüftung wird im Jahresmittel verbessert und die für die Erosionsfestigkeit des Vorlandes entscheidenden bodenbildenden Prozesse und die Entwicklung des Wurzelsystems intensiviert. Dieser Einfluß geht mit zunehmender Begrüpfung zurück, da sich beide Faktoren in ihrer Wirkung auf den Wasser- bzw. Lufthaushalt ähneln (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 110).

3.7.5 Unterhaltung von Lahnungen

In etwa jährlichem Wechsel werden Lahnungen neu angeworfen. Erforderlichenfalls wird ebenso die Buschwerkfüllung nachgepackt sowie mit Draht wieder verschnürt. Ein „Nachpacken“ der vom Seegang ausgeschlagenen Füllung wird etwa alle 3 Jahre (STADELMANN, 1981) bis 5 Jahre (ALW HEIDE, 1994, mdl.) notwendig. Häufige Schlechtwetterlagen verkürzen dieses Intervall deutlich.

Während der Kriegs- und Nachkriegsjahre des ersten und zweiten Weltkrieges verfielen augenscheinlich zahlreiche Lahnungen infolge der Vernachlässigung der Unterhaltung und Holzdiebstahls. Infolgedessen verlangsamte sich der Anwachs der Vorländer bis hin zu negativen Anwachsrate (vgl. KAMBECK, 1980, S. 4). Auch der strenge Winter in den Jahren 1939 und 1949 rief starke Schäden an den Lahnungen hervor (PROBST, 1996, S. 56). Abbildung 3.21 zeigt ein Beispiel einer 1935 errichteten und später nicht unterhaltenen Lahnung auf Neuwerk.

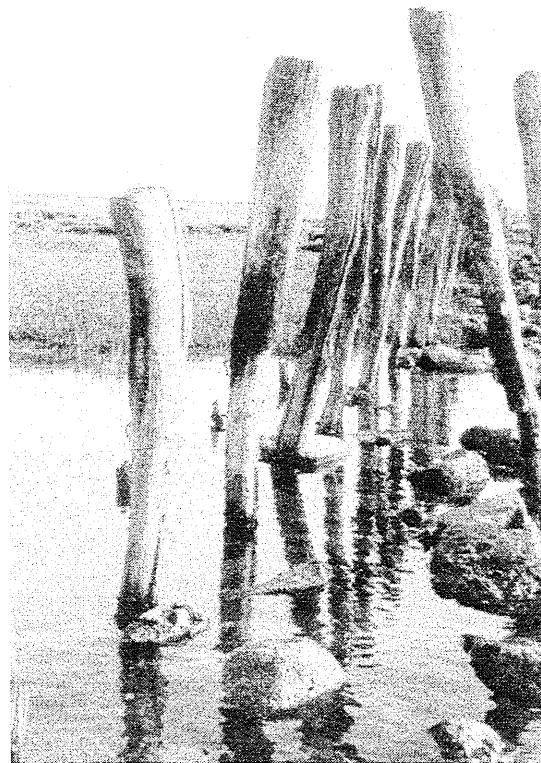


Abb. 3.21: 1935 errichtete und später verfallene Lahnung auf Neuwerk,
Hamburgisches Wattenmeer

Ergänzend zu den Arbeiten OSTERTHUNS (z.B. 1993b), jedoch mit besonderem Augenmerk auf die Unterhaltungsarbeiten von Lahnungsbauwerken, konnten FIEGE/LASS (1995) in Zusam-

menarbeit mit dem ALW Husum umfangreiches Datenmaterial, den Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog in Schleswig-Holstein betreffend, auswerten. Für ein definiertes Untersuchungsgebiet des Koogs wurde ein Untersuchungszeitraum gewählt und das vorhandene, geeignete Material hinsichtlich der Vorlandentwicklung analysiert.

Anhand von Kartierungen der Vegetationsgrenzen (Maßstab 1:10.000) wurde die zeitliche und räumliche Entwicklung der Queller- und Andelgrenzen (~ Vorlandgrenze) erfaßt. Abbildung 3.22 zeigt exemplarisch den zeitlichen und räumlichen Verlauf für Lahnungswerke im nördlichen Teil des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koogs (Werk 7 bis Werk 9). Aus der räumlichen Verlagerung der Vorlandgrenzen konnte mittels Integration näherungsweise der Vorlandzuwachs pro Jahr ermittelt werden. Für die Jahre bis 1938/39 ist ein kontinuierlicher Anwachs des Vorlandes zu verzeichnen, der mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine regelmäßige Begrüppung der Lahnungsfelder sowie auf eine stetige Unterhaltung der Lahnungsbauwerke im Rahmen des Arbeitsbeschaffungsprogramms der dreißiger Jahre zurückzuführen ist.

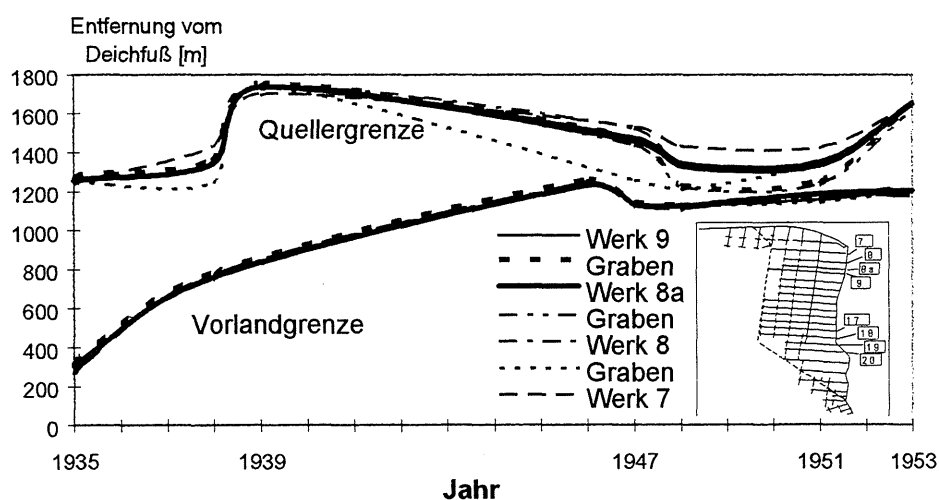


Abb. 3.22: Entwicklung der Queller- und Vorlandgrenzen in den Jahren 1935 bis 1953 im Gebiet des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Kooges südlich des Hindenburgdamms (nach: FIEGE/LASS, 1995, S. 39f)

In den Jahren zwischen 1939 und 1946 fanden keine Kartierungen der Vegetation statt; die vorhandenen Daten lassen jedoch auf einen raschen Abbruch der Vorlandkanten und einen damit einhergehenden Verlust an Vorland schließen, der in den Jahren 1946 bis 1948 verstärkt wird. Die nach 1945 notleidende Bevölkerung Nordfrieslands baute die Holzpfähle der Lahnungen aus, um sie als Brennmaterial zu verwenden. Dieser Rückbau der Lahnungen verlagerte die Vorlandkante in den nachfolgenden Jahren in Richtung des Deichs (vgl. Abb. 3.22). Mit Wie-

deraufnahme der Unterhaltungsarbeiten der Lahnungsfelder nach 1948 setzte zugleich eine Stabilisierung der Queller- und Andelgrenzen ein. Anhand der Höhenschichtlinien von Watthöhenkarten (Maßstab 1:10.000) konnten die Auflandungstendenzen im Untersuchungsgebiet rekonstruiert werden und näherungsweise zahlenmäßig erfaßt werden (Abb. 3.23).

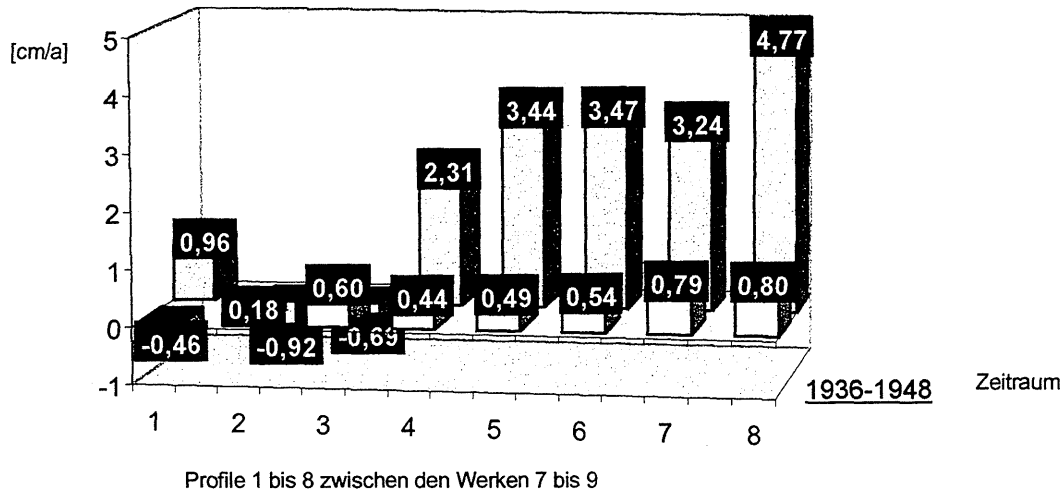


Abb. 2.23: Auflandungsbilanz in den Jahren 1936 bis 1952 im Gebiet des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Kooges südlich des Hindenburgdamms (nach: FIEGE/LASS, 1995, S. 81)

Eine zeitliche Zuordnung natürlicher Ereignisse (z.B. Sturmfluten) zu den morphologischen Veränderungen im Vorlandbereich war mangels Datendichte im Rahmen der Untersuchungen von FIEGE/LASS (1995) nur eingeschränkt möglich. Es konnte gezeigt werden, daß sowohl mit Sturmfluten als auch mit stärkeren Winterfluten hohe Sedimentationsraten einhergehen, unabhängig vom Unterhaltungszustand der Lahnungsbauwerke. Sowohl Kanten- als auch flächenhafte Erosion trat lediglich im Fall zerstörter oder beseitigter Lahnungen für mittlere Tiden auf (vgl. Kap. 3.3). Diese Erosionen konnten jedoch durch die eher selten eintretenden Extremereignisse und damit verbundenen hohen Sedimentfrachten nicht ausgeglichen werden. Da das Gebiet des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koogs aufgrund seiner geschützten Lage unmittelbar südlich des sedimentationsfördernden Hindenburgdamms die größten Anwachsrate im nordfriesischen Wattenmeer aufweist, kann dieses Ergebnis jedoch nur bedingt auf andere, weniger geschützt gelegene Küstenabschnitte übertragen werden.

3.7.6 Beweidung

Etwa bis 1955 stellte eine spätere ackerbauliche Nutzung des neugewonnenen Landes das Hauptziel der "Landgewinnungsarbeiten" dar. Mit dem sich allmählich vollziehenden strukturellen Wandel in der Europäischen Gemeinschaft haben sich die agrarpolitischen und ökonomischen Randbedingungen seitdem derart geändert, daß die "Neulandgewinnung" zunehmend unwirtschaftlicher wurde. Heute dienen die Vorlandsalzwiesen als Biotope und verbessern den aktiven Küstenschutz (vgl. Kap. 3.7.1 bis 3.7.3). Die Bodenfruchtbarkeit hat daher als Kriterium zur Beurteilung der Qualität des neu dazugewonnenen Landes an Bedeutung verloren.

Erste Ergebnisse aus dem 1991 initiierten sogenannten Erprobungs- und Entwicklungsverfahren „Salzwiesenprojekt Wurster Küste“, in dem die Entwicklung von Flora und Fauna für fünf verschiedene Nutzungsvarianten von Salzwiesen und gefluteten Sommerpoldern (brach liegende Flächen, gemähte Flächen, unterschiedlich intensiv – bis zu 1,5 Rinder/ha – beweidete Flächen) untersucht wurden, zeigen auf, daß sich in Sommerpoldern eine Beweidung positiv auswirkt, während es vorteilhaft ist, die eigentlichen Salzwiesen aus der Beweidung herauszunehmen. Empfohlen wird u.a. ein Mosaik aus beweideten Flächen und Flächen, die aus der Nutzung herausgenommen werden.

Vergleichbare Erkenntnisse wurden im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Erosionsfestigkeit von Hellern" getroffen. So zerstört eine intensivere Beweidung mit mehr als einem Rind pro Hektar auf tonreichen Böden das natürliche Pflanzengefüge und hemmt das Pflanzenwachstum. Eine extensive Beweidung mit weniger als einem Rind pro Hektar begünstigt die Artenvielfalt, da die Tiere die Bewuchshöhe und Bewuchsdichte breit fächern (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 110).

Mit der Diskussion um die zukünftige Form der Beweidung von Vorländern wird insbesondere in Niedersachsen das sogenannte "Teek-Problem" verknüpft. Unter abgelagertem Teek (Treibsel) wird der Pflanzenwuchs des Vorlandes bis zum völligen Absterben beeinträchtigt. An für den Küstenschutz relevanten Stellen, vor allem der Deichaußenböschung, muß das Treibsel entfernt werden, um potentielle Schwachstellen für angreifende Erosion zu vermeiden. Teek darf nicht wie früher in Kleipütten gekippt oder verbrannt werden, sondern muß heute kompostiert werden. Die Abfuhr und die Deponierung des Treibsel verursachen hohe Kosten (vgl. SCHULZE DIECKHOFF, 1995, S. 15). Die landwirtschaftliche Verwertung von Treibselkompost scheidet in der Regel am hohen Salzgehalt des Materials.

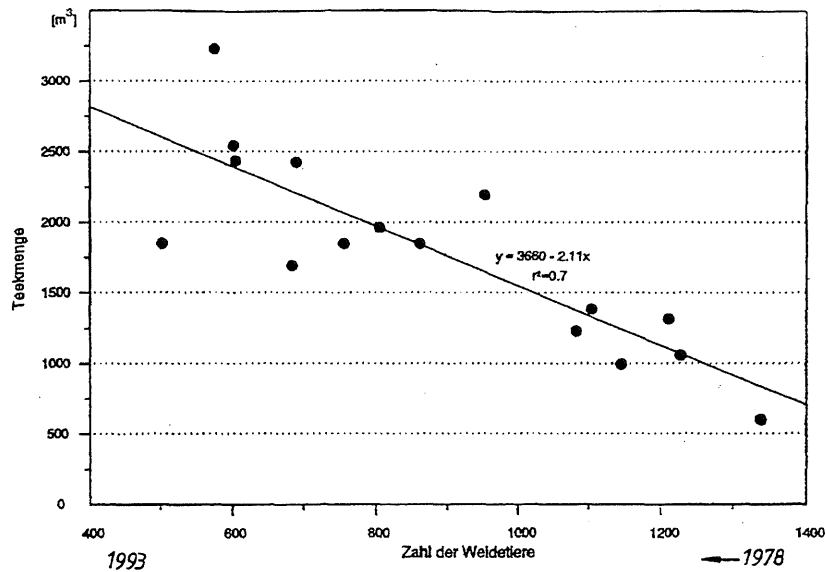


Abb. 3.24: Entwicklung der Teekmenge bezogen auf die Beweidungsintensität der östlichen Leybucht in den Jahren 1978 bis 1993 (ERCHINGER ET AL., 1996, S. 37)

Seitens des Küstenschutzes wird die Teekproblematik häufig auf den Rückgang der Beweidung in Verbindung mit einer größeren Sturmfluthäufigkeit zurückgeführt. Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ konnte festgestellt werden, daß mit dem Rückgang der Beweidungsintensität die Teekmenge zunimmt (Abb. 3.24). Untersuchungen in der Leybucht zeigten, daß das Treibsel aus den Salzwiesen der Leybucht selbst stammt (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 99f) und zu rd. 100% aus den abgestorbenen, abgeknickten Resten der Pflanzen des Vorlandes besteht. Die Biomassenproduktion der Pflanzen im Vorland ist jedoch pro Wachstumsperiode im wesentlichen als konstant anzusehen. Wenn also längere Zeit keine Sturmflut den Deichfuß erreicht, bleibt der Teek auf dem Vorland zurück und wird von den Pflanzen der folgenden Wachstumsperiode durchwachsen. Nach Ansicht der Nationalparkverwaltung hingegen ist der Anstieg des Teeks ausschließlich durch eine Zunahme der Sturmfluthäufigkeit zu erklären. Eine weitere Verschärfung der Teekproblematik wird durch die von der Nationalparkverwaltung nur noch statt Begrüppung geforderten Deichringgräben befürchtet. Der Teek würde sich in diesem Graben sammeln, und die Entsorgung des entstehenden Gemischs aus Teek und Schlick ist praktisch nicht durchführbar.

Die Auswirkung der Beweidung auf die beeinflussbaren Faktoren ist allgemein im deichnahen Bereich ausgeprägter als im weiter entfernten und auf den Beeten in Beetmitte stärker als am Rand. Dies beruht auf der Tatsache, daß Schafe und Rinder sich bevorzugt auf dem trockeneren, höheren Vorlandbereich aufhalten.

Wird die Vegetationsdecke eines Vorlandes überströmt, bilden die oberirdischen Pflanzenteile ein System von zufälligen und variablen Fließquerschnitten. In Abhängigkeit von dem Verbauungsgrad des Durchflußquerschnitts kommt es zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit und somit zu einer geringeren Sohlschubspannung. Nach Untersuchungen von HABER (1982, S. 71, 117) steigt mit zunehmendem Bewuchs und wachsender Pflanzenhöhe die kritische Strömungsgeschwindigkeit, bei der eine Bewegung der Bodenteilchen zu beobachten ist. Den höchsten Erosionsschutz jedoch bietet eine Bepflanzung mit Grassoden, deren hohe Triebdichte die Strömungsgeschwindigkeit an der Bodenoberfläche am stärksten verringert. Höhere Pflanzen reduzieren zwar die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, lassen jedoch höhere Sohlgeschwindigkeiten zu (HABER, 1982, S. 71ff). Intensive Beweidung erzeugt sehr dichten und kurzgefressenen Rasen, extensiv genutzte oder ungenutzte Flächen fördern höher wachsende Pflanzen. Bei sehr tief verbissenen Beständen nimmt der Schutz des Bodens durch die Pflanzentriebe stark ab und wird auch nicht mehr durch Zunahme der Triebdichte ausgeglichen. Ein Pflanzenbestand kann weiterhin die Wirkung der Druckschläge dämpfen, indem durch die Triebe die Bildung eines Luftpolsters im Wasserschwall begünstigt wird (GRUMBLAT, 1988, S. 190ff). Es ist möglich, daß durch hohe Pflanzen die Schäden durch Druckschlag gemindert werden können, da die Pflanzen sich legen und so der Boden nicht mehr direkt dem Druckschlag ausgesetzt ist.

Für die Festigkeit der Vorländer ist eine hohe Vorbelastung¹⁹ von Vorteil, weil dann ohne künstliche Verdichtung größere mechanische Beanspruchungen aufgenommen werden können. Nach HORN/ZHANG (1995, S. 18f, 109) nimmt die Vorbelastung des Bodens mit zunehmender Beweidungsintensität zu und erreicht bei rd. 1,0 SE/ha²⁰ annähernd das Maximum und damit eine Zunahme von 70% bis 80% gegenüber Nichtbeweidung. Höhere Beweidungsintensität führt nicht zu weiterer signifikanter Steigerung der Vorbelastung. Die Auswirkung der Beweidung ist bis in eine Tiefe von 0,30 m feststellbar (Abb. 3.25). Unabhängig von der Beweidungsintensität und Auflaststufe wurde festgestellt, daß im Durchschnitt 40% der Setzung reversibel ist. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen dieser Rückdehnung und der Beweidung ist nur in der obersten Bodenschicht bis in Tiefe von 0,10 m erkennbar.

¹⁹ Wird die Porenziffer eines Bodens über die logarithmische Belastung des Bodens aufgetragen (z.B. KATZENBACH/ARSLAN, 1994, S. 5.2-12), so ist aus dieser Darstellung zuerst eine flach verlaufende Kurve abzulesen, „die dann mit steigender Auflast in eine steilere übergeht. ... Die dem Übergangspunkt entsprechende Belastung wird als Vorbelastung des Bodens bezeichnet und stellt einen charakteristischen Spannungszustand des Bodens dar. Die Vorbelastung kann z.B. aus früherer Belastung durch eiszeitliche Eismassen, aus geostatischen Belastungen infolge von Auflageschichten oder Entwässerung resultieren oder durch Lasteintrag z.B. von Landmaschinen oder weidenden Tieren“ (HORN/ZHANG, 1995, S. 14f).

²⁰ SE/ha = Schafeinheiten pro Hektar = Maß für die Beweidungsintensität, unter der Annahme, daß von einem erwachsenen Schaf eine Belastung von rd. 120 kPa ausgeht (vgl. LULL, H.W.: Soil Compaction on Forest and Range Land, U.S. Dept. Agr. Misc. Publ. 768, Washington, 1959)
1 SE = 1 Mutterschaf + 1,5 Lämmer + 0,3 Zutretern/Jährling (HORN/ZHANG, 1995, S. 2)

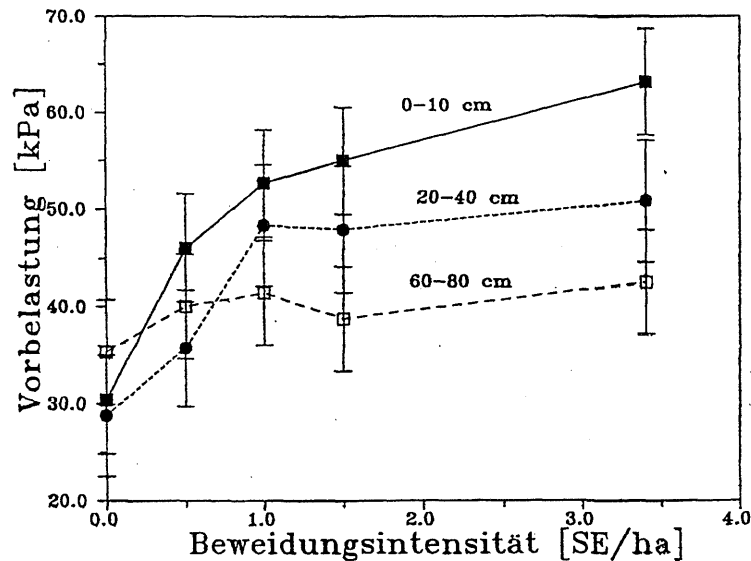


Abb. 3.25: Einfluß der Beweidung und der Bodentiefe auf die Bodenvorbelastung (HORN/ZHANG, 1995, S. 18)

Die wirksame Kohäsion des Oberbodens (0,00 m bis 0,30 m unter GOK) steigt von rd. 10 kPa bei Nichtbeweidung auf 17 kPa bei 1,0 SE/ha an. Höhere Beweidungsintensitäten führen nach HORN/ZHANG (1995, S. 27, 109) nicht zu einer weiteren Steigerung der wirksamen Kohäsion.

HORN/ZHANG (1995, S. 31ff, 109) geben das Maximum der Bodenscherfestigkeit mit einer Zunahme von 30% bis 50% gegenüber Nichtbeweidung bei einer mittleren Beweidungsintensität von 1,0 SE/ha bis 1,5 E/ha an. Höhere Beweidungsintensitäten führen nicht zu einer wesentlichen Erhöhung der Scherfestigkeit.

Aufgrund einer erhöhten Biomassenproduktion steigt auch die Evapotranspiration. Der Boden wird dadurch trockener und gewinnt an Festigkeit, die besonders in den Sommermonaten zu beobachten ist (HORN/ZHANG, 1995, S. 34f). Beweidung fördert die Biomassenproduktion mit einhergehender Wurzelkonzentration im Oberbodenbereich durch die Dominanz der Gräser. Es entsteht ein Wurzelfilz, der auch nach Auswaschung sehr stabil bleibt (GRUMBLAT, 1988, S. 194ff). Dies erhöht die Scherfestigkeit und Kohäsion und damit auch die Bodenstabilität.

Bei einer Betrachtung der aus Beweidung resultierenden Einflüsse auf die Vorlandbereiche ist zwischen Schaf- und Rinderbeweidung zu differenzieren. Der durch ein Tier verursachte Druck beträgt bei Schafen ca. 2,1 kg/cm², bei Rindern hingegen über 3,0 kg/cm². Zudem betreten Schafe aufgrund ihres Freßverhaltens den Boden insgesamt häufiger als Rinder (GRUMBLAT, 1988, S. 202). Schafe weiden eine Fläche gleichmäßig von oben her ab. Rinder erfassen dagegen Pflanzenteile mit dem Maul und reißen sie ab oder sogar aus dem Boden heraus. Daraus ergibt sich bei Schafbeweidung eine insgesamt homogenere und höhere Bodenverfestigung

(vgl. IRMLER ET AL., 1988, S. 249). Eine Beweidung kann jedoch insbesondere bei feuchtem Untergrund den bodenstrukturschädigenden Prozeß des „poachings“²¹ auslösen (HORN/ZHANG, 1995, S. 42ff). So führt eine Überweidung zu Trittschäden, die den Erhalt einer geschlossenen Vegetationsdecke verhindern. Die Bodenverfestigung wird dadurch revidiert. Der Boden ist besonders bei Rinder- und der seltenen Pferdebeweidung durch Trittschäden gefährdet.

Nach Untersuchungen von HORN/ZHANG (1995) im Vorlandbereich des Sönke-Nissen-Koogs in Schleswig-Holstein wird die Lagerungsdichte durch Beweidung nicht oder nur minimal erhöht. Im Durchschnitt war die Lagerungsdichte der am intensivsten beweideten Parzelle (3,4 SE/ha) etwa 0,05 g/cm³ höher als die der nicht beweideten (Abb. 3.26), wobei der Beweidungseinfluß im deichnahen Bereich ausgeprägter als im deichfernen ist (Abb. 3.27). „Die Tiefenfunktionen der Lagerungsdichte zeigen, daß die Auswirkung der Beweidung nur in der obersten Bodenschicht festzustellen ist“ (HORN/ZHANG, 1995, S. 110).

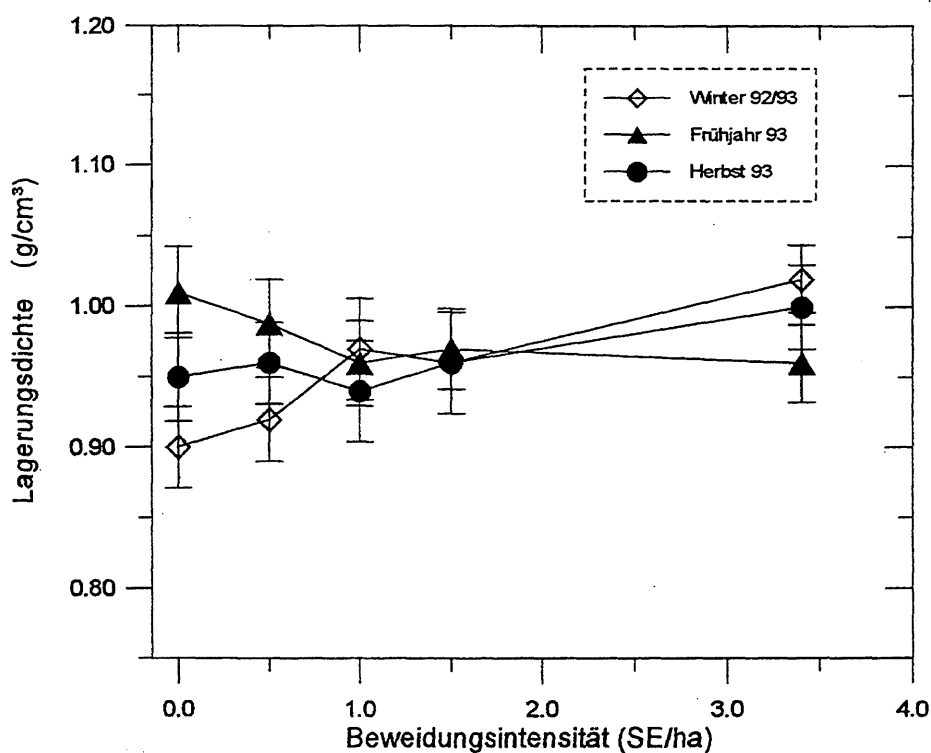


Abb. 3.26: Einfluß der Beweidungsintensität auf die Lagerungsdichte des Oberbodens (HORN/ZHANG, 1995, S. 86)

²¹ poaching (engl.):
poaching of ground = matschig werden; infolge des Zertritts durch Weidetiere wird der Boden aufgelockert, vernäßt, und das Korngefüge verliert seine Stabilität (HORN/ZHANG, 1995, S. 42ff).

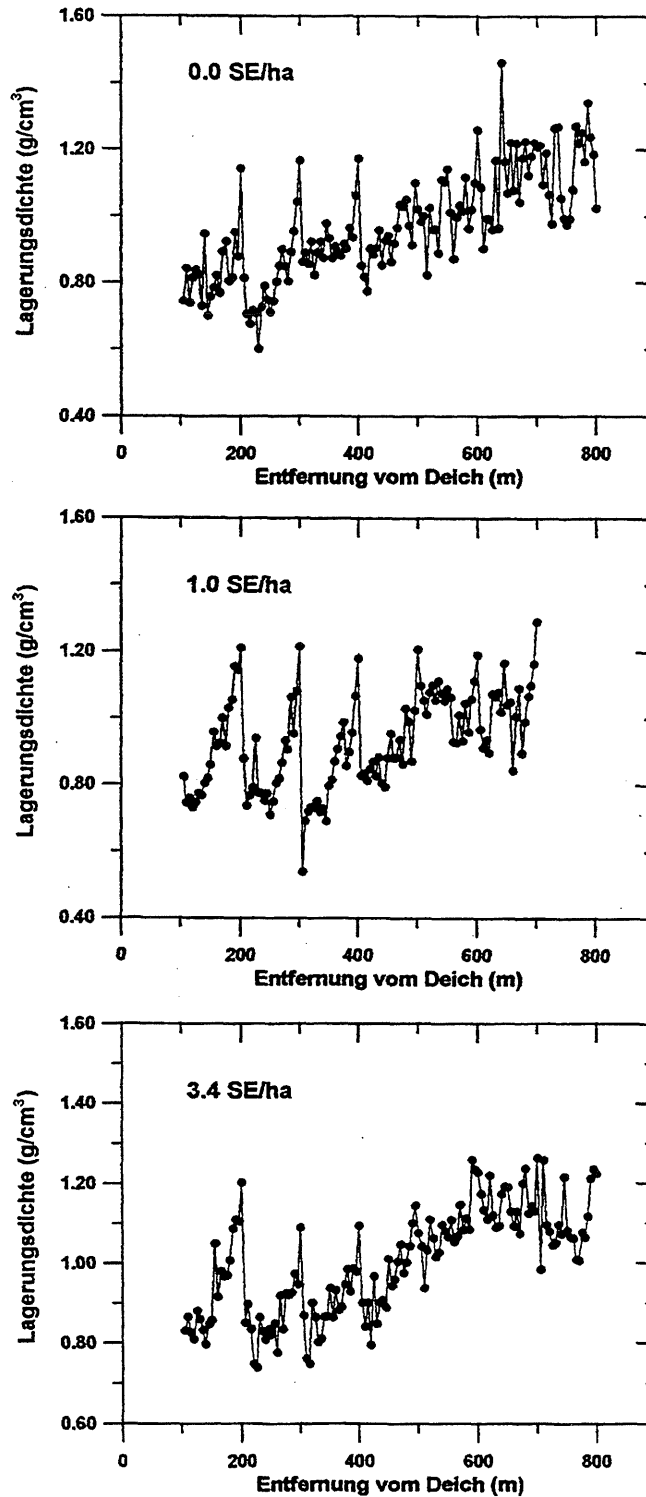


Abb. 3.27: Räumliche Verteilung der Lagerungsdichte, August 1994
(HORN/ZHANG, 1995, S. 89)

Unter dem Aspekt des Erosionsschutzes ist eine hohe Wasserleitfähigkeit von Vorteil. Eine geringe Wasserleitfähigkeit begünstigt die Vernässung und damit die Aufweichung des Bodens.

Die Folge ist eine leichtere Erodierbarkeit, so daß eine intensivere Entwässerung notwendig wird. Die Wasserleitfähigkeit sinkt mit steigender Beweidung, lediglich zwischen Nichtbeweidung und extensiver Bewirtschaftung besteht kein signifikanter Unterschied (HORN/ZHANG, 1995, S. 68). Der Beweidungseinfluß reicht bis in eine Tiefe von rd. 0,30 m, wobei die Untersuchungen von HORN/ZHANG (1995, S. 69) gezeigt haben, daß für den Oberboden die Auswirkung der Beweidung bezüglich der Wasserleitfähigkeit erst signifikant wird, wenn die Beweidungsintensität höher als 1,0 SE/ha ist.

Nach Untersuchungen von ERCHINGER ET AL. (1994, S. 113) kann eine Oberflächenerosion als Folge reiner Überströmung für breite Vorlandflächen mit einer gesicherten Oberflächenentwässerung als gering eingestuft werden. Auch Versuche mit Dauerwellenbelastung haben gezeigt, daß der Boden unabhängig von der Beweidung stabil genug ist, den Erosionskräften zu widerstehen (HORN/ZHANG, 1995, S. 46ff).

Durch Pflanzenbewuchs können frisch abgelagerte Sedimente, die anfangs eine geringe Erosionsfestigkeit haben, stabilisiert werden. Hierfür ist besonders der Andel geeignet, der in der Lage ist, seine Ausläufer durch die neue Sedimentationsschicht zu schieben und diese schnell zu durchwurzeln. Die Beweidung hat nur hinsichtlich der Sedimentation einen nennenswerten Einfluß, indem ausläuferbildende Pflanzenarten gefördert werden (GRUMBLAT, 1988, S. 190f). Die für die Sedimentation maßgebende mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist bei hohen, unbeeinflussten Pflanzenbeständen niedriger als bei einer kurz verbissenen Grasnarbe. Die nicht unwesentliche Resuspension wird jedoch von der Strömung direkt über der Sohle induziert, die bei kurzer Vegetation geringer ist.

Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 29ff, 110f) konnten keine allgemeingültigen Beziehungen zwischen Beweidungsintensität und Sedimentationsrate hergeleitet werden (Abb. 3.28). Zum einen waren die Meßzeiträume zu gering, zum anderen läßt sich verdichtetes sedimentiertes Material auf beweideten Flächen schwer mit locker abgelagertem Sediment auf ungenutzten Flächen vergleichen. Tendenzen ließen sich lediglich nach Wintern mit schweren Orkanfluten aufzeigen. Hier lagerte sich auch gröberes Material ab, wobei feine bereits sedimentierte Stoffe wieder resuspendiert wurden, und zwar bei niedrigem Bewuchs stärker als bei hohem, so daß Flächen mit hohem Bewuchs infolge fehlender Beweidung eine deutlich höhere Sedimentationsrate aufwiesen als Flächen mit stärkerer Nutzung.

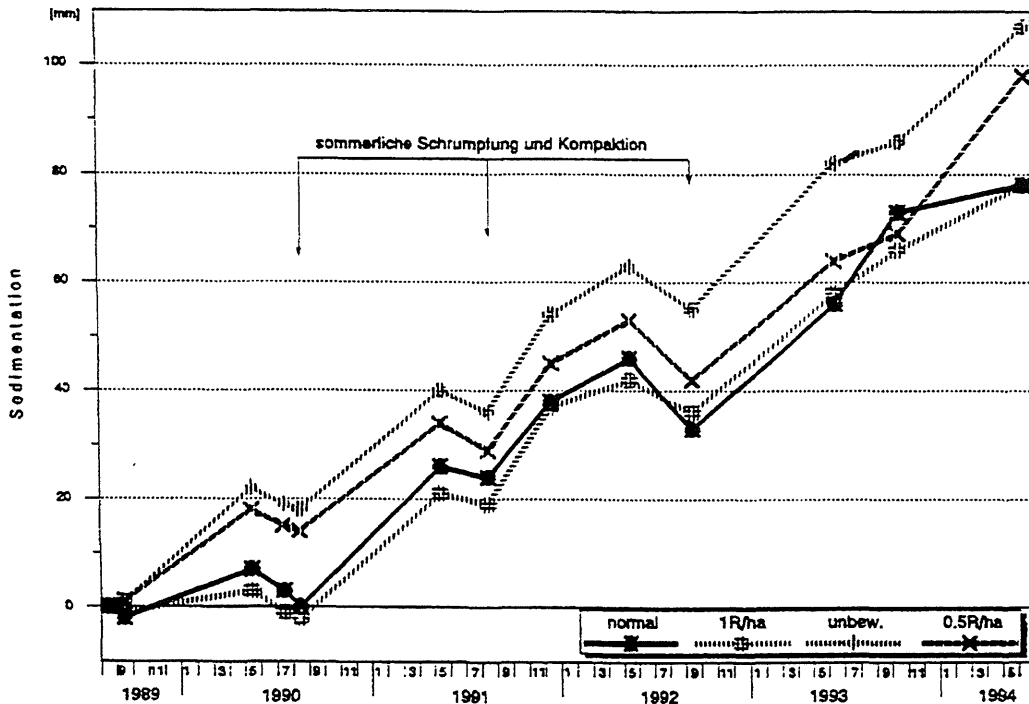


Abb. 3.28: Entwicklung des Vorlandniveaus auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ zur Definition „normal“: vgl. ERCHINGER ET AL., 1994, S. 17 (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 30)

Durch Beweidung wird einerseits das Nahrungsangebot von Vorländern beeinträchtigt, da es auch bei schwacher Beweidungsintensität zum Teil zu einem Ausfall von typischen Tier- und Pflanzenarten kommt. Andererseits werden die Brutplätze besonders für Brutvögel mit Anspruch an hoher Vegetation qualitativ wie quantitativ gemindert wenn nicht sogar vollständig vernichtet (HEYDEMANN, 1983/84, S. 258, 273ff). Direkte Schäden an der Vogelfauna durch Beweidung entstehen durch Gelege zerstörenden Viehtritt und durch die auf Brutvögel wirkende Unruhe, so daß diese ihr Gelege nicht wieder aufsuchen und eine erfolgreiche Brut verhindert wird.

Abschließend sei auf die sogenannte „Distelproblematik“ hingewiesen. Auf überwiegend mit Rindern beweideten Flächen entstehen auf den Kothaufen der Rinder Disteln, die sich sehr schnell ausbreiten (IRMLER ET AL., 1988, S. 244). Disteln wachsen aufgrund ihrer Salzunverträglichkeit ursprünglich nicht auf Salzwiesen und werden von Tieren auch nicht als Nahrungsquelle angenommen werden (NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1996, mdl.). Sie sind daher auf dem hohen Vorland als untypische und andere Pflanzengesellschaften verdrängende Pflanzen eher unerwünscht.

Die Untersuchung der Auswirkungen einer Vorlandbewirtschaftung war Thema zahlreicher Forschungsvorhaben und Projekte, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Optimierung

von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ jedoch nicht gesondert untersucht²².

²² Bezüglich der Thematik „Beweidung von Vorländern“ wird auf folgende Quellen verwiesen:

- BRONGERS, M. ET AL. Der Einfluß unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf die Salzwiesenvegetation in der Leybucht (Niedersachsen). Natur und Landschaft, Jg. 65, H. 6, 1990, S. 311-314.
- ERCHINGER, H.F. ET AL. Erosionsfestigkeit von Hellern. Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473, Norden, 1994. (unveröffentlicht)
- ESSELINK, P. „Nature management“ auf Festlandsalzwiesen: Beurteilung aus 10-jähriger Erfahrung. Vortrag im Rahmen des Workshops „Deichvorlandsicherung und Salzwiesenmanagement“ am 21./22.2.1995 in Norden. (unveröffentlicht)
- HORN, R.
ZHANG, H. Untersuchungen zur Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. Zwischenbericht 1992. Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung und Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ, Büsum) der Universität Kiel, 1992. (unveröffentlicht)
- HORN, R.
ZHANG, H. Untersuchungen zur Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. Zwischenbericht 1993. Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung und Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ, Büsum) der Universität Kiel, 1993. (unveröffentlicht)
- HORN, R.
ZHANG, H. Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein. Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung und Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ, Büsum) der Universität Kiel, 1995. (unveröffentlicht)
- KEMPF, N. Wieviele Schafe sind's denn nun? - Salzwiesenbeweidung in Schleswig-Holstein. Wattenmeer International, H. 3. 1995, S. 11-13.
- KEMPF, N. ET AL.
(Red.) Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur? Internationale Fachtagung zu Perspektiven für Schutz und Pflege von Salzwiesen im Wattenmeer, Tagungsbericht 1, WWF-Deutschland, 2. Auflage, 1988.
- KIEHL, K.
STOCK, M. Natur- oder Kulturlandschaft? Wattenmeersalzwiesen zwischen den Ansprüchen von Naturschutz, Küstenschutz und Landwirtschaft. In: LOZÁN, J.L. ET AL. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer, Blackwell, Wissenschafts-Verlag, Berlin, 1994.
- LAFRENZ, P. Über Pflege und Nutzung des Anwachsens und der Deiche an der Dithmarscher Küste. Die Küste, Jg. 6, H. 2, 1957, S. 94-129.

3.7.7 Aktuelle Managementkonzepte

Im Hinblick auf die in den vorangegangenen Kapiteln sowie in Kapitel 3.7.3 hingewiesenen und aus Vorlandarbeiten resultierenden Konflikte wurde aktuell durch eine für die Westküste Schleswig-Holsteins eingerichtete Arbeitsgruppe „Vorland“ ein sogenanntes „Vorlandmanagementkonzept“ erarbeitet, welches einen Konsens der Interessen von Küsten- und Naturschutz darstellt (HOFSTEDE/SCHIRMACHER, 1996, S. 64f). Das Konzept basiert auf einem Leitbild zum Schutz der Salzwiesen: „Es ist gemeinsames Ziel von Küstenschutz und Naturschutz, vorhandenes Vorland zu erhalten und vor Schardeichen zu entwickeln. Die Maßnahmen zur Vorlandentwicklung sind, abhängig von den örtlichen Verhältnissen, möglichst naturnah auszuführen. Dort, wo es die örtlichen Gegebenheiten zulassen, wird auf technische Maßnahmen verzichtet (STOCK ET AL., 1996, S. I-22). Abbildung 3.29 stellt schematisch das schleswig-holsteinische Managementkonzept vor, welches neben der Differenzierung von natürlichen und künstlichen Vorlandbereichen bezüglich der Entwässerung zwischen den Berei-

-
- | | |
|---|---|
| LAFRENZ, P. | Seedeich- und Vorlandnutzung im Wandel der Zeit.
In: ZIETZ, W. (Hrsg.): Land aus dem Meer, 125 Jahre Wesselburener Koog / 100 Jahre Wesselburener Koog, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1963 / 1987, S. 84-90. |
| NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“ (Hrsg.) | Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer.
1992. |
| OVESEN, C.H. | Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region.
Proc. 2 nd trilateral Working Conference, Rømø, Denmark, Ministry of the Environment, The National Forestry Agency, 1990. |
| REISE, K. | Grazing on Sediment Shores.
In: JOHN, D.M. ET AL.: Plant-Animal Interactions in the Marine Benthos, The Systematics Association, Sonderheft Nr. 46, 1992, S. 133-145. |
| STOCK, M. | Salt Marshes in Schleswig-Holstein: From a Green Towards a Natural Succession.
Wadden Sea Newsletter, Nr. 1, Wilhelmshaven, 1993, S. 11-15. |
| STOCK, M.
HANSEN, D. | Grazing is Needed to Keep Salt Marshes.
Wadden Sea Newsletter, Nr. 2, Wilhelmshaven, 1993, S. 23-24. |
| ZANDER, R. | Nationalpark und Küstenschutz als Gemeinschaftsaufgabe von Ökologen und Ingenieuren.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, H. 75, 1994. |
| ZANDER, R. | Salzwiesenmanagement, Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“. Vortragskurzfassung zum Workshop „Deichvorlandsicherung und Salzwiesenmanagement“, Norden, 1995.
(unveröffentlicht) |
| o.V. | 4. Wissenschaftliches Symposium Ökosystemforschung Wattenmeer.
17. – 19. Mai 1994, Husum, 1994. |

chen des vorhandenen Vorlandes und des Vorlandes im Aufbau unterscheidet (Anl. A 3-4a und Anl. A 3-4b). Ferner ist ein umfangreiches Monitoring-Programm vorgesehen (MELFF, 1995, S. 5).

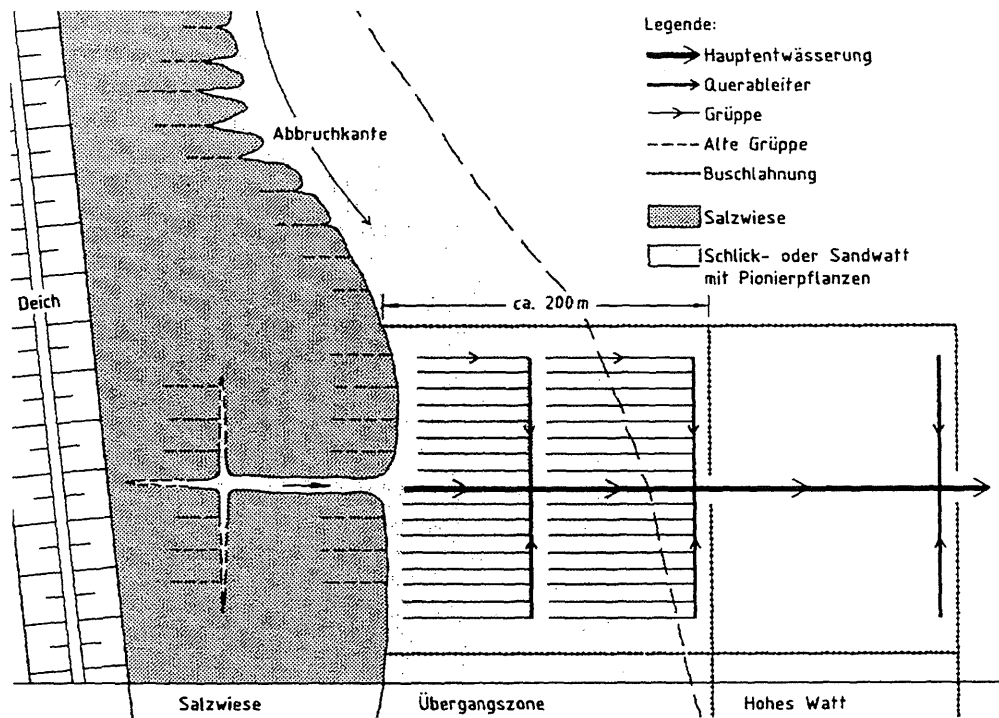


Abb. 3.29: Schematische Darstellung des schleswig-holsteinischen Managementkonzeptes (HOFSTEDÉ, 1996, S. 63)

4 Stand des Wissens und der Technik zum Thema „hydrologisch-morphologische Wechselwirkungen an Wattböden“

4.1 „Lahnungs-wirksame“ Parameter

Zu den relevanten, abiotischen und biotischen, die Wirkung der Lahnung beeinflussenden Parameter zählen

- Tide und Seegang und die daraus resultierenden Strömungen
- morphologische/sedimentologische Bedingungen (vgl. Kap. 3.3)
- Lahnungscharakteristika in Form der Geometrie, der Anordnung, der relativen Höhe und der Durchlässigkeit der Lahnung (vgl. Kap. 3.4)
- biologische, chemische und physikalische Einflüsse durch Flora und Fauna des Wattbodens (vgl. Kap. 3.5)
- Eisgang (vgl. Kap. 3.6)
- Vorlandmanagement mittels Begrüppung, Unterhaltung von Lahnungen, Beweidung (vgl. Kap. 3.7)

Unter „Wirkung“ ist in diesem Zusammenhang die Fähigkeit zu verstehen, Schwebstoffe und Sedimente im Wasser zur Ablagerung zu bringen, sie am Boden zu halten, zu konsolidieren und so zu einer Auflandung der Wattflächen zu führen. Die wirksamen Parameter stehen in enger Wechselwirkung zueinander (Abb. 4.1).

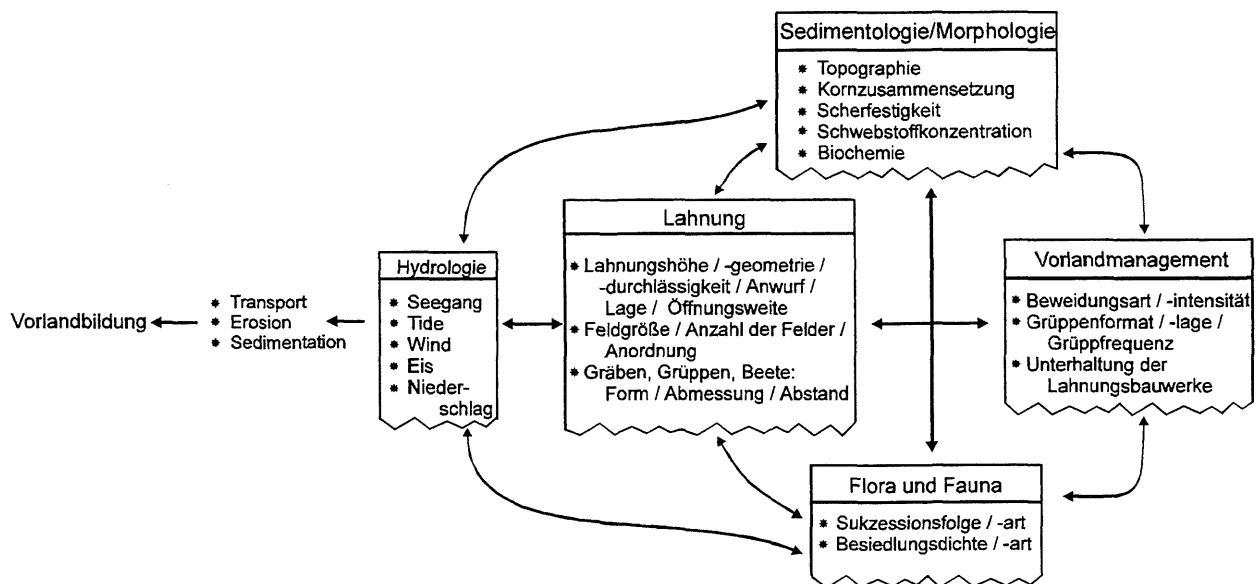


Abb. 4.1: Die Vorlandbildung beeinflussende Wechselwirkungen im Küstenvorfeld

4.2 Tide und Seegang

4.2.1 Sedimentations- und Erosionsprozesse von Wattsedimenten unter Tide- und Seegangseinfluß

Die wechselnden Wasserstände, resultierend aus den täglichen Tiden, aus Windstau und Windwellen, jahreszeitlichen Schwankungen sowie säkularen Änderungen und die damit verbundenen Strömungen bilden die Hauptbelastungen der Küsten und der Küstenschutzbauwerke (FÜHRBÖTER, 1974, S. 581).

Seegang wirkt im Gegensatz zur Tideströmung im wesentlichen erodierend, andererseits ist eine schnelle Verlandung ohne Seegang nicht denkbar: Vorrangig außerhalb der Lahnungsfelder sorgt eine starke Wellenbewegung für die Suspension der Sedimente. Der Wellenrichtung sowie der Umformung der Wellen über und hinter den Lahnungen bei hohen Tidewasserständen wird besondere Bedeutung beigemessen, denn die maximalen Orbitalgeschwindigkeiten können die Geschwindigkeit der Tideströmung weit übertreffen. Im Gegensatz zur Tidebewegung treten die periodischen und instationären Orbitalströmungen des Seegangs jedoch örtlich nur sehr kurzzeitig auf. Bereits WOHLBERG (1954, S. 49f) belegte durch seine Untersuchungen den Anstieg des Schwebstoffgehaltes im Wasser bei Sturmfluten (vgl. Kap. 3.1). Die Schwebstoffe können sich wiederum nur dann erneut absetzen, wenn die Wasserbewegung erheblich gedämpft wird. Lahnungsfelder, die als künstliche Sedimentfalle wirken, bilden derartige Ruhezonon.

Die aus den Tidebewegungen und dem Seegang im Bereich von Lahnungsfeldern resultierenden Strömungen treffen von der freien Wattoberfläche zunächst auf die, nicht zuletzt infolge von Druckschlägen gefährdeten Vorlandkanten, bevor sie entweder das Lahnungstor passieren oder, durch das Lahnungsbauwerk beeinflusst, in das Lahnungsfeld gelangen. Bei Wasserständen oberhalb der Höhenlage der Lahnungen findet auch eine Überströmung der Bauwerke statt. Innerhalb der Lahnungsfelder werden bei niedrigen Wasserständen durch die Anordnung der Entwässerungsgräben Strömungsrichtungen vorgegeben, bei höheren Wasserständen folgen die entstehenden Zirkulationsströmungen dem Verlauf der Gräben und Beete nur sohnah, so daß komplizierte dreidimensionale Strömungsmuster entstehen.

Messungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (0,30 m über Grund) im Bereich der niedersächsischen hohen Wattflächen, ergaben Werte von 0,15 m/s bis 0,30 m/s bei auflaufendem und 0,20 m/s bis 0,40 m/s bei ablaufendem Wasser. Die Maximalwerte der Flutstromgeschwindigkeit lagen bei 0,60 m/s, die Ebbstromgeschwindigkeit erreichte 0,80 m/s (THORENZ, 1991, S. 24). Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ zeigte

sich, daß die im Watt durch die Tide, die Winddrift und die von Wellen verursachten oszillierenden Wasserbewegungen hervorgerufenen und gemessenen Strömungen Beträge von 0,20 m/s nur selten überschreiten (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 43).

Im Bereich der Vorlandkante des Neßmerhellers (Ostfriesland) schwankten die Strömungsgeschwindigkeiten im Tideverlauf zwischen 0,10 m/s und 0,50 m/s und erreichten mitunter Spitzenbeträge von 0,60 m/s (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 43). Bei Wattflächen mit zum Neßmerheller vergleichsweise allmählichen Übergängen vom Watt zur Vorlandkante und höhergelegenen Geländeoberkanten fallen die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend geringer aus (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 46f).

Die Beschreibung der Sedimentations- und Erosionsprozesse von Wattsedimenten unter Strömungs- und Seegangseinfluß bereiten durch die speziellen Randbedingungen, wie sie im Wattenmeer, insbesondere in den Vorlandbereichen zu finden sind, erhebliche Schwierigkeiten. Zu den Randbedingungen zählen u.a. die sich im Verlauf einer Tide zyklisch ändernden Seegangs- und Strömungsverhältnisse, die örtlich und zeitlich variierende Zusammensetzung des Fluides und des transportierten Wattsediments sowie die Besiedlung der oberen Schichten des Wattbodens durch Kleinstlebewesen.

Durch Flut- und Ebbeströmungen, wie sie kontinuierlich wiederkehrend im Verlauf der Tide herrschen, unterliegt die Morphologie des Wattenmeeres ständigen Veränderungen. Unter bestimmten Bedingungen wird an der Sohle befindliches Material erodiert und mit dem Fluid transportiert, bis es durch eine verminderte Strömungsintensität z.B. in den Kenterphasen nicht mehr in Schwebelage gehalten werden kann und anderenorts sedimentiert. Hinzu kommt der Einfluß des Seegangs, der durch die vorhandenen Orbitalbewegungen der Wasserteilchen und möglicherweise entstehenden Turbulenzen ebenfalls dort zu Erosionen führen kann, wo dessen Einfluß bis an die Sohle reicht.

Transportprozesse von kohäsionslosen Sedimenten können heute mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden. Einen im ingenieur-technischen Bereich häufig angewandten Ansatz für den Beginn der Sedimentbewegung stellt die Lösung von SHIELDS (1936, z.B. in RAUDKIVI, 1982, S. 15). In diesem und anderen Ansätzen ist ein Korn in einem ebenen Bett Kräften aus dem Fluid (Trägheit, Reibung usw.) und der Gravitation ausgesetzt. Das in Abbildung 4.2 dargestellte Diagramm zeigt einen Zusammenhang zwischen dem Korndurchmesser d und der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Ist die Kornfraktion des Sediments bekannt, so läßt sich die zugehörige kritische Schubspannungsgeschwindigkeit u_{*c} bestimmen, bei der ein Erosionsbeginn zu verzeichnen sein wird.

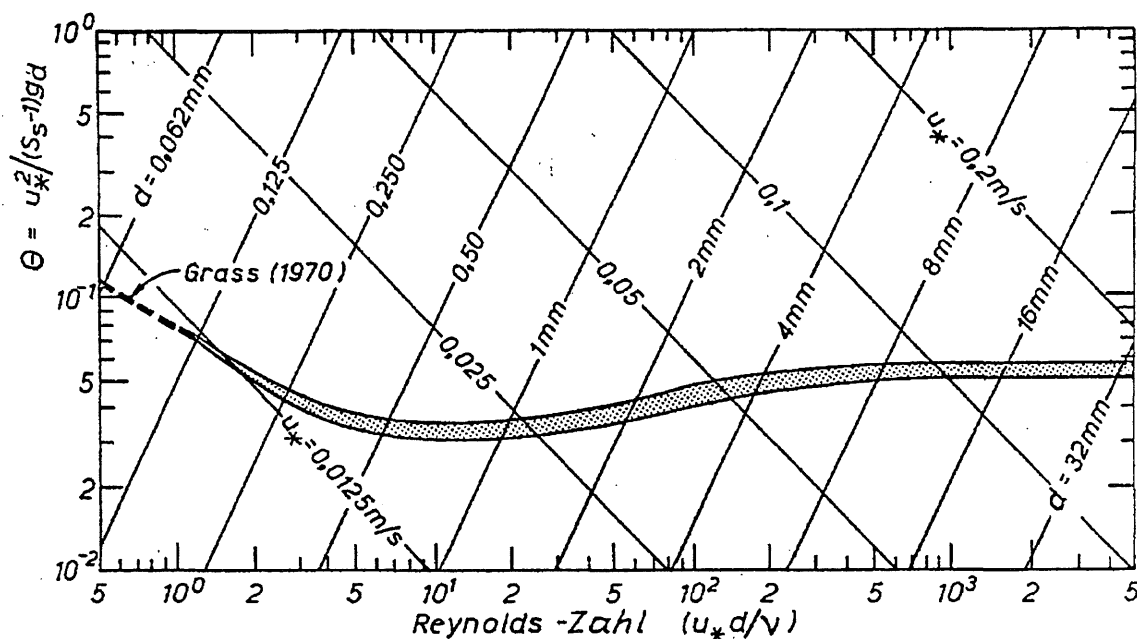


Abb. 4.2: SHIELDS-Diagramm
 (SHIELDS, 1936, in: RAUDKIVI, 1982, S. 15)

Des Weiteren existiert für kohäsionslose Sedimente eine Vielzahl weiterer Ansätze, die die Berechnung der Geschiebefracht einer Gewässersohle als sogenannte Geschiebetransportrate in dimensionsloser Form erlauben, die zwar für stationär-gleichförmige Strömungen entwickelt wurden, aber auch im Tidebereich zu brauchbaren Ergebnissen geführt haben. Hier seien z.B. die Formulierungen von EINSTEIN (1950, z.B. in: SCHRÖDER, 1985, S. 218f), MEYER-PETER/MÜLLER (1948, z.B. in: SCHRÖDER, 1985, S. 218), BAGNOLD (1956, z.B. in: SCHULZ, 1993, S. 17) und ENGELUND/FREDSØE (1974, z.B. in: SCHULZ, 1993, S. 17) genannt¹.

Im Gegensatz dazu stellt sich die genaue Beschreibung der Transportprozesse von kohäsiven Sedimenten als deutlich schwieriger dar; u.a., da kohäsive Sedimente im Gegensatz zu nicht-kohäsiven Sedimenten nicht als einzelne Körner, sondern als größere Elemente, die ein Spektrum der Kornverteilung über mehrere Korndurchmesser beinhalten, in Suspension transportiert werden (RAUDKIVI, 1982, S. 127f/ MAFF, 1993, S. 32ff). Die einzelnen Bestandteile des

¹ Zur allgemeinen Einführung siehe hierzu z.B.:

RAUDKIVI, A.J.	Grundlagen des Sedimenttransports. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1982.
SCHRÖDER, R.C.M.	Vergleichbarkeit von Geschiebetransportformeln. Wasserwirtschaft, H. 75, 1985, S. 217-221.
VOLLMERS, H. PERNECKER, L.	Beginn des Feststofftransportes für feinkörnige Materialien in einer richtungskonstanten Strömung. Die Wasserwirtschaft, H. 6, 1967
ZANKE, U.	Grundlagen der Sedimentbewegung Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.

Sedimente werden bei geringen Distanzen nicht mehr unabhängig voneinander transportiert, sondern beeinflussen sich über Kräfte der Anziehung und Abstoßung gegenseitig. Ursache sind Tonminerale, die in wechselnden Anteilen in den Sedimenten in Suspension vorhanden sind. Dadurch zeigen Tone und Tonsuspensionen in der Praxis oft unerwartete rheologische Eigenschaften (LAGALY, 1988, in: DÜRING, 1996, S. 8). Schon bei einem Gehalt von fünf bis zehn Massenprozent wird die durch die Tonminerale entstehende Kohäsion für die Transporteigenschaften des Sedimentes von großer Bedeutung (DYER, 1986, in: DÜRING, 1996, S. 8). So ändern sich ab bestimmten Sedimentkonzentrationen die rheologischen Eigenschaften des Fluid-Sediment-Systems derartig, daß durch die vorhandenen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen kohäsiven Partikeln das Fließen des Fluids von einem NEWTONischen Verhalten (einzelne, voneinander unabhängig transportierte Partikel) zu einem pseudoplastischen, nicht-NEWTONischen Verhalten übergeht. GÜVEN (1992, in: DÜRING, 1996, S. 8) erklärt dieses Verhalten durch sogenannte Flockenbildung der kohäsiven Bestandteile des Wattsediments. Die kohäsiven Teile bilden untereinander ein dreidimensionales Netzwerk, wodurch die Viskosität des Fluid-Sediment-Systems ansteigt.

Des Weiteren ist ein natürliches kohäsives Sediment sehr komplex zusammengesetzt, wodurch die mathematische Erfassung erschwert wird. Es besteht aus Kolloiden (in Dispersion), Tonmineralien (mit Durchmessern kleiner 5 µm), Sand, anderem körnigen und organischen Material in einer wässrigen Umgebung mit variierendem pH-Wert, sich ändernder Temperatur und Ionenstärke. Es erscheint als ausflockende Suspension mit Feststoffkonzentrationen von wenigen ppm bis annähernd einer Konzentration, die der sich ausbildenden Sohle entspricht. Zudem ändert sich bei bindigen Böden mit steigendem Wassergehalt die Plastizität von fest über plastisch zu flüssig.

Ein weiterer, die mathematische Erfassung erschwerender Faktor ist der Einfluß von Organismen und organischem Material auf die verschiedenen Transportprozesse. Daneben finden sich in einer lebenden Sohle ein starkes chemisches Gefälle, adhäsive Substanzen, Gasblasen sowie Rillen, Kanäle bzw. Röhren von Bodenorganismen, welche einen Einfluß auf die Erosionseigenschaften des Bodens haben (MONTAGUE, 1986, S. 252ff).

Wattsedimente sind im Verlauf der Gezeiten in unterschiedlichsten physikalisch-chemischen Bindungen vorzufinden. Der Grund dafür liegt in den sich periodisch verändernden Seegangs- und Strömungsverhältnissen während der aufeinanderfolgenden Tiden. VAN RIJN (1993, S. 11.9ff) unterscheidet dabei folgende Transportprozesse:

- Absinken/Absetzen (*settling*)
- Ablagerung (*deposition*)
- Konsolidierung
- Erosion

Diese Unterscheidung ist u.a. auch bei PARKER (1986, S. 273) wiederzufinden. PARKER (1986) entwickelte ein Modell, welches die Vorgänge bzw. Zusammenhänge aufzeigt, die vom frei beweglichen (mobilen) Sediment bis hin zur auskonsolidierten Sohle auftreten können. Eine schematische Darstellung dieses Modells ist in Abbildung 4.3 zu finden. Ein wichtiger Aspekt, der hieraus entnommen werden kann, ist der zyklische Transfer von Material.

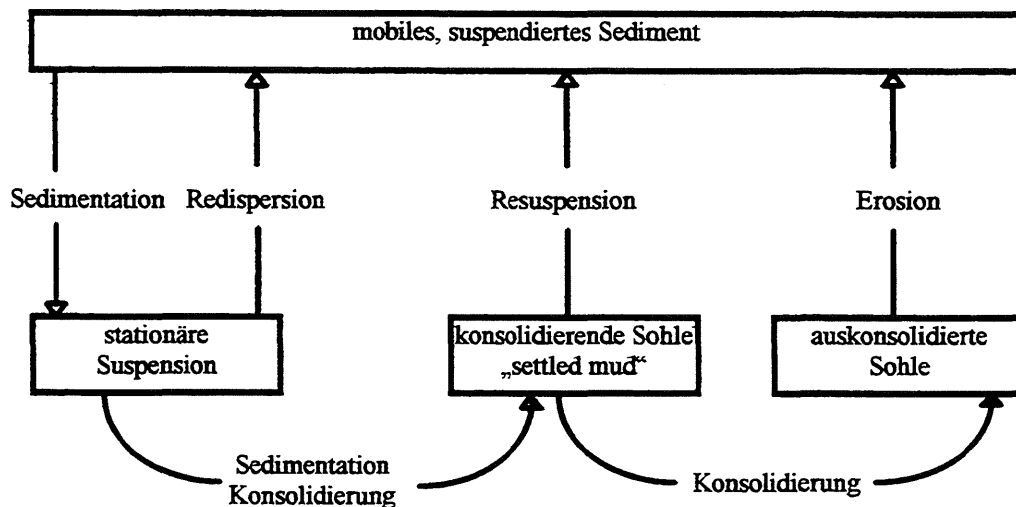


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Transportvorgänge von der mobilen Suspension bis zur auskonsolidierten Sohle (PARKER, 1986, S. 273)

In Abschnitten höherer Strömungs- und Wellenintensitäten kann das Sediment in Schwebelage gehalten werden, und es bewegt sich frei unter dem Einfluß der aus der Wasserbewegung entstehenden Kräfte. PARKER (1986, S. 273) spricht hier von einer mobilen Suspension.

Hat sich die Turbulenzintensität der Strömung so verringert, daß die auf die Sedimentpartikel wirkenden Gravitationskräfte nicht mehr ausgeglichen werden können, beginnt das Sediment abzusinken. Aufgrund der zwischen den kohäsiven Tonpartikeln wirkenden Anziehungskräfte formen diese mit zunehmender Konzentration durch den Absetzprozess lose Ansammlungen, die im allgemeinen als Flocken bezeichnet werden. Mit zunehmender Flockengröße steigt auch die Sinkgeschwindigkeit im Vergleich zu einem einzelnen Teilchen an. Im weiteren Verlauf des Absetzvorgangs beginnen die Flocken oberhalb einer bestimmten Konzentration sich gegenseitig zu behindern. Die Sinkgeschwindigkeit nimmt deutlich ab. Ist dadurch keine horizontale Bewegung, sondern nur noch ein vertikales Absetzen mit stark verminderter Sinkgeschwindigkeit mehr möglich, bezeichnet PARKER (1986, S. 273) diesen Abschnitt des Transportprozesses als stationäre Suspension.

Durch Strömungen und Welleneinwirkungen oder durch infolgedessen induzierte Turbulenzen können Flockenansammlungen wieder aus der stationären Suspension in die mobile Suspension herausgetragen werden. Das Material, welches die Sohle erreicht, wird unter seinem Eigengewicht immer weiter verdichtet, bis eine zunächst Kartenhaus-ähnliche Struktur unter der zunehmenden Auflast zusammenbricht. Unterstützt wird dieser Vorgang u.a. durch die Anziehungskräfte, die zwischen den kohäsiven Bestandteilen des Wattsedimentes herrschen. Das in den Hohlräumen eingeschlossene Porenwasser wird während dieses Vorgangs herausgedrückt. Die Verdichtung des abgelagerten Sedimentes durch Eigengewicht unter Abscheiden des Porenwassers wird als Konsolidierung bezeichnet.

Die Konsolidierung der jüngeren Ablagerungen kann solange fortschreiten, wie Strömungen und Wellen und daraus resultierende Turbulenzen nicht stark genug sind, um das Sediment zu erodieren. Dieses schließt nicht nur die Kenterphase zwischen Flut- und Ebbeströmungen ein, sondern auch die Zeit, in der das Watt während der Ebbephase nahezu trockengelegt wird. Die beginnende Konsolidierung des kohäsiven Sedimentes führt zu einer gewissen Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Erosion, so daß ein Teil des abgelagerten Sedimentes auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen nicht resuspendiert werden kann und die Sohlmächtigkeit in geringem Maß zunimmt. Diesen Bereich erhöhter Erosionsstabilität bezeichnet PARKER (1986, S. 276) als *settled mud* bzw. als *settled bed*, also einen sich absetzenden Schlamm oder Schlick. VAN RIJN (1993, S. 11.1f) definiert diesen Schlick als Fluid-Sediment-Gemisch bestehend aus Salzwasser, Sand, Tonmineralien und organischem Material. Dieser Teil der Ablagerung kann auskonsolidieren, bis die dichteste Lagerung erreicht ist. Diese erosionsstabileren Sohlen können jedoch durch ausreichend große Scherbeanspruchungen erodiert und resuspendiert (*entrainment*) werden. Damit schließt sich der o.g. Materialkreislauf.

4.2.2 Einfluß der Tide auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden

Mit dem Einlaufen der Tidewelle in den Vorlandbereich verringert sich die im Seebereich (Tief) herrschende Strömungsgeschwindigkeit des Flutstroms (Abb. 4.4, Pkt. 1), so daß sich mitgeführte Schwebstoffteilchen absetzen können (Abb. 4.4, Pkt. 2 und 3). Der Ebbestrom ist in der Regel zu schwach, um bereits abgelagerte Schwebstoffteilchen zu resuspendieren. Gefälleströmungen, die beim „Leerlaufen“ des Watts entstehen, können diese jedoch in tiefer gelegene Bereiche hineintransportieren (Abb. 4.4, Pkt. 4 und 5). Infolge der großen Wassertiefen in diesen Bereichen können die Schwebstoffteilchen bis zum Einsetzen der nächsten Flut nicht zum Boden absinken (Abb. 4.4, Pkt. 6) und werden während der nächsten Flutstromzeit wieder auf

das Watt transportiert (Abb. 4.4, Pkt. 7). Sinkt es dort ab, wurde es während einer Tide die Strecke 3 bis 8 landeinwärts bewegt (SRU, 1980, S. 28).

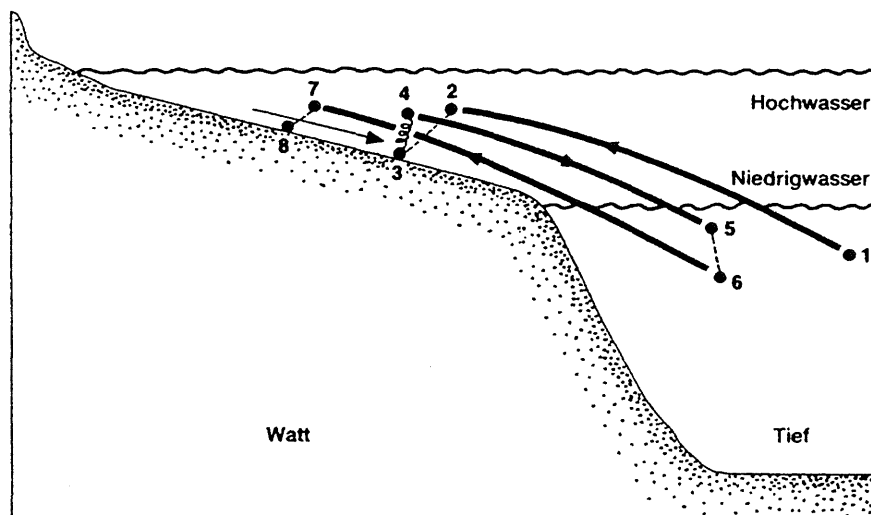


Abb. 4.4: Transportstrecke eines Schwebstoffteilchens
(nach: HICKEL, 1979, in: SRU, 1980, S. 29)

Wird die für ein Schwebstoffteilchen transportkritische Geschwindigkeit unterschritten, so sedimentiert es nicht vertikal an einem Ort, sondern unterliegt dem sogenannten „*settling lag effect*“² und wird, bis es den Grund erreicht, noch in der Strömung mittransportiert. Zwischen der Strömungsgeschwindigkeit v_1 , bei der noch eine Sedimentation eines Schwebstoffteilchens möglich ist und der Geschwindigkeit v_2 , die notwendig ist, um das Teilchen wieder vom Boden zu lösen, existiert der sogenannte „*scour lag effect*“³ (mit: $v_1 > v_2$), der mit abnehmender Korngröße steigt. Je kleiner der Korndurchmesser des betrachteten Teilchens ist, desto geringer wird auch die Geschwindigkeit v_1 bei der es sedimentiert. Daher bleiben kleinere Teilchen eine größere Anzahl an Tiden in verschiedenen Wasserschichten in Schwebelage, bevor sie sich endgültig ablagern und erreichen somit verstärkt den deichnahen Vorlandbereich.

Die Strömungen während einer Tide erzeugen im halbtäglichen Wechsel sowohl Erosionen als auch Sedimentationen. Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten, Konzentrationen sowie die Transportart des Sedimentes während einer Tide.

Nach NICHOLS (1986, in: DÜRING, 1996, S. 46) ist ein signifikantes Merkmal der zeitlichen Variationen einer Tide, daß das Maximum der Suspensionskonzentrationen dem Geschwindigkeitsmaximum der Strömungen meist um 30 Minuten bis 90 Minuten versetzt auftritt (ΔT_1).

² *settling lag effect* = Ablagerungsverzögerung

³ *scour lag effect* = Aufnahmeverzögerung

Ein weiterer zeitlicher Versatz ist zwischen dem Bereich verminderter Strömungsgeschwindigkeiten und der Sedimentation (ΔT_2) zu finden (Abb. 4.5). Die Strömung ist also erst nach gewisser Zeit derart beschleunigt, daß Material resuspendiert und durch Turbulenzen in obere Schichten der Strömung transportiert werden kann, als auch derart verzögert bis sich das suspendierte Material bei verminderter Strömungsintensität absetzt. Es sind demnach Prozesse, die durch einen vertikalen Austausch bzw. Sinkgeschwindigkeiten beschrieben werden.

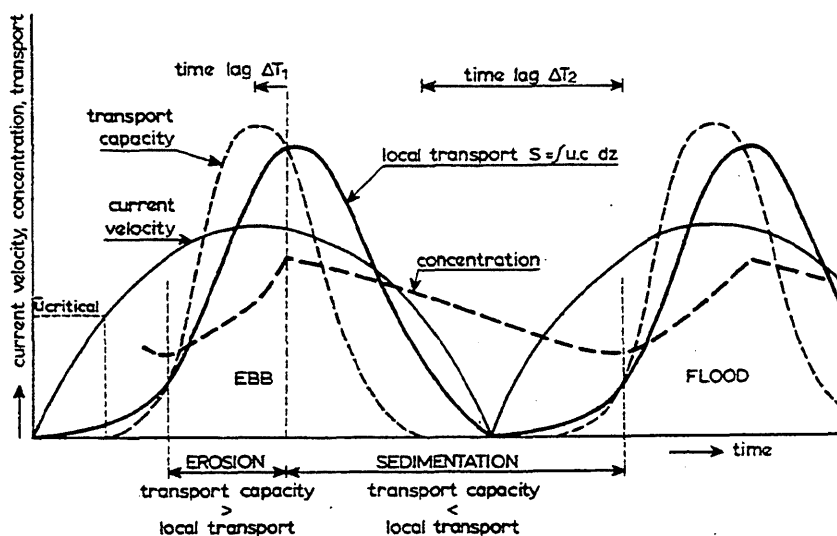


Abb. 4.5: Schematische Darstellung der Abhängigkeit zwischen Suspensionskonzentration und Strömungsgeschwindigkeit mit den dazugehörigen Transportprozessen im Verlauf einer Tide (VAN RIJN, 1993, S. 10.3)

Sedimentations- und Erosionsraten werden ebenfalls durch die halbmonatliche Ungleichheit der Tide beeinflusst. Von Nipptide zu Springtide nimmt der Tidehub langsam zu, und die Tideströmungen werden zusätzlich beschleunigt. Durch die vergrößerte Belastung der Sohle erhöht sich die Erosionsrate, und es wird mehr suspendiertes Material transportiert. Während der Nipptiden wird durch verminderte Strömungsgeschwindigkeiten weniger Material aus der Sohle resuspendiert.

4.2.3 Einfluß des Seegangs auf den Sedimenttransport kohäsiver Böden

Unter der Einwirkung von Wellen ergeben sich Strömungsprobleme, die für jeden Ort und über die Tiefe variierend instationär sind. Zudem ändert sich die Richtung der Strömung periodisch, und das Wasser wird periodisch beschleunigt und verzögert. Anders als bei stationärer Strömung werden Sedimente unter Welleneinwirkung nicht erst bei anhaltender Überschreitung einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit, sondern durch die kurzzeitig, periodisch auftretenden entsprechend hohen Strömungsgeschwindigkeiten von der Sohle gelöst und in Suspension gebracht. Sie können daher auch bei sehr schwach ausgebildeten Strömungen transportiert werden, das heißt, daß das Sediment nicht durch die Transportgeschwindigkeit der Strömung in Bewegung gesetzt zu werden braucht (RAUDKIVI, 1982, S. 95).

Wenn Wellen in Übergangs- oder Flachwasserbereiche einlaufen, beeinflusst die Sohle die Wellenbewegung. Effekte wie Shoaling, Refraktion, Sohlreibung, Perkolation und Prozesse wie Erosion, Transport in Suspension, Ablagerung und Konsolidierung sind für die Umgestaltung der Wellen als Resultat der Wellen-Boden-Interaktion von Bedeutung (HORIKAWA, 1977, S. 162ff / YAMAMOTO/TAKAHASHI, 1985, S. 63). In Abhängigkeit von den Wellenparametern (Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellensteilheit, Wassertiefe) als hydraulische Belastungsparameter und vom Konsolidierungsgrad des Bodenmaterials, das heißt von dessen Zusammensetzung und Vorgeschichte (KENDRICK/WATERS, 1987, S. 1388 / VAN RIJN/LOUISSE, 1987, S. 1528). kann der Seegang eine Verflüssigung der oberen Schicht des Meeresbodens induzieren und somit eine dickflüssige, aus Schwebstoffen bestehende Schicht, eine sogenannte *Fluid-Mud*-Schicht erzeugen (ZIDAN/LIN, 1989, S. 321). Die Grenzwerte der Geschwindigkeit für das Auftreten einer *Fluid-Mud*-Schicht liegen nach Aussagen der Literatur deutlich über den Grenzen für den Beginn der Bewegung des einzelnen Sedimentpartikels (ZANKE, 1982, S. 173 / SLEATH, 1984, S. 279).

Unter der dynamischen Belastung durch den Seegang treten gekoppelte Bewegungen der festen und der fluidalen Phase des marinen Bodens auf. Der Seegang erzeugt eine entsprechend der Wellenperiode oszillierende Schubspannung auf die Sedimentpartikel am Meeresboden. Die Orbitalbewegungen des Wassers setzen sich in der verflüssigten⁴ und unkonsolidierten Sedimentoberfläche (*Fluid Mud*) fort. Eine signifikante Dämpfung der Welle sowie eine erhöhte Resuspension des Sediments sind die Folgen. Die Orbitalamplitude innerhalb der Sedimentschicht wird durch die rheologischen Eigenschaften, also durch die Viskosität des Sediments

⁴ Für den speziellen Fall der Verflüssigung kohäsiver Sedimente infolge Seegangs wird beispielhaft auf die Arbeit DE WITS (1995) verwiesen.

und den Grad der Konsolidation beeinflusst. Folglich wird die Erosionsstabilität geschwächt und die Erosionsrate erhöht (YAMAMOTO/TAKAHASHI, 1985, S. 64)⁵.

4.3 Sedimentation und Erosion

4.3.1 Grundgleichung für den Schwebstofftransport

Transportprozesse von Schwebstoffen, die quantitativ beschrieben werden sollen, beinhalten Sedimentanhäufungen, Absetzvorgänge, Sedimentablagerungen, Konsolidierung, Erosion und dispersiven Transport. Diese Vorgänge werden in einem mathematischen Modell gewöhnlich durch Quell- und Sinkterme sowie Terme, die den Transport wiedergeben, beschrieben. Eine mögliche Darstellungsform ist die advective-dispersive Gleichung für den Massentransport. Gleichung 4-1 stellt sie in allgemeiner dreidimensionaler Form (TEISSON/FRITSCH, 1988, in: ZHU, 1993, S. 2.13) dar. Je nach Aufgabenstellung läßt sich Gleichung 4-1 über Annahmen vereinfachen (z.B. mittlere Geschwindigkeiten, Betrachtung in zwei Dimensionen etc.), so daß einzelne Terme entfallen.

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t}}_I + \underbrace{u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z}}_{II} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial c}{\partial z})}_{III} + S \quad (4-1)$$

Mit:

- I Änderungsrate
- II konvektiver Transport der Strömung
- III diffuser Transport der Turbulenz
- IV Quell- und Sinkterm

- c Suspensionskonzentration [kg/m³]
- u, v, w Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit in x-, y- und z-Richtung [m/s]
- D_x, D_y, D_z Diffusionskoeffizient in x-, y- und z-Richtung [m²/s]
- S Sink- und Quellterm (S = - q_d + q_e) [kg/(m³·s)]
- q_e Erosionsrate [kg/(m³·s)]
- q_d Sedimentationsrate [kg/(m³·s)]

⁵ Einen aktuellen Ansatz stellt beispielsweise die Arbeit WATANABES und JIANGS (1995) vor. WATANABE/ JIANG (1995) entwickelten ein empirisches rheologisches Modell zur Beschreibung des Verhaltens von kohäsivem Material unter Seegangseinwirkung.

4.3.2 Der Sedimentationsprozeß

4.3.2.1 Ausflockung von Schwebstoffen

Die Ausflockung von Schwebstoffen erfordert Kollisionen, hervorgerufen durch eine entsprechend hohe Bewegungsenergie der einzelnen Teilchen. ONGLEY ET AL. (1992, in: DÜRING, 1996, S. 19) nennen dazu drei maßgebende Kollisionsmechanismen:

- BROWNSche Molekularbewegung
- Kollision in einem turbulenten Strömungsfeld oder unter dem Einfluß von Wellen (*fluid shear*)
- Kollision durch unterschiedlich hohe Sinkgeschwindigkeiten der Tonaggregate (*differential settling*); hierbei treffen größere Ansammlungen infolge höherer Sinkgeschwindigkeiten auf kleinere oder einzelne Partikel, überwinden dadurch die abstoßenden Kräfte und gehen mit ihnen eine Verbindung ein.

Die Größe der Flocken hängt von der Kollisionsfrequenz und damit erheblich von der Konzentration sowie der Größe der Kohäsionskräfte ab (BURT, 1986, S. 128). Die Kollisionsfrequenz berechnet KRONE (1962, S. 13) über die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zwischen zwei Teilchen. Dabei wird zwischen der Kollisionsfrequenz aufgrund der BROWNSchen Molekularbewegung (Glg. 4-2)

$$I = \frac{4 \cdot k_{\text{Boltzmann}} \cdot T' \cdot n_{\text{Ton}}}{3 \cdot \mu} \quad (4-2)$$

und einer Kollisionsfrequenz aufgrund örtlicher Schubspannungen, resultierend aus der Wasserbewegung, unterschieden (Glg. 4-3).

$$J = \frac{4}{3} \cdot n_{\text{Ton}} \cdot R^3 \cdot \frac{du}{dz} \quad (4-3)$$

Mit:

I	Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund BROWNScher Molekularbewegung [1/s]
J	Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund örtlicher Schubspannungen [1/s]
$k_{\text{BOLTZMANN}}$	BOLTZMANN-Konstante = $1,3803 \cdot 10^{-25}$ [J/K]
T'	absolute Temperatur [K]
n_{Ton}	Anzahl der Tonteilchen pro Volumeneinheit [$1/\text{m}^3$]
μ	dynamische Viskosität [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
R	Kollisionsradius (Annahme des zweifachen Partikelradius') [m]
du/dz	örtliche Größe der Schubspannung [1/s]

Mit zunehmender Konzentration steigt die Kollisionsrate an, wodurch größere Flocken gebildet werden können, die sich mit anwachsendem Gewicht schneller absetzen. Die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit läßt sich in Abhängigkeit von der Konzentration in drei Bereiche unterteilen (MEHTA, 1986, S. 303ff):

1. Bei sehr kleinen Konzentrationen ($< 10 \text{ mg/l}$), in denen eine Ausflockung aufgrund zu seltener Kollisionen vernachlässigbar klein ist, läßt sich die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen mit Hilfe des STOKESSchen Gesetzes berechnen. Dieser Fall liegt in der Praxis im Umgang mit kohäsiven Sedimenten jedoch nur selten vor und ist daher weniger relevant. Es gilt:

$$w_s = \frac{g \cdot d^{*2}}{18 \cdot \mu} \cdot (\rho_s - \rho_w) \quad (4-4)$$

Mit:

w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
g	Erdbeschleunigung [m/s^2]
d^*	Korn- bzw. Partikeldurchmesser [m]
μ	dynamische Viskosität [$\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$]
ρ_s	Dichte der Partikel [kg/m^3]
ρ_w	Dichte des Wassers [kg/m^3]

2. Bei mäßigen Konzentrationen von 10 mg/l bis 10.000 mg/l (VAN RIJN, 1993, S. 11.10) erfolgt durch die Ausflockung der Tonteilchen mit zunehmender Konzentration c eine Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit w_s . In diesem Fall ergibt sich folgende Beziehung zwischen der Sinkgeschwindigkeit w_s und der Konzentration c (vgl. Abb. 4.6 und Taf. 4.1):

$$w_s = k^* \cdot c^{n^*} \quad (4-5)$$

mit:

w_s	Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
k^*	sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient [m^3/kg]
c	Suspensionskonzentration [kg/m^3]
n^*	Potenz, Konstante [–]

ZHU (1993, S. 29) gibt Versuchsergebnisse von KRONE (1962) wieder, der bei Suspensionskonzentrationen kleiner 10.000 mg/l Größen für k^* ($= 0,011$) und n^* ($= 4/3$) erhält. BURT (1986, S. 144ff) bestätigt nach Feldmessungen in der Themse die Proportionalität von Sinkgeschwindigkeit und Konzentration potentiert mit $4/3$. Jedoch weicht der Vorfaktor k^* von KRONES Ergebnissen ab. Nach PARTHENIADES (1986, S. 225ff) ändert sich k^* je nach Zusammensetzung des Sedimentes, während sich n^* auch nach anderen Autoren zu annähernd $4/3$ ergibt. MEHTA (1986, S. 303) und VAN RIJN (1993, S. 11.10) geben für n^* einen Bereich von 1 bis 2 an.

3. Bei Konzentrationen größer 10.000 mg/l bilden die Flocken im sogenannten *Fluid Mud* ein kontinuierliches Netzwerk, aus dem das vorhandene eingeschlossene Porenwasser nur eingeschränkt nach oben entweichen kann, da es sich während des Verdrängungsprozesses einen Weg durch die Flockenzwischenräume bahnen muß. Aufgrund dieser Vorgänge ist die

Sinkgeschwindigkeit in diesem Bereich deutlich reduziert. Dieser Prozeß wird als gehemmtes oder behindertes Absetzen (*hindered settling*) bezeichnet (KRONE, 1962, S. 23). Die BROWNSche Molekularbewegung spielt dort für die Kollisionsprozesse eine immer größere Rolle. In vielen praktischen Fällen hat sich in diesem Bereich die empirische Gleichung 4-6 als ausreichend genau erwiesen:

$$w_s = w_{so} (1 - \alpha \cdot c)^\beta \quad (4-6)$$

mit:

- w_s Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
- w_{so} Referenzsinkgeschwindigkeit eines einzelnen Partikels (entspricht i.w. Gl. (4-4)) [m/s]
- α sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient [m^3/kg]
- c Suspensionskonzentration [kg/m^3]
- β Koeffizient (= 3 bis 5; VAN RIJN, 1993, S. 10.11) [-]

An dieser Stelle sei auch auf die aktuellsten Arbeiten MEHTAS verwiesen (z.B. MEHTA, 1996), die eine weitere empirische Lösung (Glg. 4-7) zur Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit in sogenannten *hindered settling*-Bereichen vorstellen.

$$w_s = \frac{a' \cdot c^{n'}}{(c^2 + b'^2)^{m'}} \quad (4-7)$$

mit:

- w_s Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]
- a' sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient [-]
- c Suspensionskonzentration [kg/m^3]
- n' sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (= 0,8 bis 2,5; MEHTA, 1996, in: ABDEL-MAWLA, 1997, S. 6) [-]
- b' sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (=1 bis 10; MEHTA, 1996, in: ABDEL-MAWLA, 1997, S. 6) [-]
- m' sedimentspezifischer, empirischer Koeffizient (=1 bis 3; MEHTA, 1996, in: ABDEL-MAWLA, 1997, S. 6) [-]

KRONE (1962, S. 23) stellte fest, daß es ab einer Suspensionskonzentration von rd. 10 g/l zu einem behinderten Absetzen im sogenannten *Fluid Mud* kommt. KIRBY (1986, in: ZHU, 1993, S. 35) unterteilen diesen Bereich weiter in mobilen und stationären *mud* (vgl. Abb. 4.7). Letzterer weist keine horizontalen Geschwindigkeitsanteile mehr auf. Im Bereich des stationären *Fluid Muds* entsteht das vielleicht schwächste Gleichgewicht zwischen dem Eigengewicht, den bindenden Kräften an den Kontaktpunkten der Flocken und den Scherspannungen. Diese erste Ablagerung ist durch einen hohen Poren- und Wassergehalt sowie einer geringen Dichte gekennzeichnet (Abb. 4.7). Mit zunehmender Sedimentation nimmt der Druck auf tiefere Schichten zu, so daß es zu einer Neuformierung kommt. Die ersten Kontaktpunkte brechen auf und die Flocken formieren sich unter Abgabe von Porenwasser zu einem stabileren Gerüst mit einer größeren Anzahl an Kontaktpunkten, wodurch die Dichte der Flockenansammlungen

ansteigt (PARTHENIADES, 1986, S. 222). Wenn die Flocken eine solche Struktur ausbilden und sich weiter verdichten, wird das physikalische Verhalten durch Konsolidierungstheorien wie z.B. von GIBSON ET AL. (1967) oder BEEN/SILLS (1983) wiedergegeben.

	w_s	c	SEDIMENT
NEDECO (1965)	$1 \cdot 10^{-2}$ mm/s bis $3 \cdot 10^{-2}$ mm/s	$2 \cdot 10^2$ mg/l bis $1 \cdot 10^5$ mg/l	<i>Demerara silt</i>
OWEN (1970)	$2 \cdot 10^{-2}$ mm/s bis $7,5 \cdot 10^{-1}$ mm/s	$2 \cdot 10^2$ mg/l bis $3 \cdot 10^4$ mg/l	<i>Avonmouth mud</i>
VAN RIJN/LOUISSE (1987)	$1 \cdot 10^{-2}$ mm/s bis $1,5 \cdot 10^{-1}$ mm/s	$2 \cdot 10^2$ mg/l bis $1 \cdot 10^5$ mg/l	Kaolinit

Taf. 4.1: Beispiele mittlerer Sinkgeschwindigkeiten w_s in Abhängigkeit von der Konzentration c (nach: VAN RIJN/LOUISSE, 1987, S. 1520f)

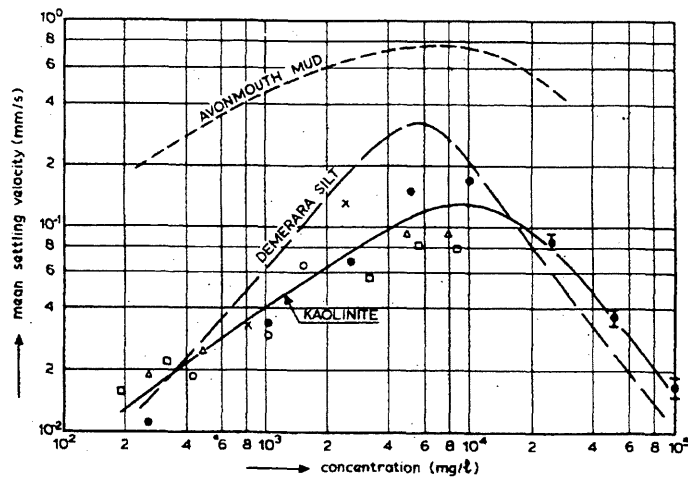


Abb. 4.6: Mittlere Sinkgeschwindigkeit w_s in Abhängigkeit von der Konzentration c (VAN RIJN, 1993, S. 12.3.1)

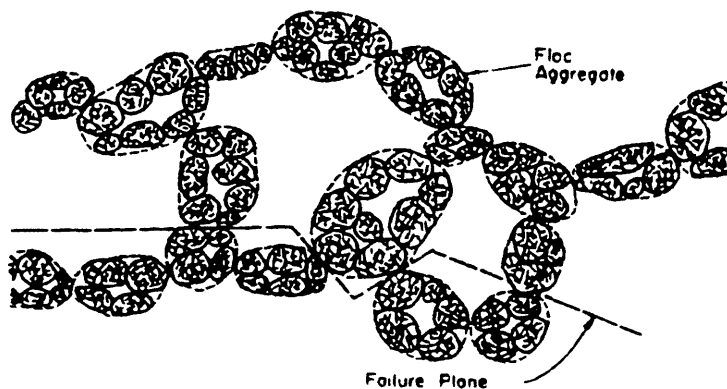


Abb. 4.7: Schematische Darstellung eines Netzwerkes aus Flocken in seinem schwächsten Zustand (PARTHENIADES, 1986, S. 222)

Nach LICK ET AL. (1992, in: DÜRING, 1996, S. 27f) sind bisherige numerische Berechnungen von Ausflockungsprozessen zwar von ihren Ansätzen her relativ einfach zu lösen, jedoch ist der Rechenaufwand und damit der Zeitbedarf, um zu Ergebnissen zu gelangen, sehr hoch. Die Ursache dafür liegt darin, daß bislang alle Zustände einer einzelnen Flocke numerisch beschrieben wurden und dadurch die Gesamtbeschreibung des Ausflockungsprozesses zu erheblichen Datenmengen führt, deren Auswertung sehr zeitaufwendig ist. Die Lösung dieses Problems besteht für LICK ET AL. (1992) darin, die Anzahl der einzelnen Zustände zu reduzieren, indem Flocken gleicher Größe gruppiert werden. So kann die Anzahl der zu berechnenden Zustände von einigen Tausend auf eine sehr kleine Zahl reduziert werden. Typisch sind nach LICK ET AL. (1993) zehn zu berechnende Zustände.

Wie auch bei anderen Modellen ist in diesem Modell die Erhaltung der Masse gewährleistet. Im Vergleich zu LICK ET AL. (1992) fehlt anderen Ansätzen häufig eine Betrachtung des Volumens. Während einer Kollision bleibt zwar die Masse erhalten, jedoch ändert sich das Volumen, da sich auch Hohlräume zwischen den Partikeln oder kleineren Flocken bilden können. Die mathematische Herleitung des numerischen Modells ist bei LICK ET AL. (1992) zu finden, während LICK ET AL. (1993) eine Zusammenfassung der Modelleigenschaften und eine allgemeine Beschreibung des Ausflockungsvorganges wiedergeben. Auf eine formelmäßige Wiedergabe des Ansatzes soll verzichtet werden.

Generell sind die Ansätze zur Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit in Anbetracht der großen Anzahl empirischer Koeffizienten (vgl. Gl. 4-5 bis 4-7) kritisch zu betrachten. Weitere Informationen zur Sinkgeschwindigkeit kohäsiven Materials können beispielsweise der neueren Arbeit NIELSONS (1992) entnommen werden. Für den speziellen und für den Vorlandbereich bedeutenden Fall, daß Salzwasser die Absetzvorgänge beeinflusst, sei hier beispielhaft auf die Publikation von RUNZE ET AL. (1989) verwiesen.

4.3.2.2 Konsolidierung von Schwebstoffen

Sediment wird in Suspension vom bewegten Wasser weitergetragen, bis eine so verringerte Strömungsintensität vorhanden ist, daß sich die einzelnen Partikel bzw. Flocken zur Sohle hin absetzen können. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Konzentration der Flocken. Ab einem bestimmten Zeitpunkt verhält sich das Sediment nicht mehr als einzelnes Partikel oder Flocke in einer Suspension, sondern es geht in ein frühes Stadium der Sohle über. In diesem Übergangsbereich entwickelt sich ein Rahmengebilde zwischen den Flocken, dem auch wirksame

Spannungen⁶ zugeordnet werden können. Dieses Gerüst ist sehr kompressibel, so daß noch mit vergleichsweise großen Verformungen gerechnet werden muß. Wenn weiteres Material sich an der obersten Schicht ablagert, wird der Zwischenraum durch das zusätzliche Gewicht unter Ausscheidung von Porenwasser aus den Hohlräumen der Flocken weiter verkleinert. Dieser Verdichtungsprozeß wird als Konsolidierung bezeichnet. Durch die in Wechselwirkung tretenden Flocken entsteht ein stabilisierender Effekt auf die Sohle gegenüber anstehenden Strömungen und Turbulenzen (SILLS/ELDER, 1986, in: DÜRING, 1996, S. 29).

MIGNIOT/BOULOC (1981, S. 635) unterscheiden beispielsweise fünf Phasen von der Sedimentation bis zur auskonsolidierten Sohle; zwei des Absetzens und drei der Konsolidierung (Abb. 4.8):

- | | |
|--------------------------|--|
| 0 Std. bis 0,1 Std.: | Flockenbildungsphase
Das suspendierte Material setzt sich durch Flockenbildung rasch ab.
Es entsteht eine feste Schicht. |
| 0,1 Std. bis 1,0 Std.: | Gehemmtes oder behindertes Absetzen
Eine Suspensionskonzentration von $c > 10$ g/l behindert das Absetzen der Schwebstoffe, da das Wasser infolge der starken Flockenbildung nicht leicht entweichen kann. Es bildet sich die sogenannte <i>Fluid Mud</i> -Schicht. |
| 1,0 Std. bis 10, 0 Std.: | 1. Konsolidierungsphase
Die Flockenstruktur bricht auf, das Porenwasser entweicht und die Sedimente beginnen zu konsolidieren. |
| 10 Std. bis 600 Std.: | 2. Konsolidierungsphase
Durch die Drainwirkung entweicht das Wasser nur langsam. |
| > 600 Std.: | 3. Konsolidierungsphase
Durch die Auflast der oberen Schichten wird eine zusätzliche Konsolidierung erreicht. |

⁶ In einem mit einer Suspension angefüllten Absetzzylinder kann die Suspensionskonzentration c [g/l], die Gesamtspannung σ [kN/m³], welche sich aus der Integration des Dichteprofiles ergibt und der Fluid- bzw. Porenwasserdruck u^* [kN/m³] bestimmt werden. Daraus errechnet sich die sogenannte wirksame Spannung σ' als Differenz aus der Gesamtspannung und dem Porenwasserdruck $\sigma' = \sigma - u^*$. Während in Suspensionen in der Regel keine wirksamen Spannungen auftreten, ist in einem herkömmlichen Boden die wirksame Spannung selten gleich Null (außer an der Oberfläche), da durch das Eigengewicht des Bodens eine Gesamtspannung erzeugt wird, die meistens größer ist als der Porenwasserdruck. Letzterer entspricht i.a. annähernd der hydrostatischen Druckverteilung und ist dadurch kleiner als die Gesamtspannung (SILLS/ELDER, 1986, in: DÜRING, 1996, S. 26). Daher kann die wirksame Spannung als physikalischer Parameter zur Festlegung des Übergangs zwischen einer sich absetzenden und der darüber liegenden Suspension dienen (BEEN/SILLS, 1983, in: DÜRING, 1996, S. 27).

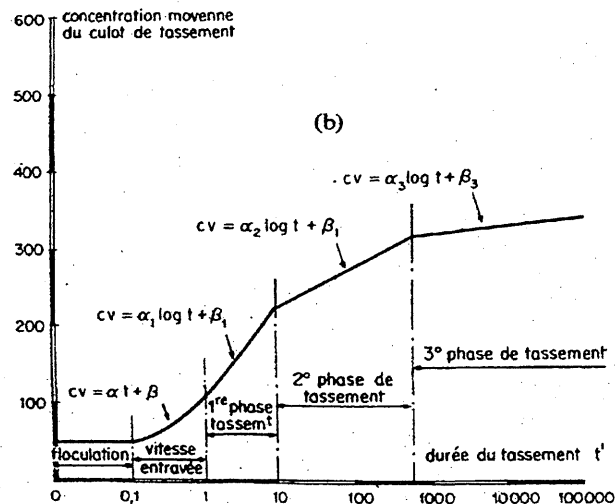


Abb. 4.8: Phasen des Absetzens und der Konsolidierung bindiger Böden
 (nach: MIGNIOT/BOULOC, 1981, S. 635)

Je höher der Konsolidierungsgrad und die Tiefe des Bodens, desto größer ist die Bodendichte und damit auch der Bodenfeststoffgehalt c_b . Der Bodenfeststoffgehalt c_b an der Sohle kann als Funktion der Trockenlegungs- bzw. der Konsolidierungsdauer t^* dargestellt werden (MIGNIOT/BOULOC, 1981, S. 635):

$$c_b = \alpha \cdot \log t^* + \beta \tag{4-8}$$

Mit:

- c_b Bodenfeststoffgehalt [kg/m^3]
- t^* Trockenlegungs- bzw. Konsolidierungsdauer [s]
- α Faktor in Abhängigkeit von der Korngröße der Partikel [-]
- β Faktor in Abhängigkeit vom Wassermedium [-]

Bisher wurde die Konsolidierung in Modellansätzen nur ungenügend berücksichtigt. Eine Übersicht der Arbeiten über die Konsolidierung kohäsiver Böden (Abb. 4.9) zeigt, daß die Arbeiten TERZAGHIS (1925), KYNCHS (1952) und GIBSONS ET AL. (1967) als grundlegend zu bezeichnen sind. KYNCH (1952) legt mit seiner Veröffentlichung „*A Theory of Sedimentation*“ den Grundstein der theoretischen Beschreibung der Absetzprozesse von Sedimenten. Ziel dieser Arbeit war es, zu zeigen, daß der Sedimentationsvorgang vollständig über die örtliche Konzentration beschrieben werden kann, ohne Genaueres über auf die Partikel wirkende Kräfte zu wissen. Dieser Ansatz ist, ebenso wie die Theorie TERZAGHIS, nur sehr eingeschränkt anwendbar. Das Modell von GIBSON ET AL. ist vergleichsweise allgemeingültiger. GIBSON ET AL.

(1967) beschreibt den Konsolidierungsvorgang von durchtränkten Lehmböden unter Berücksichtigung der möglichen Verformungen durch die vertikale Spannungsverteilung und bei variierender Permeabilität und Kompressibilität. Dabei wird zwischen dünnen und dicken Schichten unterschieden. Bei dünnen Schichten spielt für die Konsolidierung das Eigengewicht der Schicht im Vergleich zu anderen aufgebracht Lasten eine untergeordnete Rolle. Dagegen wird bei dicken Schichten die Konsolidierung durch das Eigengewicht verursacht, so z.B. bei einer Sohle, die mit fortlaufender Zeit durch Sedimentation an Mächtigkeit zunimmt.

Als weiterer Ansatz zur Beschreibung der Konsolidierung von Schwebstoffen sei der von BEEN/SILLS (1983) genannt. Er ermöglicht die Berechnung des Porenwasserdrucks u^* an einer beliebigen Stelle y und zum beliebigen Zeitpunkt t unter einer imaginären Auflast:

$$u^*(y^*, T^*) = 2 \cdot (\rho_S - \rho_F) \cdot z_0 \cdot \sum_n \frac{\cos(m^{\circ} \cdot \pi \cdot y)}{m^{\circ 2} \cdot \pi^2} \cdot \exp(-m^{\circ 2} \cdot \pi^2 \cdot T^*) \quad (4-9)$$

Mit:

u^*	Porenwasserdruck [KN/m ²]
y^*	Materialkoordinate [-]
T^*	Zeitfaktor [-]
ρ_S	Dichte des Sediments [kg/m ³]
ρ_F	Dichte des Fluids [kg/m ³]
z°	Koordinate der Schichtoberfläche [m]
n°	= 0, 1, 2, 3, ... [-]
m°	= 0,5 · (2 · n° + 1) [-]

Mit Gleichung 4-8 ergibt sich für $z = z_1$ (reale Sohloberfläche) ein resultierender Porenwasserdruck. Gemäß Laborversuchen sollte sich dieser jedoch zu Null ergeben. Daher wurde Gleichung 4-8 in folgender Weise modifiziert (BEEN/SILLS, 1983, in: DÜRING, 1996, S. 38):

$$u_1(z, t) = u^*(z, t) - u^*(z_1, t) \quad \text{für } 0 \leq z \leq z_1 \quad (4-10)$$

Mit:

u^*	Porenwasserdruck [KN/m ²]
u_1	Porenwasserdruck in der realen Sohle [KN/m ²]
z	vertikale Koordinate [m]
z_1	reale Sohloberfläche [m]
t	Zeit [s]

Eine mögliche Darstellung der Ergebnisse aus der Kombination der Gleichungen 4-9 und 4-10 zeigt Abbildung 4.10 für den Fall $z_0 = 1,5 \cdot z_1$ (z_0 ist die Koordinate der Schichtoberfläche).

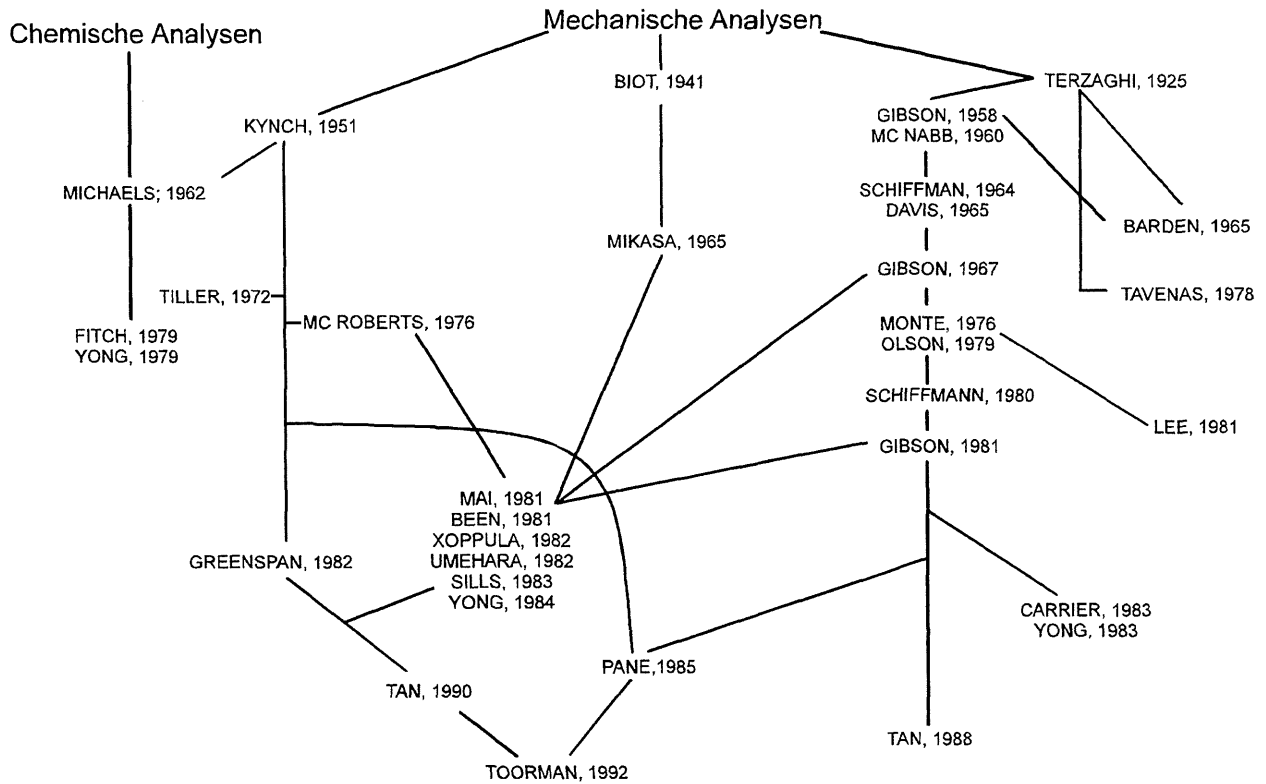


Abb. 4.9: Übersicht der theoretischen Studien über die Konsolidierung kohäsiver Böden
 (nach: ALEXIS ET AL., 1993, S. 6)

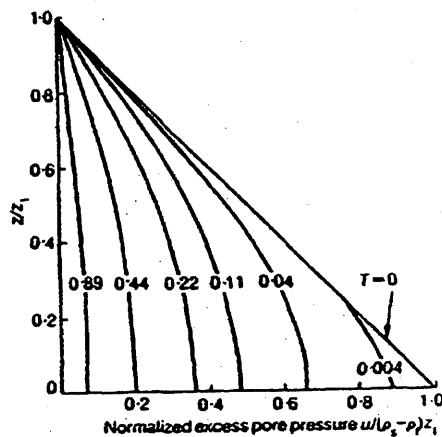


Abb. 4.10: Verlauf des Porenwasserdrucks für $z_0 = 1,5 \cdot z_1$
 (BEEN/SILLS, 1983, in: DÜRING, 1996, S. 38)

4.3.3 Der Erosionsprozeß

Wenn äußere Kräfte auf die Sohloberfläche von sedimentiertem kohäsiven Material einwirken, können sowohl Erosions- als auch Sedimentationsprozesse stattfinden, wobei die Größe des jeweiligen Partikelstroms u.a. von der Größe der angreifenden Kraft abhängt. Die Sohlschubspannung τ_0 ist dabei ein weitverbreiteter Parameter, um ein Maß für die Intensität der Sedimentations- bzw. Erosionsraten aufgrund hydrodynamischer Vorgänge zu finden. Ebenfalls sehr gebräuchlich ist die aus τ_0 resultierende Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Nach SLEATH (1984, S. 256) besteht folgender Zusammenhang:

$$u_*^2 = \frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{du}{dy} = \nu \frac{du}{dy} \quad (4-10)$$

Mit:

u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
τ_0	Sohlschubspannung [KN/m ²]
ρ	Dichte des Fluids [kg/m ³]
μ	dynamische Zähigkeit des Fluids [kg/(m·s)]
ν	kinematische Zähigkeit des Fluids [m ² /s]
du/dy	Geschwindigkeitsgradient [1/s]

Die zu Erosionen führenden Kräfte resultieren (u.a. nach: MIMURA, 1993, in: DÜRING, 1996, S. 40) aus:

1. den über einen gewissen Zeitraum gleichgerichteten, instationären turbulenzintensiven Strömungen, wie sie die Ebbe- und Flutströmungen darstellen
2. den kurz-periodischen oszillierenden, durch Oberflächenwellen hervorgerufenen Strömungen

Oberflächenerosion findet statt, wenn die an der Sohle herrschenden Schubspannungen τ_0 die kritische Sohlschubspannung τ_c übersteigen, das heißt wenn die äußere Spannung τ_0 groß genug ist, um die zwischen den kohäsiven Partikeln entstandenen elektrochemischen Bindungen aufzubrechen, wodurch das Material resuspendiert. Ein bindiger Boden wird also für $\tau_0 > \tau_c$ bzw. $u_* > u_{*c}$ abgetragen (vgl. Abb. 4.2).

MEHTA (1986, S. 315) unterscheidet in bezug auf den Erosionsprozeß zwischen der Oberflächen- und der Massenerosion. Bei der Oberflächenerosion werden einzelne Partikel oder Aggregate aufgrund von auftretenden Scherspannungen aus ihren elektrochemischen Bindungen herausgelöst. Dagegen werden bei der Massenerosion größere Elemente von einer Ausdehnung sehr vieler Flocken aus der Sohle herausgerissen. Diese Elemente gehen bei verhältnismäßig flüssigem Boden sofort in Suspension über. Bei festeren Sohlmaterialien werden sie rollend

transportiert, dabei zerkleinert und schließlich ebenfalls resuspendiert (ZANKE, 1982, S. 173). Letztere Erosionsart ist besonders bei oszillierenden Strömungen infolge Wellen anzutreffen.

Für über die Tiefe homogene und auskonsolidierte Sohlen gibt MEHTA (1986, S. 315) folgende Gleichung zur Berechnung der sogenannten Erosionsrate E (= pro Zeit- und Flächeneinheit erodiertes Sedimentvolumen) an:

$$E = \frac{dm}{dt} = \alpha_1 \cdot \left(\frac{\tau_0 - \tau_s}{\tau_s} \right) \quad (4-11)$$

Mit:

E	Erosionsrate [m^3/s]
dm/dt	zeitlicher Gradient der Massentransportrate [m^3/s]
α_1	empirische Erosionsratenkonstante [m^3/s]
τ_0	Sohlschubspannung [KN/m^2]
τ_s	vorhandener kohäsiver Scher- oder Strömungswiderstand der Sohle [KN/m^2]

Für eine konstante Schubbelastung τ_0 ist E konstant, solange τ_s nicht mit der Tiefe z variiert. Für weichere, nur teilweise konsolidierte Sohlen kann die Erosionsrate nach Gleichung 4-12 bestimmt werden:

$$E(z) = \frac{dm}{dt}(z) = \varepsilon_0 \cdot \exp(\alpha_2 (\tau_0 - \tau_s(z))^{0,5}) \quad (4-12)$$

Mit:

$E(z)$	Erosionsrate [m^3/s]
dm/dt	Gradient der Massentransportrate [m^3/s]
ε_0	empirische Konstante [m^3/s]
α_2	empirische Konstante [$m^{0,5} \cdot s/kg^{0,5}$]
τ_0	Sohlschubspannung [KN/m^2]
$\tau_s(z)$	vorhandener kohäsiver Scher- oder Strömungswiderstand der Sohle [KN/m^2]

Der Strömungswiderstand τ_s steigt mit zunehmendem Konsolidierungsgrad über die Tiefe z an. Daher kann der Erosionsprozeß solange über die Tiefe fortschreiten, bis in einer bestimmten Tiefe τ_s die Größe von τ_0 erreicht hat und damit der Strömungswiderstand größer wird als die anliegende erodierende Schubspannung. Die jeweiligen Koeffizienten α_1 , α_2 und ε_0 müssen experimentell in Laborversuchen bestimmt werden, da sie von den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Fluids und des Sedimentes abhängen.

Tafel 4.2 zeigt eine Zusammenstellung von Untersuchungsergebnissen über die Einflüsse verschiedener Parameter wie der Korndurchmesser oder der Wassergehalt kohäsiver Sedimente auf die erosionskritische Schubspannung.

ZUNAHME ...	QUELLE: RAUDKIVI, 1982	KRITISCHE SCHUBSPANNUNG	
		SINKT	STEIGT
der Temperatur		X	
des Wassergehaltes		X	
des Dispersionsverhältnisses (= Verhältnis von Tonanteilen in einer dispergierten und einer nicht dispergierten Probe)		X	
des Korndurchmessers		X	
des Tonanteils			X

Taf. 4.2a: Einflüsse bestimmter Parameter der Sedimente auf die erosionskritische Schubspannung (nach: RAUDKIVI, 1982, S. 128f, 132, 137)

ZUNAHME ...	QUELLE: RAUDKIVI, 1982	KRITISCHE SCHUBSPANNUNG	
		SINKT	STEIGT
des Plastizitätsindex (= Differenz des Wassergehaltes an der Fließgrenze und des Wassergehaltes an der Ausrollgrenze)			X
des Salzgehaltes			X

Taf. 4.2b: Einflüsse bestimmter Parameter der Sedimente auf die erosionskritische Schubspannung (nach: RAUDKIVI, 1982, S. 128f, 132, 137)

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß die zuvor genannten Quellen nur einen Einblick, insbesondere in die aktuelleren Ergebnisse gewährt. Ein Vergleich der verschiedenen Forschungsergebnisse hinsichtlich allgemeingültiger Aussagen stellt sich häufig sehr schwer dar, da sich das versuchstechnisch eingesetzte kohäsive Material insbesondere hinsichtlich vorhandener Verunreinigungen sowie der Vorbereitung für das Experiment unterscheidet (WILLIAMS, 1986, in: DÜRING, 1996, S. 9).

4.3.4 Herkunft der Sedimente

Die im Zusammenhang mit den Transportphänomena schlickigen Materials auftretende Frage nach der Herkunft der Sedimente, die zur Ablagerung im Vorlandbereich gelangen, kann bisher nicht abschließend beantwortet werden.

HINRICHS (1931, S. 7) nennt folgende Quellen der Sedimente:

- Sedimente aus Flüssen, die in die Nordsee münden
- Verwesungsprodukte von Süß- und Seewasserorganismen
- Abbrüche des festen Marschbodens
- Sedimente, die aus der See stammen

REINECK (1978, S. 66) weist darauf hin, daß den Watt unserer Zeit nur wenig neue Sedimente zugeführt werden, sondern vielmehr Umlagerungen im Watt selbst, wie beispielsweise Prielverlagerungen, Abrasion von Wattflächen, Ausräumung von Rinnen (KAMBECK, 1980, S. 8 / MUUSS/PETERSEN, 1974, S. 63) stattfinden. Die Wattflächen scheinen daher selbst die Hauptquelle der Sedimente zu sein (Abb. 4.11).

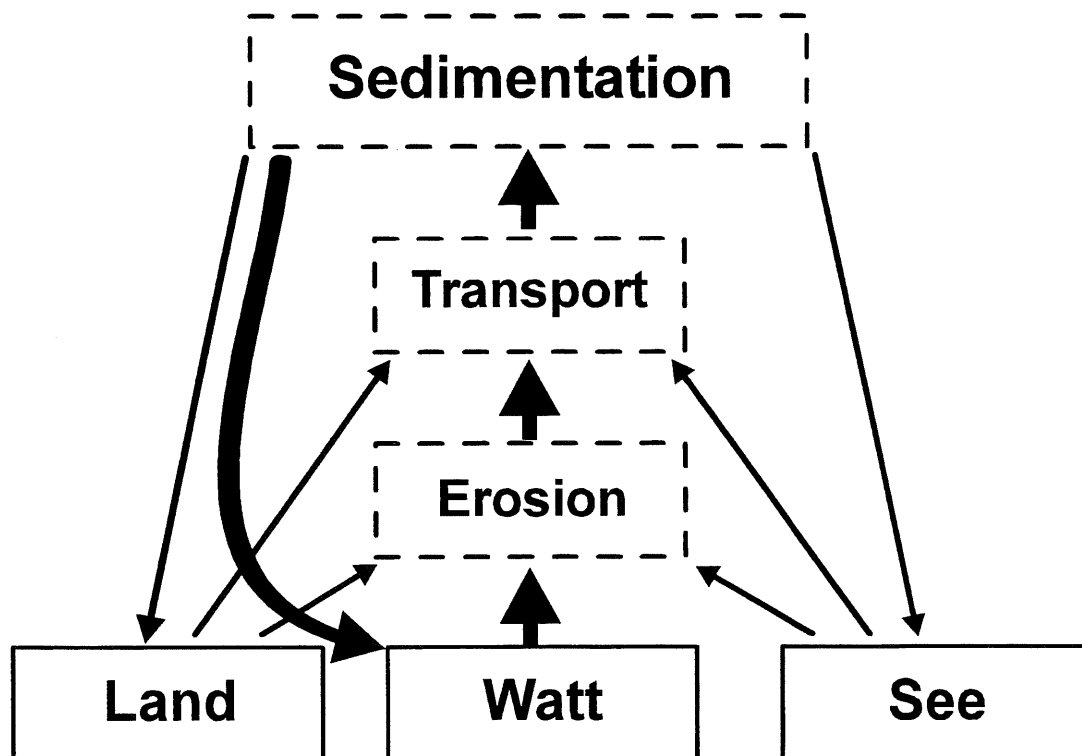


Abb. 4.11: Umlagerung von Sedimenten
(REINECK, 1978, S. 71)

Ein Großteil der landnahen Watten hat einen schlickigen Charakter, während die seewärtigen Watten infolge einer Sortierung durch die zur Küste hin abnehmende Transportkapazität überwiegend sandig sind. „Ein Teil dieses Schlicks entsteht durch biologische und chemische Prozesse⁷ im Wattenmeer selbst, der weitaus größte Teil des Schlicks muß aber von außerhalb in die Wattengebiete eingebracht werden“ (DIECKMANN, 1985, S. 312).

Nach EISMA (1973, in: DIECKMANN, 1985, S. 310) stammt nur ein kleiner Teil sandiger Sedimente von den Abbruchkanten der Inseln, Halligen und Strände. Eine weitere Quelle stellen unter anderem nach THIES (1985, S. 31) die Schwebstoffe, die durch die Ästuarie transportiert werden, dar.

Eine Zusammenstellung der ein- und ausgetragenen Schwebstoffmengen der Nordsee ist bei OSTERTHUN (1996, S. 204) zu finden.

⁷ Die entstehenden organischen Stoffe sind an das Leben von Pflanzen und Tieren (Absterben, Häutung etc.) gebunden (WOHLENBERG, 1954, S. 41 / REINECK, 1978, S. 70).

5 Untersuchungsmethodik

5.1 Allgemeines

Zur Umsetzung des Gesamtzieles des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“, nämlich „die zu erwartenden Erosions- und Sedimentationsvorgänge ... bei unterschiedlichen Lahnungsgeometrien und baulichen Ausführungen“ zu analysieren, stehen prinzipiell die folgenden Methoden zur Verfügung:

1. Messungen in der Natur
2. Physikalische Simulationen
3. Numerische Simulationen

5.2 Messungen in der Natur

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ wurden topographische, hydrologische (Seegang und Strömung) sowie morphologisch-sedimentologische Messungen in der Natur geplant und in zwei Testgebieten in Schleswig-Holstein durchgeführt. Diese Messungen liefern stichprobenartige Ergebnisse an den zuvor festgelegten Meßstellen. Die Interpretation der Meßergebnisse ist aufgrund der Variabilität der Seegangs- und Tidebedingungen für verallgemeinernde Aussagen nur eingeschränkt möglich. Zudem überlagern sich verschiedene Prozesse, die in der Regel nicht quantifizierbar sind. Physikalische bzw. numerische Modellierungen hingegen erlauben, die sich unter definierten Randbedingungen einstellenden Strömungs- und Seegangsbedingungen im Bereich von Lahnungsfeldern zu simulieren und diese im Hinblick auf eine Optimierung der bisherigen Methoden zu interpretieren.

5.3 Physikalische Simulationen

Um die Strömungs- und Seegangsbedingungen im Bereich möglicher Wasserstände von Lahnungsfeldern abbilden sowie die quantitativen Aussagen bezüglich der morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld treffen zu können, wäre ein 3-dimensionales physikalisches Modell mit beweglicher Sohle erforderlich. Das im Franzius-Institut zur Verfügung stehende Wellenbecken mit Abmessungen von rd. 18 m x 40 m läßt beispielsweise die Abbildung eines spiegelsymmetrischen halben Lahnungsfelds in Originalgröße nicht zu. Die Schwierigkeit bei maßstabsbehafteten Modellen mit Sedimentbewegungen besteht darin, daß neben der FROUDESchen Ähnlichkeit für die Strömungsvorgänge aus Tide und Seegang auch gleichzeitig die erweiterte FROUDE-Zahl (Fr^*) und die REYNOLDS-Zahl (Re^*) des Einzelkorns berücksichtigt werden muß.

Das würde nur mit unwirklichen Eigenschaften von Modellflüssigkeit und Sedimentkörnern zu einer praktisch anwendbaren Maßstabszahl führen.

Die hydrodynamischen Vorgänge können im Modell nach dem FROUDESchen Ähnlichkeitsgesetz naturähnlich nachgebildet werden, da die Bewegungsvorgänge im wesentlichen durch die Schwere- und Trägheitskräfte gesteuert werden. Die Geschwindigkeiten im Modell v_{Modell} sind dann entsprechend dem FROUDESchen Ähnlichkeitsgesetz

$$v_{\text{Modell}} = v_{\text{Natur}} / \sqrt{\text{Maßstabszahl}} \quad (5-1)$$

kleiner als in der Natur (v_{Natur}), wobei die Maßstabszahl größer eins ist. Daher wäre es erforderlich, für die morphologischen/sedimentologischen Untersuchungen ein geeignetes „Ersatzmaterial“ mit geringerer Dichte als der des natürlichen Sohlenmaterials zu wählen, um die kritischen Geschwindigkeiten während des Bewegungsbeginns abbilden zu können (ENGEL, 1963, S. 31ff/ GEHRIG, 1967, S. 245ff/ GEHRIG, in: KOBUS, 1978, S. 67ff). Außerdem müßte ein Sohlenmaterial mit einem äquidistanten Formwiderstand gefunden werden. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Schwebstoffe müßten den maßstabsabhängigen Strömungsstrukturen angepaßt werden.

Des weiteren sind die Zeitmaßstäbe der hydraulischen und der Transportvorgänge nicht identisch. Zur Ermittlung des entsprechenden „morphologischen Zeitmaßstabes“ sind in der Regel Aufzeichnungen über größere Zeiträume erforderlich (KOHLEHASE, 1983, S. 267f), die jedoch für den vorliegenden Fall nicht verfügbar sind.

Besondere Schwierigkeiten treten zudem durch biologische und biochemische Prozesse im Boden auf, die die Konsolidierungs- und Absetzvorgänge maßgeblich beeinflussen und im Modell nicht nachzubilden sind. Ebenso lassen sich örtliche Unterschiede im Sohlmaterial im Modell nicht darstellen. Ein „künstliches Sediment“, welches nicht nur die sedimentologischen und morphologischen, sondern gleichfalls die biologischen und chemischen Eigenschaften des natürlichen Sedimentes charakterisiert, konnte bisher nicht gefunden werden. Daher wurden die in Tafel 5.1 ausgewählten Teilaspekte in gesonderten, nicht maßstabsbehafteten Modellen in einer Strömungs- oder Wellenrinne (s. Kap. 7.1 und 7.2) bzw. einem Wellenbecken (s. Kap. 7.3) untersucht. Hierbei können, insbesondere durch die Verwendung natürlicher Materialien, Maßstabeffekte ausgeschlossen werden. Das Zusammenspiel von Wasserstand, Seegang und Windfeldern, wie beispielsweise von RUDOLPH (1994) beschrieben, kann im physikalischen Modell mangels einer windinduzierenden Einrichtung jedoch nicht simuliert werden.

5.4 Numerische Simulationen

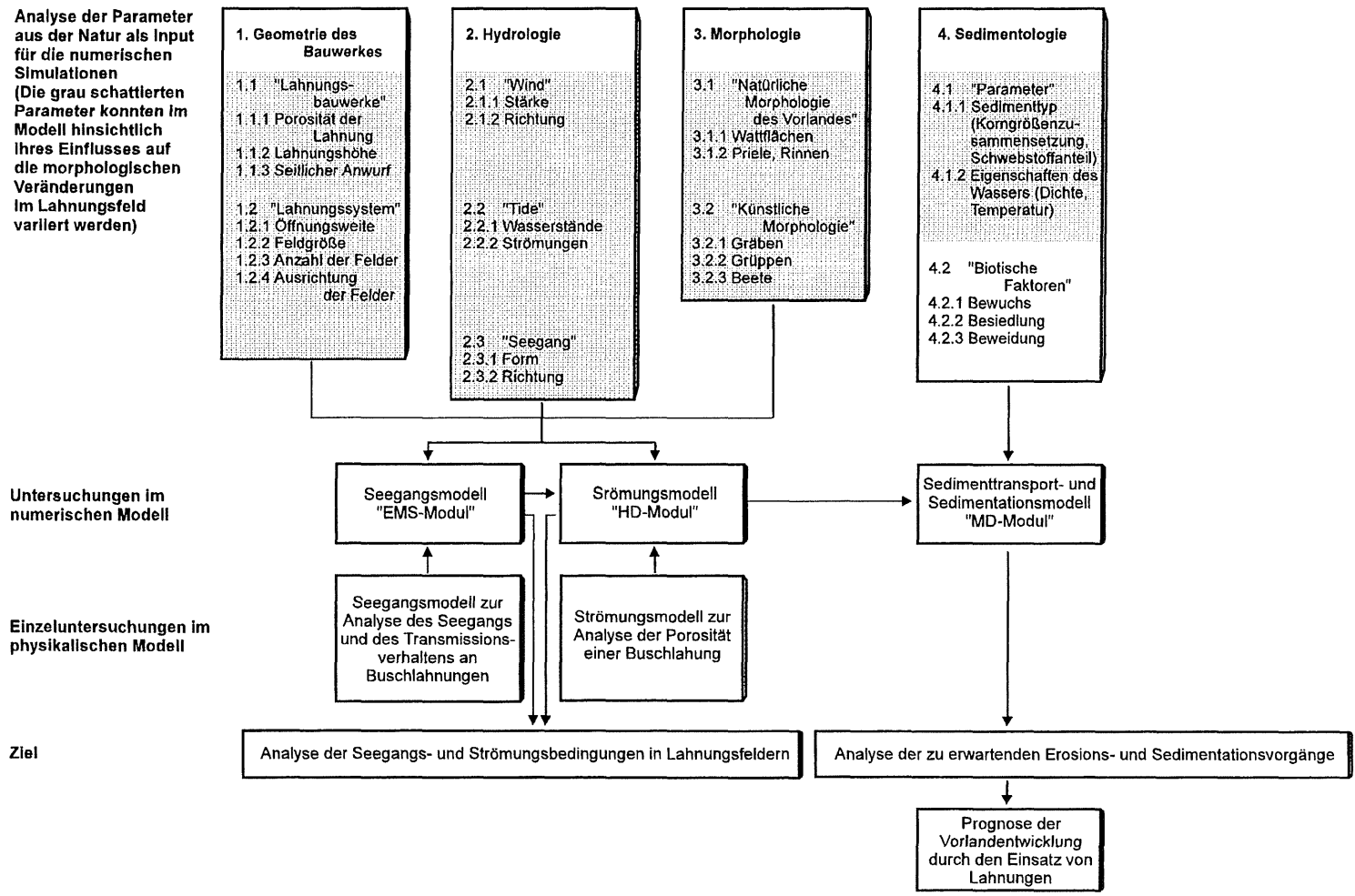
Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Schwierigkeiten wurde methodisch die Simulation im numerischen Modell gewählt, mit dem Ziel, den kombinierten Einfluß von Seegang und Strömungen in Lahnungsfeldern im Hinblick auf vergleichenden Aussagen für unterschiedliche Lahnungsgeometrien (Anordnung der Quer- und Längslahnungen, Öffnungsweiten) bzw. der Morphologie (Grüppen, Beete) zu untersuchen. Da aber Seegang im wesentlichen eine erodierende Funktion und die Strömung mehr eine Transportfunktion besitzt, erscheint es zweckmäßig, im numerischen Modell zunächst getrennt voneinander das Strömungs- und das Seegangsverhalten in Lahnungsfeldern für die zu variierenden Eingangsgrößen (Geometrie des Bauwerkes, Morphologie, Hydrologie etc.) zu untersuchen. Die Ergebnisse beider Simulationen fließen abschließend in ein Sedimenttransport- bzw. Morphodynamikmodell ein, mit dem – unter den genannten Randbedingungen – die Vorlandentwicklung infolge des Einsatzes von Lahnungsbauwerken im Küstenvorfeld beschrieben werden kann (vgl. Kap. 8).

Nur einige der in der Natur vorhandenen und für die Simulationen relevanten Parameter wurden durch Messungen in der Natur von den Projektpartnern ermittelt. Die fehlenden, jedoch zwingend erforderlichen Input-Größen (Porosität einer Buschlahnung, Wellentransmissionsverhalten einer Buschlahnung usw.) sowie grundlegende Erkenntnisse zum Seegangsverhalten im Bereich von Lahnungsfeldern wurden im Rahmen dieses Vorhabens im FRANZIUS-INSTITUT daher durch physikalische Modellierungen gewonnen.

Die Untersuchungsmethodik, in der Messungen in der Natur, Untersuchungen im physikalischen Modell und Simulationen im numerischen Modell kombiniert werden, ist in Tafel 5.1 dargestellt.

Optimierung von Küstensicherungsarbeiten durch Lahnungen

Untersuchung des Einflusses von Tidewasserstand, -strömungen, Seegang, Morphologie und Sedimentologie von Küstenabschnitten auf die morphologischen Veränderungen im Lahnungsfeld als Funktion von Größe, Anzahl, Richtung sowie Ausführung der Lahnung und der Be- und Entwässerung der Felder



Taf. 5.1: Untersuchungsmethodik im Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“

6 Naturmessungen in den Testgebieten

6.1 Beschreibung der Testgebiete

Mit dem Ziel, die Wirkung von Lahnungen auf Strömung, Seegang und die daraus resultierenden sedimentologischen und morphologischen Veränderungen sowie Eingangswerte für die physikalischen und numerischen Untersuchungen zu ermitteln, wurden von den ÄMTERN FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT in Heide und Husum eigens für das Forschungsvorhaben zwei Testgebiete an der Westküste Schleswig-Holsteins eingerichtet, in denen Watthöhen-, Strömungs- sowie Seegangsmessungen von den jeweils zuständigen Ämtern durchgeführt wurden. Um aus diesen Messungen in der Natur eine möglichst große Datenvielfalt zu erzielen, die auch zu verallgemeinernde Ergebnisse zuläßt, wurden die Testgebiete so ausgewählt, daß sie sich hinsichtlich ihrer geographischen, sedimentologischen, morphologischen und hydrologischen Randbedingungen unterscheiden.

1. Das nördlichere der beiden Testgebiete liegt in Nordfriesland, nahe Ockholm und südlich des Hauke-Haien-Kooges (vgl. Abb. 1.1). Es wird im Rahmen des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ als Testgebiet „Ockholm“ bezeichnet.

1990 wurde im Bereich zwischen ca. Deichkilometer 01+ 050 und ca. Deichkilometer 01+462 eine in nordwest-südöstlicher Richtung verlaufende, langgestreckte Vordeichung fertiggestellt, vor der nahezu senkrecht ein Lahnungsfeld mit einer Breite von 435 m und einer Tiefe von rd. 200 m lag. Im Vorfeld des Forschungsvorhabens wurde das große Feld im Herbst 1993 durch den Bau einer in Nordfriesland typischen Buschlahnung (vgl. Anl. A 3-2a) in zwei flächengleiche, jeweils 200 m x 217,5 m umfassende Felder geteilt (vgl. Abb. 6.1a). Die Oberkanten der Querlahnungen Q1 und Q2 sowie der Längslahnungen L1 bis L3 lagen bis Mai 1995 mit + 1,53 mNN auf Höhe des MThw der Jahresreihe 1981/1990 des rd. 7 km nordwestlich gelegenen Tidepegels Schlüttsiel (vgl. Abb. 1.1). In beiden Feldern 1 und 2 wurden mit einem Grüppenbagger Hauptentwässerungsgräben angelegt.

Im Zuge einer zweiten Ausbaustufe wurde den beiden Feldern je ein weiteres vorgelagert; Feld 3 mit einer Höhenlage der Querlahnung Q3 und der Längslahnungen L4 und L5 von $MThw_{(Schlüttsiel, 1981 - 1990)} + 0,30 \text{ m} = + 1,83 \text{ mNN}$ und Feld 4 mit einer Höhenlage der Querlahnung Q4 und der Längslahnung L6 von $MThw_{(Schlüttsiel, 1981 - 1990)} = + 1,53 \text{ mNN}$ (Abb. 6.1b). In Feld 1 (vgl. Abb. 6.1a) wurden die Querlahnung Q1 sowie die Längslahnungen L1 und L2 um 0,30 m auf $MThw_{(Schlüttsiel, 1981 - 1990)} + 0,30 \text{ m} = + 1,83 \text{ mNN}$ erhöht (vgl. Abb. 6.1b).

Gleichzeitig mit der zweiten Ausbaustufe wurde in den Feldern 3 und 4 die Hauptentwässerungsgraben der Felder 1 und 2 weiter hinausgezogen. Entlang der neuangelegten Quer- und Längslahnungen verlaufen die sogenannten Anwurfgruppen (Anl. A 6-1).

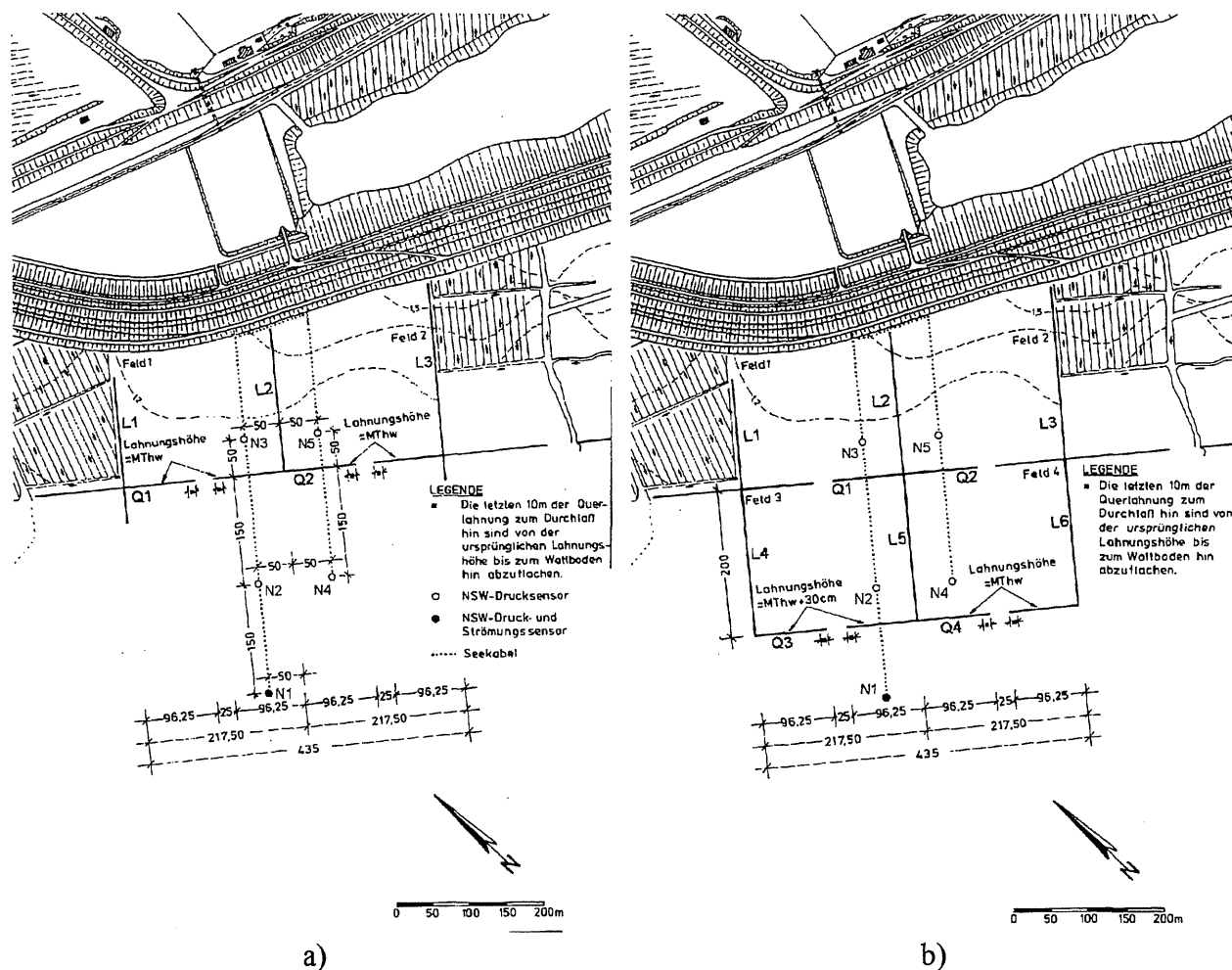


Abb. 6.1: Ausbaustufe „Herbst 1993“ (a) und „Frühjahr 1995“ (b) des Testgebietes „Ockholm“ (geänderte Grafik, LANU, 1993)

- Das südlichere der beiden Testgebiete liegt in der Meldorfer Bucht vor dem Speicherkoog Dithmarschen südlich von Helmsand (vgl. Abb. 1.1). Es wird im Rahmen des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ als Testgebiet „Speicherkoog Süd“ bezeichnet.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens existierten vor dem im Testgebiet „Speicherkoog Süd“ geradlinig in nordwest-südwestlicher Richtung verlaufenden Deich keine Lahnungsfelder. Das Testgebiet wurde lediglich im Norden durch eine rd. 150 m lange Buhne begrenzt. Im

Mai 1995 entstanden im Zuge der Ausbaustufe „Frühjahr 1995“ senkrecht zur Deichlinie im Bereich zwischen Deichkilometer 34+470 und Deichkilometer 34+870 drei jeweils 200 x 200 m große Lahnungsfelder (Abb. 6.2) mit für den Bereich Dithmarschens typischen Buschlahnungen (vgl. Anl. A 3-2a). In Feld 1 wurden die Höhenlagen der Querlahnung Q1 und der Längslahnungen L1 und L2 auf rd. +1,90 mNN erstellt, die der Querlahnungen Q2 und Q3 sowie der Längslahnungen L3 bis L5 der voreinandergelegenen Felder 2 und 3 auf rd. +1,60 mNN (Abb. 6.2).

Gleichzeitig mit der Anlage der Lahnungsfelder wurden in den Feldern 1 bis 3 Hauptentwässerungsgräben gezogen. Im Rahmen der Ausbaustufe wurde gleichfalls eine Begrüpfung der Testfelder 1 bis 3 vorgenommen; und zwar wurden entlang der neuangelegten Quer- und Längslahnungen Anwurfgruppen erstellt (vgl. Anl. A 6-1).

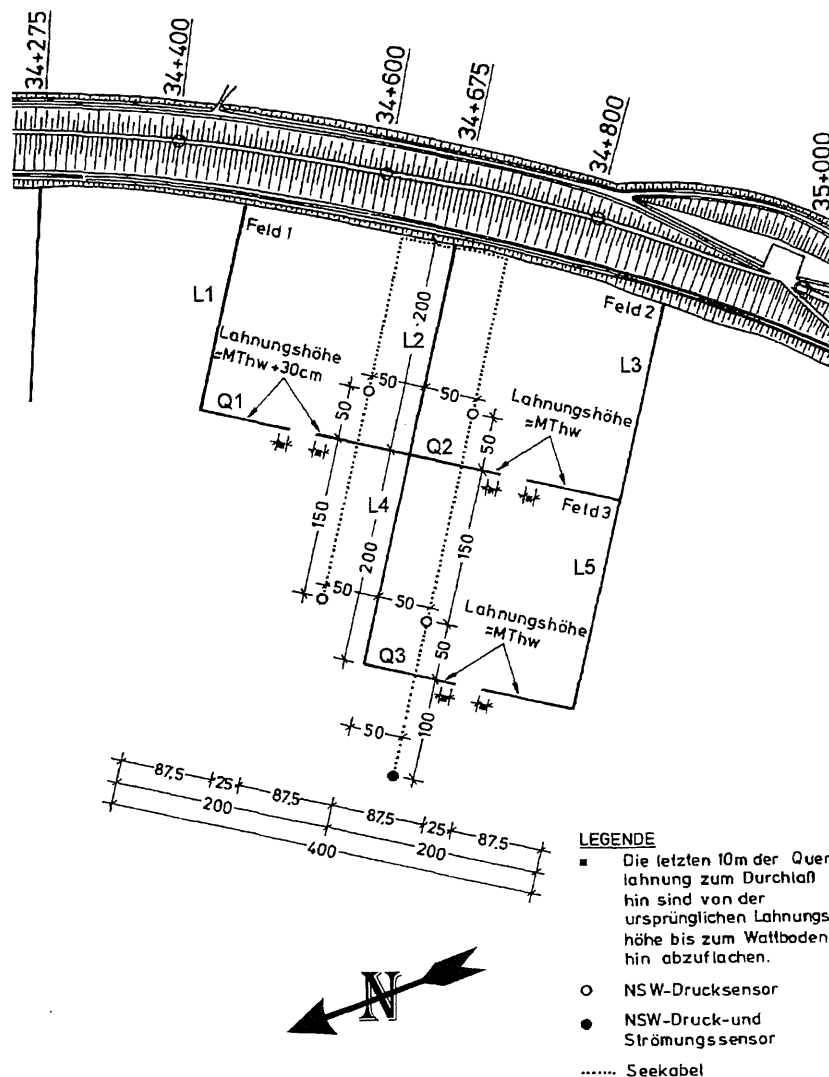


Abb. 6.2: Ausbaustufe „Frühjahr 1995“ des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ (geänderte Grafik, LANU, 1993)

6.2 Tideverhältnisse

6.2.1 Testgebiet „Ockholm“

Abbildung 6.3 zeigt die mittlere Tidekurve der Jahre 1981 bis 1990 des Pegels „Schlüttsiel“, welcher als repräsentativ für das Testgebiet „Ockholm“ gewählt wurde. Das mittlere Tidehochwasser beträgt $M_{Thw} = 653$ cm PN, das mittlere Tideniedrigwasser $M_{Tnw} = 339$ cm PN, woraus ein mittlerer Tidehub von $M_{Thb} = 314$ cm und ein Tidemittelwasserstand von $T_{mw} = 515$ cm PN resultiert. Die durchschnittliche Flutdauer beträgt $T_F = 5$ h 30 min, die Ebbedauer $T_E = 6$ h 55 min. Am 24.11.1981 wurde der bis heute maximale Hochwasserstand von $HH_{Thw} = 970$ cm PN gemessen.

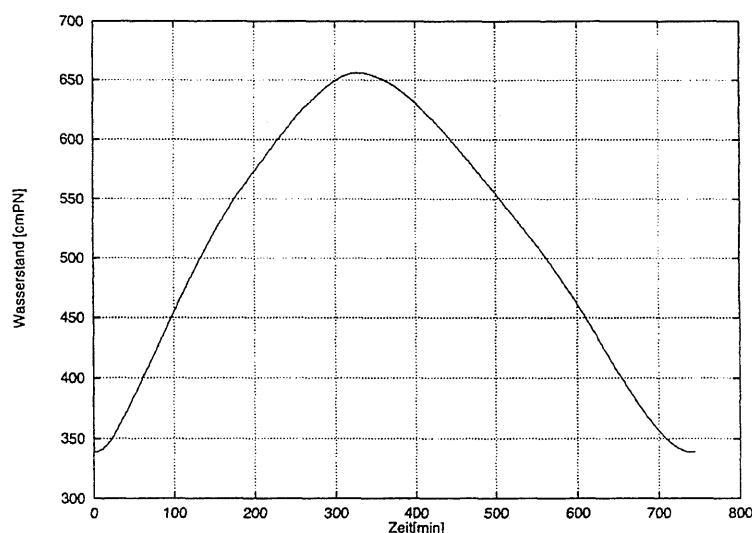


Abb. 6.3: Mittlere Tidekurve der Jahre 1981 bis 1990, Pegel „Schlüttsiel“
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1994)

Die detaillierten Wasserstände während der Strömungs- und Seegangsmessungen sind in Kapitel 6.5 bzw. Kapitel 6.6.3 dargestellt.

6.2.2 Testgebiet „Speicherkoog Süd“

Abbildung 6.4 zeigt die mittlere Tidekurve des Abflußjahres 1994 des Pegels „Sommerkoog Steertloch“, welcher als repräsentativ für das Testgebiet „Speicherkoog Süd“ gewählt wurde. Das mittlere Tidehochwasser beträgt $M_{Thw} = 670$ cm PN, das mittlere Tideniedrigwasser $M_{Tnw} = 392$ cm PN, woraus ein mittlerer Tidehub von $M_{Thb} = 278$ cm resultiert. Die durchschnittliche Flutdauer beträgt $T_F = 4$ h 29 min, die Ebbedauer $T_E = 7$ h 56 min.

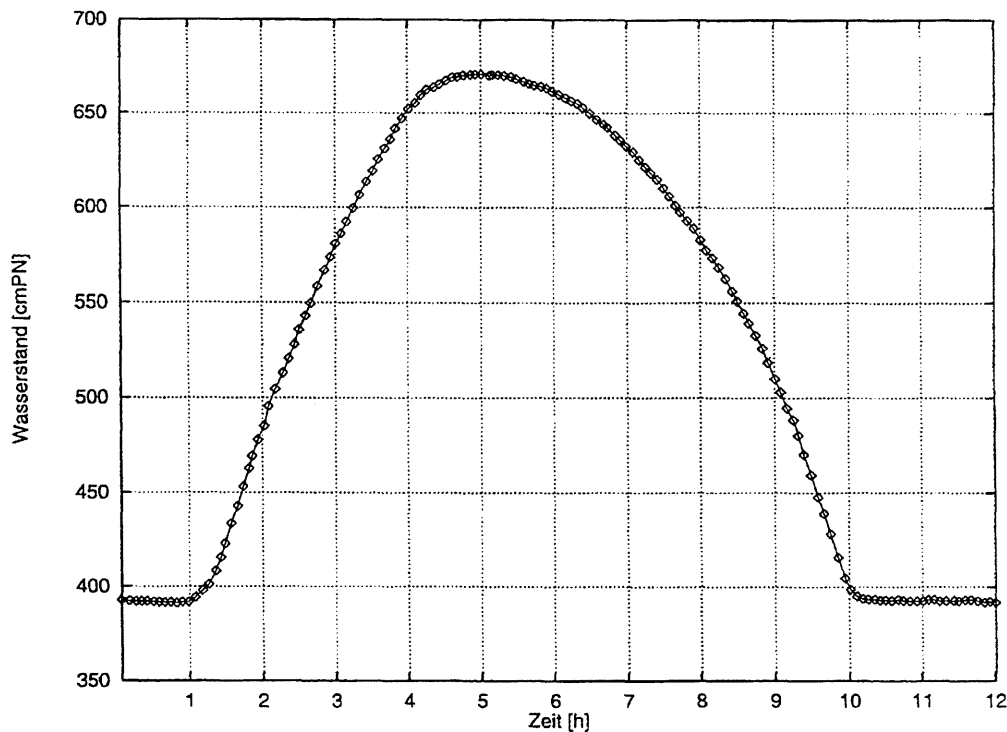


Abb. 6.4: Mittlere Tidekurve des Abflußjahres 1994, Pegel „Sommerkoog Steertloch“
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE, 1995)

6.3 Windverhältnisse

6.3.1 Testgebiet „Ockholm“

Aus langjährigen Aufzeichnungen der Winddaten der rd. 20 km südwestlich des Testgebietes „Ockholm“ gelegenen Meßstation „Hallig Hooge“ (vgl. Abb. 1.1) läßt sich entnehmen, daß die am häufigsten und intensivsten auftretenden Winde aus Richtung Südwesten wehen und somit senkrecht auf die Küstenlinie des Testgebietes "Ockholm" treffen (LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG-HOLSTEIN, 1994, S. 26f). Windverhältnisse mit Geschwindigkeiten über 14 m/s (\geq Bft 7) treten nahezu ausschließlich in den Wintermonaten auf (vgl. Anl. A 6-2a bis A 6-2f). Repräsentativ wurde die Windsituation des Jahres 1983 in Abbildung 6.5 dargestellt.

Die detaillierten Windverhältnisse während der Seegangsmessungen sind in Kapitel 6.6.4 dargestellt.

Häufigkeiten der Windrichtungen für Windstärken > 5 m/s und > 14 m/s, Windmeßstation Hooge, für das Jahr 1983:

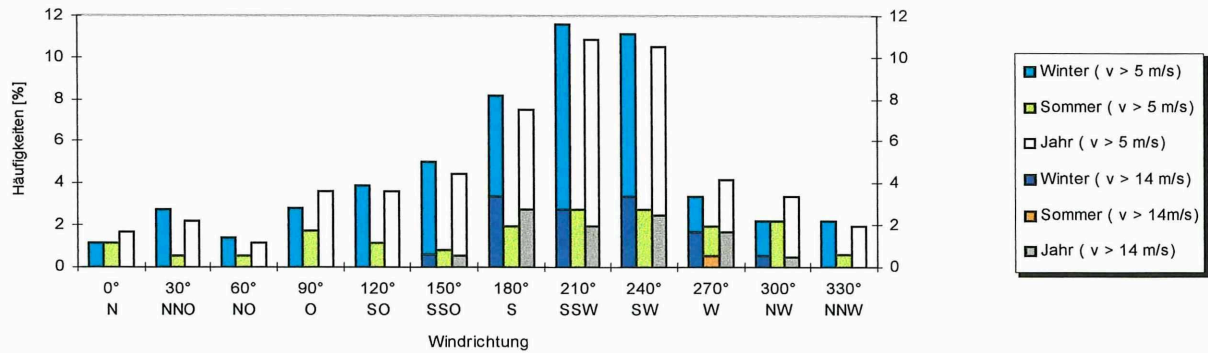


Abb. 6.5: Windsituation des Jahres 1983, Meßstation „Hallig Hooge“
 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1995)

6.3.2 Testgebiet „Speicherkoog Süd“

Als für das Testgebiet „Speicherkoog Süd“ typisch, wurden die mittleren Winddaten der Jahre 1969 bis 1974 der rd. 10 km nordwestlich des Testgebietes gelegenen Meßstation „Büsum“ (vgl. Abb. 1.1) ausgewählt (Abb. 6.6). Aus Abbildung 6.6 läßt sich entnehmen, daß die am häufigsten und intensivsten auftretenden Winde aus Richtung Südwesten bis Nordwesten wehen und somit nur bedingt senkrecht auf die Küstenlinie und die Lahnungsfelder des Testgebietes treffen. Windverhältnisse mit Geschwindigkeiten über 14 m/s (\geq Bft 7) treten fast ausschließlich in den Wintermonaten auf (WIELAND/FLADUNG, 1982, S. 513, Taf. 5).

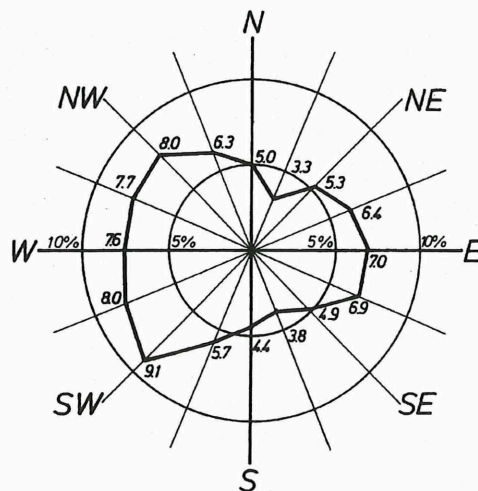


Abb. 6.6: Verteilung der Windrichtungen aller Windstärken im 6-Jahres-Mittel 1969/74, Meßstation „Büsum“
 (WIELAND/FLADUNG, 1982, S. 512)

6.4 Watthöhenmessungen

6.4.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ wurden in den Testgebieten „Ockholm“ und „Speicherkoog Süd“ von den ÄLW HEIDE und HUSUM großflächige tachymetrische Vermessungen durchgeführt; und zwar im

Testgebiet „Ockholm“ (ALW HUSUM) im

- Mai 1994
- November 1994
- April 1995
- November/Dezember 1995
- April 1996
- November 1996

und im Testgebiet „Speicherkoog Süd“ (ALW HEIDE) im

- Juni 1994
- Oktober/November 1995
- Juni 1996
- November 1996

Die im Testgebiet „Ockholm“ im Mai 1994, April 1995, November/Dezember 1995 und April 1996 durchgeführten Vermessungsarbeiten waren umfangreicher als die übrigen; eine Fläche von rd. 1.400 m x 600 m um den Bereich der Lahnungsfelder 1 bis 4 wurde erfaßt. Die Abstände der Vermessungspunkte betragen in den vorhanden sowie zu bestimmten Zeitpunkten noch geplanten Feldern parallel zum Deich rd. 20 m und senkrecht zur Deichlinie rd. 10 m. Die Vermessungspunkte außerhalb der Felder wurden in einem Abstand von rd. 40 m bzw. rd. 20 m angeordnet. Zusätzlich wurden markante Punkten (z.B. bei ausgeprägten Prielen) eingemessen.

Die weniger umfangreichen Vermessungsarbeiten im Testgebiet „Ockholm“ in den Monaten November 1994 und November 1996 wurden in den Feldern und in einer rd. 250 m x 475 m großen, den Feldern vorgelagerten Fläche ausgeführt. Die Abstände der Vermessungspunkte betragen in den vorhanden sowie zu bestimmten Zeitpunkten noch geplanten Feldern parallel zum Deich rd. 20 m und senkrecht zur Deichlinie rd. 10 m.

Die Daten der tachymetrischen Vermessungen bilden die Grundlage der numerischen Modellierungen für das Testgebiet „Ockholm“ (vgl. Kap. 8.4.1).

Im Rahmen der im Testgebiet „Speicherkoog Süd“ im Juni 1994 und November 1996 durchgeführten Vermessungsarbeiten wurde eine Fläche von rd. 600 m x 500 m um den Bereich der Lahnungsfelder 1 bis 3 erfaßt. Die Abstände der Vermessungspunkte betragen in den vorhandenen sowie zu bestimmten Zeitpunkten noch geplanten Feldern sowie einem denkbaren Feld 4 sowohl parallel als auch senkrecht zur Deichlinie rd. 10 m, außerhalb der Felder rd. 20 m.

Die Vermessungsarbeiten im Testgebiet „Speicherkoog Süd“ im Oktober/November 1995 und Juni 1996 wurden lediglich im Bereich der Felder 1 bis 3 sowie einem denkbaren Feld 4 in einem 10 m-Raster erfaßt.

Ergänzend zu den tachymetrischen Vermessungen wurden in den Testgebieten „Ockholm“ und „Speicherkoog Süd“ an jeweils neun Positionen in und vor den Testfeldern Messungen mit dem sogenannten „*Sedimentation-Erosion-Table*“ (SET) durch das FTZ durchgeführt (vgl. REIMERS ET AL., 1995, S. 3), welche Aufschluß über Sedimentation und Erosion an diesen Positionen geben. In Verbindung mit den Ergebnissen der gleichfalls durch das FTZ vorgenommenen sedimentologischen Geländearbeiten (vgl. z.B. REIMERS ET AL., 1995, S. 4f) lagen weitere Eingangsparemeter für die numerischen Modellierungen vor (vgl. Kap. 8.3).

6.4.2 Testgebiet „Ockholm“

Nach einer tachymetrischen Vermessung durch das ALW HUSUM im Mai 1994 wies das Testgebiet „Ockholm“ zu Beginn der Naturmessungen Höhenlagen von rd. 1,00 mNN bis rd. 1,50 mNN innerhalb der Lahnungsfelder 1 und 2 sowie Höhenlagen von rd. 0,60 mNN bis rd. 0,80 mNN vor den Lahnungsfeldern bis etwa zur Höhe der Meßposition N1 auf (vgl. Abb. 6.1). Die Neigung des Geländes betrug innerhalb der Lahnungsfelder rd. 1:400, außerhalb rd. 1:1.000. Für detailliertere Aussagen zur morphologischen und sedimentologischen Entwicklung des Testgebietes „Ockholm“ wird auf den Bericht des Teilprojektes „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“ verwiesen.

6.4.3 Testgebiet „Speicherkoog Süd“

Nach einer tachymetrischen Vermessung durch das ALW HEIDE im Zeitraum vom 14. bis 29. Juni 1994 wies das Testgebiet „Speicherkoog Süd“ zu Beginn der Naturmessungen Höhenlagen von rd. 0,50 mNN bis rd. 1,00 mNN im Bereich der geplanten Lahnungsfelder (vgl. Abb. 6.2) auf. Das Gelände ist wechselhaft horizontal bzw. rd. 1:1.000 zwischen den Meßpositionen

S2 und S3 bzw. S4 und S5 geneigt. Das Testgebiet wird im Schutz der Meldorfer Bucht wesentlich durch größere in nord-nordwestlicher Richtung einschwenkende Priele, die ihre Lage und Größe mit den Jahreszeiten stark verändern (vgl. REIMERS ET AL., 1995, S. 12), geflutet und damit in sedimentologischer und morphologischer Hinsicht gestaltet. Für detailliertere Aussagen zur morphologischen und sedimentologischen Entwicklung des Testgebietes „Speicherkoog Süd“ wird auf den Bericht des Teilprojektes „Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern“ verwiesen.

6.5 Strömungsmessungen

Im Zeitraum vom 30. Oktober bis 30. November 1995 wurde im Testgebiet „Ockholm“ eine Strömungsmeßkampagne im Bereich der Testfelder durchgeführt. Insgesamt wurden 14 AANDERA-Strömungsmeßgeräte (Abb. 6.7), wie in Abbildung 6.8 dargestellt, an den Positionen 1 bis 14 installiert. Für Position 4 liegen aufgrund eines Geräteausfalls während der Meßkampagne keine Ergebnisse vor. Position 9 wurde mit zwei Strömungssensoren ausgestattet (Pos. 9a und Pos. 9b), so daß zum gleichen Zeitpunkt Messungen in den zwei unterschiedlich gewählten Wassertiefen, 0,25 m und 0,55 m über der Geländeoberkante, möglich wurden.

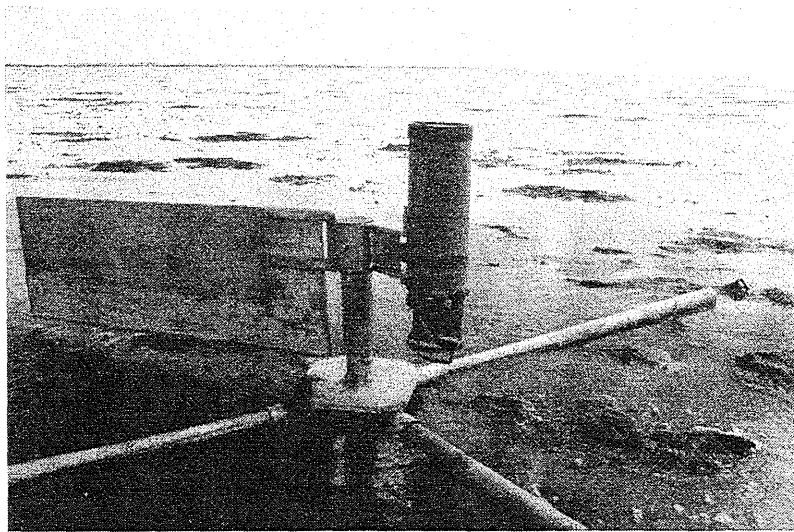


Abb. 6.7: Im Testgebiet „Ockholm“ eingesetztes, hier trockengefallenes AANDERA-Strömungsmeßgerät mit Strömungssensor (rechts) und Richtungsfahne (links)

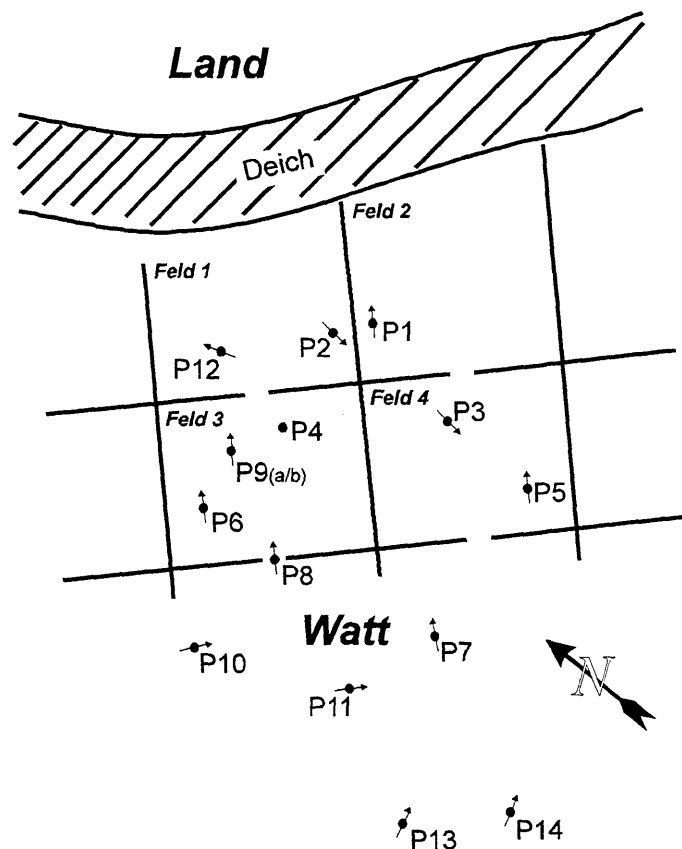


Abb. 6.8: Positionen der Strömungsmeßgeräte im Testgebiet „Ockholm“
 im Zeitraum der Strömungsmeßkampagne vom 30. Oktober bis 30. November 1995

Den Messungen wurde näherungsweise ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil in der Vertikalen nach Gleichung 6-1 zugrundegelegt (HOUWING ET AL., 1995, S. 29). Für einen gegebenen Zeitpunkt t ist die Strömungsgeschwindigkeit $u_{z=0,25\text{ m}}$ sowie $u_{z=0,55\text{ m}}$ an der Position 9 bekannt. Damit existieren die beiden Gleichungen 6-1a und 6-1b mit insgesamt zwei Unbekannten, und z_0 sowie u_* können ermittelt werden.

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot (\ln(z) - \ln(z_0)) \quad (6-1)$$

für $z = 0,25\text{ m}$ und $\kappa = 0,4$:

$$u_z = \frac{u_*}{0,4} \cdot \ln\left(\frac{0,25\text{ m}}{z_0}\right) = \frac{u_*}{0,4} \cdot (\ln(0,25\text{ m}) - \ln(z_0)) = 2,5 \cdot u_* \cdot (-1,386 - \ln(z_0)) \quad (6-1a)$$

für $z = 0,55 \text{ m}$ und $\kappa = 0,4$:

$$u_z = \frac{u_*}{0,4} \cdot \ln\left(\frac{0,55 \text{ m}}{z_0}\right) = \frac{u_*}{0,4} \cdot (\ln(0,55 \text{ m}) - \ln(z_0)) = 2,5 \cdot u_* \cdot (-0,5978 - \ln(z_0)) \quad (6-1b)$$

Unter der Voraussetzung, daß die Form des angenommenen Strömungsprofils auch auf die anderen Meßpositionen übertragbar ist, kann mit den Gleichung 6-2 und 6-3 die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $v_{m \text{ rechn.}} = \bar{u}$ mit Hilfe der 0,25 m über der Sohle gemessenen Strömungsgeschwindigkeit $u_{z=0,25 \text{ m}}$ an allen Meßpositionen errechnet werden:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\frac{z_0}{d} - 1 + \ln\left(\frac{d}{z_0}\right)\right) \quad (6-2)$$

$$\frac{u_*}{u_z} = \frac{\ln(z_0)}{\ln(z)} \quad \text{bzw.} \quad u_* = u_z \cdot \frac{\ln(z_0)}{\ln(z)} \quad (6-3)$$

Mit:

- u_z Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung im Abstand z von der Sohle gemessen [m/s]
- u_* Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
- κ VON KARMAN-Konstante (= 0,4) [-]
- z vertikale Koordinate [m]
- z_0 lokale Rauheitslänge (*zero-velocity level*) [m]
- \bar{u} Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]
- d Wassertiefe [m]

Während der Meßkampagne herrschten im wesentlichen mittlere Tideverhältnisse (Anl. A 6-3). In Anlage A 6-4a bis A 6-4n sind exemplarisch Ergebnisse der Meßkampagne für eine Tidephase des 10. Novembers 1995 dargestellt, während der Wind konstant aus 200° wehte und daher nahezu senkrecht auf die Lahnungsfelder traf. Die mittlere Windgeschwindigkeit im betrachteten Zeitraum (ca. 0.30 Uhr bis 6.30 Uhr) betrug 6,7 m/s (4 Bft). Die Auswertung der Strömungsmessungen zeigt erwartungsgemäß bei steigender und fallender Tide maximale und während Stauwasser nahezu konstante, geringere Strömungsgeschwindigkeiten mit wechselnden Richtungen. Auf der Wattfläche vor den Lahnungsfeldern (Pos. 7, 10, 11, 13 und 14) traten Strömungsgeschwindigkeiten im Mittel von ca. 0,04 m/s bis ca. 0,08 m/s auf. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten betrugen bis zu rd. 0,22 m/s. An Position 7 traten vergleichsweise höhere Geschwindigkeiten als an den Positionen 10, 11, 13 und 14 auf, die durch die Lage der Position 7 im Hauptentwässerungsgraben zu erklären ist (Anl. A 6-4f, A 6-4j, A 6-4k, A 6-4m und A 6-4n).

In der Lahnungsöffnung des Feldes 3 (Pos. 8) wiesen die Strömungsgeschwindigkeiten, die senkrecht auf bzw. von den Querlahnungen weg gerichtet sind, während des Steigens und des

Fallens der Tide Größen zwischen rd. 0,50 m/s bis 0,60 m/s auf. Während des Stauwassers fand keine Strömung statt (Anl. A 6-4g). Dieses Verhalten ist nur bedingt für die Position 7 wiederzuerkennen (Anl. A 6-4g).

Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Feldern 3 und 4 (Pos. 3, 5, 6 und 9) wiesen im Mittel Werte von ca. 0,03 m/s. Sowohl die Mittel- als auch die Maximalwerte lagen für die Position 3 und 9, die sich jeweils in den Entwässerungsgräben bzw. in unmittelbarer Nähe befanden, etwas höher, und zwar im Mittel bis ca. 0,08 m/s (Anl. A 6-4c bis Anl. A 6-4e, Anl. A 6-4h und Anl. A 6-4i).

Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Feldern 1 und 2 betragen im Mittel an den Positionen 2 und 12 0,01 m/s, an der Position 1 im Mittel ca. 0,02 m/s (Anl. A 6-4a, Anl. A 6-4b und Anl. A 6-4l).

Eine Betrachtung der Strömungsrichtungen gibt folgendes Bild wieder: Analog zur Windrichtung strömte Wasser im wesentlichen senkrecht auf die Lahnungsfelder 1 bis 4 zu (ca. 200° an den Pos. 13 und 14), wurde durch die Hauptentwässerungsgräben (Pos. 7 und 8) in die Felder 1 und 2 geführt und von dort weiter mit gleicher Richtung (Pos. 3, 5, 6 und 9) in die nächsten Felder 3 und 4, wobei die Richtung der Pos. 3 nicht eindeutig zuzuordnen ist. In den Feldern 3 und 4 (Pos. 1, 2 und 12) sind überwiegend von der Hauptströmungsrichtung abweichende Strömungsrichtungen zu verzeichnen.

Ein Vergleich der während der Registrierung von Strömungsdaten zeitgleich aufgetretenen Wasserstände erlaubt näherungsweise Aussagen über das Einströmverhalten in Lahnungsfelder. So waren erste Strömungsgeschwindigkeiten an den Positionen 7 und 8, welche in den Hauptentwässerungsgräben liegen, zu verzeichnen, noch bevor die Wattflächen – hier durch die Positionen 13 und 14 repräsentiert – geflutet wurden. Mehr als 10 Minuten später als an den Positionen 13 und 14 konnten Strömungsgeschwindigkeiten an den Positionen 10 und 11 vor den Lahnungsfeldern verzeichnet werden, ebenso an Position 9a und wenig später auch an Position 3. Das bedeutet, daß das einströmende Wasser zunächst durch die Hauptentwässerungsgräben in die Felder geführt wurde. Erst später wurden die Felder hinter der Lahnung (Pos. 5 und 6) geflutet, und nach mehr als einer weiteren halben Stunde erreichten die Strömungen die deichnahen Felder (Pos. 1, 2 und 12).

Auf die zeitgleich mit den Seegangsmessungen durchgeführten Strömungsmessungen wird in Kapitel 6.6.2 eingegangen.

6.6 Seegangsmessungen

6.6.1 Prinzip der Auswertung

Bereits zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden zur Erfassung von Seegangskarakteristika jeweils vier Drucksensoren (Abb. 6.9) sowie ein kombinierter Druck- und Strömungssensor in den Testgebieten installiert. Die Energieversorgung der Sensoren sowie der Datentransfer zur Registrierung erfolgten über eine Seekabelverbindung zu einer binnendeichs lokalisierten Meßstation. Abbildung 6.1 zeigt die Positionen der Sensoren N1 bis N5 im Testgebiet „Ockholm“, Abbildung 6.2 die der Sensoren S1 bis S5 im südlich gelegeneren Testgebiet „Speicherkoog Süd“.

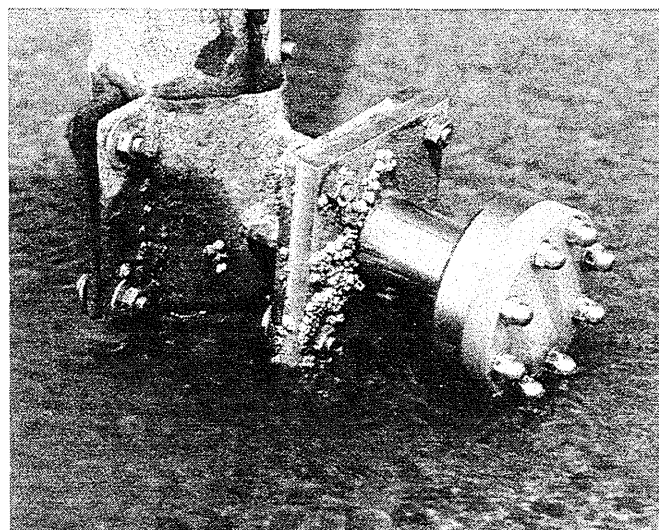
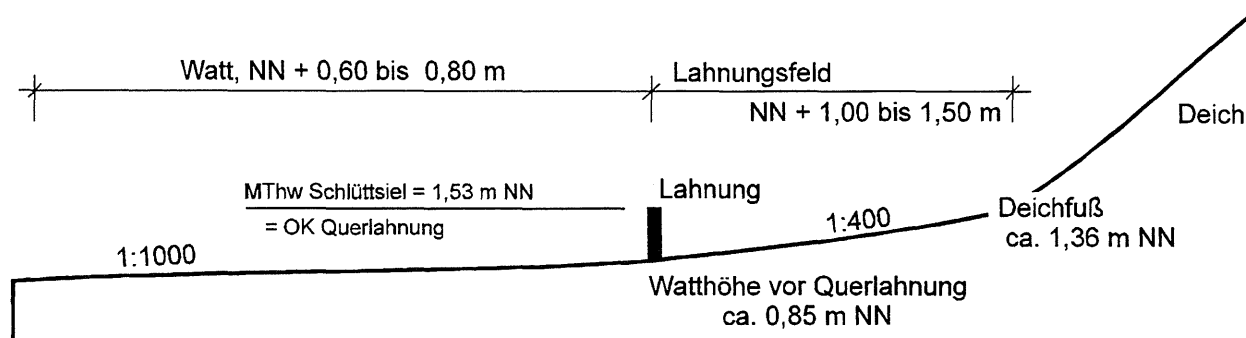


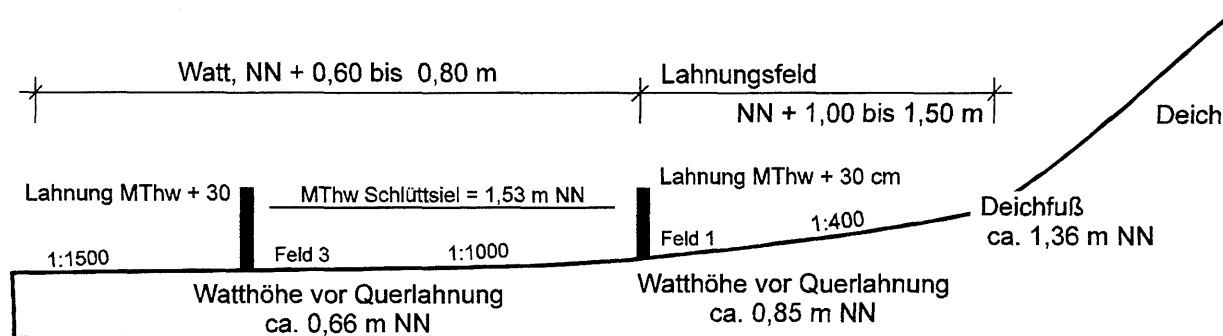
Abb. 6.9: In den Testgebieten eingesetzter, hier trockengefallener Drucksensor

Die in den Testgebieten mit einer Frequenz von 4 Hz aufgezeichneten und in Absprache mit den Projektpartnern als geeignet ausgewählten Datenreihen wurden von der FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY DES NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR ÖKOLOGIE (FSK) u.a. als 15-Minuten-Mittel nach dem „ZERO-DOWN-CROSSING-Verfahren“ ausgewertet. Diesen Seegangsdaten konnten im FRANZIUS-INSTITUT die aktuellen Wassertiefen zugeordnet werden. Die vorliegenden Daten beziehen sich ausschließlich auf das Testgebiet „Ockholm“ und für die Monate Dezember 1994 bis März 1995 auf dessen Aufbau mit zwei Lahnungsfeldern, deren Lahnungsoberkante jeweils dem MThw der Jahre 1981 bis 1990 des Tidepegels „Schlüttsiel“ (= 1,53 mNN) entsprach. Die Watthöhe vor den Querlahnungen Q1 und Q2 betrug zum Zeitpunkt der Messungen rd. 0,85 mNN, so daß die Lahnung eine Höhe über Geländeoberkante von rd. $1,53 \text{ mNN} - 0,85 \text{ mNN} = 0,68 \text{ m}$ aufwies (Abb. 6.10). Für die weiterhin ausgewerteten Daten der Monate August und September 1995 befanden sich im Testgebiet "Ockholm" vier Lahnungsfelder mit unterschiedlichen Höhenlagen der Lahnungsoberkante (vgl. Abb. 6.1). Die

Watthöhe vor den Querlahnungen Q3 und Q4 betrug zum Zeitpunkt der Messungen rd. 0,66 mNN, so daß die Lahnungen Höhen über Geländeoberkante von rd. 1,53 mNN - 0,66 mNN = 0,87 m bzw. rd. 1,83 mNN - 0,66 mNN = 1,17 m aufwiesen.



a)



b)

Abb. 6.10: Schematische Skizze der Watthöhen im Frühjahr 1995 (a) und im Sommer/Herbst 1995 (b) im Testgebiet „Ockholm“

In Tafel 6.1 sind die Höhenlagen der Sonden und der Geländeoberkante zum Zeitpunkt der Seegangsmessungen im Testgebiet „Ockholm“ dargestellt. Die Aufzeichnung von Seegangsdaten im Testgebiet „Speicherkoog Süd“ wurde nicht zuletzt durch den Diebstahl des Meßrechners erschwert. Daher liegen keine ausgewerteten Seegangsdaten aus diesem Testgebiet vor. Eine Analyse des Seegangsverhaltens im Bereich von Lahnungsfeldern konnte jedoch mit den ausgewählten Datenreihen sichergestellt werden. Die Auswahl zweier voneinander verschiedener und wie in Kapitel 6.1 beschriebener Testgebiete ist in erster Linie für die Beurteilung sedimentologischer und morphologischer Veränderungen von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang wird auf den Bericht des Teilprojektes "Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern" verwiesen.

MEBPOSITION	HÖHE DER GELÄNDEOBERKANTE [mNN]	HÖHENLAGE DER SONDE [mNN]	MEBPOSITION GÜLTIG AB:
N1	0,62	0,85	30.09.1994
	0,61	0,75	18.01.1995
	0,58	0,75	25.01.1995
N2	0,71	0,94	30.09.1994
	0,70	0,84	18.01.1995
	0,70	0,76	25.01.1995
N3	1,11	1,35	30.09.1994
	1,11	1,24	18.01.1995
	1,10	1,23	25.01.1995
N4	0,74	0,95	30.09.1994
	0,73	0,88	18.01.1995
	0,73	0,79	25.01.1995
N5	1,11	1,35	30.09.1994
	1,11	1,25	18.01.1995

Taf. 6.1: Höhenlagen der Sonden und der Geländeoberkante im Testgebiet „Ockholm“
 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM, 1997)

Die Auswertung der Daten (Sortiervorgänge, Programmierung einfacherer Rechenoperationen und Iterationen sowie statistische Betrachtungen) wurde mit Hilfe des Programms EXCEL 5.0 der Firma MICROSOFT® durchgeführt. Ebenso wurde das Programm zur grafischen Darstellung der Ergebnisse angewandt.

Anlage A 6-5 zeigt eine Übersicht der vorliegenden und im Rahmen des Teilprojektes "Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen" ausgewerteten Seegangsdaten.

6.6.2 Ermittlung von Eingangsparametern für die Untersuchungen

Zur Festlegung der Eingangsparameter für die numerischen und physikalischen Untersuchungen wurden aus dem Testgebiet „Ockholm“ vorliegende und nach o.g. Verfahren aufbereitete Seegangsdaten ausgewertet. Im Schwerpunkt wurden die Zeitbereichsparameter H_s ($= H_{1/3}$) und T_{H_s} ($= T_{H_{1/3}}$) bzw. H_{max} und $T_{H_{max}}$ betrachtet.

In einem ersten Analyseschritt wurden für die betrachteten Monate die gemeinsamen Häufigkeiten der Zeitbereichsparameter H_s ($= H_{1/3}$) und T_{H_s} ($= T_{H_{1/3}}$) dargestellt. Mit Hilfe dieser

Darstellung können die Bereiche der überwiegend auftretenden Wellenhöhen und der zugehörigen Perioden eingegrenzt werden. Zudem konnten die vorliegenden Daten auf ihre Qualität überprüft und möglicherweise fehlerhafte Daten selektiert werden. Hierbei wurden die mit recht großer Häufigkeit auftretenden Wellenhöhen unterhalb von 0,05 m (sowie die zugehörigen Perioden) im Rahmen einer detaillierteren Analyse nicht weiter berücksichtigt. Sie stellen die untere Grenze der registrierbaren Wellenhöhen infolge einer Wasserüberdeckung der eingesetzten Druckmeßdosen dar und sind daher als kritisch zu bewerten.

Die Analyse zeigte eine Konzentration der signifikanten Wellenperioden auf einen Bereich von 1,8 s bis 5,3 s. Die am häufigsten aufgetretenen Wellenhöhen variieren zwischen 0,05 m und 0,17 m. Lediglich Position N3 zeigt im Monat Januar ein abweichendes Ergebnis auf: Der Schwerpunkt der Wellenperioden liegt hier niedriger und die Wellenhöhen sind vergleichsweise linear verteilt, d.h. mit zunehmender Periode liegen höhere Wellen vor. Im Vergleich mit denen an den Positionen N1, N2, N4 und N5 treten Perioden im Bereich von 2,5 s bis 5,2 s in Kombination mit Wellenhöhen von 0,05 m bis 0,17 m an der Position N3 nicht auf, während dieses Phänomen nicht für die übrigen betrachteten Monate zu verzeichnen ist. In Anlage A 6-6 sind beispielhaft die gemeinsamen Häufigkeiten der Zeitbereichsparameter H_s und T_{Hs} im Monat Februar 1995 dargestellt.

Zur detaillierteren Analyse von Eingangsparametern wurden die im Zeitraum vom 14. Dezember 1994 bis 1. Januar 1995 gemessenen Seegangsdaten (registrierter Ausschnitt von zehn Tiden, vgl. Anl. A 6-5) betrachtet. Abbildung 6.11 zeigt exemplarisch Wellenrichtungen und „primär seegangsinduzierte“ (ALBERTS ET AL., 1995, S. 2) Strömungsgeschwindigkeiten der Meßposition N1 im Testgebiet „Ockholm“ während eines erhöhten Tidehochwassers mit ausgeprägtem Seegang. Ebenso wie in den Anlagen A 6-7a (Tide mit mittlerem Tidehochwasser und sehr geringem Seegang) und A 6-7b (Sturmflut) wird deutlich, daß die Wellenanlaufrichtung in guter Korrelation zur Windrichtung senkrecht zur Küstenlinie verläuft. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten auf der freien Wattfläche bewegen sich um 0,20 m/s, während auflandige (v_{max+}) Strömungsmaxima, insbesondere bei kurzfristigem Richtungswechsel von Wind- und damit Strömungsrichtung, Größen bis zu rd. 1,15 m/s (vgl. Anl. A 6-7b) aufweisen.

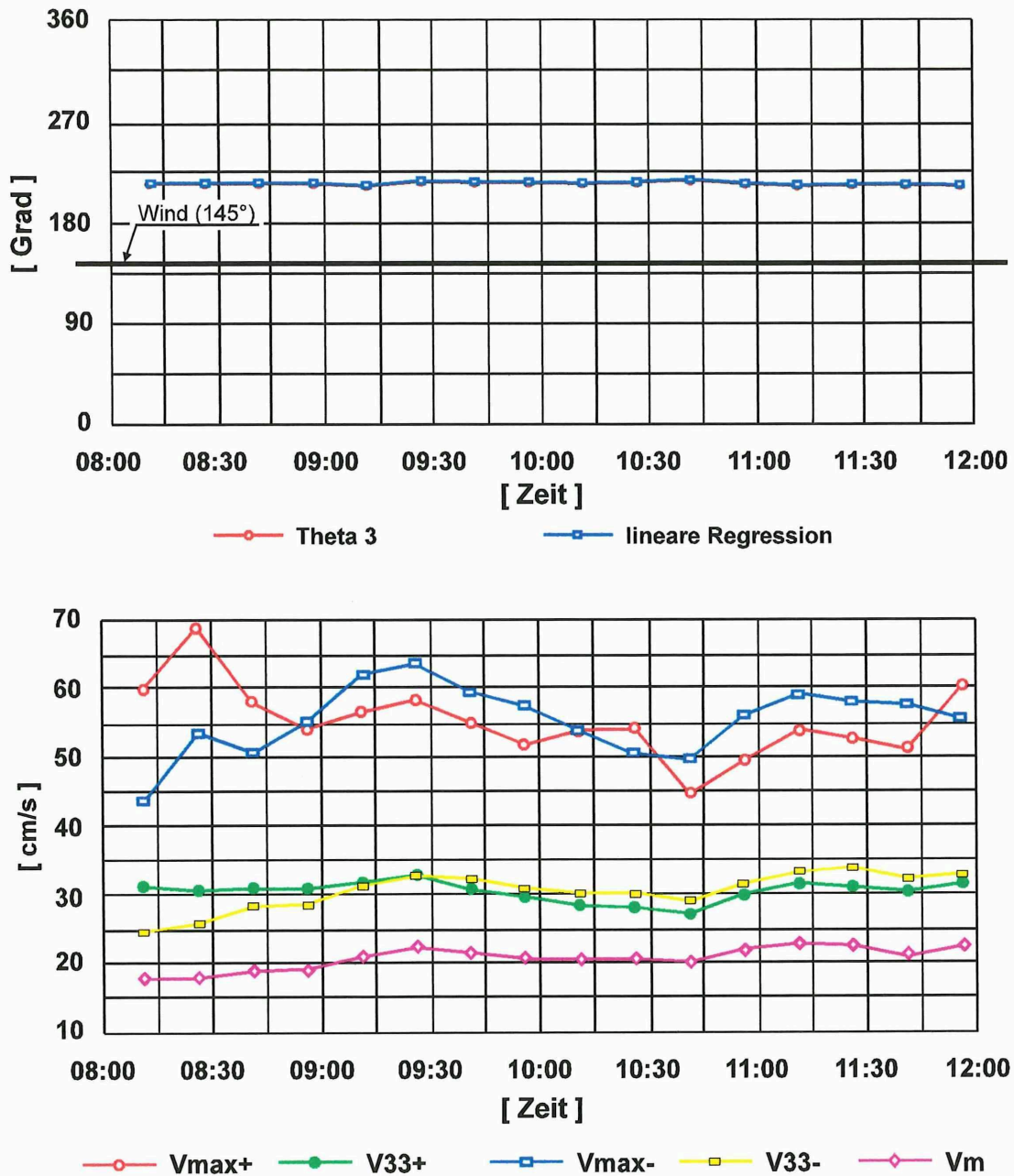


Abb. 6.11: Wellenrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten an Meßposition N1 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 29.12.1994 in der Zeit von 08.11 Uhr bis 11:56 Uhr; Beispiel für ein erhöhtes Tidehochwasser mit ausgeprägtem Seegang und schwachem küstenparallelen Wind (nach: ALBERTS ET AL., 1995, S. 25; Winddaten ergänzt)

Da für das Testgebiet „Ockholm“ näherungsweise von einem überwiegend senkrechten Wellenangriff der Küste bzw. der Lahnungsfelder ausgegangen werden kann (s.o.; vgl. auch Kap. 6.1), wurden insbesondere die Meßpositionen N1, N2 und N3 sowie die Positionen N1,

N4 und N5 gegenübergestellt. Exemplarische Vergleiche der Wellenhöhen der Positionen N2 und N4 bzw. N3 und N5 zeigten große Übereinstimmung (Anl. A 6-8 und A 6-9), so daß für die weitere Bestimmung von Eingangsgrößen für die Simulationen ausschließlich die Meßwerte der Positionen N2 und N4 betrachtet wurden.

Aus der Gesamtmenge der Einzelwerte einer Meßposition wurden für definierte Wassertiefen Histogramme erstellt, die eine Beurteilung der Verteilungshäufigkeit der Wellenparameter erlauben. Aus den Histogrammen wurden Summenlinien erstellt, die eine Bestimmung mittlerer Wellenhöhen und -perioden ermöglichen. Die gewählten, mittleren Wassertiefen der Meßpositionen N1 bis N5 beschreiben jeweils eine Wassertiefe von $d \pm 0,20$ m; so ist beispielsweise mit einer mittleren Wassertiefe von 1,60 m der Bereich von 1,51 m bis 1,70 m Wassertiefe erfaßt worden. Anlage A 6-10 zeigt exemplarisch ein gemeinsames Histogramm sowie die zugehörige Summenlinie der Wellenhöhen H_s für die Positionen N2 und N4 für eine einer mittleren Wassertiefe von rd. 1,15 m.

Die wesentlichen Ergebnisse der Auswertung sind in Tafel 6.2 zusammengestellt. Die schraffierten Daten wurden als Grundlage zur Ermittlung der Eingangsgrößen für die physikalischen Untersuchungen gewählt (vgl. Taf. 7.4).

Mittlere Wassertiefe in Höhe der Meßpositionen N2 und N4, rd. 350 m vom Deich entfernt [m]	Wasserspiegellage [mNN]	Mittlere Wellenhöhe [m]	Charakteristische Wellenhöhen [m]	Mittlere Periode [s]	Charakteristische Perioden [s]
0,45	1,21 bis 1,40	0,05	0,08 bis 0,15	3,2	2,0 bis 3,0 4,0 bis 5,0
0,65	1,41 bis 1,60	0,10	0,10 bis 0,20	2,5	2,0 bis 4,0 4,0 bis 6,0
0,85	1,61 bis 1,80	0,13	0,10 bis 0,25	2,5	2,0 bis 3,0 4,0 bis 5,0
1,05	1,81 bis 2,00	0,14	0,10 bis 0,25	2,5	2,2 bis 3,0 3,5 bis 4,5
1,25	2,01 bis 2,20	0,12	0,12 bis 0,15	2,5	2,5 bis 3,5
1,45	2,21 bis 2,40	0,15	0,23 bis 0,27	2,4	3,0 bis 4,0
1,65	2,41 bis 2,60	0,21	0,23 bis 0,27	2,8	3,0 bis 4,0
1,85	2,61 bis 2,80	0,13	0,10 bis 0,20 0,27 bis 0,35	2,5	2,5 bis 3,5

Taf. 6.2: Ergebnisse der Auswertung der Summenlinien und der gemeinsamen Häufigkeit der Zeitbereichsparameter H_s und T_{Hs} im Testgebiet „Ockholm“ für den Zeitraum vom 14.12.1994 bis 01.01.1995 zur Bestimmung von Eingangsparametern für die physikalischen und numerischen Untersuchungen (Datenbasis: NLO-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1995)

6.6.3 Analyse der Abhängigkeit der Wellenhöhen vom Wasserstand

Zur Analyse der Abhängigkeit der Wellenhöhen vom Wasserstand wurde den Seegangsdaten des Testgebietes „Ockholm“ der Monate Januar bis März sowie August und September 1995 die aktuellen Wassertiefen, bezogen auf die Tide des Pegels „Schlüttsiel“, zugeordnet (vgl. Anl. A 6-5). Vermutlich fehlerhafte bzw. für eine Analyse nicht geeignete Tiden (z.B. aufgrund einer für die Analyse unzureichenden Datendichte) wurden selektiert (vgl. Kap. 6.6.2).

Die Wasserstände in den betrachteten Monaten lagen zwischen rd. 0,50 m unter MThw und 1,85 m über MThw. Sturmfluten mit Tidehochwasserständen oberhalb MThw + 1,50 m wurden nur während wenigen Tiden Anfang Januar 1995 registriert (vgl. Anl. A 6-5). Zwischen dem Verlauf der Tidekurve und dem der Wellenhöhen ist eine strenge Korrelation zu verzeichnen. Abbildung 6.12 zeigt beispielhaft den Ausschnitt einer Tide vom 28. Februar/1. März 1995, ein Beispiel für eine Sturmflut mit Wasserständen bis etwa MThw + 1,50 m und ausgeprägtem Seegang. Hier nehmen die Wellenhöhen, sowohl signifikante als auch maximale, mit steigenden Tidewasserständen (ohne zunächst Windgeschwindigkeit und -richtung zu berücksichtigen) zu und folgen dem Verlauf der Tidekurve.

Die Auftragung der gemessenen und ausgewerteten Wellenhöhen H_s und H_{max} über die Wassertiefe an den Meßpositionen N1, N2 und N3 vor den Querlahnungen zeigen, wie das in Abbildung 6.13 dargestellte Beispiel für die Meßposition N2 im Monat Februar 1995, insbesondere bei den maximalen Wellenhöhen eine starke Streuung. Die Wellenhöhen nehmen jedoch etwa linear mit steigender Wassertiefe zu. Im vorgestellten Beispiel lag die signifikante Wellenhöhe H_s bei Wassertiefen von über einem Meter zwischen rd. 0,10 m und rd. 0,30 m. Einzelne Wellen erreichten dabei Höhen von $H_{max} = \text{rd. } 0,55 \text{ m}$.

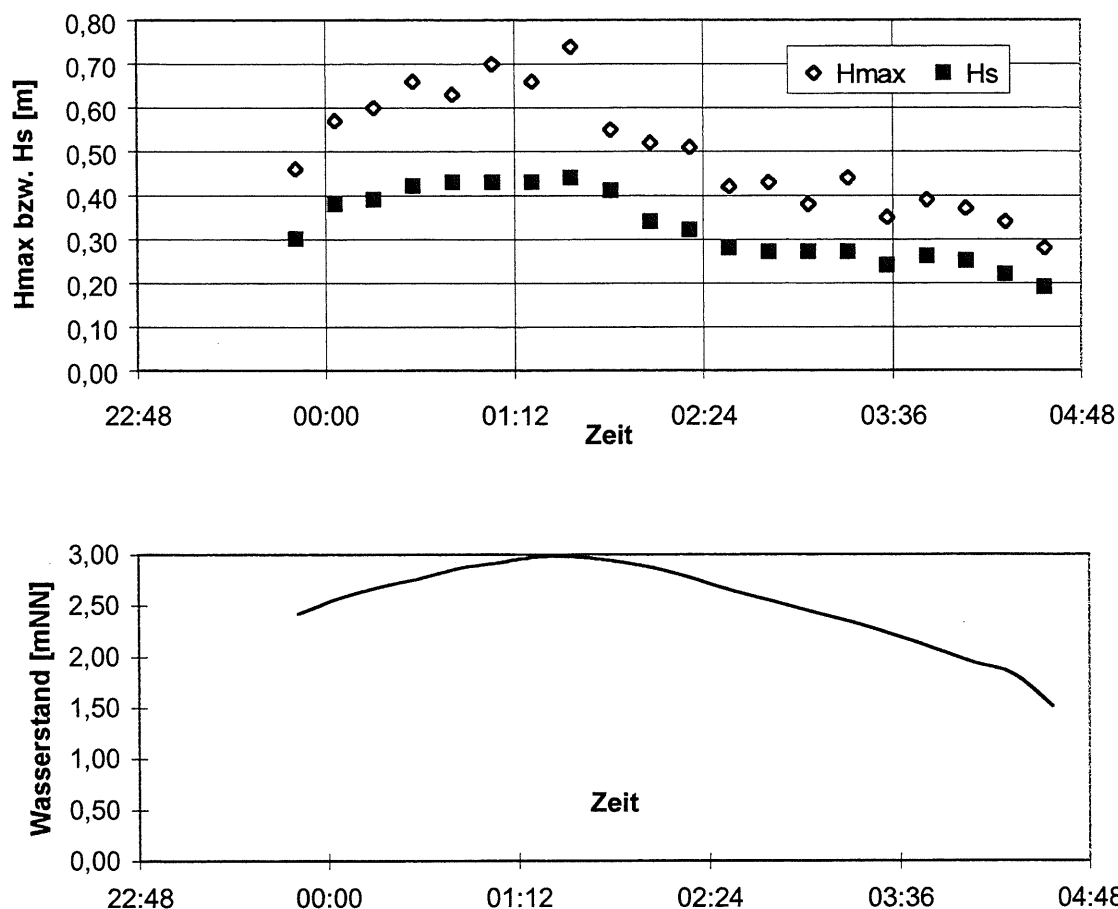


Abb. 6.12: Abhängigkeit der signifikanten (H_s) und der maximalen Wellenhöhe (H_{max}) an Meßposition N1 (Testgebiet „Ockholm“) vom Wasserstand für die Tidephase am 28.02./01.03.1995 in der Zeit von 23.48 Uhr bis 04.34 Uhr; Beispiel für ein erhöhtes Thw mit ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: NLO-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

Die Abhängigkeiten der signifikanten und der maximalen Wellenhöhen von der Wassertiefe an der Meßposition N2 im Testgebiet "Ockholm" sind für die betrachteten Monate in den Anlagen A 6-11a bis A 6-11e dargestellt.

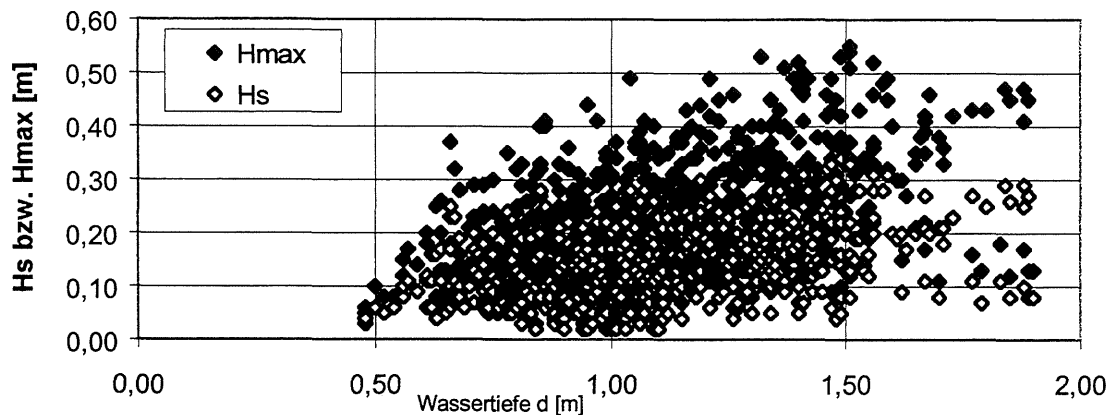


Abb. 6.13: Abhängigkeit der signifikanten (H_s) und der maximalen Wellenhöhe (H_{max}) an Meßposition N2 (Testgebiet „Ockholm“) von der Wassertiefe für alle im Monat Februar 1995 registrierten Tidephasen (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

6.6.4 Analyse der Abhängigkeit der Wellenhöhen von der Windgeschwindigkeit und -richtung

Für das Testgebiet „Ockholm“ wurde den Seegangsdaten (hier: H_{max} und H_s bzw. T_{Hmax} und T_{Hs}) des seewärts gelegenen Meßpunktes N1 der Monate Januar bis März sowie August und September 1995 Windgeschwindigkeiten und -richtungen zugeordnet. Während die Pegeldata in minütlicher Aufzeichnung vorlagen und daher direkt den Seegangsdaten (15-Minuten-Werte nach dem „ZERO-DOWN-CROSSING-Verfahren“) zugeordnet werden konnten, wurden die Windgeschwindigkeiten und -richtungen lediglich als stündliche Mittel angesetzt.

In Abbildung 6.14 sind die während der durchgeführten Messungen aufgetretenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen dargestellt. Während der Monate Januar bis März 1995 traten überwiegend Winde aus süd- bis westlicher Richtung auf. Während sich der Wind im Beobachtungsmonat Januar 1995 eher auf nörd-, west-, süd- und südöstliche Richtung verteilte, herrschten im Monat Februar 1995 Winde aus westlicher und südwestlicher Richtung vor. Im Monat März 1995 traten überwiegend Winde aus westlicher, auch aus südwestlicher Richtung auf. Zudem sind Winde geringerer Stärke aus südöstlicher Richtung zu verzeichnen. Die Windverteilung im Monat September 1995 entspricht im wesentlichen der Verteilung im März 1995. Zusätzlich sind verstärkt Winde aus östlicher Richtung zu verzeichnen. Im Monat August 1995 traten nahezu ausschließlich Winde aus nördlicher und nordwestlicher Richtung auf.

Ein Vergleich zeigt, daß die Verteilung im Beobachtungsmonat Februar dem langjährigen Mittel der Meßstation Hooge (vgl. Abb. 6.5) entspricht, während sie insbesondere in den Monaten Januar 1995, März 1995 und September 1995 eine größere Varianz der Richtung und Intensität aufweist.

Aus der Zuordnung der Wind- und Seegangdaten zeigt sich, daß die Messungen sowohl für Januar bis März 1995 tendenziell gleiche Ergebnisse an den Positionen N1 und N2 lieferten, wobei die Wellenhöhen der Position N2 vereinzelt größer waren als die der Position N1. Für die Position N3 sind bei Ausgangswellenhöhen von bis zu 0,15 m an den Positionen N1 und N2 bis zu 50% niedrigere Wellenhöhen zu verzeichnen, bei höheren Ausgangswellen stellen sich i.d.R. rd. 20% niedrigere Wellen an Position N3 ein. Während Windgeschwindigkeiten von $v > 9$ m/s liegen die Werte aller drei Meßpositionen in der gleichen Größenordnung. Die Wellenhöhen der Positionen N1, N4 und N5 sind in den Monaten Januar bis März 1995 mit den Höhen der Positionen N1, N2 und N3 vergleichbar. Für alle Monate Januar bis März 1995 als auch für die Monate August und September 1995 entspricht der zeitabhängige Verlauf der Windintensitäten im allgemeinen dem der Wellenhöhen und Wassertiefen (vgl. Anl. A 6-5 sowie Abb. 6.15).

Die Häufigkeiten der auftretenden Windrichtungen wurden für acht Haupt-Windsektoren ermittelt (vgl. Windrosen in Abb. 6.14):

1. $0^\circ \pm 22,5^\circ$ (Nord)
2. $45^\circ \pm 22,5^\circ$ (Nord-Ost)
3. $90^\circ \pm 22,5^\circ$ (Ost)
4. $135^\circ \pm 22,5^\circ$ (Süd-Ost)
5. $180^\circ \pm 22,5^\circ$ (Süd)
6. $225^\circ \pm 22,5^\circ$ (Süd-West)
7. $270^\circ \pm 22,5^\circ$ (West)
8. $315^\circ \pm 22,5^\circ$ (Nord-West)

Wie an einem Beispiel in Abbildung 6.16 gezeigt, ist mit einer Beanspruchung des sich bildenden Vorlandes infolge Seegangs im Testgebiet "Ockholm" erst ab Windstärken von 4 Bft (ca. 5,5 m/s bis 7,9 m/s) aus vorwiegend südwestlicher Richtung zu rechnen. Die Wellenhöhe nimmt mit ansteigender Windgeschwindigkeit zu. Bei 6 Bft (ca. 12 m/s) wird eine maximale Wellenhöhe von 0,40 m nur selten überschritten, bei 7 Bft bis 8 Bft (ca. 14 m/s bis 20 m/s) liegt sie zwischen 0,40 m und 0,70 m. Prinzipiell gleich verhalten sich die signifikanten Wellenhöhen, sie liegen jedoch bei 6 Bft (ca. 12 m/s) unterhalb von 0,25 m und erreichen im Bereich zwischen 7 Bft bis 8 Bft (ca. 14 m/s bis 20 m/s) bis zu rd. 0,45 m.

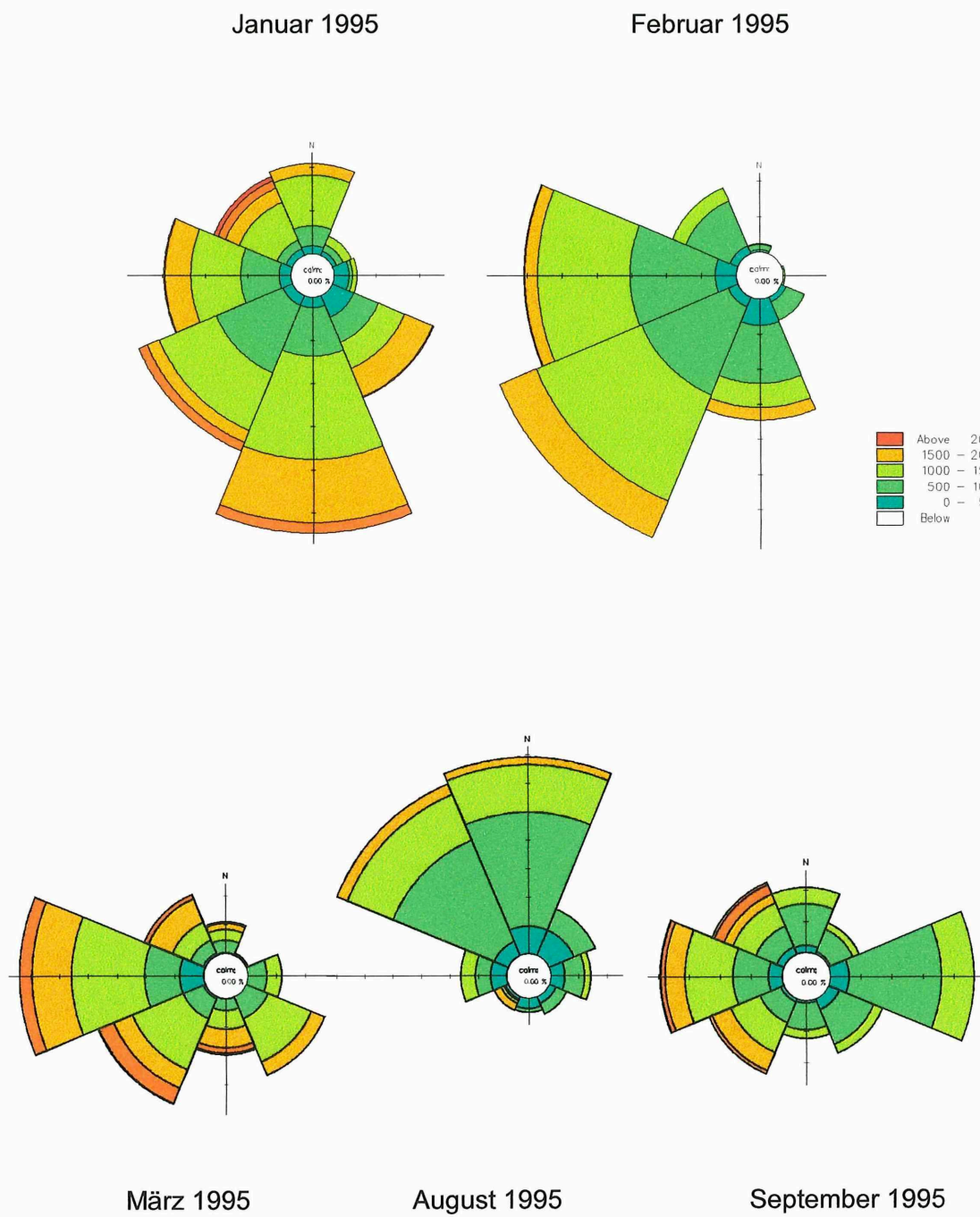


Abb. 6.14: Windrosen der Meßstation "Hallig Hooge"
für die Beobachtungsmonate
Dezember 1994, Januar bis März 1995 sowie August und September 1995
(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1995, 1996)

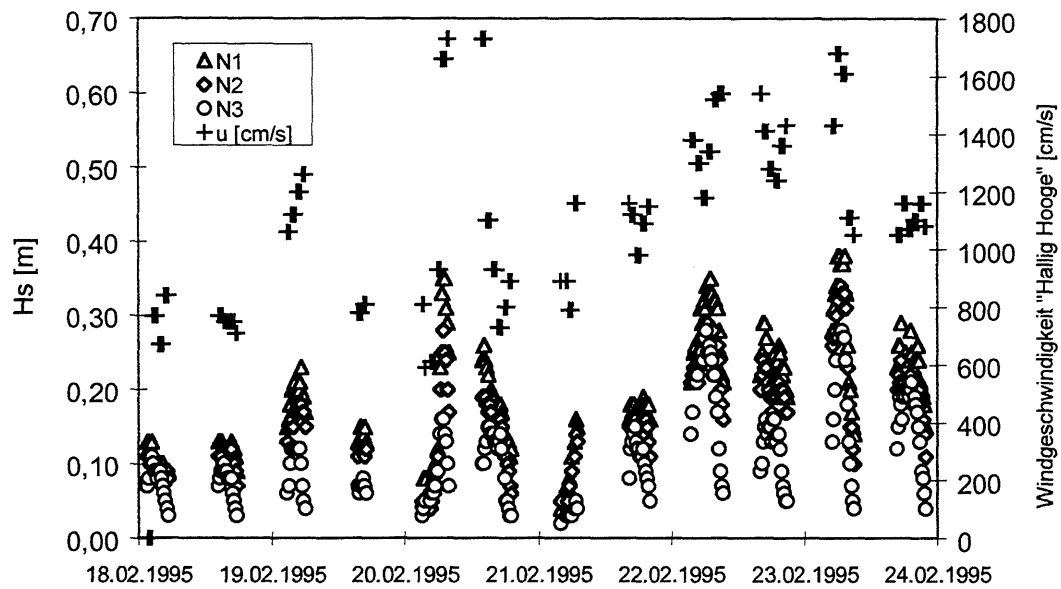
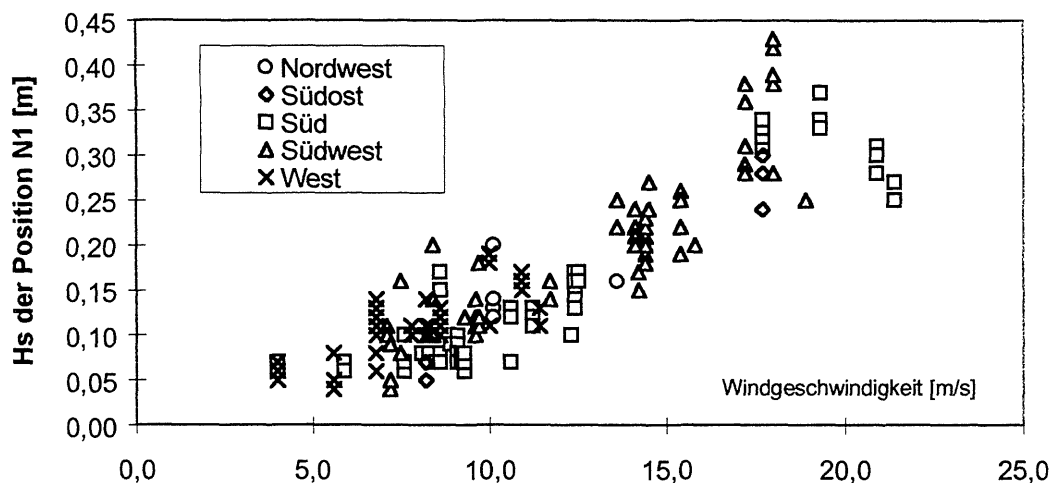
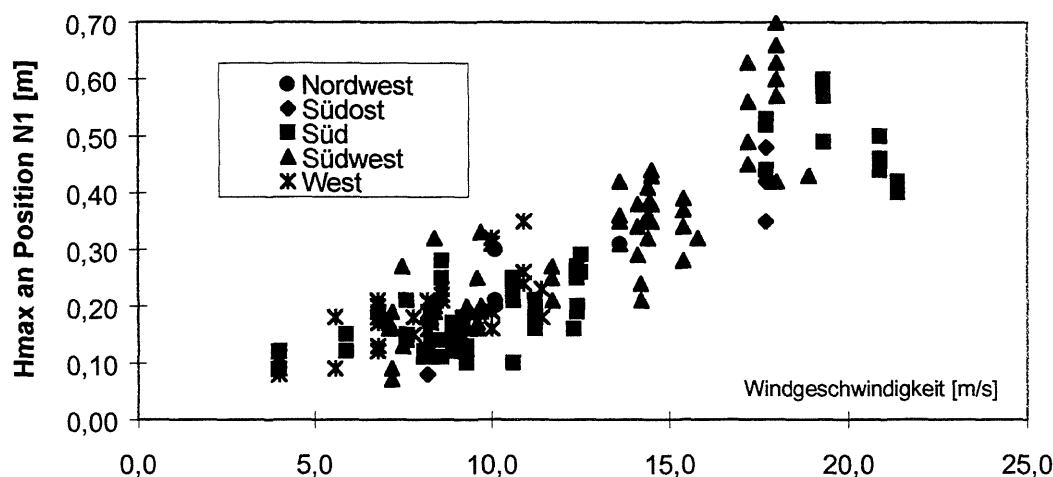


Abb. 6.15: Zeitlicher Verlauf der Wellenhöhen H_s an den Meßpositionen N1 bis N3 (Testgebiet „Ockholm“) mit den zugehörigen Windgeschwindigkeiten der Meßstation "Hallig Hooge" für die registrierten Tidephasen in der Zeit vom 18.02.1995 bis 23.02.1995; Tiden mit erhöhtem Thw bis MThw + 1,08 m und geringem bis ausgereiftem Seegang (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)



(a)



(b)

Abb. 6.16: Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe H_s (a) sowie der maximalen Wellenhöhe H_{max} (b) von der Windgeschwindigkeit und -richtung (Meßstation "Hallig Hooge") an der Meßposition N1 (Testgebiet „Ockholm“) für die registrierten Tidephasen in der Zeit vom 01.03.1995 bis 17.03.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

6.6.5 Berechnung des Energieflusses

Mit dem Ziel, vor und innerhalb von Lahnungsfeldern den Energiefluß bei unterschiedlichen Wetterbedingungen zu errechnen, wurde dieser, basierend auf der linearen Wellentheorie, für einzelne Tidezyklen der gewählten Betrachtungsmonate im Testgebiet „Ockholm“ für die gegebenen Eingangsgrößen (Wellenhöhe, Wellenperiode und Wassertiefe) als Produkt aus Wellenenergie und Gruppengeschwindigkeit nach den Gleichungen 6-4 bis 6-8 iterativ ermittelt.

Soweit möglich, wurde die Energieumwandlung durch eine Abnahme der Wassertiefe bzw. einen Anstieg des Sohlenniveaus oder die baulichen Maßnahmen in Form von Lahnungen interpretiert.

Die Energieflußkomponente F_m in Berechnungsfortschrittsrichtung bezogen auf die Einheitsbreite des Wellenkamms, d.h. die Energie, die in Fortschrittsrichtung durch einen Querschnitt (bestehend aus der Breite „1“ und den Abstand der Wellenkammlage zur Seesohle) pro Wellenperiode übertragen wird, ergibt sich für die zweidimensionale Wellenbewegung nach linearer Wellentheorie zu:

$$F_m = E \cdot c_g \quad (6-4)$$

$$c_g = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right] \cdot c = n \cdot c \quad (6-5)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(k \cdot d)} = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)} = \sqrt{\frac{g \cdot c \cdot T}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{c \cdot T}\right)} \quad (6-6)$$

wobei die Energie des unregelmäßigen Seegangs durch Gleichung (6-7) definiert ist:

$$E_{ges} = 1/8 \cdot \rho \cdot g \cdot H_{rms}^2 \quad (6-7)$$

mit:
$$H_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j H_i^2}{j}} \quad (6-8)$$

Mit:

- F_m mittlere Energieflußkomponente
in Berechnungsfortschrittsrichtung [$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 \cdot 1 / \text{m} = \text{W} / \text{m}$]
- E_{ges} Gesamtenergie eines unregelmäßigen Seegangs [$\text{W} \cdot \text{s} / \text{m} \cdot 1 / \text{m}$]
- T Wellenperiode [s]
- L Wellenlänge [m]
- c_g Gruppengeschwindigkeit (= $n \cdot c$) [m/s]
- c Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der Einzelwelle (= L/T) [m/s]
- n Proportionalitätsfaktor [-]
- k Wellenzahl (= $2 \cdot \pi / L$) [1/m]
- d Wassertiefe [m]
- ρ Dichte des Fluids (hier gewählt: $\rho = 1.024 \text{ kg/m}^3$) [kg/m^3]
- g Erdbeschleunigung [m/s^2]
- H Wellenhöhe [m]
- H_{rms} Wellenhöhe „*root-mean-square*“ [m]
- i Laufvariable [-]
- j Anzahl der Wellenhöhen einer Messung [-]

Aus den Ergebnissen der Berechnung des Energieflusses wurden drei charakteristische Beispiele ausgewählt: Eines für mittlere Tidewasserstände und geringem Seegang (Abb. 6.17), eines für einen ausgereiften Seegang bei erhöhten Wasserständen, deren Tidehochwasser rd. 1,30 m über MThw liegt (Abb. 6.18) und eines für eine Sturmflut (Abb. 6.19). Die zu den Abbildungen 6.17 bis 6.19 zugehörigen Wasserstände sowie die Wellenhöhen an den Meßpunkten N1 bis N5 sind in den Anlagen A 6-12a bis A 6-12c dargestellt.

Für die Beispiele mit höheren Wasserständen und ausgeprägtem Seegang (Abb. 6.18 und 6.19) liegen die Beträge des Energieflusses mit bis zu rd. 400 W/m für alle fünf Meßpositionen N1 bis N5 um ca. ein 20-faches höher als im Beispiel einer mittleren Tide mit geringem Seegang (Abb. 6.17). Im Fall der erhöhten Tidewasserstände treten, bedingt durch den senkrecht auf die Lahnungsfelder gerichteten Wind, vergleichsweise höhere Wellen als während der dargestellten Sturmflut mit küstenparallelem Wind auf. Zudem ist im erstgenannten Fall mit einem verstärkten Reflexionsverhalten an den Lahnungen zu rechnen.

Für die ausgewählten Beispiele zeigt sich, aufgetragen über die Zeit, eine mehr oder weniger deutliche Energiereduzierung durch das Lahnungsbauwerk in Abhängigkeit vom Wasserstand: Die Energien an den Meßpositionen N3 und N5 sind vergleichsweise geringer als die der Positionen N2 und N4. Prozentual werden die Energien im Fall mittlerer Tiden und geringer Seegangsbelastung bis zu rd. 55% reduziert. Die maximale Energiereduzierung im Fall der ausgewählten Sturmflut (Abb. 6.19) ist vergleichsweise größer als bei erhöhten Tidewasserständen und im Mittel höheren Wellen (Abb. 6.18). Während die Energie im Fall der Sturmflut in der Regel reduziert wird, sind während erhöhter Wasserstände keine Energiereduzierungen im Lahnungsfeld zu verzeichnen. Hier kann das Lahnungsbauwerk also keinen energiemindernden und für das Sedimentationsverhalten im Feld entscheidenden Einfluß mehr ausüben.

Im allgemeinen ist zwar eine Zunahme der Wellenenergie mit steigenden Tidewasserständen zu verzeichnen (Abb. 6.17 und 6.18 bzw. Anl. A 6-12a und A 6-12b), jedoch ist sie im wesentlichen von der Wellenhöhe abhängig. Bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ wurde darauf hingewiesen, „daß der Energiegehalt von Wellen nicht linear, sondern vielmehr exponentiell mit der Wellenhöhe ansteigt“, so daß „die Hellerkante und -oberfläche bereits bei einer nur geringen Zunahme der Wellenhöhe erheblich stärker belastet“ wird (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 49). So ist der Energiefluß während der Tidehochwässer, verbunden mit vergleichsweise geringeren Wellenhöhen (vgl. Anl. A 6-12c), deutlich reduziert (Abb. 6.19).

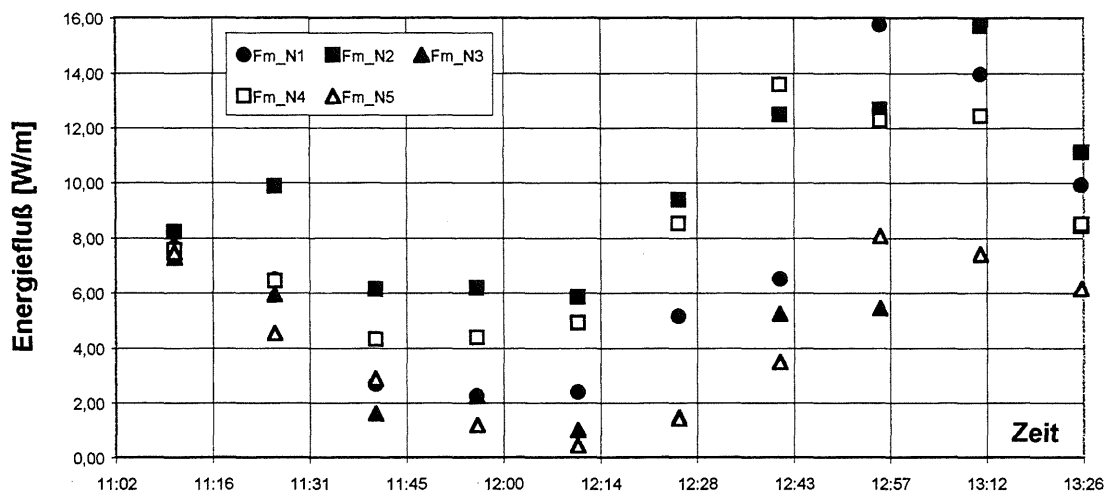


Abb. 6.17: Zeitlicher Verlauf des Energieflusses an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 27.02.1995 in der Zeit von 11.11 Uhr bis 13.26 Uhr; Beispiel für eine mittlere Tide bei geringem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

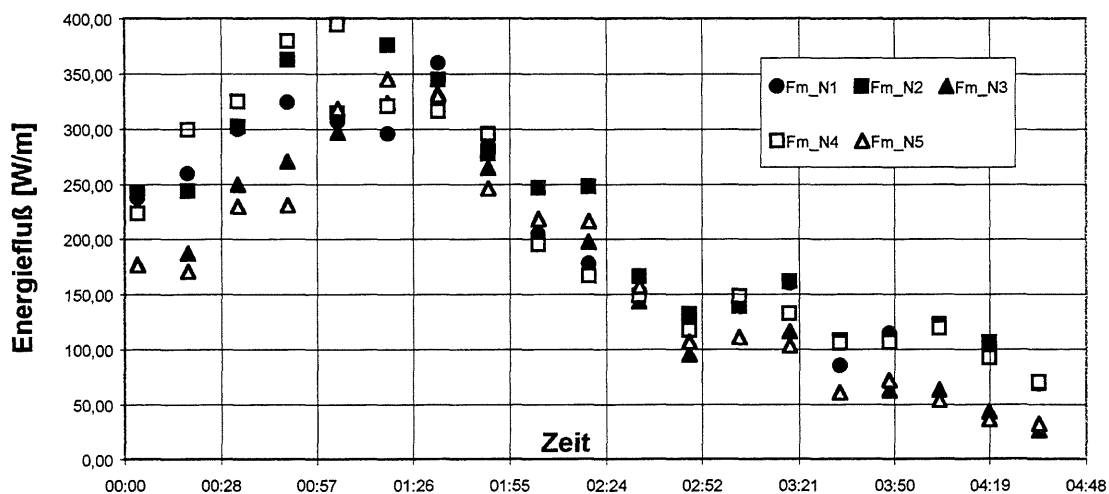


Abb. 6.18: Zeitlicher Verlauf des Energieflusses an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 01.03.1995 in der Zeit von 00.03 Uhr bis 04.33 Uhr; Beispiel für eine erhöhte Tide bei ausgereiftem Seegang und senkrecht auf die Testfelder gerichtetem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

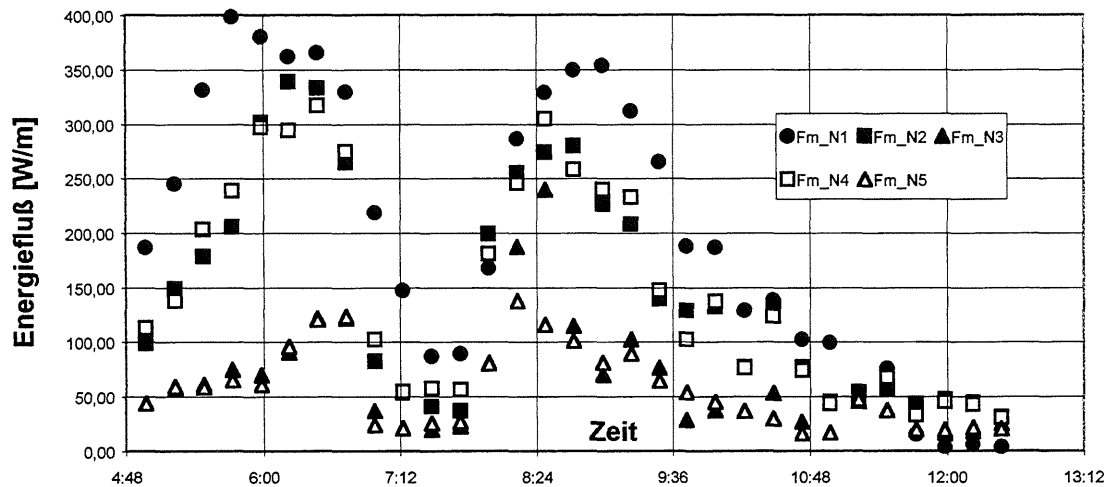


Abb. 6.19: Zeitlicher Verlauf des Energieflusses an den Meßpositionen N1 bis N5 (Testgebiet „Ockholm“) für die Tidephase am 27.02.1995 in der Zeit von 11.11 Uhr bis 13.26 Uhr; Beispiel für eine Sturmflut bei küstenparallelem Wind (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

6.6.6 Analyse des Transmissionsverhaltens von Lahnungen im Testgebiet "Ockholm"

Für die geschilderte Situation im Testgebiet „Ockholm“ kann z.B. aus dem Verhältnis der Wellenhöhen an den Meßpositionen N3 oder N5 (in den Lahnungsfeldern) zu den Wellenhöhen der Meßpositionen N2 oder N4 (vor der Querlahnung) der Dämpfungsgrad der Wellen, der durch den Transmissionskoeffizienten beschrieben werden kann, in Abhängigkeit von der Wassertiefe in den Monaten Januar bis März 1995 ermittelt werden. Für die Monate August und September 1995 wurden analog die Meßergebnisse der Positionen N1 (vor den Querlahnungen) und N2 bzw. N3 (in den Feldern) ins Verhältnis gesetzt.

Die Auswertung zeigt, ähnlich wie die Ergebnisse der Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ bzw. „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarrien der Deutschen Bucht“, daß ab einer bestimmten Wassertiefe (im gezeigten Beispiel der Abb. 6.20 etwa ab 1,40 m / vgl. Anl. A 6-13) der Seegang durch die Lahnungen nur noch unwesentlich oder nicht mehr gedämpft werden kann und die Wellenhöhen sogar im Feld höher als außerhalb sein können. Im Bereich der geringeren Wassertiefen verläuft der Transmissionskoeffizient mit rd. 30% beginnend, etwa linear, nach der genannten „Grenzwassertiefe“ im

wesentlichen konstant. Dies gilt sowohl für die maximalen als auch die signifikanten Wellenhöhen.

Das bedeutet, daß die zum Zeitpunkt der Messungen vorhandenen Lahnungen mit einer Höhe von rd. 0,70 m (OK Lahnung = M_{Thw} (Schlüttsiel, 1981 - 1990)) für Wasserstände oberhalb $M_{Thw} + 0,70$ m für die Situation im Testgebiet „Ockholm“ als nicht wirksam eingestuft werden können. Hier ist jedoch anzumerken, daß Wasserstände oberhalb $M_{Thw} + 0,50$ m für die ausgewerteten Tidephasen lediglich in 23 von 100 Tiden auftraten.

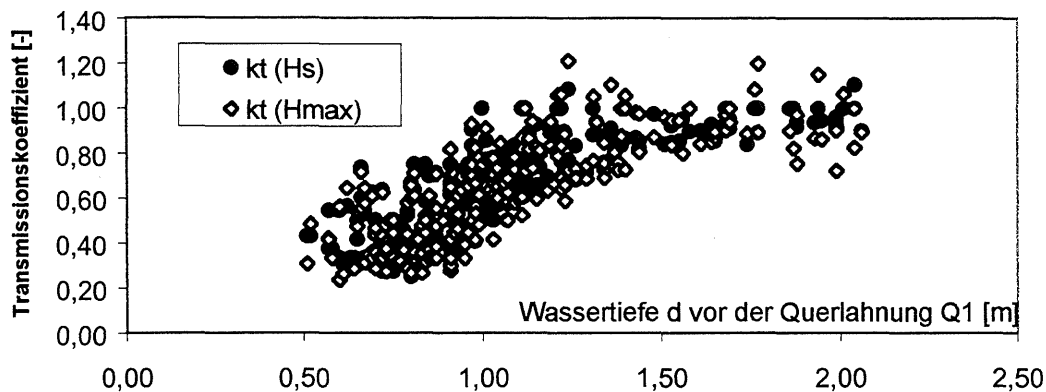
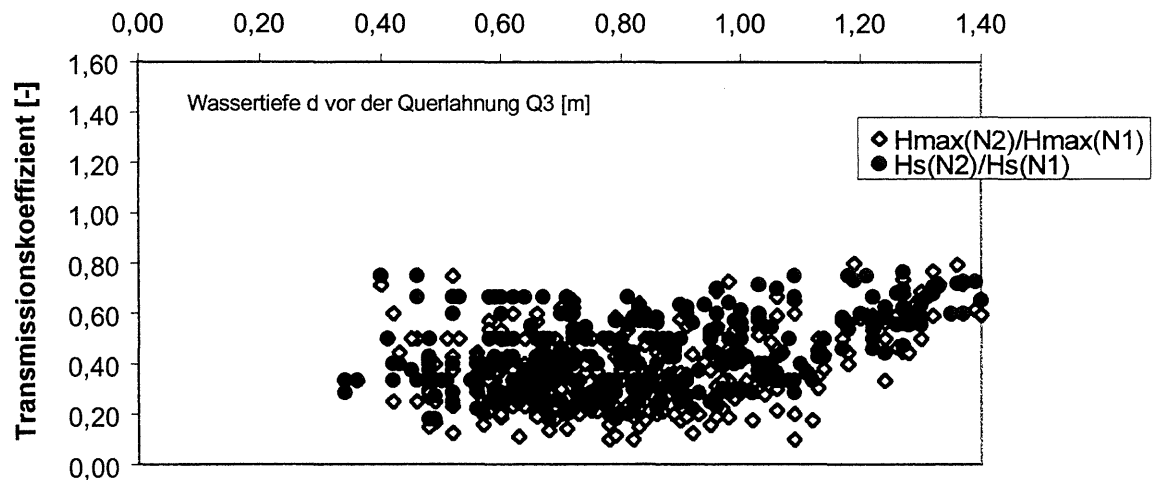


Abb. 6.20: Zusammenhang zwischen dem Dämpfungsgrad der Wellenhöhen H_s und H_{max} (Transmissionskoeffizienten der Positionen N3 zu N2) und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q1 (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.03.1995 bis 17.03.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1996 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

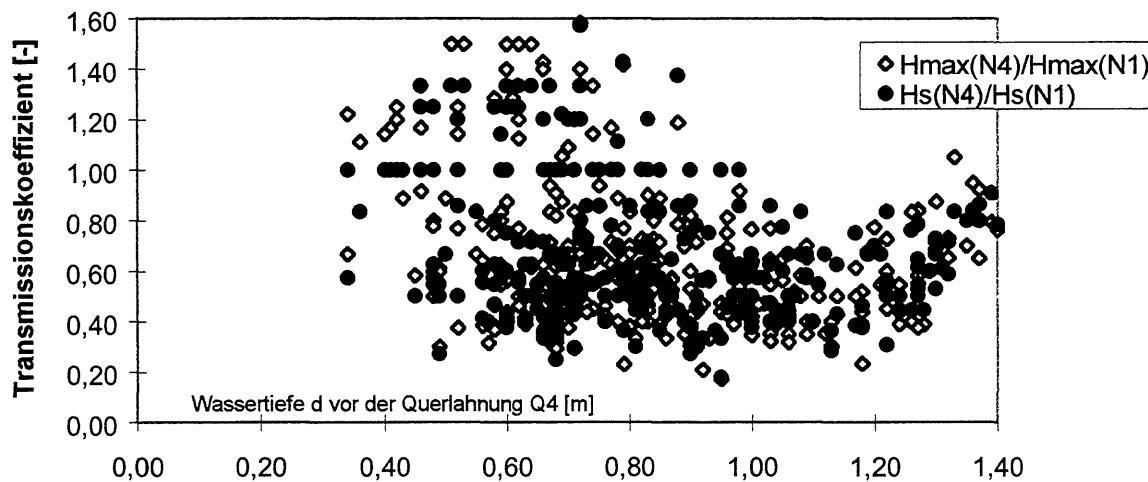
Die Auswertung der aus den Monaten August und September 1995 vorliegenden Seegangsmessungen ermöglichte den Vergleich zweier unterschiedlich hohen Lahnungen bei gleichen Seegangbedingungen. Die Abbildungen 6.21 und 6.22 zeigen das Dämpfungsverhalten von Lahnungen, dargestellt in Form des Transmissionskoeffizienten. Es zeigt sich, daß die um 0,30 m höher als die Querlahnung Q4 gelegene Querlahnung Q3 ($h = \text{rd. } 1,17$ m) die an Position N1 registrierten Wellen stärker reduziert als die niedrigere, rd. 0,87 m hohe Querlahnung Q3. Die Wellenhöhen im Feld 4 hinter der niedrigeren Querlahnung Q4 erreichen in einigen Fällen höhere Werte als die Ausgangswellenhöhen an der Position N1 (Transmissionskoeffizienten $>1,00$ bis 1,60 / Abb. 6.21b).

Die zeitgleiche Darstellung der signifikanten und maximalen Wellenhöhen für z.B. die Meßpositionen N1 bis N3 zeigt, daß die maximalen Wellenhöhen erwartungsgemäß stärker durch Lahnungen gedämpft werden als die signifikanten (Anl. A 6-14a). Das in Anlage A 6-14b dargestellte Beispiel für unterschiedlich hohe Lahnungen belegt eine stärkere Seegangsdämpfung in dem mit einer höheren Lahnung (Die Oberkante der Lahnung liegt 0,30 m über M_{Thw} .)

umgebenen, seewärts gelegenen Feld 3 (Meßpunkt N2). Die Seegangsdämpfung in den deichnah gelegenen Feldern 1 und 2 (Meßpunkte N3 und N5) ist nahezu gleich. Bei der Darstellung der Transmissionskoeffizienten ist jedoch zu beachten, daß die Wellenhöhen in den Monaten August und September 1995 relativ geringe Werte aufwiesen, die zu vergleichsweise hohen Transmissionskoeffizienten führen und die tendenzielle Aussage möglicherweise verfälschen.

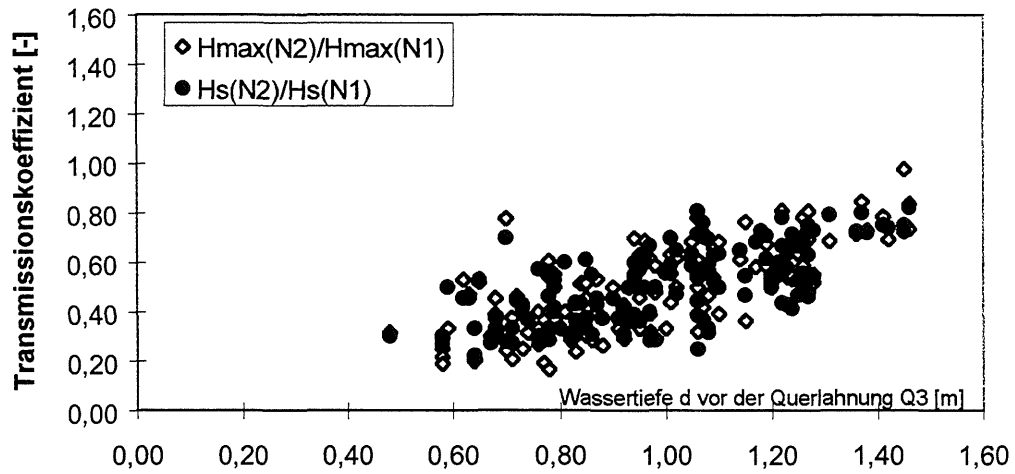


(a)

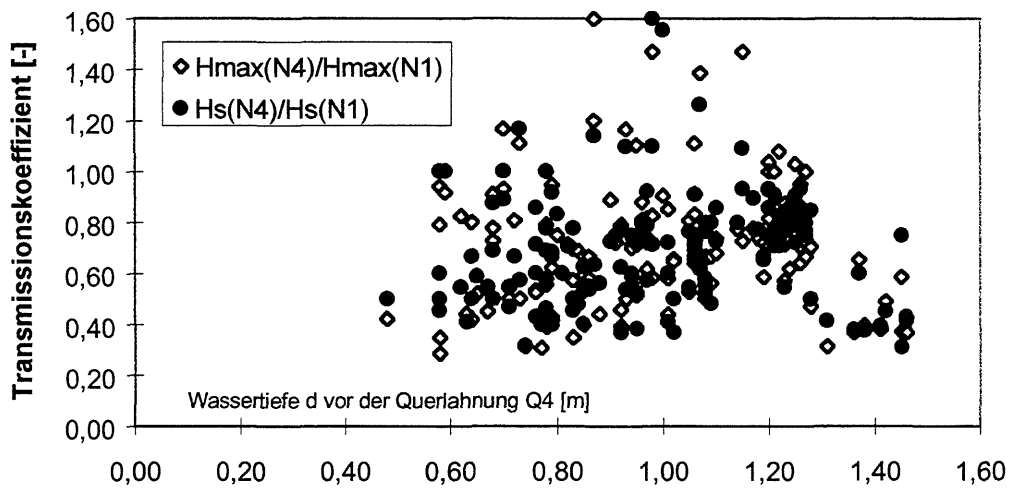


(b)

Abb. 6.21: Transmissionskoeffizienten der Positionen N2 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q3 (a) sowie der Positionen N4 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q4 (b) (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.08.1995 bis 31.08.1995 (Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1997 / NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997)



(a)



(b)

Abb. 6.22: Transmissionskoeffizienten der Positionen N2 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q3 (a) sowie der Positionen N4 zu N1 und der örtlichen Wassertiefe an der Querlahnung Q4 (b) (Testgebiet "Ockholm") in der Zeit vom 01.09.1995 bis 30.09.1995

(Datenbasis: AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT, 1997 /
NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1997)

7 Physikalische Untersuchungen an Buschlahnungen

7.1 Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Buschlahnungen in der Strömungsrinne

7.1.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Die Simulation und Beurteilung von Erosions- und Sedimentationsvorgängen in Lahnungsfeldern setzt die Kenntnis der Ein- und Ausströmvorgänge in den Lahnungsfeldern bei auf- bzw. ablaufender Tide voraus. Ein Teil des Wasservolumens strömt durch die Lahnungen, sofern sie durchlässig sind, während andere Anteile durch die Hauptöffnung eines Lahnungsfeldes oder bei entsprechenden Tidewasserständen durch Überströmung der Lahnungen in das Feld gelangen. Ziel ist es daher, zunächst diese Anteile zu ermitteln. Hierzu wurden Einzeluntersuchungen in einer Strömungsrinne durchgeführt an die sich weitere Untersuchungen in einer Wellenrinne anschlossen (s. Kap. 7.2).

In der technischen Hydraulik werden dem Begriff Einbauten alle Einzelbauwerke zugeordnet, die den regulären Gerinnequerschnitt einengen und den Durchfluß behindern. Dazu gehören sowohl horizontal ausgerichtete Bauelemente an der Gerinnesohle als auch vertikal angeordnete Einbauten (SCHRÖDER, 1994, S. 164). Diese Bauwerke widerstehen der Strömung und rufen mehr oder weniger große Energiehöhenverluste hervor. Neben dem Spiegellinienverlauf interessiert in der Regel der Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasserspiegel, der Aufschluß über die Durchlässigkeit des Bauwerkes gibt. Dieses Prinzip wurde den Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Buschlahnungen zugrundegelegt.

7.1.2 Versuchseinrichtungen und Meßtechnik

In einer 1,00 m tiefen, 0,98 m breiten und rd. 22,00 m langen Strömungsrinne mit fester Sohle wurde zur Analyse des Durchströmungsverhaltens von Buschlahnungen Ausschnitte verschiedener Lahnungen im Maßstab 1:1 nachgebildet (Abb. 7.1 / Taf. 7.1). Für verschiedene tideabhängige im Modell stationäre Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten wurden Messungen der Wasserstände und der Geschwindigkeiten vor und hinter dem Lahnungsbauwerk durchgeführt. Zur Steuerung des Modells wurden der Literatur in erster Näherung tideabhängige Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von Lahnungsfeldern entnommen. Die Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeiten wurden anhand der durchgeführten und in Kapitel 6.5 dargestellten Strömungsmessungen überprüft.

Zunächst wurde das Durchströmungsverhalten einer Buschlahnung mit und ohne seitlichen Anwurf untersucht. Die Lahnung wurde aus den in der Natur eingesetzten Materialien

(Buschwerk, Pfähle, Draht) so eingebaut, daß sie im wesentlichen den Ausführungsvorschriften des AMTES FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ALW) HUSUM entspricht (Anl. A 7-1). Dieser Einbauzustand entspricht einem idealisierten, in der Natur nur unmittelbar nach dem Einbau, vor dem Anwurf der Lahnung existierenden Zustand, der im Rahmen der Untersuchungen als Variante S-1 (vgl. Taf. 7.1, Z. 1) bezeichnet wird.

Das Buschmaterial lagert laborbedingt für längere Zeit trocken und wird nicht, wie in der Natur zweimal täglich mit Salzwasser bespült. Ferner setzen sich in der Natur, saisonal und regional abhängig, im Verlauf weniger Wochen nach Herstellung und Anwurf der Lahnungen Sedimente sowie organische und anorganische Materialien zwischen das Buschwerk und verringern durch diese Verdichtung den Grad der Porosität. Diese Phenomene können sowohl im numerischen als auch im physikalischen Modell nicht nachgebildet werden.

In einem weiteren Schritt wurden die Nadelholzfaschinen im Zwischenraum der Buschlahnung durch den Einbau von definierten Filtern mit einer Lang- bzw. Rundlochung schematisiert, so daß in Abhängigkeit vom Wasserstand (bzw. vom Durchfluß) vor der Lahnung eine Ermittlung der Größenordnung des Porositätsbeiwertes als Eingangsparemeter für die numerischen Simulationen möglich wurde.

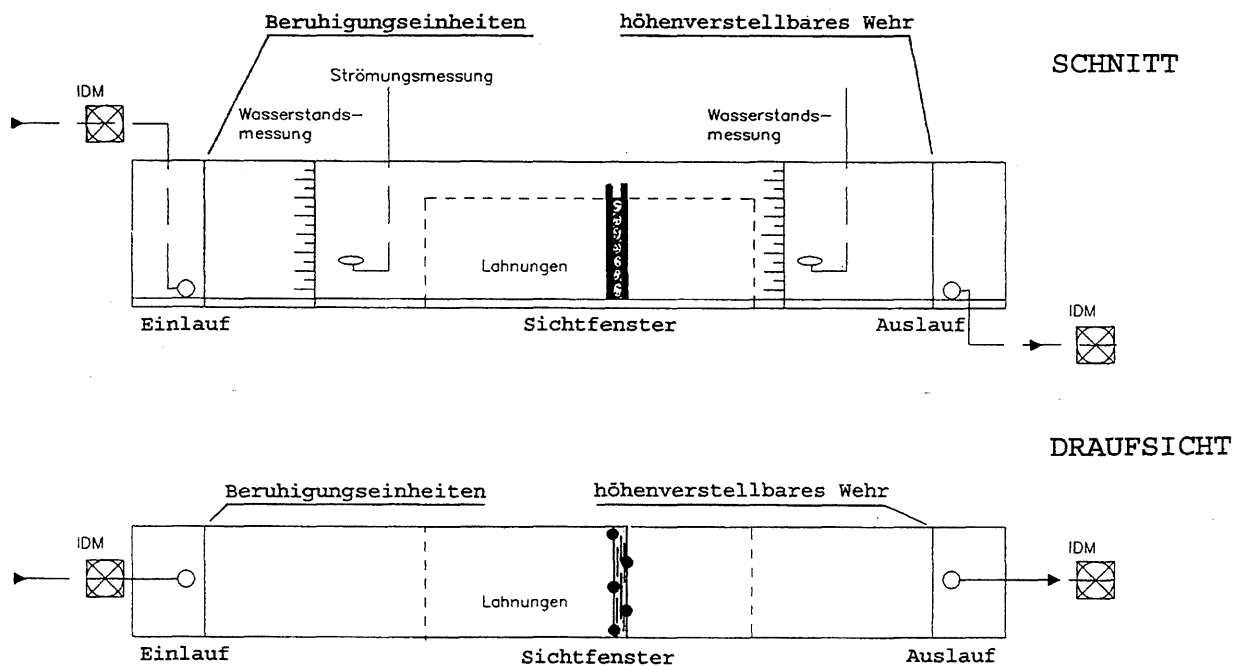


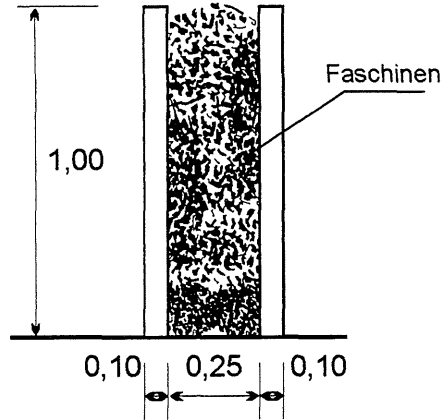
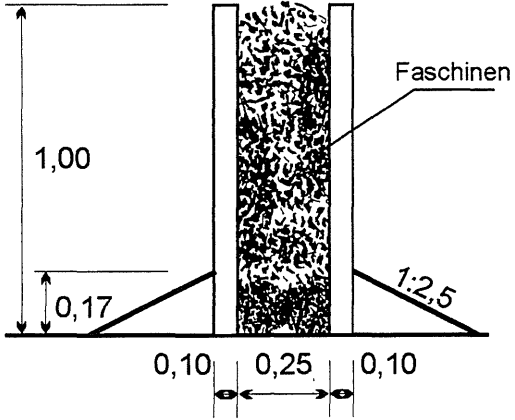
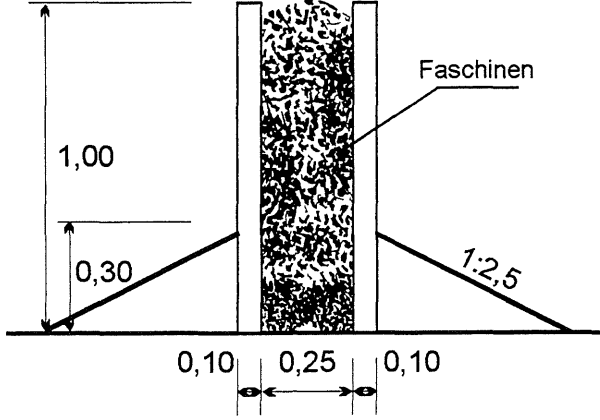
Abb. 7.1: Strömungsrinne mit Betriebseinrichtungen und Versuchseinbauten

Tafel 7.1 stellt die untersuchten Lahnungsvarianten dar, deren Höhe jeweils 1,00 m und deren lichte Breite 0,25 m betrug. Für die Simulation des seitlichen Anwurfs der Varianten S-2 und S-3 wurde ein erosionsstabiles Material (Quarzporphyr, $d = 5 \text{ mm bis } 22 \text{ mm}$, homogen verteilt, Rohdichte = $2,6 \text{ kg/dm}^3$) gewählt und beidseitig an die Variante S-1 (Abb. 7.2) geschüttet. Die Höhe des Anwurfs der Variante S-2 beträgt 0,17 m und die Böschungsneigung rd. 1:2,5, während Variante S-3 eine Anwurfhöhe von 0,30 m und ebenfalls eine Böschungsneigung von 1:2,5 aufweist. Die offene Siebfläche der anstelle der Nadelholzfaschinen verwendeten Langlochfilter (Var. S-4) beträgt 29,78%, d.h. rd. 70% des Rinnenquerschnitts sind verbaut. Analog den Langlochfiltern wurde je ein Rundlochfilter an der Innenseite der beiden Pfahlreihen befestigt (Var. S-5). Die offene Siebfläche der verwendeten Filter beträgt dabei 24,23%.

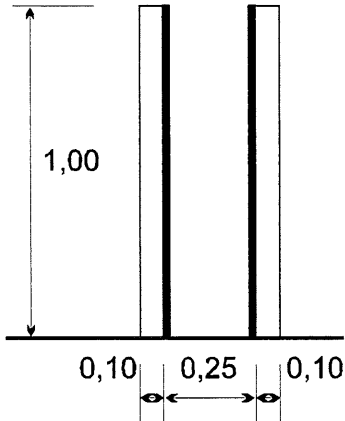
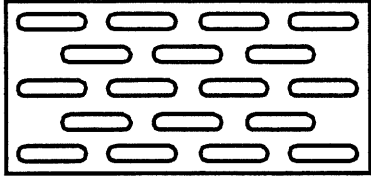
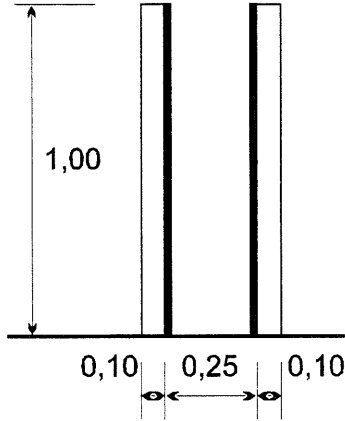
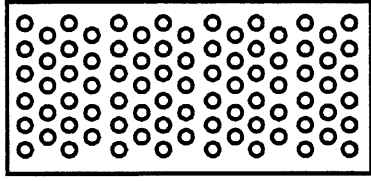


Abb. 7.2: Aufbau der Variante S-1 (Buschlahnung ohne Anwurf)

Die Wasserstände im Modell wurden über den Durchfluß geregelt (vgl. Taf. 7.2, Sp. 3). Für einen konstanten Durchfluß konnten bei gegebenem Wasserstand im Oberwasser (H_{OW}) der Wasserstand im Unterwasser (H_{UW}) bestimmt sowie Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden. Die Steuerung des Abflusses über einen motorbetrieben Schieber erfolgte im Modell nach den Meßwerten des in die Rohrleitung integrierten induktiven Durchflußmessers (vgl. Abb. 7.1). Der Wasserstand im Oberwasser wurde durch ein höhenverstellbares, senkrechtes Wehr geregelt und unter Verwendung kalibrierter „Delfter Wellenpegel“ (*Wave Height Meter*, Modell GHM) überwacht. Diese Pegel liefern Spannungssignale, die der Wasserspiegelauslenkung proportional sind. Ebenso wurden die Wasserstände im Unterwasser mit Wellenpegeln gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeiten vor und hinter dem Ausschnitt der Lahnung wurden mit einer elektromagnetischen Strömungssonde gemessen (induktive Messung). Alle Meßdaten wurden einem Mehrkanalschreiber zugeführt, visuell während der Messung beobachtet und ausgewertet.

VARIANTE	AUFBAU DER LAHNUNG IM MODELL
<p>S-1 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf</p>	
<p>S-2 Buschlahnung mit 1:2,5 geneigten seitlichem Anwurf und einer Höhe von 0,17 m</p>	
<p>S-3 Buschlahnung mit 1:2,5 geneigten seitlichem Anwurf und einer Höhe von 0,30 m</p>	

Taf. 7.1a: Darstellung der in der Strömungsrinne untersuchten Lahnungsvarianten S-1 bis S-3

VARIANTE	AUFBAU DER LAHNUNG IM MODELL	
<p>S-4 Mit Langlochfiltern simulierte Lahnung</p>		
<p>S-5 Mit Rundlochfiltern simulierte Lahnung</p>		

Taf. 7.1b: Darstellung der in der Strömungsrinne untersuchten Lahnungsvarianten S-4 und S-5

LFD. NR.	WASSERTIEFE IM OW	DURCHFLUß	MITTLERE STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT IM OW
	[m]	[l/s]	[m/s]
1	0,20	20	0,10
2	0,30	20	0,07
3	0,40	20	0,05
4	0,50	20	0,04
5	0,60	20	0,03
6	0,45	30	0,07
7	0,50	30	0,06
8	0,60	30	0,05
9	0,30	40	0,14
10	0,40	40	0,10
11	0,50	40	0,08
12	0,60	40	0,07
13	0,40	60	0,15
14	0,50	60	0,13
15	0,60	60	0,10
16	0,40	80	0,20
17	0,50	80	0,16
18	0,60	80	0,14
19	0,50	90	0,18
20	0,60	90	0,15
21	0,50	100	0,20
22	0,60	100	0,17
23	0,50	120	0,25
24	0,60	120	0,20
25	0,50	140	0,29
26	0,60	140	0,24

Taf. 7.2: Eingangsparameter der Untersuchungen in der Strömungsrinne

7.1.3 Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse

Ein Vergleich der Wasserstände im Ober- und Unterwasser der Buschlannung ohne seitlichen Anwurf (Variante S-1), mit einem seitlichen Anwurf von 0,17 m Höhe (Variante S-2) und ei-

nem Anwurf von 0,30 m Höhe (Variante S-3) in Abhängigkeit vom Durchfluß zeigt, daß für die Lahnung mit einem Anwurf von 0,17 m Höhe im Vergleich zur Lahnung ohne Anwurf nur geringfügige Abweichungen des Wasserstandes im Unterwasser eintreten. Der Anwurf von 0,30 m Höhe hingegen erhöht den Durchströmungswiderstand der Lahnung in der Art, daß der Wasserstand im Unterwasser deutlich reduziert wird und die Strömungsgeschwindigkeit im Unterwasser zunimmt (Abb. 7.3). In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß lokale Strömungsspitzen Ursache für Auskolkungen im Bereich von Buschlahnungen sind, wie beispielsweise in Abbildung 7.4 für das Testgebiet „Ockholm“ dargestellt.

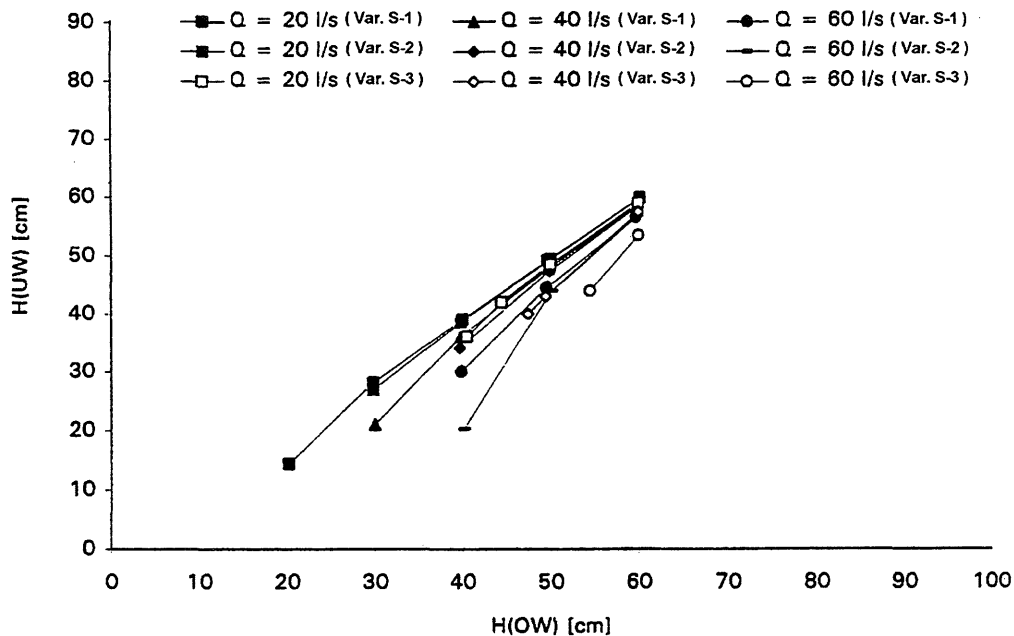


Abb. 7.3: Abhängigkeit des Wasserstandes vor der Lahnung (H_{OW}) vom Wasserstand hinter der Lahnung (H_{UW}) für verschiedene Durchflüsse ($Q = 20 \text{ l/s}$, 40 l/s bzw. 60 l/s) für die Lahnungsvarianten S-1 bis S-3



Abb. 7.4: Im Testgebiet „Ockholm“ im Frühjahr 1997 an einer Querlahnung aufgetretene lokale Auskolkung

Aus den Ergebnissen der Versuche der Varianten S-1, S-4 und S-5 wurde unter anderem das Verhältnis des Durchflusses zur Wasserspiegeldifferenz $H_{OW} - H_{UW}$ bestimmt. Die Wasserspiegeldifferenz verläuft, wie nach REHBOCK (in: PRESS/SCHRÖDER, 1966, S. 43f) zu erwarten, mit steigendem Durchfluß exponentiell; und zwar sowohl für die durch Langloch- und durch Rundlochfilter idealisierten Lahnungen als auch für die Buschlahnung (Abb. 7.5). Somit kann die Durchlässigkeit der Buschlahnung prinzipiell durch eine Schematisierung mit teildurchlässigen Filtern simuliert werden.

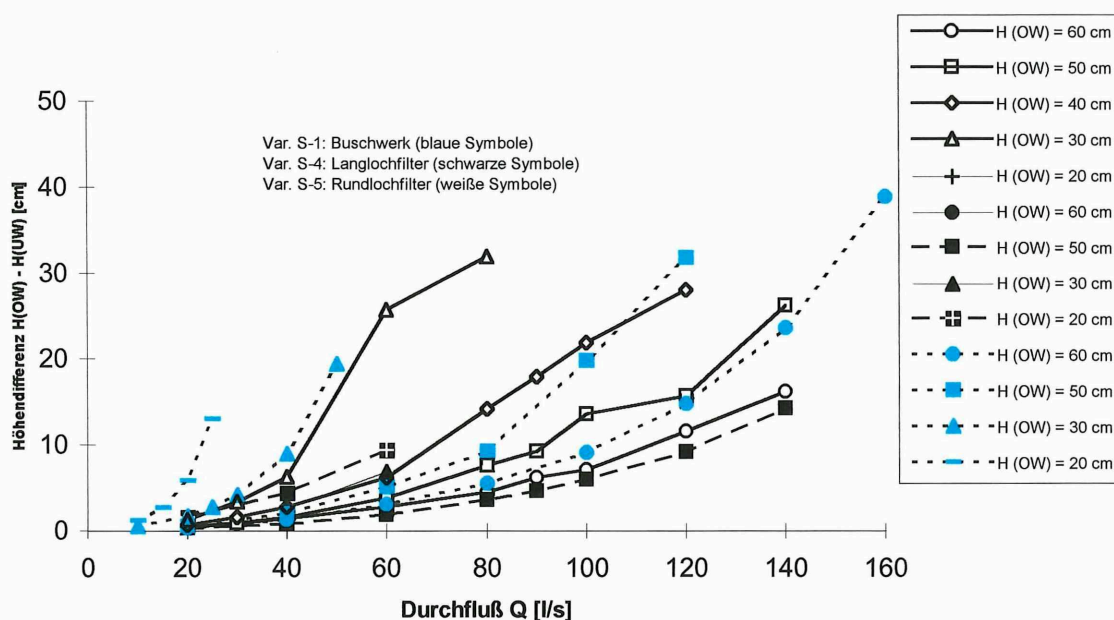


Abb. 7.5: Vergleich der Wasserspiegeldifferenz $H_{OW} - H_{UW}$ in Abhängigkeit vom Durchfluß für die Lahnungsvarianten S-1, S-4 und S-5

Ein Vergleich der Abhängigkeit des Wasserstandes vor der Lahnung (H_{OW}) vom Wasserstand hinter der Lahnung (H_{UW}) für verschiedene Durchflüsse der Buschlahnung (Var. S-1) und der durch Filter idealisierten Lahnungen (Var. S-4 und S-5), zeigte die größte Porosität für die durch Langlochfilter idealisierte Lahnung (Var. S-4), die geringste für die Buschlahnung. Abbildung 7.6 stellt beispielhaft das Ergebnis für einen Durchfluß von $Q = 80$ l/s dar.

Durch systematisches Verstopfen einiger Öffnungen der Rundlochfilter konnte der Verbauungsgrad der Buschlahnungen vergleichend erfaßt werden. Sind rd. 78,5% des Querschnitts der Rundlochfilter verbaut, d.h. rd. 21,5% des Querschnitts durchlässig, stellt sich für variable Durchflüsse ein mit der Buschlahnung vergleichbares hydraulisches Verhalten ein (Abb. 7.7).

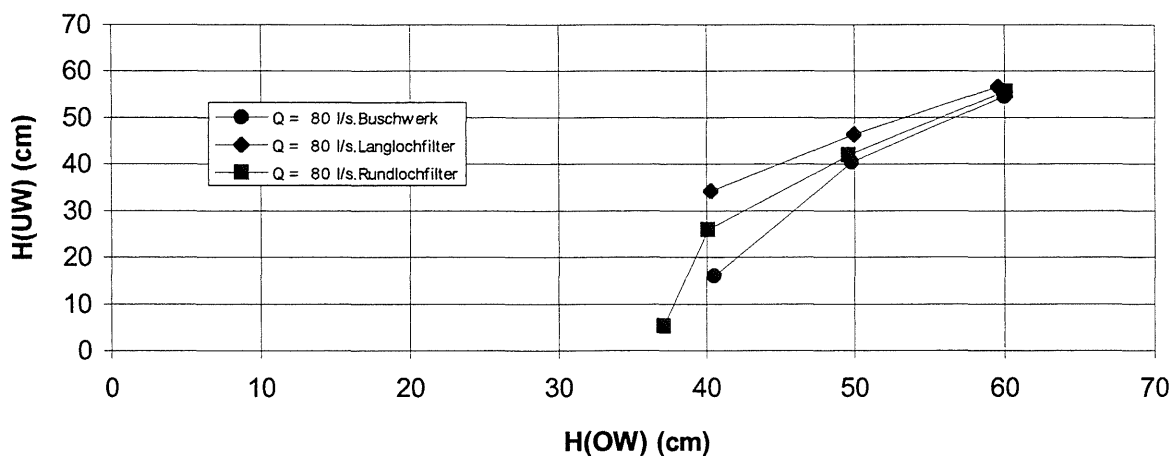


Abb. 7.6: Abhängigkeit des Wasserstandes vor der Lahnung (H_{OW}) vom Wasserstand hinter der Lahnung (H_{UW}) für einen Durchfluß von $Q = 80$ l/s für die Lahnungsvarianten S-1 (Buschwerk), S-4 (Langlochfilter) und S-5 (Rundlochfilter)

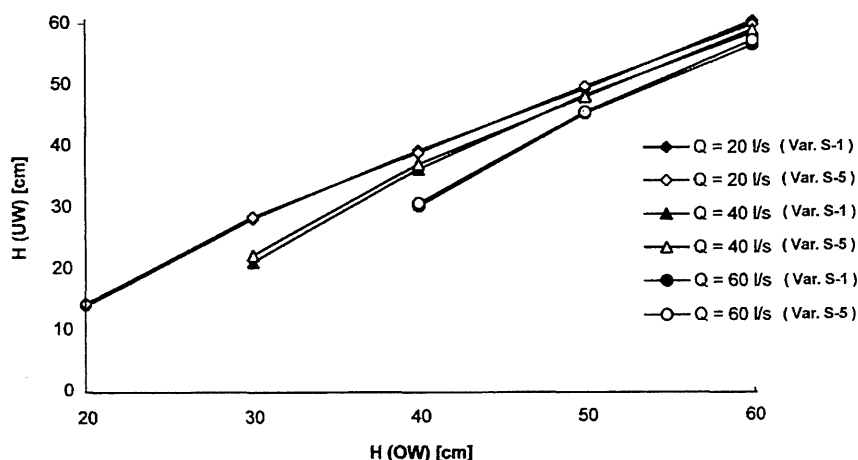


Abb. 7.7: Annäherung des Verbauungsgrades der Variante S-5 an die der Buschlahnung (Var. S-1)

Die parallel zu den Wasserstandsmessungen durchgeführten Strömungsmessungen geben ein qualitatives Bild des Durchströmungsverhaltens von Lahnungen wieder. Auswertungen der Strömungsmessungen zeigen, daß sich im Unterwasser infolge der Einengung des Querschnitts durch die Lahnungen von den im Oberwasser abweichende Strömungszustände einstellen: Während die Strömungsgeschwindigkeiten im Oberwasser gleichmäßig (mit Ausnahme von Randeinflüssen) über die Rinnenbreite verteilt sind, verursachen die Pfähle ein leichtes Einschnüren des Wasserstrahls im Unterwasser und führen somit zu erhöhten Geschwindigkeiten zwischen zwei Pfählen. Ein Beispiel für den Einfluß der Pfähle der Lahnung auf die Strömungsgeschwindigkeiten ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

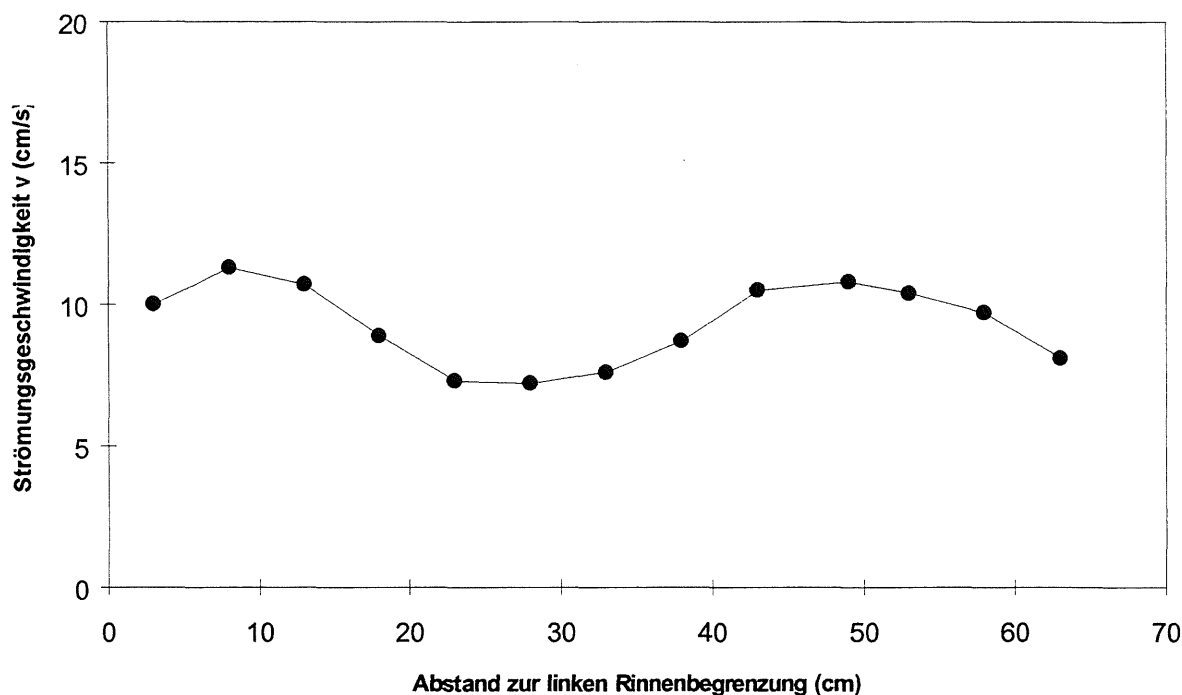


Abb. 7.8: Einfluß der Pfähle der Lahnungsvariante S-1 auf die Strömungsgeschwindigkeiten im UW; $Q = 60$ l/s; $d = 0,60$ m; Messung 0,30 m über der Rinnensohle und 1,00 m hinter der Lahnung; dargestellt ist die in Fließrichtung gesehene linke Hälfte des Rinnenprofils; die Mitte eines Pfahls im UW ist bei 0,25 m (x-Achse) positioniert

Bedingt durch die Abmessungen der Rinne besteht der Ausschnitt der Lahnung aus drei bzw. zwei Pfählen. Alle Versuche mit einem Ausschnitt einer Buschlahnung bzw. mit definierten Filtern idealisierten Lahnungen wurden so durchgeführt, daß sich jeweils drei Pfähle im Oberwasser und zwei Pfähle im Unterwasser befanden. Anschließend wurde für die Buschlahnung durch einige Kontrollmessungen nachgewiesen, daß sich für den um 180° gedrehten Zustand (zwei Pfähle im Oberwasser und drei Pfähle im Unterwasser) keine nennenswerten Abweichungen ergeben.

Die Durchlässigkeit einer Buschlahnung wird nicht wesentlich durch die Anordnung der Pfähle (drei bzw. zwei Pfähle im Oberwasser) bestimmt. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die Versuche lediglich für einen Ausschnitt einer Lahnung durchgeführt wurden. In der Natur handelt es sich vielmehr um ein Linienbauwerk mit einer gleichen Anzahl von Pfählen auf beiden Seiten der Lahnung, deren Durchlässigkeit stärker vom Verdichtungsgrad der Faschinen abhängig ist. Die Buschlahnung wurde gemäß den Ausführungsvorschriften der ÄMTER FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT in Heide und Husum so dicht wie möglich in die Strömungsrinne eingebracht und während der durchgeführten Versuche nicht verändert. In der Natur werden jedoch aufgrund des inhomogenen Nadelholzmaterials und der nicht immer gleichen Verdichtung der Faschinen im Zwischenraum der Lahnungen durch Arbeitskräfte mit

unterschiedlichen Körpergewichten sowohl in der Höhe der Lahnung als auch in ihrer Längsrichtung unterschiedliche Packungsdichten zu finden sein.

Des Weiteren wurde der Anwurf im Rahmen der Untersuchungen nur schematisiert in das Modell eingebaut. Veränderungen des Anwurfes durch Transportmechanismen (Erosion, Sedimentation, Konsolidierung etc.) konnten nicht berücksichtigt werden. Es wurde also lediglich die den durchlässigen Anströmquerschnitt verbauende Wirkung des Anwurfes beobachtet. Auch über das Versuchsprogramm hinausgehende regional übliche Einbauvorschriften, wie beispielsweise zusätzliche Fußsicherungen der Lahnungen durch mit Stackpfählen befestigte Nadelholzfaschinen (vgl. Anl. A 3-3), fanden keine Berücksichtigung.

Ebenso wurde ein Sedimenttransport nicht berücksichtigt, der gleichzeitig ein Verstopfen der Lahnung oder Erosionen im Fußbereich verursachen kann. Zudem können beispielsweise Pflanzenreste oder Algen ebenfalls zur Verdichtung der Faschinen beitragen und somit die Porosität reduzieren. Diesem Phänomen wurde nicht Rechnung getragen.

7.2 Untersuchungen zur Transmission von Wellen an Buschlahnungen

7.2.1 Transmission von Wellen

Die Transmission von Wellen in den Schutzbereich eines permeablen Bauwerks wird durch die Reflexion der Wellen und durch Energieumwandlungsvorgänge im Bauwerksbereich beeinflusst. Da die Wellenenergie dem Quadrat der Wellenhöhe proportional ist und die Energie der Ausgangswelle zwar in die drei Komponenten Transmission, Reflexion und Verlusthöhe aufgespalten wird, aber insgesamt erhalten bleibt, gilt folgende Beziehung:

$$k_T^2 + k_R^2 + k_V^2 = 1 \quad (7-1)$$

Mit:

k_T Transmissionskoeffizient [-]

k_R Reflexionskoeffizient [-]

k_V Verlustkoeffizient [-]

Der Transmissionskoeffizient k_T ist definiert als das Verhältnis von Wellenhöhe im Transmissionsbereich H_T zur Ausgangswellenhöhe H_i :

$$k_T = H_T/H_i \quad (7-2)$$

Der Reflexionskoeffizient k_R errechnet sich aus dem Verhältnis der Höhe der reflektierten Welle H_R vor dem Bauwerk zur Ausgangswellenhöhe H_i zu

$$k_R = H_R/H_i \quad (7-3)$$

Aus dem Brechen oder teilweise Brechen der Wellen über dem Bauwerk und Reibungsverlusten resultiert eine Reduzierung der Wellenhöhe, die durch den Verlustkoeffizienten k_v als Verhältnis der Verlustwellenhöhe H_v zur Ausgangswellenhöhe H_i angegeben wird:

$$k_v = H_v/H_i \quad (7-4)$$

7.2.2 Versuchseinrichtungen und Meßtechnik

Die Untersuchungen zum Transmissionsverhalten von Buschlahnungen wurden im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS am Schneiderberg (WKS) durchgeführt. Der Kanal ist 118 m lang, 2,20 m breit und läßt im Versuchsbetrieb eine maximale Wassertiefe von 1,20 m zu. In etwa 25 m Abstand von der Wellenmaschine befindet sich ein Beobachtungsfenster, vor dem die Versuchseinbauten angeordnet wurden.

In den Wellenkanal wurde zunächst ein Ausschnitt einer 1,00 m hohen und im lichten Maß 0,25 m breiten Buschlahnung im Maßstab 1:1 eingebaut und als Variante W-1 bezeichnet. Mit den zuvor in einer Strömungsrinne durchgeführten Untersuchungen wurde für diese, der Variante W-1 baugleichen Variante S-1 eine Porosität von rd. 20% ermittelt (vgl. Kap. 7.1.3).

Als Variante W-7 wurde eine Lahnung mit einem Porositätsgrad von rd. 0%, eine nahezu undurchlässige, mit Rauhpunddielen gedichtete Lahnung ohne seitlichen Anwurf betrachtet, die im wesentlichen den Ausführungsvorschriften des STAATLICHEN AMTES FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ (STAIK) NORDEN entspricht (Anl. A 7-2).

Die tatsächliche Porosität einer, nach regionaler Lage unterschiedlich erstellten Lahnung wird erwartungsgemäß zwischen rd. 0% und rd. 20% Porosität liegen. Im Sinne der im Forschungsauftrag definierten Aufgabe, nämlich „vergleichende Aussagen bei unterschiedlichen ... baulichen Ausführungen“ zu treffen, wurden für die in Tafel 7.3 dargestellten Varianten Transmissionskoeffizienten, auch Reflexions- und Verlustkoeffizienten ermittelt. Bei variablen Wasserständen und Seegangsbedingungen wurden die folgenden Parameter variiert (vgl. Taf. 7.4):

- Bauwerksbreite B
- Relative Bauwerkshöhe h/d (h = Bauwerkshöhe, d = Wassertiefe)
- Grad der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom gewählten Füllmaterial bzw. einem seitlichen Anwurf

Die Durchlässigkeit des Lahnungsbauwerks ist mit seiner Breite veränderlich. Die heute übliche Lahnungsbreite (vgl. Anl. A 3-2a) beträgt 0,20 m bis 0,25 m im lichten Maß. In diesem

Zusammenhang sind Aspekte der Wirtschaftlichkeit, der Standsicherheit sowie des Auftriebes der Faschinen von Bedeutung. Zur Analyse des Einflusses der Bauwerksbreite auf das Transmissionsverhalten von Wellen an Buschlahnungen wurden die Varianten W-3 bis W-5 gewählt: 0,70m hohe Buschlahnungen ohne seitlichen Anwurf mit lichten Maßen von 0,25 m (Var. W-3), 0,50 m (Var. W-4) und 0,75 m (Var. W-5). Die Konstruktionshöhe der Varianten W-3 bis W-5 von 0,70 m wurde im Hinblick auf eine anschauliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Natur- und Modellmessungen (s. Kap. 7.2.4) analog den örtlichen Gegebenheiten im Testgebiet „Ockholm“ gewählt (vgl. Kap. 6.6.1, Abb. 6.10).

Die betriebstechnisch bedingte Wassertiefe im WKS beträgt 1,20 m, weshalb die Varianten W-1 bis W-5 nicht auf ihr Transmissionsverhalten bei erhöhten Wasserständen untersucht werden konnten. Unter der Annahme, daß für diese Varianten bereits eine Sedimentation erfolgte, wurde die Buschlahnung auf die Höhe von 0,40 m reduziert (Var. W-6), so daß eine breitere Variation des Verhältnisses h/d möglich wurde.

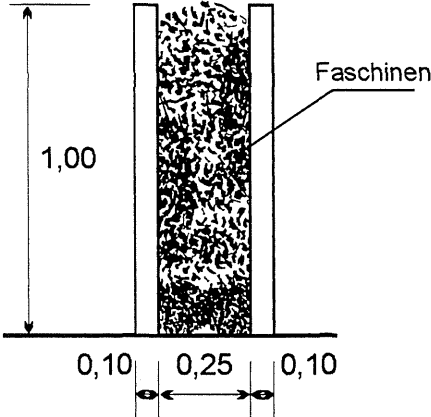
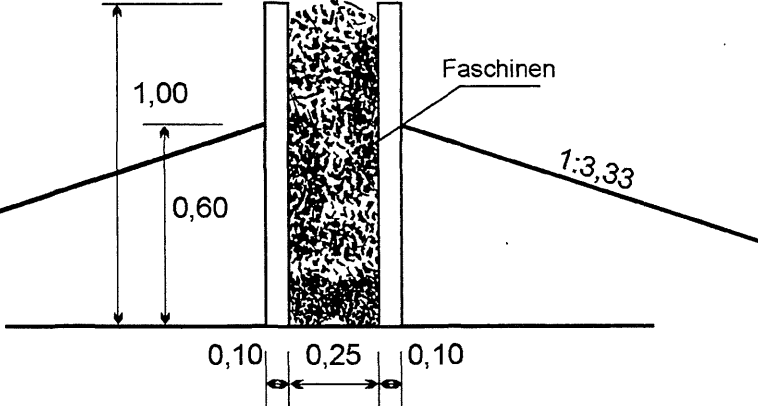
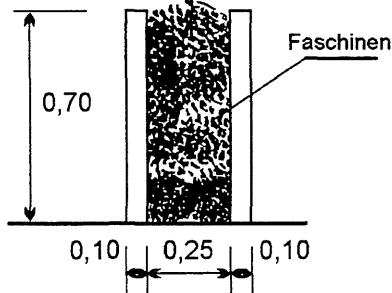
In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde Variante W-7 um eine landseitige Rauhsponddielenwand ergänzt, so daß sowohl ein Vergleich mit Variante W-6 als auch mit im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ gewonnenen Daten (vgl. Kap. 7.2.5) erzielt wurde.

Der verbauenden Wirkung eines seitlichen Anwurfs einer Buschlahnung wurde mit der Untersuchung der Variante W-2 Rechnung getragen. Der Anwurf wurde im Modell durch einen mit einer Estrichschicht bedeckten Sandkeil mit einer Neigung von 1:3,33 simuliert.

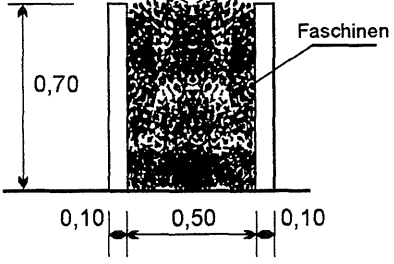
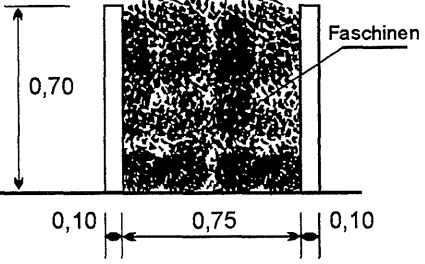
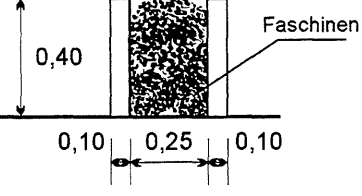
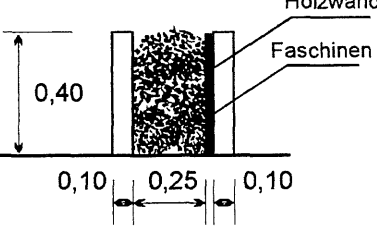
Die senkrecht auf das Bauwerk laufenden Wellen wurden durch eine Plattenwellenmaschine erzeugt und als Wasserspiegelauslenkung über die Zeit mit sieben „Delfter Pegeln“ gemessen. Die Aufzeichnung der Meßergebnisse erfolgte mit dem Programm DIA/DAGO[®] der GESELLSCHAFT FÜR STRUKTURANALYSE (GFS).

An dieser Stelle sei beispielhaft auf die Untersuchungen von GRÜNE und KOHLHASE (1975) verwiesen, die Untersuchungen zur Wellentransmission an senkrechten, geschlitzten Wänden durchführten. In diesem Zusammenhang wurde auch der Einfluß der Wellenangriffsrichtung auf das Bauwerk untersucht. Es zeigte sich, daß der senkrechte Wellenangriff die ungünstigste Versuchsanordnung bezüglich einer Wellendämpfung darstellt. Dieses Ergebnis wurde bei der Durchführung der Versuche im WKS insofern berücksichtigt, als diese Versuchsanordnung den

„kritischsten“ Bemessungsfall darstellt. Die Versuche im WKS wurden ausschließlich mit senkrechtem Wellenangriff durchgeführt.

VARIANTE	AUFBAU DER LAHNUNG IM MODELL
<p>W-1 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf $h = 1,00 \text{ m}$; $B = 0,25 \text{ m}$</p>	
<p>W-2 Buschlahnung mit 1:3,33 geneigten seitlichem An- wurf mit einer Höhe von 0,60 m $h = 1,00 \text{ m}$; $B = 0,25 \text{ m}$</p>	
<p>W-3 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf $h = 0,70 \text{ m}$; $B = 0,25 \text{ m}$</p>	

Taf. 7.3a: Darstellung der im Wellenkanal untersuchten Lahnungsvarianten W-1 bis W-3

VARIANTE	AUFBAU DER LAHNUNG IM MODELL
<p>W-4 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf $h = 0,70 \text{ m}$; $B = 0,50 \text{ m}$</p>	
<p>W-5 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf $h = 0,70 \text{ m}$; $B = 0,75 \text{ m}$</p>	
<p>W-6 Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf $h = 0,40 \text{ m}$; $B = 0,25 \text{ m}$</p>	
<p>W-7 Gedichtete Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf $h = 0,40 \text{ m}$; $B = 0,25 \text{ m}$</p>	

Taf. 7.3b: Darstellung der im Wellenkanal untersuchten Lahnungsvarianten W-4 bis W-7

Gemäß Tafel 7.4 wurden zunächst Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen, dann mit Spektren durchgeführt. Die Kombinationen der Zeitbereichs- bzw. Frequenzbereichsparameter für die Untersuchungen wurden anhand der in der Natur gemessenen und analysierten Seegangsdaten (vgl. Kap. 6.6.2) ausgewählt.

LFD. NR.	WASSERTIEFE[m]	SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE [m]	PERIODE BZW. PEAK-PERIODE [s]	WELLENFORM RW = REGELMÄßIGE WELLEN SP = SPEKTREN	VARIANTE
1	0,40	0,10 0,15 0,20	1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	RW, SP	W-1, W-3, W-4, W5, W-6, W-7
2	0,50	0,10 0,20 0,30	2,0 2,5 3,0	SP	W-3, W-4, W-5
3	0,60	0,10 0,15 0,20 0,30	1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	RW, SP	W-1, W-6, W-7
4	0,70	0,10 0,20 0,30	2,0 2,5 3,0	SP	W-3, W-4, W-5
5	0,80	0,10 0,20 0,30	2,0 2,5 3,0	SP	W-1, W-6, W-7
6	0,90	0,10 0,20 0,30	2,0 2,5 3,0	SP	W-3, W-4, W-5
7	1,00	0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 0,30	1,8 2,0 2,2 2,5 3,0	RW, SP	W-1, W-2, W-6, W-7
8	1,10	0,10 0,20 0,30	2,0 2,5 3,0	SP	W-3, W-4, W-5
9	1,20	0,10 0,15 0,20 0,25 0,30	2,2 2,5	RW, SP	W-2

Taf. 7.4: Eingangparameter der Untersuchungen im Wellenkanal

Die nutzbare Länge des Wellenkanals für die Versuchsdurchführung beträgt rd. 60 m. Um eine ausreichende Anzahl an Wellen zur Auswertung heranziehen zu können, wurde die Wellenlänge auf 7 m begrenzt, aus der sich bei vorgegebener Wassertiefe mit Gleichung 7-5 eine maximale Wellenperiode von $T = 3,0$ s ergibt.

$$L = \frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot T^2 \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L} \right) \quad (7-5)$$

Mit:

- T Wellenperiode [s]
- L Wellenlänge [m]
- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- d Wassertiefe [m]

Bei regelmäßigen Wellen besteht die Auswertung normalerweise aus einer Ermittlung der Wellenhöhe (Abstand zwischen Wellental und Wellenberg) im Zeitbereich. Da fast immer gewisse Schwankungen auftreten, wird üblicherweise auch eine Mittlung über mehrere Wellen vorgenommen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden jedoch sowohl für die Versuche mit regelmäßigen Wellen als auch mit unregelmäßigen Wellen (Spektren) Methoden der Analyse im Frequenzbereich eingesetzt, da bei der Umformung der Wellen – einschließlich der Brechvorgänge über dem Lahnungsbauwerk – Wellenbewegungen mit höheren Frequenzen als der Grundfrequenz erzeugt werden. In einem solchen Fall ist durch die Berechnung der FOURIER-Komponenten oder der Wellenspektren eine Zuordnung der Wellenenergie zu Frequenzbereichen oder die Berechnung der Gesamtenergie möglich. Unabhängig von der Entscheidung, ob Energieanteile in höheren Frequenzbereichen als der Grundfrequenz berücksichtigt werden sollen oder nicht, sind die so berechneten Ergebnisse mit geringeren methodisch bedingten Streuungen behaftet als bei dem Versuch von Mittelwertbildungen im Zeitbereich. Bei den Untersuchungen mit unregelmäßigen Wellen (Spektren) bieten sich diese Auswerteverfahren ohnehin an.

Durch die FOURIER-Analyse wird eine aus verschiedenen Schwingungsanteilen überlagerte Gesamtschwingung in die einzelnen Schwingungsanteile zerlegt. Das Ergebnis der Berechnung ist die Angabe von Amplituden $a(f)$ und Phasenwinkeln $\varphi(f)$ der in den untersuchten Schwingungen vorhandenen Schwingungsanteilen. Den Zusammenhang zwischen der Energieverteilung über die Frequenz (Energiedichtespektrum $S(f)$) und den FOURIER-Komponenten gibt Gleichung 7-6 wieder:

$$S(f) = \frac{a(f)^2}{2 \cdot \Delta f} \quad (7-6)$$

Mit:

- f Frequenz [1/s]
- Δf $1/T^\circ$ [1/s]
- T° analysierte Dauer eines Meßsignals [s]

Die Gesamtenergie wird durch eine Integration des Energiedichtespektrums über den Frequenzbereich berechnet und entspricht damit dem nullten Moment des Spektrums.

$$m_0 = \int S(f) \cdot df \quad (7-7)$$

Höhere Momente des Spektrums werden allgemein durch

$$m_{n^{\circ}} = \int S(f) \cdot f^{n^{\circ}} \cdot df \quad (7-8)$$

mit $n^{\circ} = 0, 1, \dots$ beschrieben, um charakteristische Periodenparameter zu berechnen, wenn nicht die Peakfrequenz des Spektrums als charakteristischer Wert bevorzugt wird.

Der Zusammenhang zwischen der signifikanten Wellenhöhen H_S und der Energie des Spektrums wird durch

$$H_S = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad (7-9)$$

beschrieben. H_S entspricht näherungsweise dem Zeitreihenparameter $H_{1/3}$.

Zur Auswertung der Versuche wurden Programme des Sonderforschungsbereichs (SFB) 205, Teilprojekt B13 angewandt, die u.a. die Reflexionsanalyse nach MANSARD/FUNKE (1980) unter Anwendung der FAST FOURIER TRANSFORMATION durchführen. Die Auswertung erfolgte nach dem „ZERO-DOWN-CROSSING-Verfahren“.

7.2.3 Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse

Für die Variante W-1 schwankten die Transmissionskoeffizienten sowohl aus den Versuchen mit regelmäßigen Wellen als auch mit Spektren für eine Wassertiefe von 0,40 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 2,5$) zwischen 37% und 50%, für eine Wassertiefe von 0,60 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 1,66$) zwischen 37% und 60%, für eine Wassertiefe von 0,80 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 1,25$) zwischen 45% und 60%, für eine Wassertiefe von 1,00 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 1,00$) zwischen 72% und 110%. Konkrete Abhängigkeiten von der Periode oder der Wellenhöhe konnten nicht ermittelt werden, jedoch ist die Schwankungsbreite in Abhängigkeit von der Periode (Abb. 7.9 bis Abb. 7.12) vergleichsweise geringer als in Abhängigkeit von der Wellenhöhe (Abb. 7.13 bis Abb. 7.16).

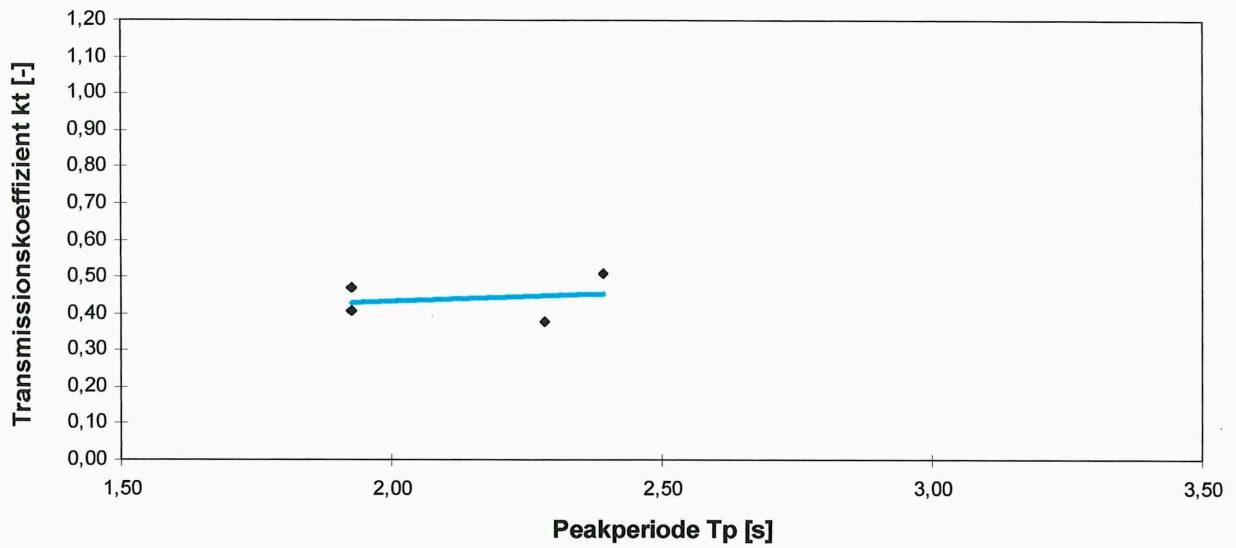


Abb. 7.9: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenperiode bei einer Wassertiefe von 0,40 m für die Variante W-1

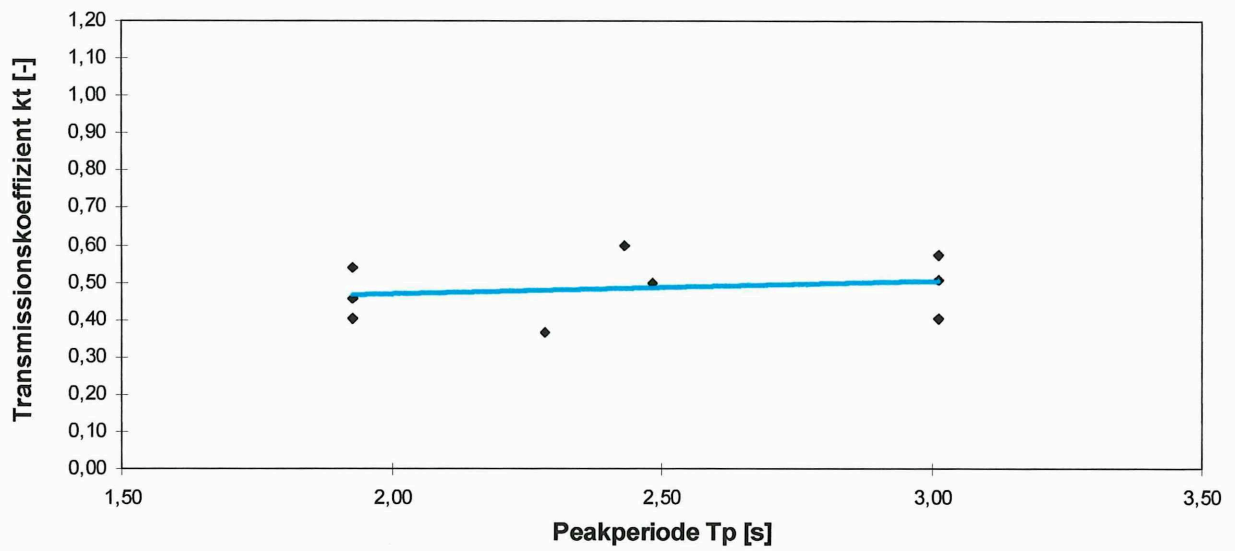


Abb. 7.10: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenperiode bei einer Wassertiefe von 0,60 m für die Variante W-1

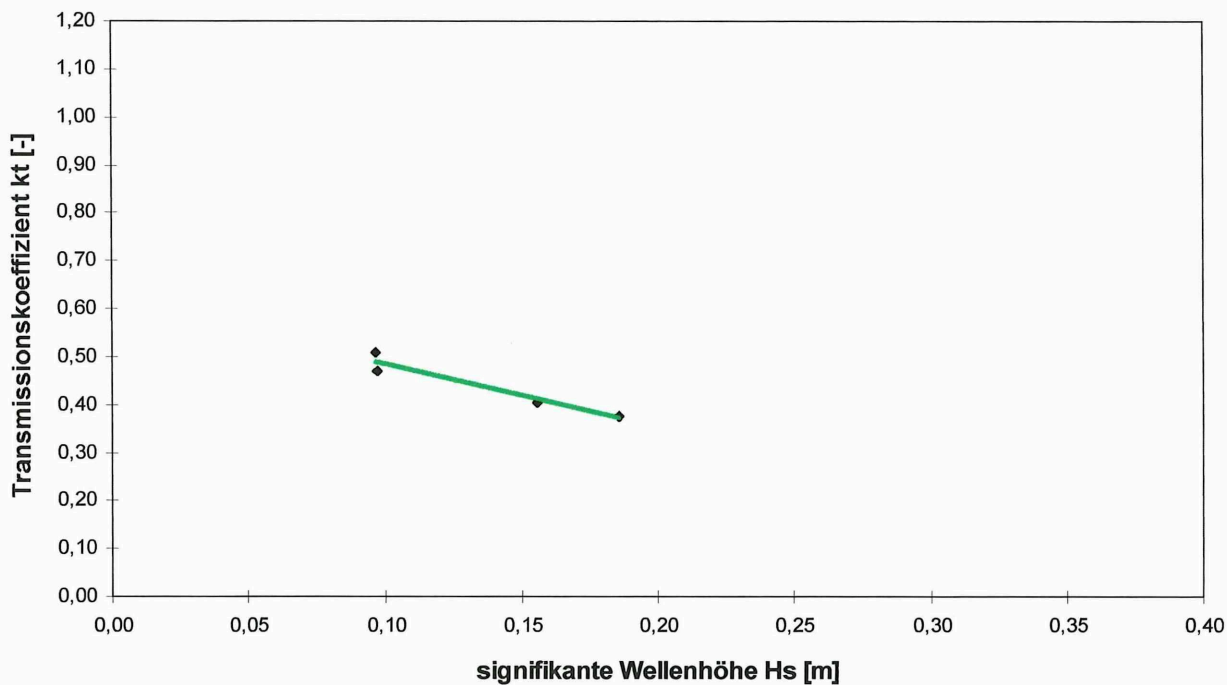


Abb. 7.13: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 0,40 m für die Variante W-1

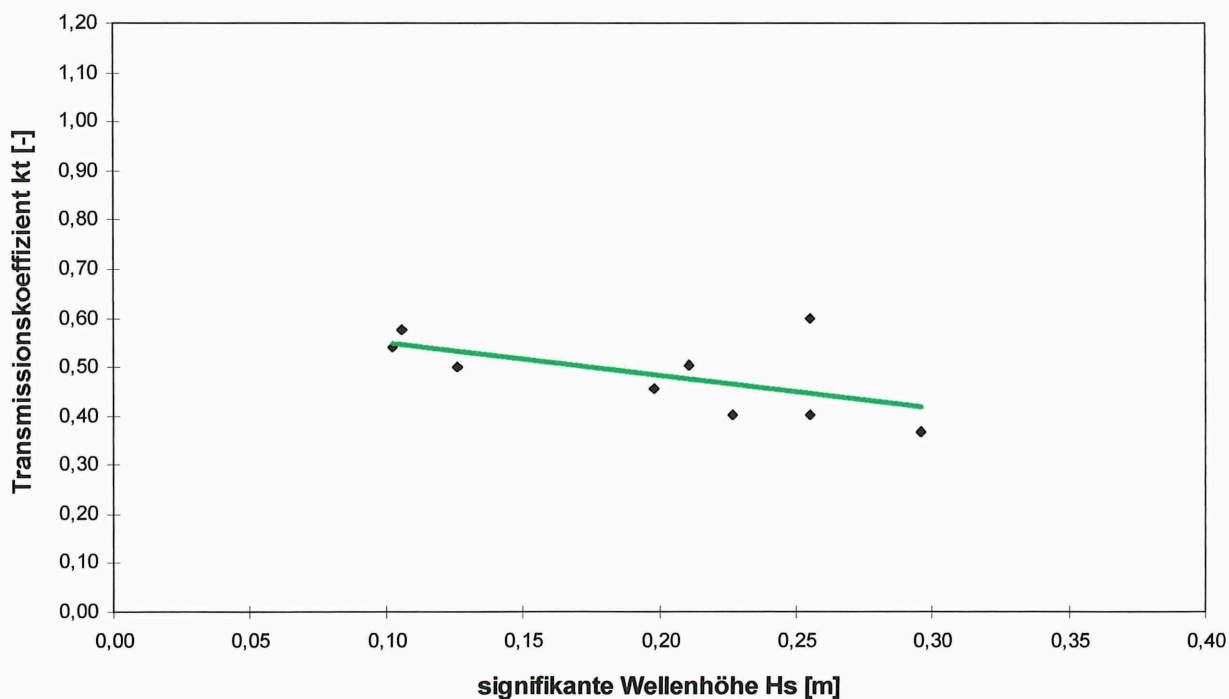


Abb. 7.14: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 0,60 m für die Variante W-1

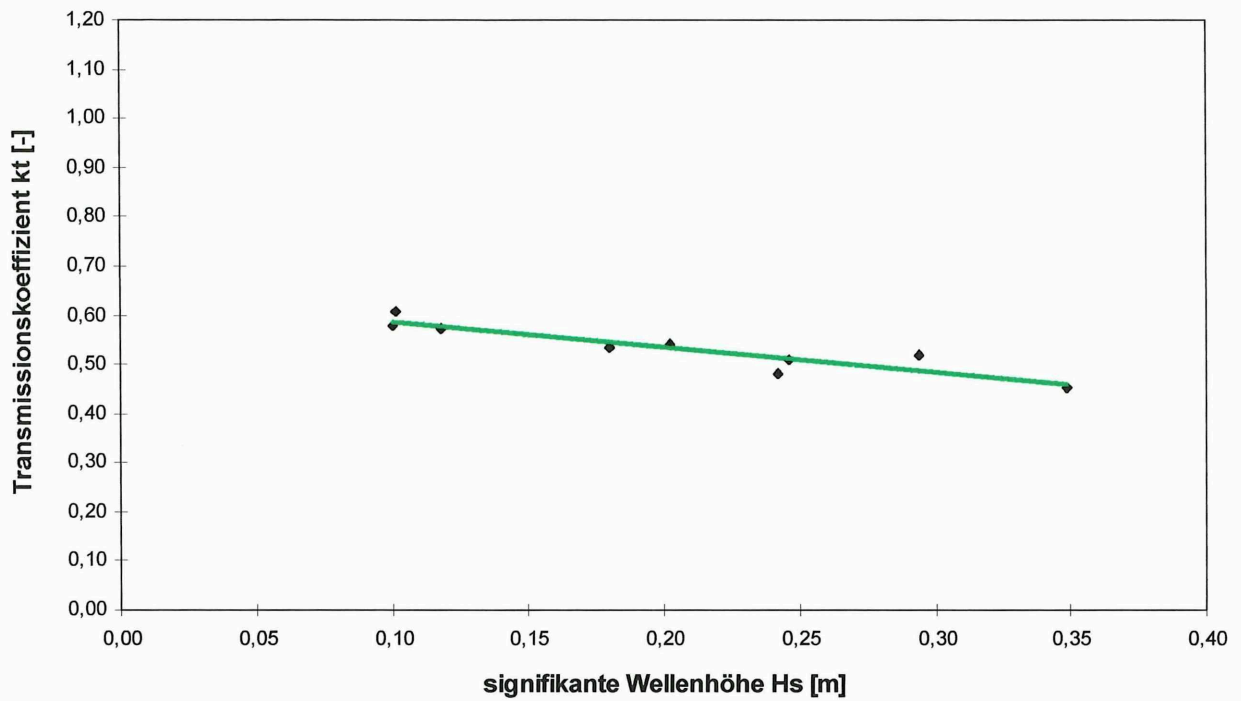


Abb. 7.15: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 0,80 m für die Variante W-1

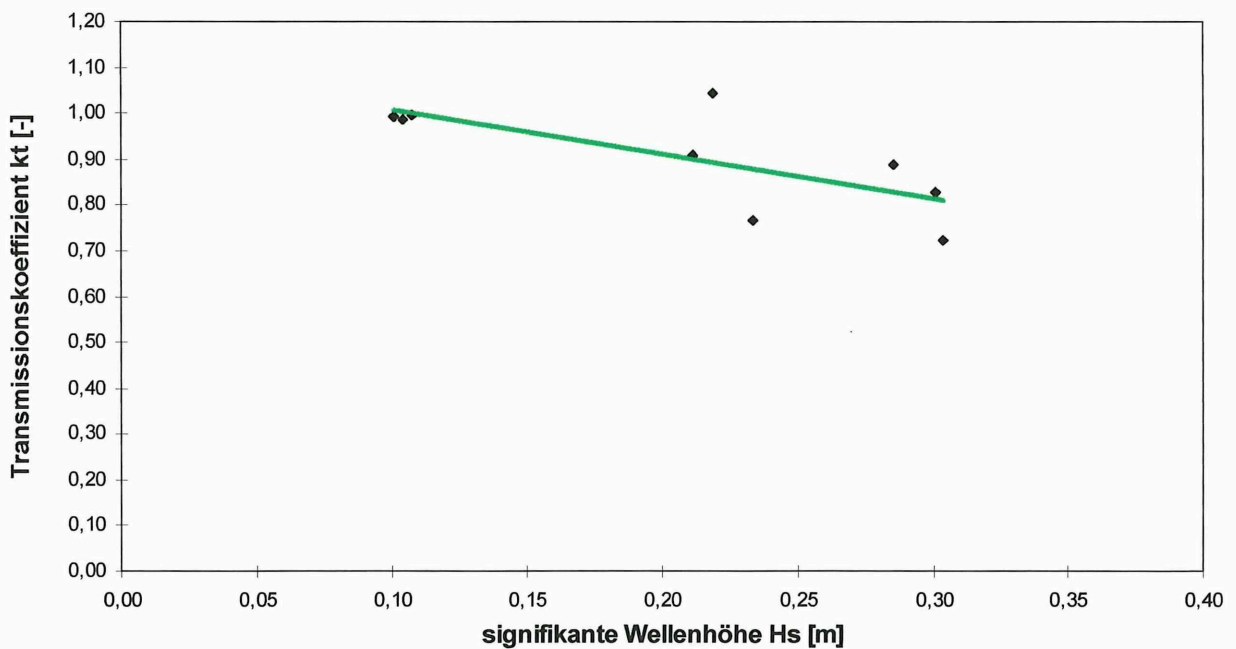
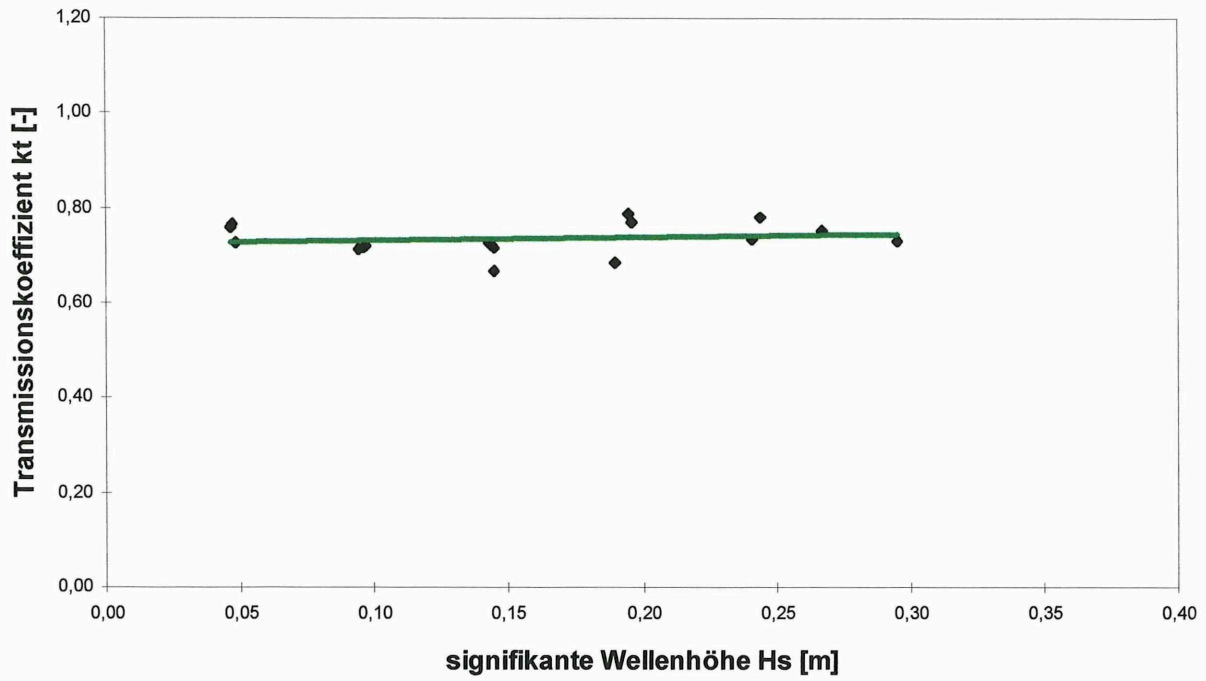
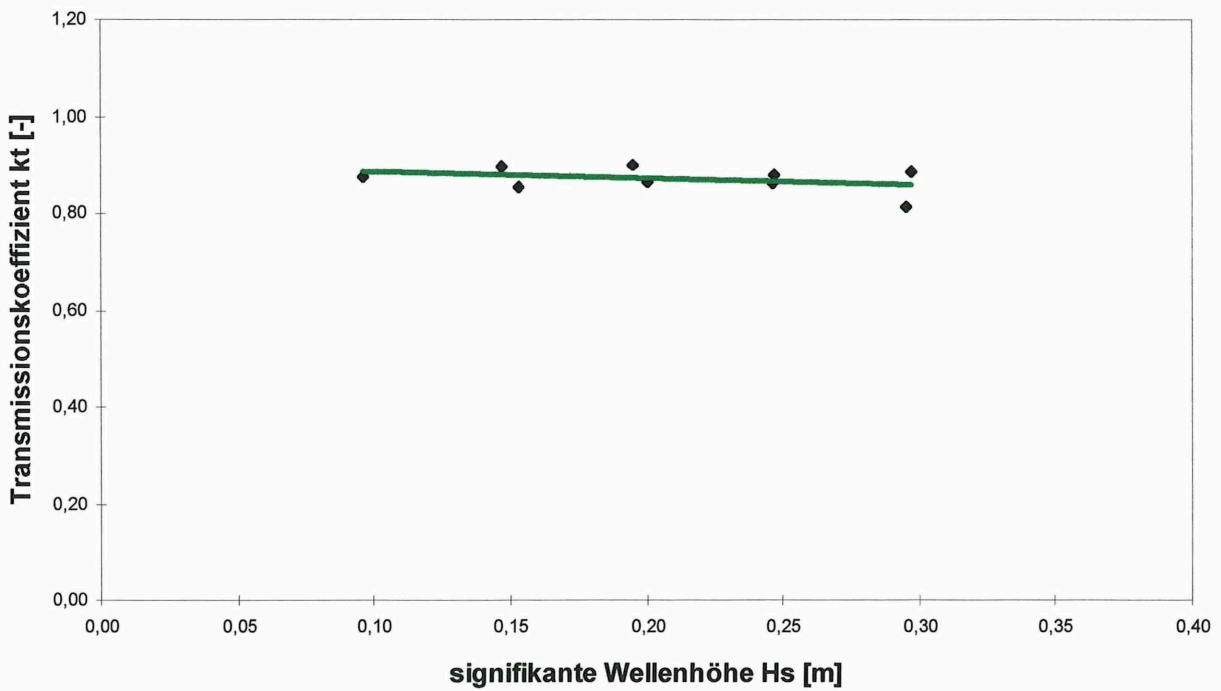


Abb. 7.16: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 1,00 m für die Variante W-1



a)



b)

Abb. 7.17: Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenhöhe bei einer Wassertiefe von 1,00 m (a) und 1,20 m (b) für die Variante W-2

Für Wassertiefen von 1,00 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 1,00$) und 1,20 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 0,83$) zeigen sich für Variante W-2 nahezu konstante Transmissionskoeffizienten. Sie bewegen sich für eine Wassertiefe von 1,00 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 1,00$) zwischen 70 % und 75 % und für eine Wassertiefe von 1,20 m (relative Bauwerkshöhe $h/d = 0,83$) zwischen 85 % und 90 % (Abb. 7.17). Eine deutliche Abhängigkeit von der Wassertiefe konnte für Variante W-2 nicht nachgewiesen werden. Größere Wassertiefen, d.h. kleinere relative Bauwerkshöhen h/d , konnten für diese Variante aus betriebs- und versuchstechnischen Gründen nicht untersucht werden.

Ein Vergleich der Untersuchungen mit Variante W-1 und Variante W-2 zeigt deutlich verschiedene Ergebnisse. Während der Transmissionskoeffizient k_T bei einer Buschlaffung ohne Anwurf (Var. W-1) sowohl von der Wellenhöhe als auch von der Wellenperiode abhängig ist, weisen die Ergebnisse der Versuche mit einer Buschlaffung mit seitlichem Anwurf (Var. W-2) nahezu keine Abhängigkeit von der Ausgangswellenhöhe bzw. -periode auf. Für die untersuchten Wasserstände ist die Buschlaffung ohne seitlichen Anwurf (Var. W-2) im Vergleich zur Buschlaffung (Var. W-1) als wirkungsvoller einzuschätzen.

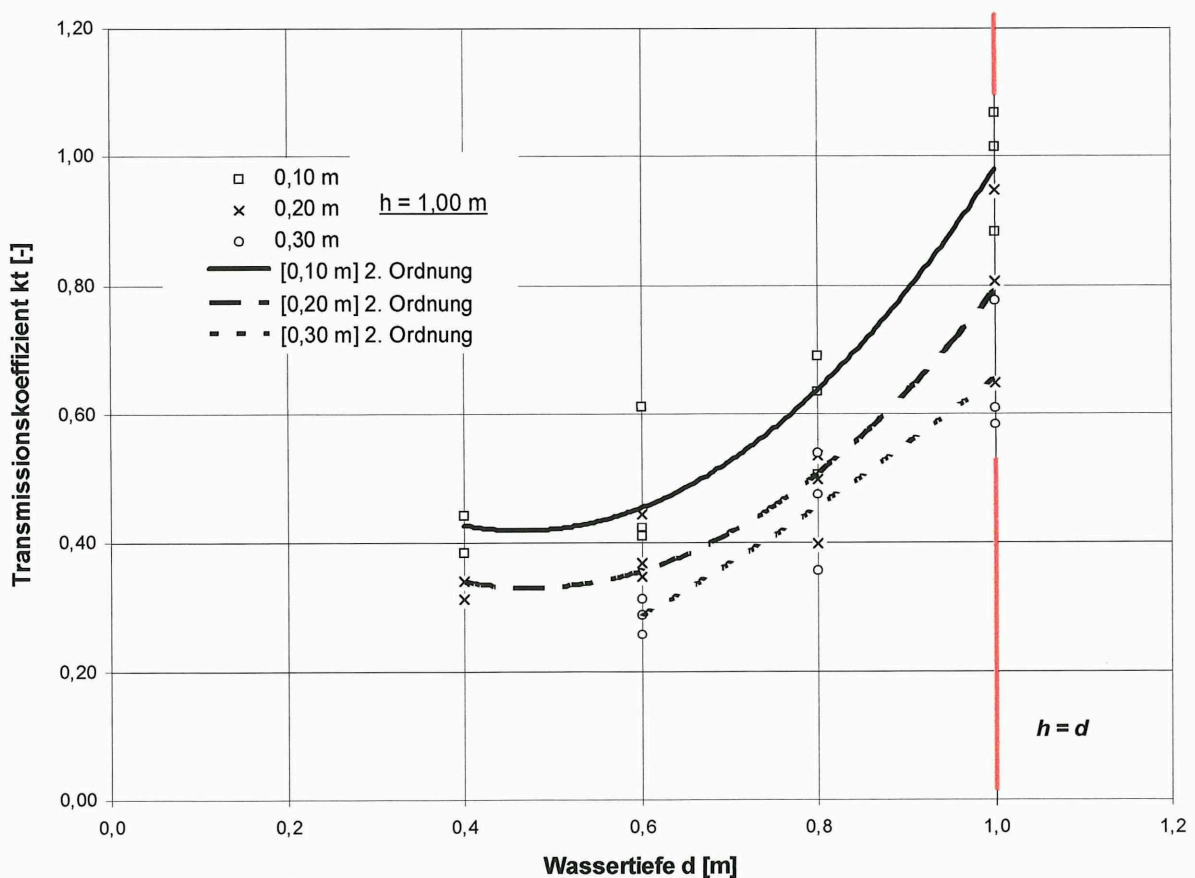


Abb. 7.18a: Transmissionskoeffizienten der maximalen Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-1

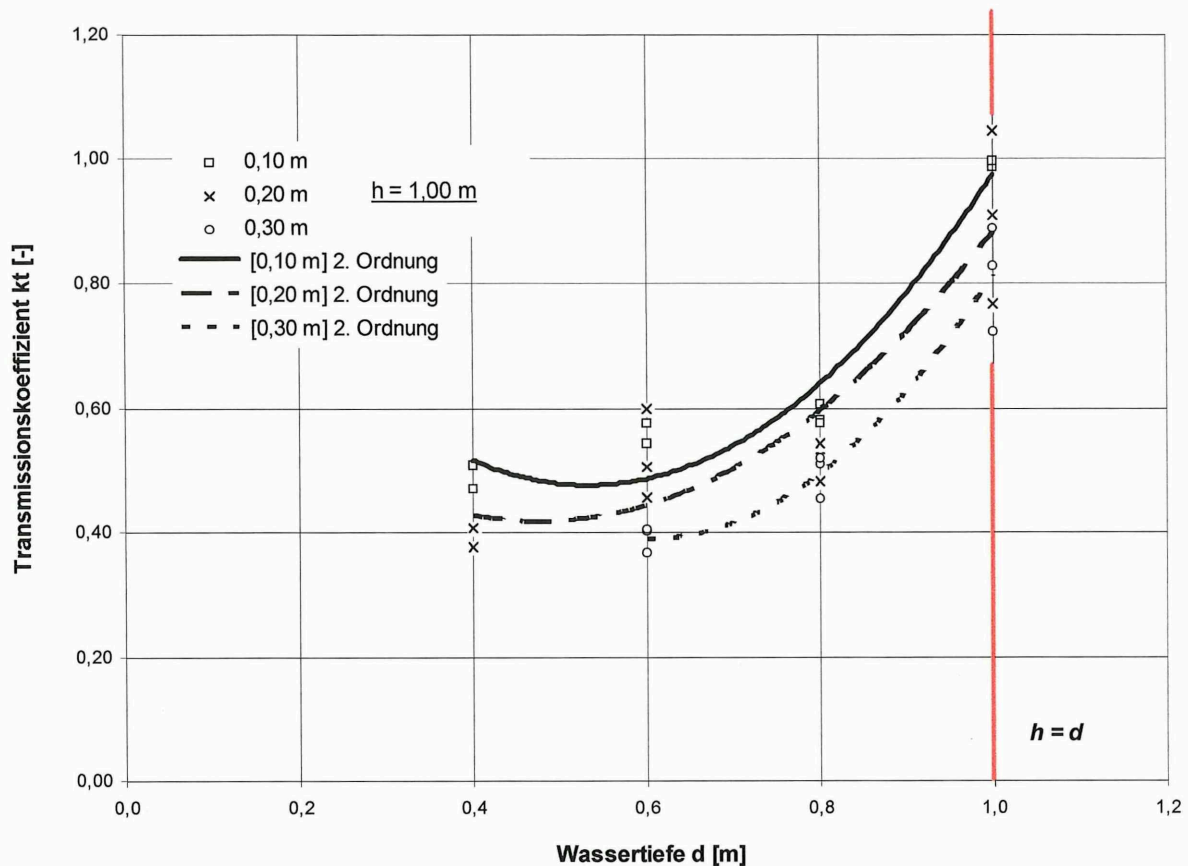


Abb. 7.18b: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-1

Eine Auftragung der Transmissionskoeffizienten der signifikanten und der maximalen Wellenhöhen über die Wassertiefe zeigt prinzipiell, daß höhere Ausgangswellen besser als niedrigere gedämpft werden (Abb. 7.18). Näherungsweise wurden für die Versuchsergebnisse Ausgleichskurven höherer Ordnung ermittelt, die tendentiell für alle Versuchsvarianten eine gleiche Form aufweisen. Es erscheint jedoch sinnvoll, die Ergebnisse bereichsweise zu betrachten: Für die Variante W-1 (Buschhlung ohne seitlichen Anwurf; Höhe = 1,00 m), W-3 (Buschhlung ohne seitlichen Anwurf; Höhe = 0,70 m) und W-6 (Buschhlung ohne seitlichen Anwurf; Höhe = 0,40 m) zeichnet sich für Wassertiefen bis zur Bauwerksoberkante ($d = h$) eine im wesentlichen lineare Zunahme der Transmissionskoeffizienten ab. Mit zunehmender Wassertiefe über dem Bauwerk nähert sich der Koeffizient einem Grenzwert an (Abb. 7.19 und Abb. 7.20).

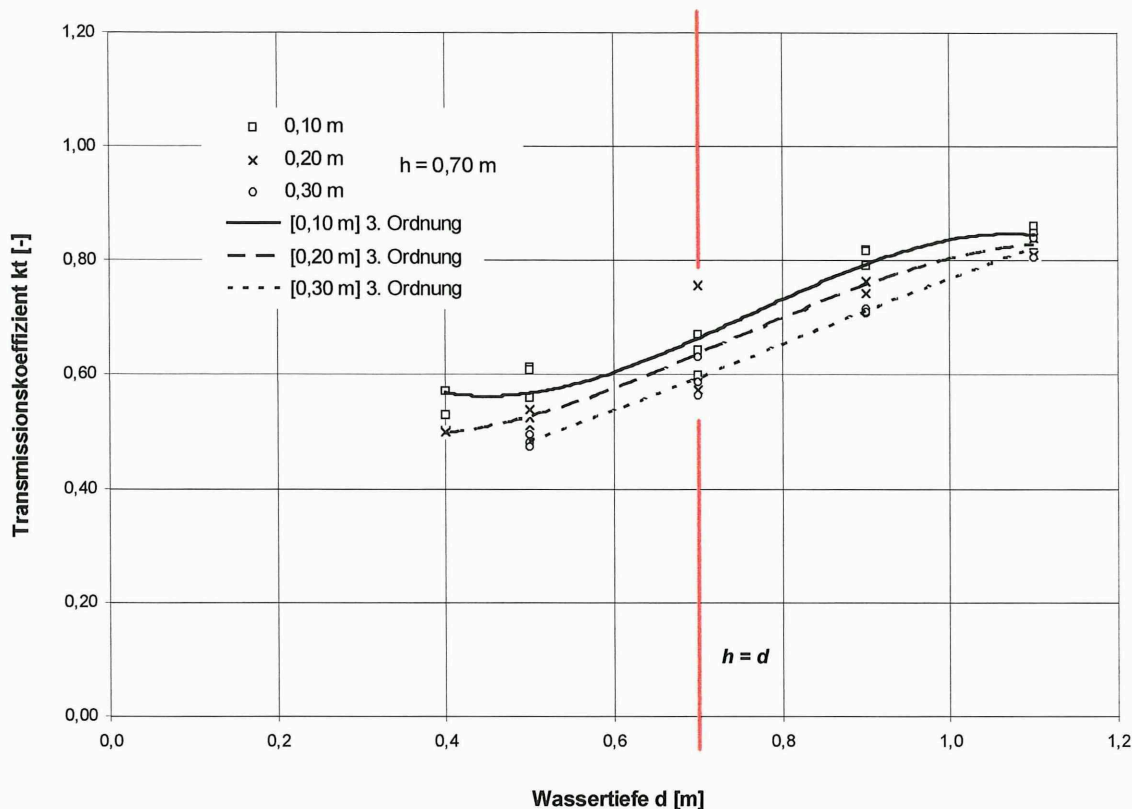


Abb. 7.19: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-3

Da die Ergebnisse der Versuchsvarianten W-1, W-3 und W-6 ein gleiches Systemverhalten dokumentieren, scheint ihre Verknüpfung zulässig. Mit der Ermittlung des Quotienten der relativen Bauwerkshöhe bzw. Wassertiefe h/d kann das Spektrum der unterschiedlichen Wasserstände an einer einfachen Buschlannung ohne Anwurf erweitert und so eine allgemeinere Aussage möglich werden.

Abbildung 7.21 zeigt eine deutliche Abhängigkeit des Transmissionskoeffizienten einer Buschlannung vom Verhältnis h/d . Für h/d -Verhältnisse $\geq 0,50$ werden signifikante Wellen jeder Höhe durch das Lahnungsbauwerk nicht reduziert ($k_T = \text{rd. } 1,00$), maximale um ca. 10 % ($k_T = \text{rd. } 0,90$). Mit zunehmendem h/d -Verhältnis ($0,50 \leq h/d \leq 1,00$) nimmt der Transmissionskoeffizient für signifikante und maximale Wellen im wesentlichen linear von rd. 1,00 bzw. 0,90 auf rd. 0,60 ab. Für kleinere Wassertiefen ($h/d \geq 1,00$) erfolgt eine Reduzierung des Koeffizienten der maximalen Wellenhöhen auf $k_T = \text{rd. } 0,30$ bzw. der signifikanten auf $k_T = \text{rd. } 0,40$. Im Bereich $h/d \geq 2,00$ nimmt der Transmissionskoeffizient wieder etwas zu. Es ist zu berücksichtigen, daß größere Wellenhöhen prinzipiell stärker reduziert werden als niedrigere. Ferner ist für das Verhältnis $h/d = 1,00$ eine starke Streuung der Transmissionskoeffizienten zu verzeichnen, die für diesen Wasserstand insbesondere für kleine Wellenhöhen

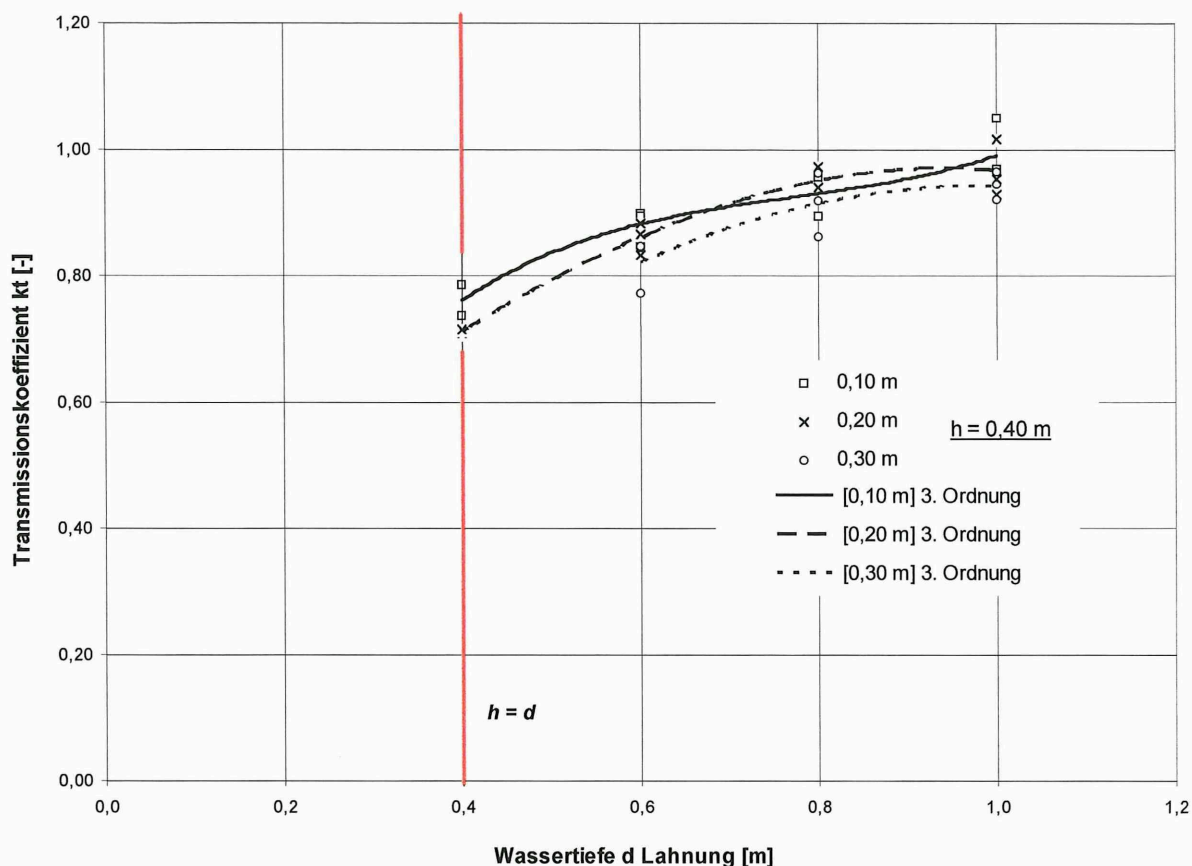


Abb. 7.20: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-6

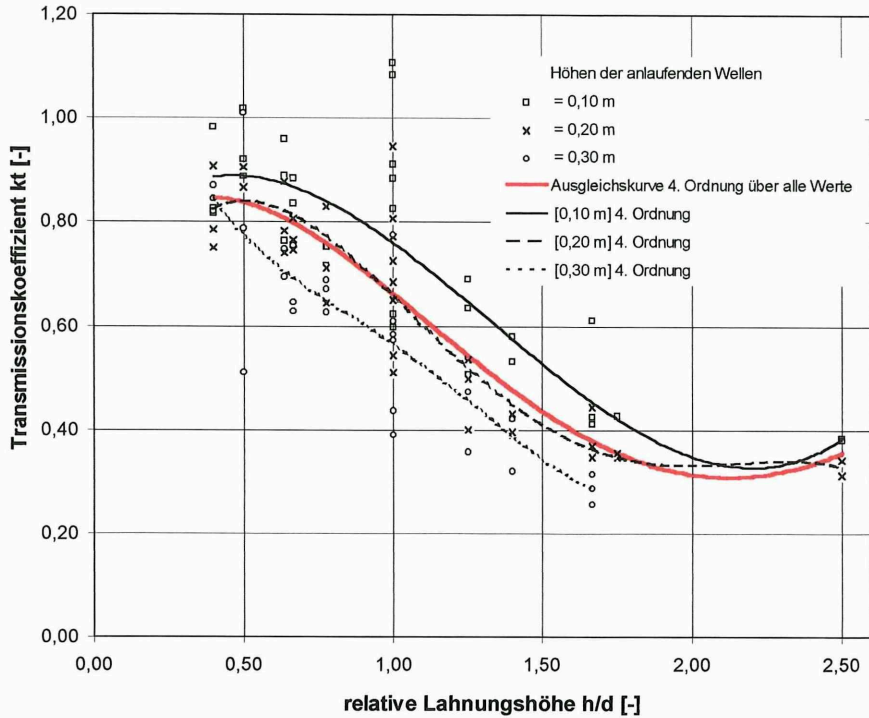
rechnerisch ermittelt wurden. In erster Näherung kann für signifikante bzw. maximale Wellenhöhen ein mittlerer Transmissionskoeffizient im Bereich $0,40 \leq h/d \leq 2,50$ nach nachstehenden Gleichungen ermittelt werden:

$$k_{T(H_S)} = -0,11 \cdot (h/d)^4 + 0,57 \cdot (h/d)^3 - 0,78 \cdot (h/d)^2 - 0,21 \cdot (h/d) + 1,14 \quad (7-10)$$

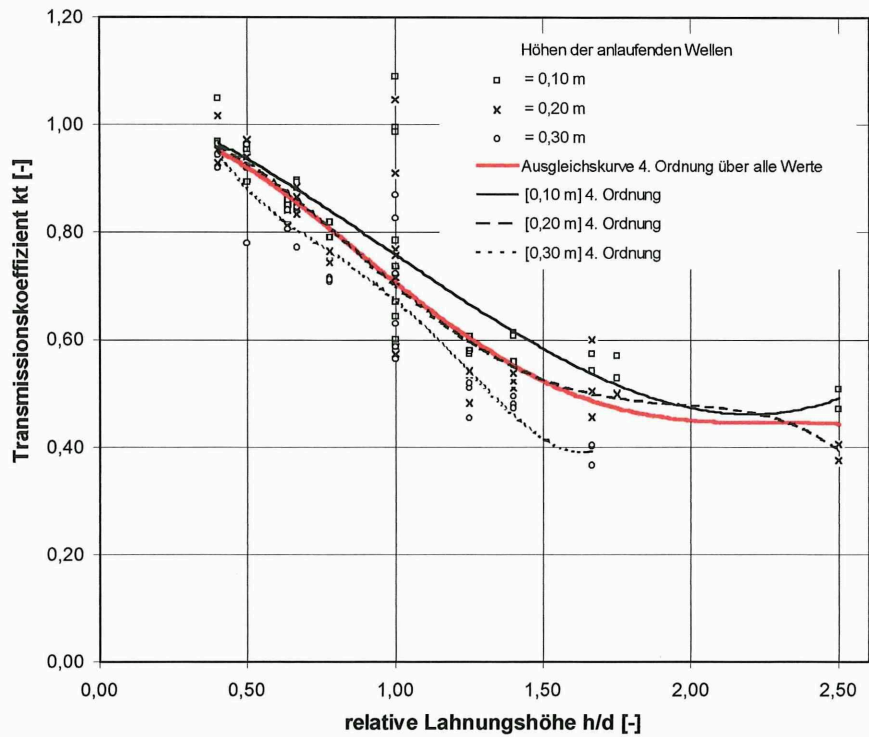
$$k_{T(H_{max})} = -0,19 \cdot (h/d)^4 + 1,12 \cdot (h/d)^3 - 2,06 \cdot (h/d)^2 + 0,95 \cdot (h/d) + 0,76 \quad (7-11)$$

Mit:

- k_T Transmissionskoeffizient [-]
- h/d relative Bauwerkshöhe bzw. Wassertiefe [-]
- h Bauwerkshöhe (= Höhe der Lahnung über OK Watt) [m]
- d Wassertiefe [m]



(a)



(b)

Abb. 7.21: Transmissionskoeffizienten der maximalen (a) und signifikanten Wellenhöhen (b) in Abhängigkeit von der relativen Bauwerkshöhe h/d für die Varianten W-1 bis W-3 und W-6

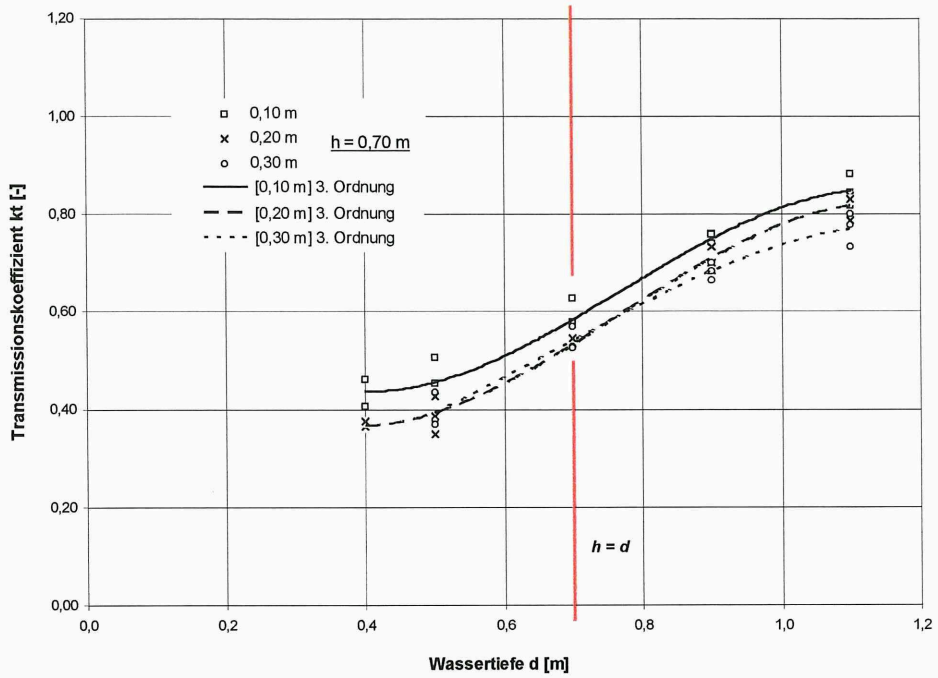


Abb. 7.22: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-4

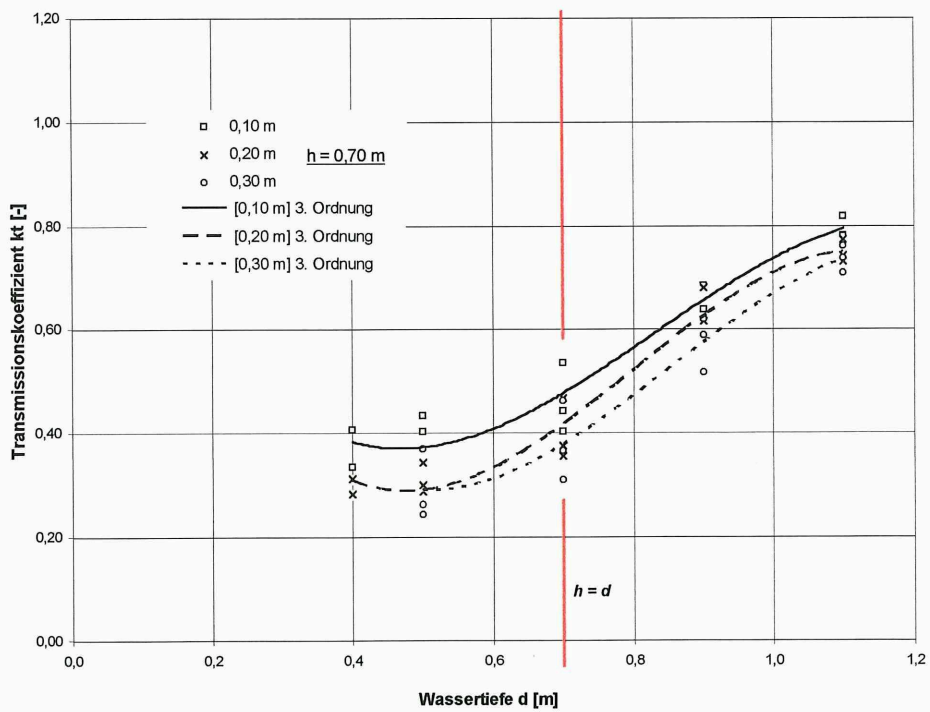


Abb. 7.23: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Variante W-5

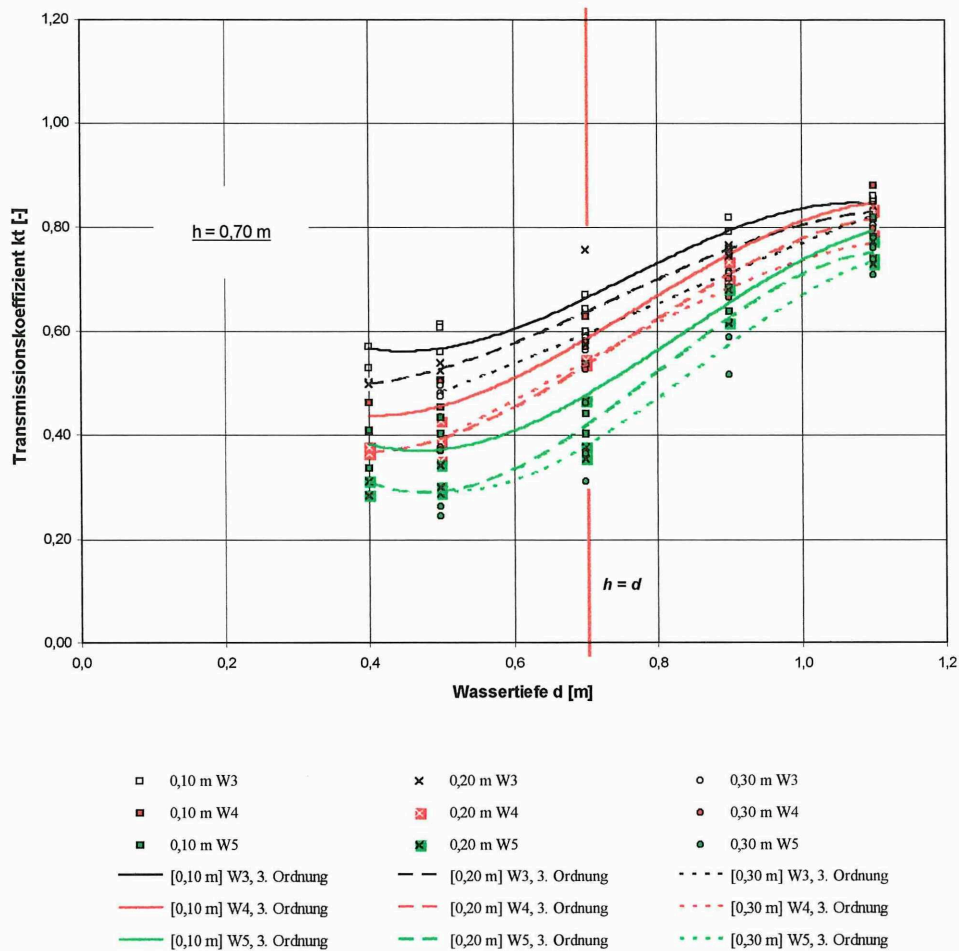


Abb. 7.24: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Varianten W-1, W-4 und W-5

Ergebnisse der Untersuchungen mit breiteren Buschlahnungen sind in den Abbildungen 7.22 und 7.23 dargestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse für die schmale Variante W-1 ($B = 0,25$ m / Abb. 7.17b) mit den Ergebnissen der Varianten W-4 ($B = 0,50$ m) und W-5 ($B = 0,75$ m) zeigt mit zunehmender Bauwerksbreite abnehmende Transmissionskoeffizienten (Abb. 7.24). Dies gilt insbesondere für Wasserstände bis zur Lahnungsoberkante. Bei Wasserständen oberhalb der Lahnungsoberkante konzentrieren sich die Transmissionskoeffizienten stärker und nähern sich einem „gemeinsamen Grenzwert“ von ca. 80%.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse der Varianten W-6 (Buschlahnung; $h = 0,40$ m; $B = 0,25$ m) und W-7 (gedichtete Buschlahnung; $h = 0,40$ m; $B = 0,25$ m) weist auf eine effektivere Dämpfung des Seegangs im Bereich von Wasserständen bis zu rd. 0,40 m über der Lahnungsoberkante durch die Lahnungsvariante W-7 hin (Abb. 7.25). Für höhere Wasserstände können wesentliche Unterschiede zwischen den Varianten W-6 und W-7 nicht ermittelt werden; der Transmissionskoeffizient nähert sich für beide Varianten einem Grenzwert von rd. 95% an.

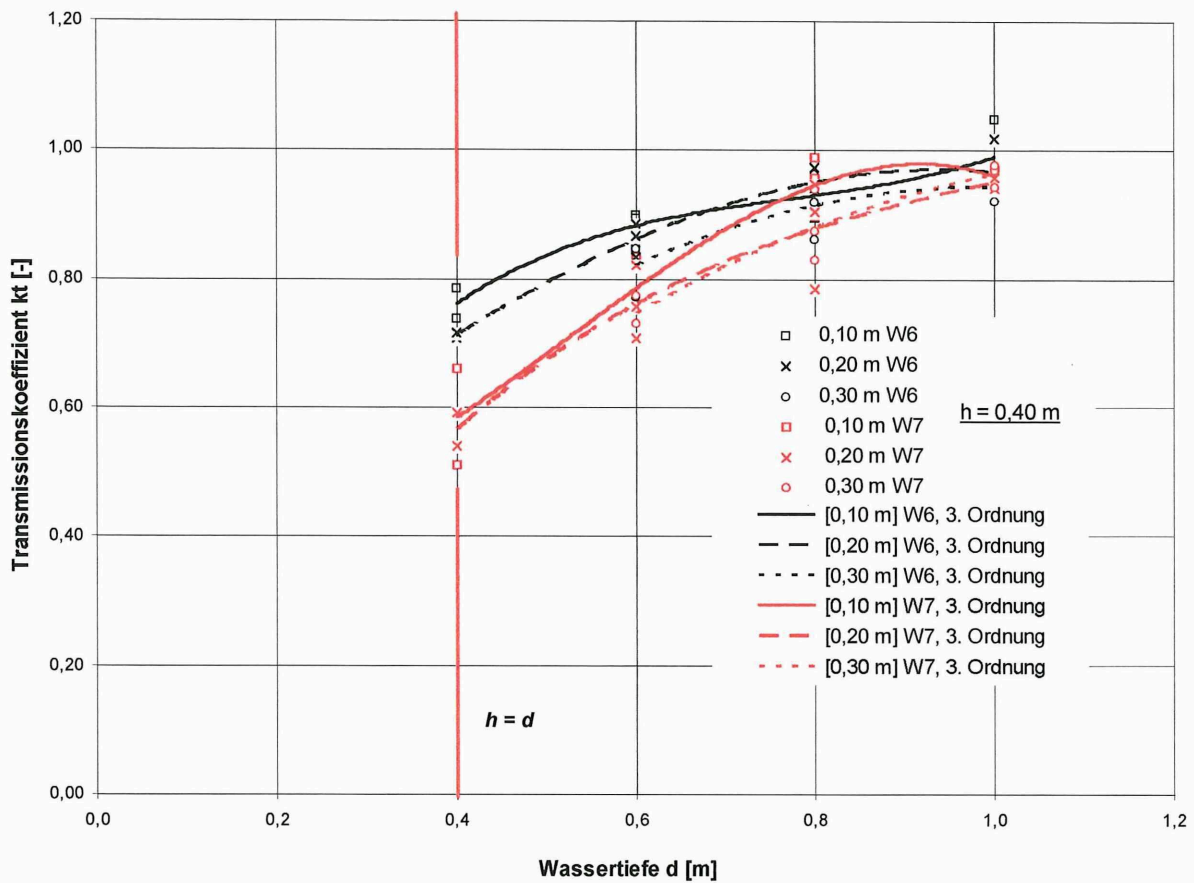
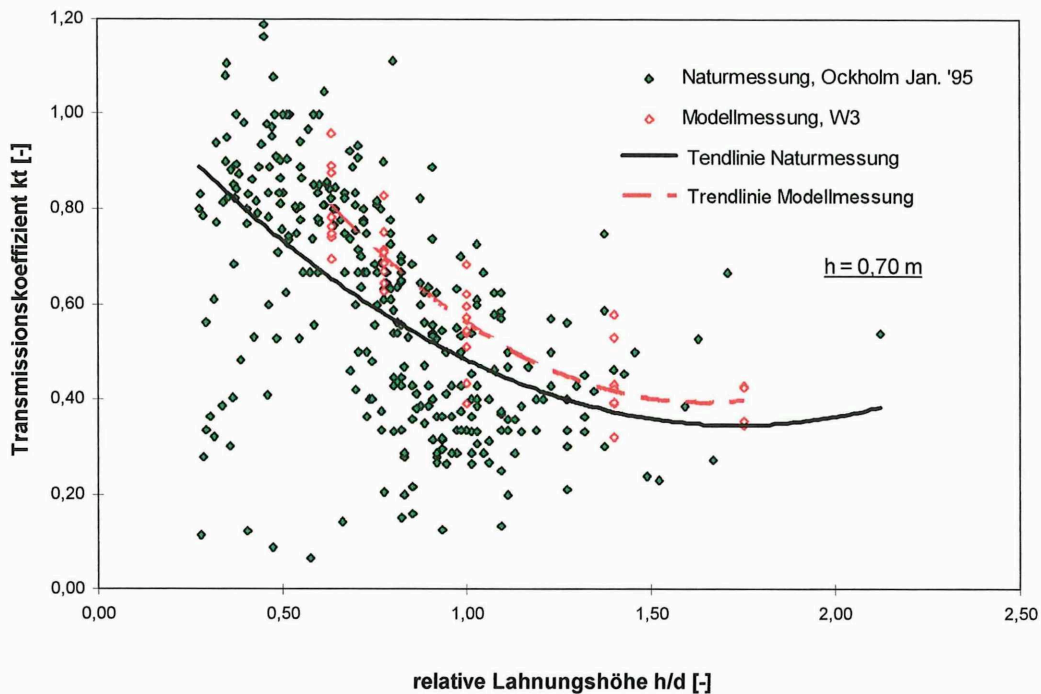


Abb. 7.25: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für die Varianten W-6 und W-7

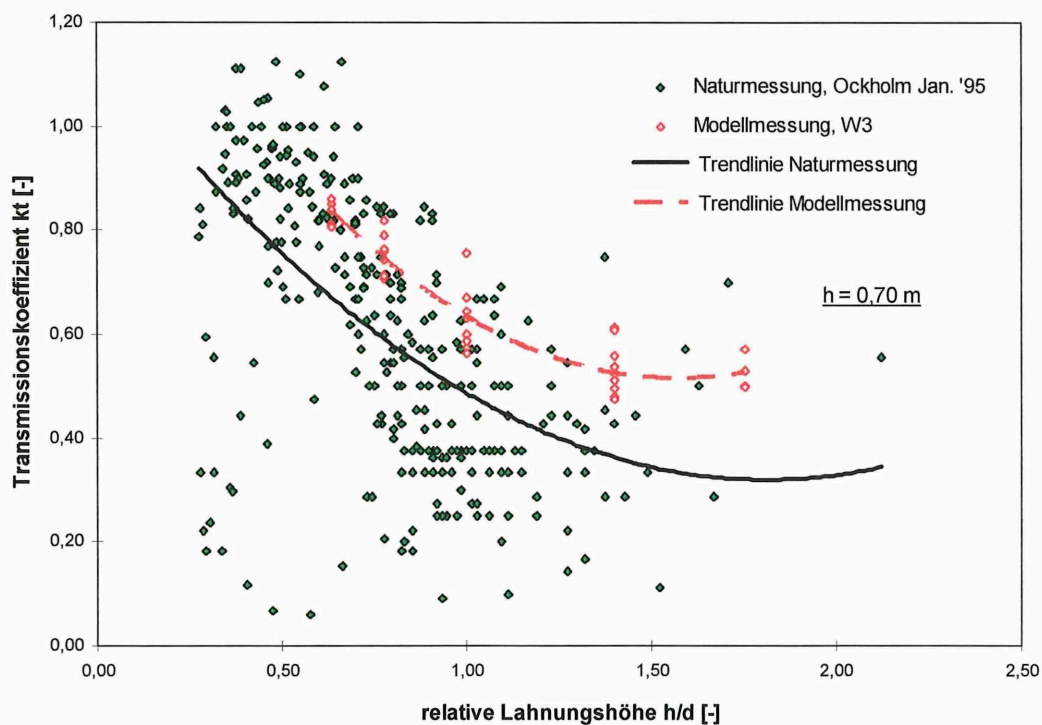
7.2.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit Messungen in der Natur

Die im WKS durchgeführten Versuche wurden so konzipiert, daß ein Vergleich mit den für das Testgebiet „Ockholm“ ausgewerteten Seegangsmessungen möglich ist. Abbildung 7.26 zeigt Modelldaten der Variante W-3 sowie Meßdaten des Testgebietes „Ockholm“ im Januar 1995. Sowohl für die Transmissionskoeffizienten der signifikanten als auch der maximalen Wellenhöhen stimmen die Modelldaten in ihrem Verlauf mit dem Trend der Meßdaten aus der Natur überein.

In Abbildung 7.27 wurden die in der Natur im Monat August 1995 und die im Modell ermittelten Transmissionskoeffizienten auf die Wassertiefe bezogen. Die Daten aus der Natur belegen, ebenso wie die Modelldaten, daß höhere Lahnungen (hier: Lahnungen mit einer Oberkante auf Höhe von MThw + 0,30 m) wirkungsvoller bezüglich ihrer Seegangsdämpfung einzuschätzen sind, als niedrigere.



(a)



(b)

Abb. 7.26: Vergleich der Transmissionskoeffizienten der maximalen (a) und signifikanten Wellenhöhen (b) in Abhängigkeit von der Wassertiefe der Variante W-3 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen im Testgebiet „Ockholm“ im Monat Januar 1995 (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

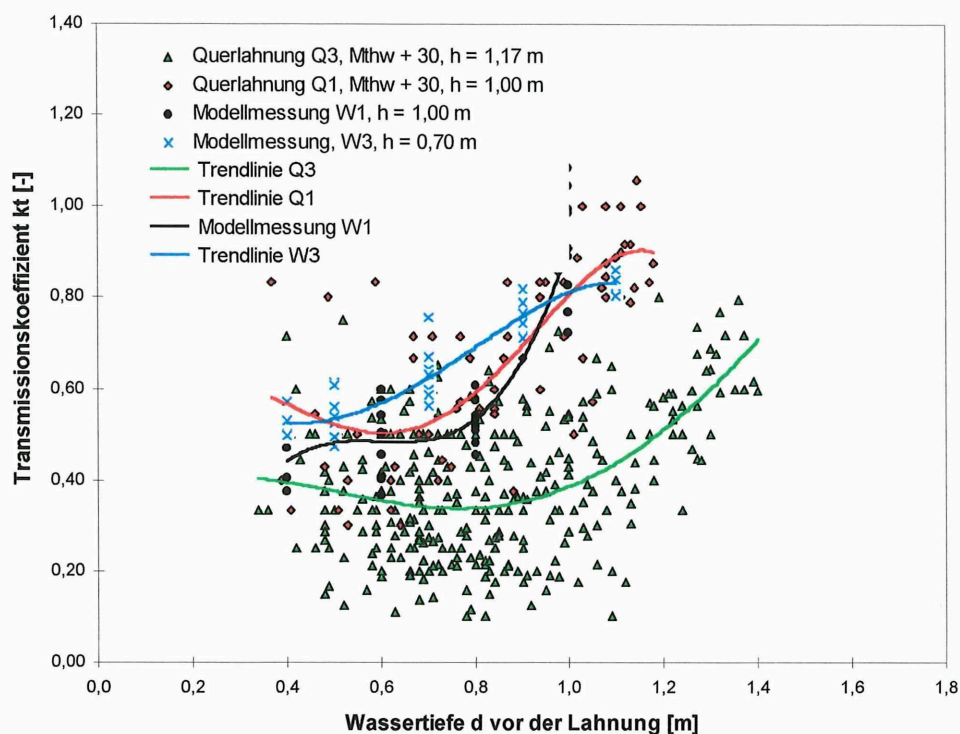


Abb. 7.27: Vergleich des Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe der Varianten W-1 und W-3 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen im Testgebiet „Ockholm“ im Monat August 1995 (Datenbasis: NLÖ-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, 1996)

Versuche aus WKS zeigen im Vergleich zur Natur höhere Transmissionskoeffizienten; d.h. in der Natur wird Seegang durch Buschlahnungen besser gedämpft. Ursache dafür sind vermutlich Algen, Sedimente etc. die sich in der Lahnung festsetzen und für ihre abnehmende Durchlässigkeit verantwortlich sind. Die Unterschätzung des Transmissionskoeffizienten im physikalischen Modell bewegt sich in einer Größenordnung von ca. 20% für die signifikanten und ca. 10% für die maximalen Wellenhöhen. Der im Sinne einer Wellendämpfung positive Effekte geringerer Durchlässigkeiten konnte prinzipiell auch im Vergleich zwischen Variante W-1 (Buschlahnung) und W-2 (Buschlahnung mit seitlichem Anwurf) aufgezeigt werden und das Systemverhalten von Lahnungen mit den Ergebnissen der physikalischen Untersuchungen beschrieben werden.

Der Grad der Wellendämpfung durch Lahnungsbauwerke wurde ebenso anhand von Messungen im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ am Neßmerheller südlich Norderneys untersucht (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 36ff). Betrachtet wurden dort zwei unterschiedlich hohe Lahnungen¹: eine niedrige, deren Oberkante (OK) dem Niveau

¹ Es handelt sich hierbei um regional übliche, mit Rauhsplunddielen gedichtete Buschlahnungen (vgl. Anl. A 7-2).

des MThw entsprach und eine etwas höhere, die 0,30 m über das MThw hinausragte (klassische Lahnungshöhe). Es wurde festgestellt, daß für Wasserstände zwischen MThw und MThw + 0,85 m ($d = \text{ca. } 0,70 \text{ m}$ bis $d = \text{ca. } 1,55 \text{ m}$) durch die Wirkung der niedrigeren Lahnung ($\text{OK} = \text{MThw}$) der Transmissionskoeffizient für signifikante Wellenhöhen H_s im Mittel ca. 75% beträgt (Abb. 7.28). Hinter der hohen Lahnung ($\text{OK} = \text{MThw} + 0,30 \text{ m}$) verringerte sich die signifikante Wellenhöhe H_s im Mittel um rd. 50% (Abb. 7.29). Für die höchsten Wellen H_{max} ergab sich ein mittlerer Transmissionskoeffizient von $k_T = \text{rd. } 65\%$ für die niedrigere und $k_T = \text{rd. } 45\%$ für die höhere Lahnung (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 37f).

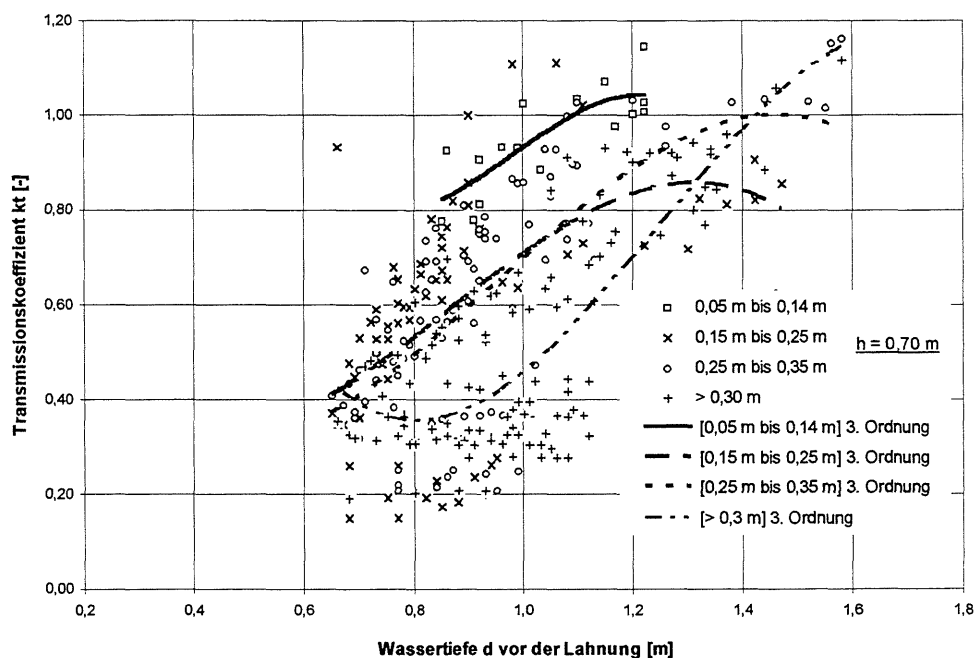


Abb. 7.28: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für eine Lahnung mit $\text{OK} = \text{MThw}$
 Ergebnisse der Seeganganalysen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“

(Datenbasis: STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ NORDEN, 1997)

Eine Auftragung der Ergebnisse für die höhere und die niedrigere Lahnung über die relative Bauwerkshöhe als auch der Ergebnisse der Versuchsvariante W-7 zeigt im Verlauf der Trendlinien gute Übereinstimmungen (Abb. 7.30). Das Transmissionsverhalten im Modell wird jedoch auch für den Typ der gedichteten Buschlahnungen gegenüber den Messungen in der Natur um ca. 18% unterschätzt. Die Ursache hierfür ist in der versuchs- und labortechnisch bedingten geringen Höhe des Lahnungsbauwerkes zu suchen. Der Seegang wird im Vergleich zur betrachteten Lahnung im Neßmerheller ($h = \text{rd. } 0,70 \text{ m}$) an der nur 0,40 m hohen Lahnung im Modell in seinen Orbitalbahnen stärker beeinflusst.

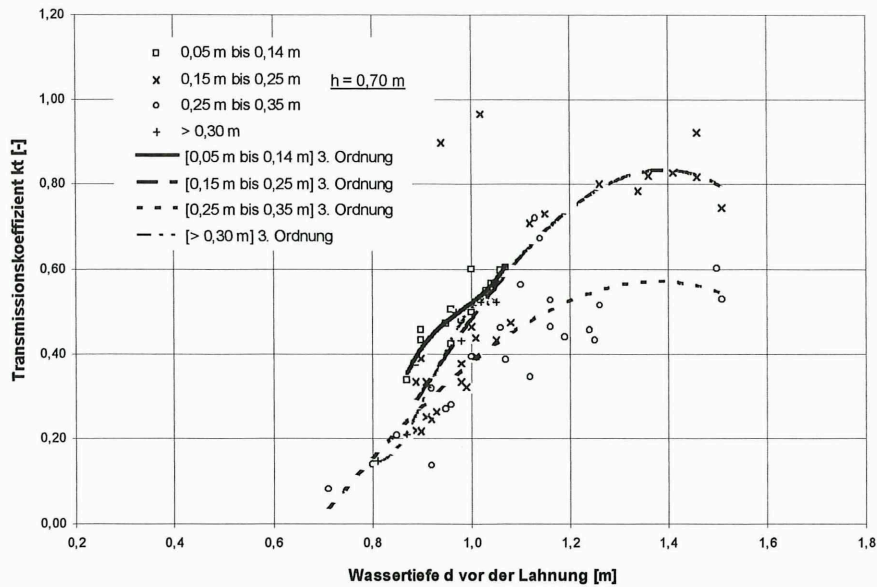


Abb. 7.29: Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe für eine Lahnung mit $OK = MThw + 0,30$ m
 Ergebnisse der Seegangsanalysen des KFKI-Forschungsvorhabens
 „Erosionsfestigkeit von Hellern“
 (Datenbasis: STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ NORDEN, 1997)

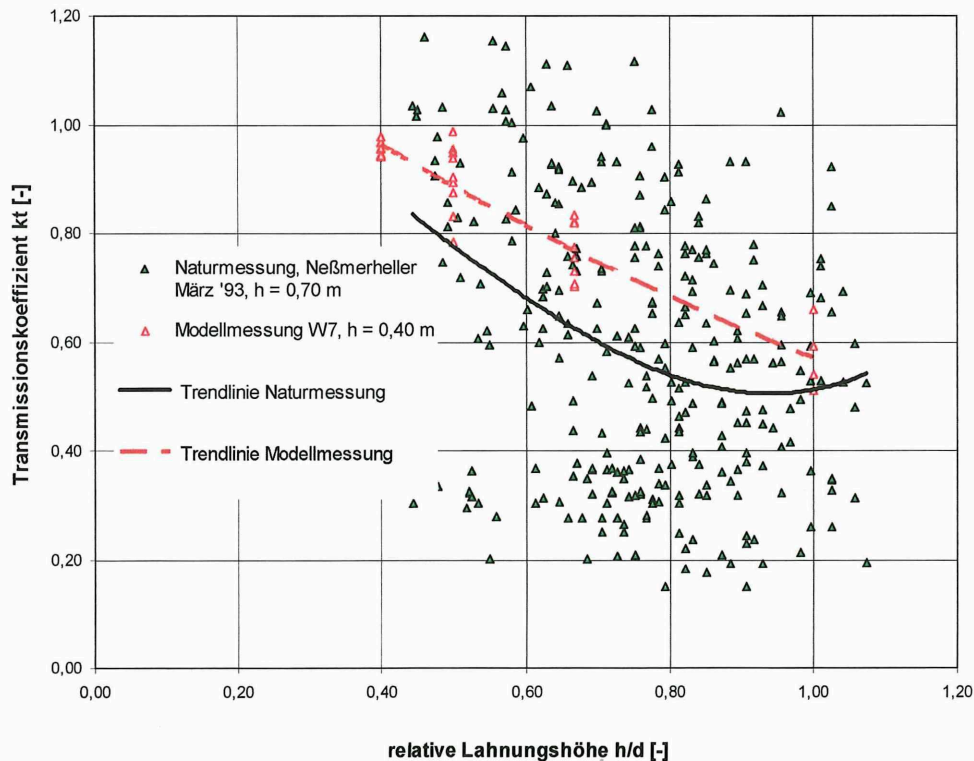


Abb. 7.30: Vergleich der Transmissionskoeffizienten der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der relativen Bauwerkshöhe h/d der Variante W-7 mit den Ergebnissen der Seegangsanalysen des KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“
 (Datenbasis: STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ NORDEN, 1997)

Im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der deutschen Bucht“ wurde im Teilprojekt „Wattseegang“ u.a. die Dämpfung von Seegang durch Lahnungen für den mit einer ausgeprägten Vorlandkante gestalteten Bereich vor dem Schardeich der Ostermarsch (nordöstlich von Norddeich) untersucht. Es konnte belegt werden, daß bei erhöhten Wasserständen Wellenhöhen in einem Lahnungsfeld sowohl höher als auch niedriger als auf den vorgelagerten Wattflächen sein können. So findet nach NIEMEYER ET AL. (1995, S. 178f) oberhalb einer Wassertiefe von $d = 2,55$ m keine nennenswerte Dämpfung des Seegangs statt. Innerhalb der Lahnungsfelder können auch höhere Wellen als seeseitig der Lahnungen gemessen werden. Eine wellendämpfende Wirkung der Lahnungen während Sturmfluten mit erhöhten Wasserständen konnte hier also nicht nachgewiesen werden.

Ein direkter Vergleich mit den Messungen im Testgebiet „Ockholm“ ist nicht möglich, da auch während der Wintermonate des Meßzeitraumes Wassertiefen von 2,55 m nicht überschritten wurden. Zudem handelt sich bei der hier betrachteten Lahnung um eine Betonfertigteillahnung (OK = 1,30 mNN) auf einer niedrigen Wattfläche (GOK = $\pm 0,00$ mNN). Dennoch kann das zuvor beschriebene Verhalten des Seegangs bei höheren Wasserständen prinzipiell auch im Testgebiet „Ockholm“ an Buschlahnungen beobachtet werden (vgl. Kap. 6.6.6).

7.2.5 Bewertung der Ergebnisse

Für den Bereich der im Rahmen der physikalischen Modellversuche untersuchten Wasserstände bis 0,60 m über der Bauwerkskrone können Buschlahnungen in ihrer Konstruktion als wirkungsvoll bezüglich der Seegangsdämpfung beurteilt werden. Die zusätzliche Analyse von Meßdaten aus der Natur belegt, daß eine Anordnung der Lahnungskrone oberhalb MThw als in der Praxis sinnvoll zu erachten ist.

Mit zunehmender Breite des Lahnungsbauwerkes kann der Transmissionskoeffizient im Bereich von Wasserständen unterhalb der Lahnungsoberkante wirkungsvoll reduziert werden. Im Hinblick auf eine praktische Realisierbarkeit sind insbesondere Aspekte der Wirtschaftlichkeit (Mehrkosten aus Material und Arbeitszeit) sowie der Sicherung des Lahnungsbauwerkes gegen das infolge zunehmender Bauwerksbreite resultierende Aufschwimmen der Lahnung zu berücksichtigen, worauf bereits HINRICHS (1931, S. 68) hinweist: „Die Schlickfänger sollen eine geringe, nämlich nur solche obere Breite erhalten, daß sich die Faschinen noch durch die Öffnung zwischen den Pfahlreihen einbringen lassen. Eine große Breite erhöht nicht nur die Baukosten, sondern auch die Gefahr des Auftreibens der Masse bei höherem Wasserstand, sowie die ihrer Zerstörung durch Wellenschlag, weil die Buschmatte dann weniger durchlässig ist“.

Mit Rauhsplunddielen gedichtete Buschlahnungen, wie sie häufig in Ostfriesland zu finden sind, können auf Grundlage der durchgeführten Versuche mit 0,40 m hohen Lahnungen – also beispielsweise bereits stark verlandete Lahnungen – im Bereich von Wasserständen bis zu rd. 0,30 m über der Lahnungsoberkante als wirkungsvoller als die nicht gedichteten Lahnungen eingeschätzt werden. Für höhere Wasserstände zeigen beide Varianten vergleichbare Ergebnisse, und keine der beiden Varianten kann im Hinblick auf die Reduzierung des Seegangs begründet bevorzugt werden.

Die Wirkung eines seitlichen Anwurfs an die Buschlahnung konnte nur in begrenztem Umfang untersucht werden. Es zeichnet sich für die untersuchten Wasserstände jedoch ab, daß die Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf im Vergleich zur Buschlahnung mit seitlichem Anwurf bezüglich der Seegangsdämpfung als wirkungsvoller einzuschätzen ist. Hierbei wurde der stabilisierende und der Buschlahnung Standsicherheit verleihende Aspekt nicht berücksichtigt. Ferner wurde bereits in Kapitel 7.1.3 auf den Einfluß eines seitlichen Anwurfes auf die Strömungsgeschwindigkeiten hingewiesen, welche für den Transport von Sedimenten in Lahnungsfeldern von Bedeutung sind (s. hierzu Kap. 8.4.2.3 bzw. 8.4.3.3).

7.3 Seegangsverhalten in einem Wellenbecken

7.3.1 Versuchseinrichtungen und Meßtechnik

Für die Untersuchungen, die insbesondere der Verifizierung der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen dienen, wurden in enger Abstimmung mit diesen durchgeführt. Im dreidimensionalen, rd. 18 m x 40 m großen Wellenbecken des FRANZIUS-INSTITUTS wurde die Veränderung von Seegang und das daraus resultierende Strömungsbild bei schrittweise veränderten Wasserständen in einem Ausschnitt eines Lahnungsfeldes mit fester, ebener Sohle im Naturmaßstab untersucht. Die eingebaute Lahnung entspricht im Querschnitt den Varianten S-1 (Taf. 7.1) bzw. W-1 (Taf. 7.3) und wurde wie in Abbildung 7.31 dargestellt mit einer Länge von 10 m in das Wellenbecken eingebaut. Der im Wellenbecken betrachtete Ausschnitt stellt einen Ausschnitt eines realen Lahnungsfeldes dar. Auf eine maßstabsbehaftete Untersuchung wurde verzichtet, um die Analogie zu den in der Strömungsrinne (Kap. 7.1) und dem WKS (Kap. 7.2) durchgeführten Versuchen zu wahren. Ferner wurde bei senkrechtem Wellenangriff ein spiegelsymmetrisches Verhalten des Seegangs und der resultierenden Strömungen im Lahnungsfeld vorausgesetzt.

Für die Untersuchungen wurden die in Tafel 7.5 zusammengestellten Parameter variiert. Die betriebstechnisch bedingte maximale Wassertiefe beträgt 0,60 m.

LFD. NR.	WASSERTIEFE [m]	SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE [m]	PERIODE BZW. PEAK-PERIODE [s]	WELLENFORM RW = REGELMÄßIGE WELLEN SP = SPEKTREN
1	0,40	0,10 0,20 0,23	3,0	RW
2	0,50	0,10 0,20 0,23	3,0 4,5	RW, SP
3	0,60	0,10 0,20 0,23	3,0 4,5	RW

Taf. 7.5: Eingangparameter der Untersuchungen im Wellenbecken

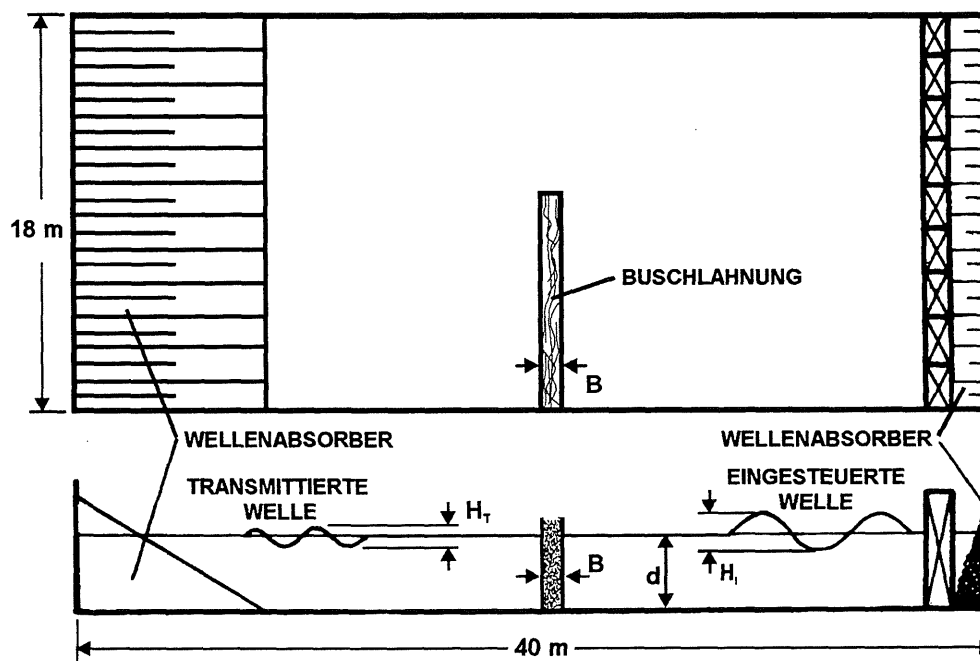


Abb. 7.31: Einbau einer Lahnung in das Wellenbecken

Die auf das Lahnungsbauwerk laufenden Wellen wurden durch eine Plattenwellenmaschine erzeugt und als Wasserspiegelauslenkung über die Zeit mit „Delfter Pegeln“ kontrolliert. Der Grad der Wellendämpfung wurde punktuell im Lahnungsfeld gemessen. Gemäß Tafel 7.5 wurden sowohl Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen als auch mit Spektren durchgeführt. Die Kombinationen der Zeitbereichs- bzw. Frequenzbereichsparameter für die Untersuchungen wurden anhand der in der Natur gemessenen und analysierten Seegangsdaten (vgl. Kap. 6.6.2) sowie in Abstimmung mit den numerischen Simulationen (vgl. Kap. 8.4.1.4) ausgewählt. Zur

Auswertung der Seegangsdaten wurden die am FRANZIUS-INSTITUT entwickelten Auswerteprogramme eingesetzt (vgl. Kap. 7.2.2).

Parallel zu den Seegangsmessungen wurde das Verhalten von in das Becken eingebrachten Schwimmern (u.a. im Zeitrafferverfahren) per Video aufgenommen und somit Strömungsvorgänge an der Wasseroberfläche erfaßt. Charakteristische Schwimmerbahnen wurden aus den Videoaufnahmen ausgewählt und Strömungsvektoren ermittelt.

7.3.2 Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen konnten der dämpfende Einfluß der Lahnungen sowie ein Diffraktionsverhalten meßtechnisch erfaßt und bestätigt werden. Abbildung 7.32 zeigt für einen regelmäßigen Seegang ($H_s = 0,20$ m, $T_{Hs} = 3,00$ s, $d = 0,50$ m) die ungedämpft durch das Lahnungstor passierenden Wellen, während im Bereich hinter der Lahnung die Wasseroberfläche stark beruhigt ist.

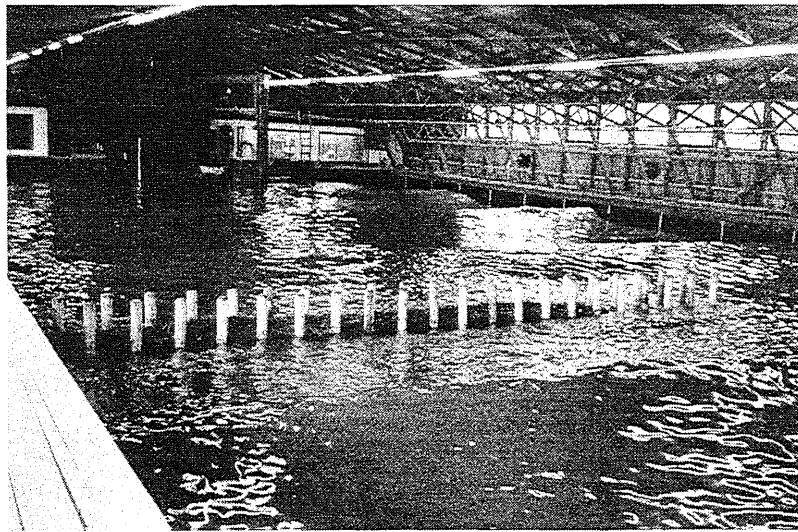


Abb. 7.32: Seegangsverhalten für einen regelmäßigen Seegang im Ausschnitt eines Lahnungsfeldes ($H_s = 0,20$ m, $T_{Hs} = 3,00$ s, $d = 0,50$ m)

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen im Wellenbecken wurde auf ein im Rahmen der numerischen Untersuchungen aufgetretenes Phänomen gerichtet (vgl. Kap. 8.4.2.4 bzw. 8.4.3.4): Die Ergebnisse der Simulation seegangsinduzierter Strömungen für tideabhängige

Wassertiefen zeigten auf die Lahnungen gerichtete Strömungsvektoren, also einen Einströmvorgang durch die Lahnungen hindurch, während die Vektoren in der Öffnung der Lahnung seewärts zeigen (Abb. 7.33²). Das geschilderte Phänomen konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen für alle in Tafel 7.5 genannten Parameterkombinationen beobachtet werden. Eine prinzipielle Beschreibung des Phänomens ist bei PILARCZYK/ZEIDLER (1996, S. 21) zu finden: An permeablen Bauwerken erfolgt der Transport in Abhängigkeit von der Wassertiefe über oder durch das Bauwerk. Die Strömungen werden dann seitlich am Bauwerk vorbeigeführt; im Fall einer Lahnung durch die Lahnungsöffnung.

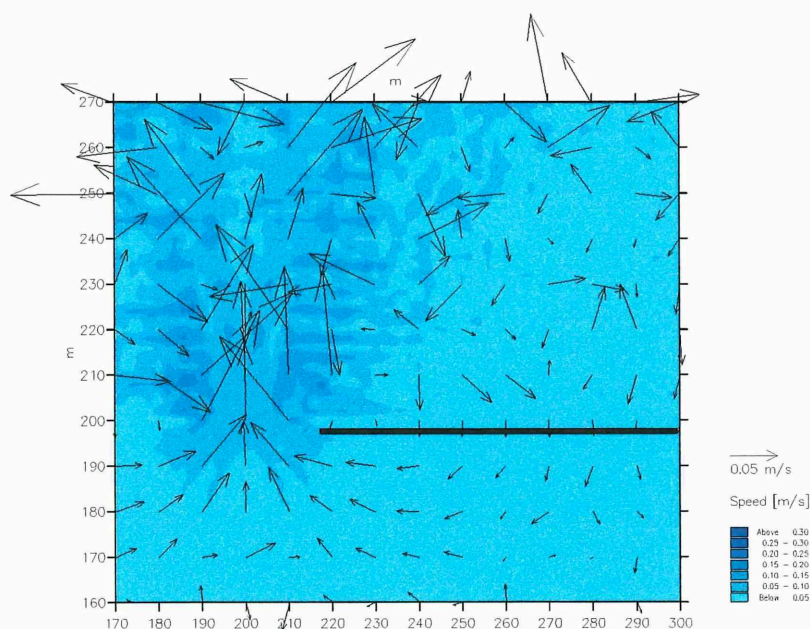


Abb. 7.33: Ergebnisse der numerischen Simulation von seegangsinduzierten Strömungen für ein 200 m x 200 m großes, 1:800 geneigtes Lahnungsfeld und einer Öffnungsweite von 25 m bei regelmäßigem Seegang ($H_s = 0,10$ m, $T_{Hs} = 3,00$ s, $d = 0,50$ m)

Mit der Darstellung einzelner Schwimmerbahnen konnte das Strömungsverhalten sichtbar gemacht und quantifiziert werden. Es zeigten sich gute Übereinstimmungen der Größenordnungen der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen des physikalischen und des numerischen Modells. An dieser Stelle muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse der Schwimmerauswertungen Oberflächenströmungen beschreiben, während die Ergebnisse der numerischen Simulation tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten darstellen.

² Für die Darstellung und Wertung der Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen wird hier auf die in Kapitel 8.4.1.4 dargestellten Simulationsergebnisse vorgegriffen.

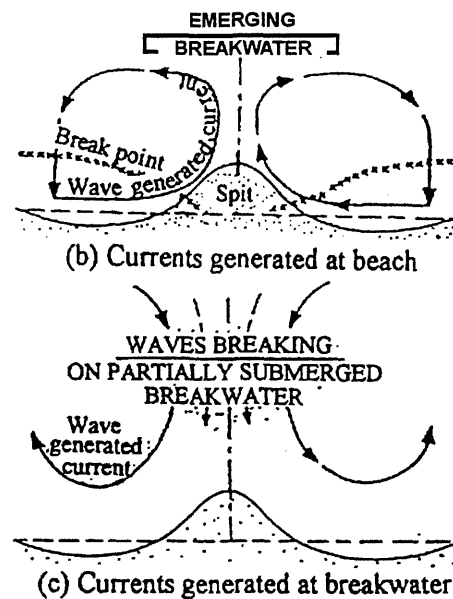


Abb. 7.34: Strömungsverhalten im Bereich permeabler Strukturen;
hier: Unterwasserwellenbrecher
(PILARCZYK/ZEIDLER, 1996, S. 21)

Die Untersuchungen im Wellenbecken mit dem Ausschnitt eines im Maßstab 1:1 nachgebildeten naturnahen Lahnungsfeldes zeigen, daß das seegangsinduzierte Strömungsverhalten in Lahnungsfeldern, insbesondere im Bereich der Lahnungsöffnung unter Annahme vereinfachter Randbedingungen wie

- einer flach geneigten bzw. horizontalen Sohle
- einer Lahnung ohne seitlichen Anwurf
- einer Buschlahnung ohne zusätzliche Verdichtung durch Sedimente oder pflanzliche Materialien
- regelmäßiger Wellen
- tiefengemittelter Strömungsgrößen oder
- schrittweise konstanter Wasserstände

mit dem eingesetzten Modul „*Elliptic-Mild-Slope (EMS)*“ des Softwarepaketes MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI) wiedergegeben werden kann.

8 Numerische Untersuchungen in Lahnungsfeldern

8.1 Allgemeines

Die Vielzahl der abhängigen und unabhängigen Parameter bei der Beschreibung und Simulation von Strömungs-, Wellen- und Sedimentationsvorgängen im Küstenvorfeld und insbesondere in Lahnungsgebieten läßt eine umfassende Simulation der Vorgänge und Variation der Parameter in physikalischen Modellen nicht zu. Erst recht lassen die nach den Gesetzen von Zufall und Wahrscheinlichkeit in der Natur auftretenden Anfangs- und Randbedingungen nur ausschnittsweise Messungen einzelner Parameter zu. Die Qualität der inzwischen verfügbaren numerischen Modelle im Zusammenspiel mit leistungsfähigen Rechenanlagen ermöglicht die Simulation auch in der Natur nur selten auftretender Extremfälle. Modellierbar sind jedoch vor allem über längere Zeiträume ablaufende Prozesse, die aus Kostengründen weder im physikalischen Modell durchzuführen sind, noch in der Natur durch Messungen zu verfolgen sind.

Die Zuverlässigkeit eines Modells kann nur anhand von Meßwerten aus dem Modellgebiet beurteilt werden (Verifizierung). Weitere Meßwerte dienen zudem der Anpassung von Parametern an die örtlichen Gegebenheiten (Kalibrierung). Für das hier untersuchte Testgebiet „Ockholm“ liegen begrenzte Meßdaten zur Bathymetrie und ihren Veränderungen, Meßdaten bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, sowie Wellenhöhen vor. Sie bilden eine wichtige Grundlage für Eichung und Verifizierung der numerischen Modelle.

Das Programmsystem MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI) und die in ihm enthaltenen Module bilden die Grundlage der numerischen Berechnungen. Das Programmsystem umfaßt mehrere Module zur Modellierung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Naturprozesse. Für die Berechnung von Strömungen wurde das HD-Modul (Hydrodynamic Module) verwendet. Für die Simulation welleninduzierter Strömungen kam das EMS-Modul (Elliptic-Mild-Slope Module) zum Einsatz. Sedimenttransport wurde mit Hilfe des MT-Moduls (Mud-Transport Module) untersucht.

Da die Ergebnisse im Zusammenhang mit den zum Einsatz gekommenen Verfahren in ihrer Aussagefähigkeit einzuordnen sind, werden die theoretischen Grundlagen der einzelnen Module in den folgenden Kapiteln eingehend beschrieben.

8.2 Grundlagen der numerischen Simulation

8.2.1 Grundsätzliches zur numerischen Simulation

Sowohl die Strömungs- als auch die Transportgleichung sind bis auf wenige, einfache Ausnahmefälle analytisch bisher nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand zu lösen. In

der Regel ist die exakte Lösung der zugrunde liegenden Differentialgleichungen unbekannt. Sie werden daher mit Hilfe numerischer Berechnungsverfahren approximiert. Für die Lösung der Differentialgleichungssysteme wird hier ein implizites finites Differenzenverfahren (Unbekannte der zu berechnenden Zeitebene werden in ihrer Gesamtheit, d.h. in einem Gleichungssystem, aus den Parameterverteilungen der alten Zeitebene berechnet) angewendet.

Der hier realisierte numerische Ansatz erfordert die Aufteilung des Modellgebietes in quadratische Zellen mit äquidistanten Abmessungen im gesamten Modellgebiet. Die innerhalb der Differentialgleichung enthaltenen Ableitungen der abzubildenden Systemparameter werden durch räumliche und zeitliche Differenzenquotienten ersetzt. Je Netzknoten ergibt sich somit eine Gleichung. Durch die Gesamtheit der im System enthaltenen n Knoten kann so ein Gleichungssystem mit n Unbekannten für die n unbekannt Systemparameter aufgebaut werden. Dieses wird nach Einarbeitung von Anfangs- und Randbedingungen gelöst.

Zur Lösung instationärer Probleme wird die Zeitskala in einzelne Zeitpunkte zerlegt und die Systemparameter im Zeitschritt n anhand einer Rechenvorschrift aus dem Systemzustand zum Zeitpunkt n-1 berechnet.

$$t^n = t^{n-1} + n\Delta t \quad (8-1)$$

mit

$$\begin{aligned} t^n & \text{ Systemzustand zum Zeitpunkt n} \\ t^{n-1} & \text{ Systemzustand zum Zeitpunkt n-1} \end{aligned}$$

Die in den Grundgleichungen auftretenden partiellen Ortsableitungen werden unter Verwendung der Knotenwerte (Abb. 8.0) durch finite Differenzenquotienten (hier beispielhaft Vorwärtsdifferenzen in x-Richtung für ein äquidistantes Gitter in x-Richtung) ersetzt:

$$\frac{\delta u}{\delta x_{i,j}} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \quad (8-2)$$

mit

$$\begin{aligned} u & \text{ abzuleitender Parameter} \\ u_{i+1,j} & \text{ abzuleitender Parameter in der Zelle } i+1,j \\ u_{i,j} & \text{ abzuleitender Parameter in der Zelle } i,j \\ \Delta x & \text{ Diskretisierungsweite (Zellgröße) in x-Richtung} \end{aligned}$$

Zweite Ableitungen werden durch zentrale Differenzen dargestellt:

$$\frac{\delta u}{\delta u_{i,j}} = \frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{\Delta x^2} \quad (8-3)$$

Nach Diskretisierung aller Ableitungen ist das Problem auf die Lösung eines algebraischen Gleichungssystems zurückgeführt. Durch die Kombination der unterschiedlichen Verfahren für die Zeitdiskretisierung und die dargestellten Approximationen der Ortsableitungen entstehen die verschiedenen Finite-Differenzen-Schemata.

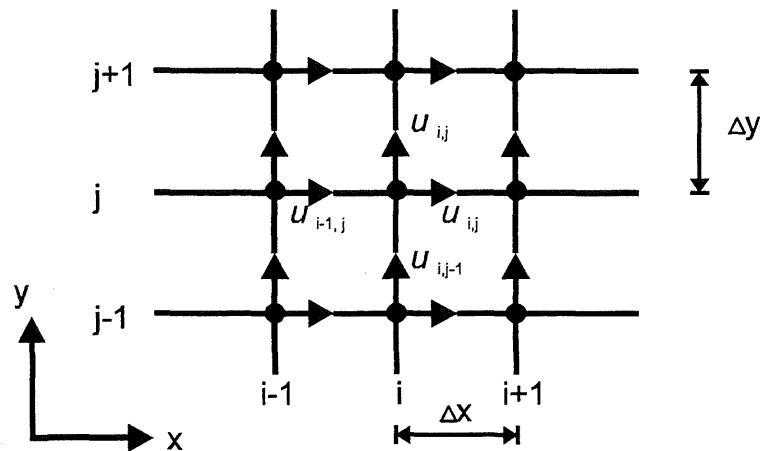


Abb. 8.0: Indizierung von Knoten und Variablen bei Anwendung eines Finite-Differenzen-Verfahrens

Das so entwickelte Gleichungssystem wird innerhalb des Programmsystems MIKE21[®] mit Hilfe des ADI-Verfahrens (*Alternating-Direction-Implicit Procedure*) gelöst (DHI, 1997a). Der Algorithmus zeichnet sich durch seine Schnelligkeit und einen zweischleifigen Berechnungsmodus (*Double Sweep*) aus, der maßgeblich zur Stabilität des Verfahrens beiträgt.

8.2.2 Hydrodynamisches Modell (HD-Modul)

Das hydrodynamische Modell (HD-Modul) wird für die Modellierung von Wasserständen, Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüssen in Binnenflüssen, Ästuaren und Küstengewässern (Wasserkörper mit freier Oberfläche) eingesetzt. Es dient somit als Grundlage für die auf diesen Parametern bzw. einem berechneten Geschwindigkeitsfeld aufbauenden Modelle zur Beschreibung des Sedimenttransports.

Das Modell basiert auf einem zweidimensionalen Ansatz (vertikal homogenes Fluid, Geschwindigkeits- und Dichtegradienten in der Vertikalen sind vernachlässigbar), der auch die Betrachtung instationärer Strömungsvorgänge erlaubt.

Bei dem angewandten numerischen Verfahren werden die hydrodynamischen Zustandsgrößen durch eine Integration der Kontinuitäts- und Impulsgleichung über die Vertikale formuliert.

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden über die Tiefe gemittelt. Für die zweidimensionale Betrachtung müssen die folgenden Annahmen getroffen werden:

- Die vertikalen Beschleunigungen sind vernachlässigbar.
- Die Impulsbeiwerte sind etwa 1.
- Die viskosen Spannungen ändern sich nur wenig über die Tiefe.

Die Einhaltung dieser Annahmen ist im konkreten Anwendungsfall zu überprüfen. Für die Entwicklung der maßgebenden Differentialgleichungen für den zweidimensionalen Fall werden die Ableitungen durch TAYLOR-Reihenentwicklung approximiert. Die Beschreibung der Strömungsvorgänge erfolgt mit Hilfe der Gleichungen zur Massenerhaltung (Gl. 8-4) und der NAVIER-STOKES-Gleichungen (Gl. 8-5 und Gl. 8-6):

Massenerhaltung:

$$\underbrace{\frac{\partial \zeta}{\partial t}}_{\text{Auslenkungsänderung}} + \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y}}_{\text{Durchflußdivergenz}} = 0 \quad (8-4)$$

mit

- $\zeta(x,y,t)$ Wasserspiegelauslenkung [m]
- t Zeit [s]
- $p(x,y,t)$ Durchfluß in x-Richtung [m^3/s]
- $q(x,y,t)$ Durchfluß in y-Richtung [m^3/s]
- x, y Raumkoordinaten [m]

Impulserhaltung:

$$\underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right)}_{\text{advective Beschleunigung}} + \underbrace{gh \frac{\partial \zeta}{\partial x}}_{\text{Meeresspiegelneigung}} + \underbrace{\frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2}}_{\text{Bodenreibung}} - \underbrace{\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right]}_{\text{Schubspannungsdivergenz}} - \underbrace{\frac{\Omega q}{\rho_w}}_{\text{Coriolis-kraft}} - \underbrace{f V V_x}_{\text{Windschub}} + \underbrace{\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x}}_{\text{Luftdruckgradient}} = 0 \quad (8-5)$$

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right)}_{\text{advective Beschleunigung}} + \underbrace{gh \frac{\partial \zeta}{\partial y}}_{\text{Meeresspiegelneigung}} + \underbrace{\frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2}}_{\text{Bodenreibung}} \\
 & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] - \underbrace{\frac{\Omega q}{\rho_w}}_{\text{Coriolis-Kraft}} - \underbrace{f V V_y}_{\text{Windschub}} + \underbrace{\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y}}_{\text{Luftdruckgradient}} = 0
 \end{aligned} \tag{8-6}$$

mit

f	Windreibungskoeffizient [-]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$h(x,y,t)$	Wassertiefe [m]
$p_a(x,y,t)$	Luftdruck [kg/(m s ²)]
$C(x,y)$	Widerstandsbeiwert nach CHEZY [m ^{1/2} /s]
$V(x,x,t)$	Windgeschwindigkeit [m/s]
$V_x(x,x,t)$	Windgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]
$V_y(x,x,t)$	Windgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]
ρ_w	Dichte des Fluids [kg/m ³]
τ_{xx}	Schubspannungskomponente in x-Richtung [kg/m s ²]
τ_{xy}	Schubspannungskomponente in x-Richtung am y-Rand [kg/m s ²]
τ_{yx}	Schubspannungskomponente in y-Richtung am x-Rand [kg/m s ²]
τ_{yy}	Schubspannungskomponente in y-Richtung [kg/m s ²]
Ω	CORIOLIS-Parameter in Abhängigkeit vom Breitengrad [1/s]

Die lokalen Beschleunigungsterme in Gleichung 8-5 und Gleichung 8-6 werden durch eine TAYLOR-Reihenentwicklung approximiert:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left(\frac{p^{n+1} - p^n}{\Delta t} \right)_{i,j} \tag{8-7}$$

Die advective Beschleunigung (hier dargestellt für die x-Richtung) wird durch zwei Terme beschrieben, die wie folgt diskretisiert werden:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pp}{h} \right) = \left[\frac{(p_{i+1,j} p_{i,j})^{n+1}}{2} \frac{(p_{i+1,j} + p_{i,j})^n}{2} \frac{1}{h_{i+1,j}^n} - \frac{(p_{i,j} + p_{i-1,j})^{n+1}}{2} \frac{(p_{i,j} + p_{i-1,j})^n}{2} \frac{1}{h_{i,j}^n} \right] \frac{1}{\Delta x} \tag{8-8}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = \left[\left(\frac{p_{i,j+1}^a + p_{i,j}^b}{2} \right) v_{i+1/2,j}^{n+1/2} - \left(\frac{p_{i,j}^a + p_{i,j-1}^b}{2} \right) v_{i+1/2,j-1}^{n+1/2} \right] \frac{1}{\Delta y} \tag{8-9}$$

"down sweep":	$a = n + 1, b = n$	(8-10)
"up sweep":	$a = n, b = n + 1$	

$$v_{i+1/2,j}^{n+1/2} = \frac{2 (q_{i,j} + q_{i+1,j})_j^{n+1/2}}{(h_{i,j} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j} + h_{i+1,j+1})^n} \quad (8-11)$$

$$v_{i+1/2,j-1}^{n+1/2} = \frac{2 (q_{i,j} + q_{i+1,j})_{j-1}^{n+1/2}}{(h_{i,j-1} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j-1} + h_{i+1,j})^n} \quad (8-12)$$

Die Gravitationsterme in Gleichung 8-5 und Gleichung 8-6 werden ebenfalls durch eine TAYLOR-Reihenentwicklung angenähert (hier für die x-Richtung dargestellt):

$$g h \frac{\partial \zeta_x}{\partial x} = g \left(\frac{h_{i,j} + h_{i+1,j}}{2} \right)^n \left(\frac{\zeta_{i+1} - \zeta_{i,j}}{\Delta x} \right)^{n+1/2} \quad (8-13)$$

Die Rauheitskoeffizienten zur Berücksichtigung der Bodenreibung werden in ihrer räumlichen Verteilung durch CHEZY-Widerstandsbeiwerte berücksichtigt:

$$R = \frac{g u |u|}{C^2} \quad (8-14)$$

mit

- u Fließgeschwindigkeit [m/s]
- R Bodenreibung [m^2/s]

Alternativ können Rauheitskoeffizienten nach MANNING berücksichtigt werden, wobei zwischen CHEZY- und MANNING-Beiwert die folgende Beziehung angesetzt wird:

$$C = M h^{1/6} \quad (8-15)$$

mit

- h Wassertiefe [m]
- M MANNING-Beiwert [$m^{1/3}/s$]

Die TAYLOR-Reihenentwicklung für den die Bodenreibung beschreibenden Term in Gleichung 8-5 und Gleichung 8-6 stellt sich wie folgt dar:

$$\frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} = \frac{g p_{i,j}^{n+1} \sqrt{\left(p_{i,j}^n \right)^2 + \left(\frac{1}{8} (q_{i,j}^{n-1/2} + q_{i+1,j}^{n-1/2} + q_{i,j-1}^{n-1/2} + q_{i+1,j-1}^{n-1/2} + q_{i,j}^{n+1/2} + q_{i+1,j}^{n+1/2} + q_{i,j-1}^{n+1/2} + q_{i+1,j-1}^{n+1/2}) \right)^2}}{C_{i,j}^2 \left(\frac{1}{2} (h_{i+1,j} + h_{i,j})^n \right)^2} \quad (8-16)$$

Die MANNING-Zahl liegt erfahrungsgemäß zwischen 20 bis 40 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$. In Ästuarien mit Tideeinfluß wird eine MANNING-Zahl von 25 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ empfohlen (DHI, 1997a). Die CHEZY-Widerstandsbeiwerte liegen i.a. in einem Bereich von 30 bis 50 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$. Durch eine Anpassung von Reibungsbeiwerten im Bereich offener Modellränder kann die numerische Stabilität entscheidend verbessert werden. Zu diesem Zweck werden im Bereich der offenen Modellränder die MANNING-Beiwerte auf einen Wert von 5 bis 10 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ festgelegt. Das angewendete Mehrschrittverfahren (DVWK, 1996) verwendet nicht nur den direkt vergangenen Zeitschritt $n-1$ zur Berechnung des Strömungszustandes zum Zeitpunkt n . Hierdurch kann eine höhere zeitliche Konsistenzordnung erzielt werden. Maßgebend für die numerische Stabilität und damit auch die Aussagefähigkeit der Berechnungsergebnisse ist für den Konvergenzfall das Einhalten eines bestimmten Verhältnisses zwischen Strömungsgeschwindigkeit und gewählter Diskretisierungsweite. Dieses, als COURANT-Zahl bezeichnete Verhältnis, ergibt sich zu:

$$C_{R,x} = v_x \frac{\Delta t}{\Delta x}$$
$$C_{R,y} = v_y \frac{\Delta t}{\Delta y}$$
(8-17)

mit

$C_{R,x}$	COURANT-Zahl in x-Richtung [-]
$C_{R,y}$	COURANT-Zahl in y-Richtung [-]
Δt	Zeitschrittlänge [s]
Δx	Diskretisierungsweite (Zellgröße) in x-Richtung [m]
Δy	Diskretisierungsweite (Zellgröße) in y-Richtung [m]
v_x	Fließgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]
v_y	Fließgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]

Die maximale COURANT-Zahl sollte nicht größer als 1 sein. Die Einhaltung dieser Verhältniswerte gewährleistet, daß sich Störungen aus Impuls und Masse während eines Zeitschrittes der Länge Δt nicht über mehr als eine Gitterweite Δx ausbreiten.

Die Turbulenz tendiert zu hochgradig instationären Wirbelstrukturen. Die größten Wirbel haben die Größenordnung des Strömungsgebietes und entziehen der mittleren Strömung kinetische Energie. Sie zerfallen in immer kleinere Wirbelstrukturen, bis sich am Ende der Wirbelkaskade die kleinsten Wirbel in Wärmeenergie umwandeln (Dissipation). Die Frequenz der Wirbelbewegung ist umgekehrt proportional zum Längenmaßstab der Wirbelstrukturen. Aufgrund der Erkenntnis, daß die REYNOLDS-Spannungen eine ähnliche Wirkung auf das Strömungsgeschehen haben, wie eine innere Reibung, formulierte BOUSSINESQ das Wirbelviskositätsprinzip. In Analogie zur molekularen Viskosität ν definiert dieses Prinzip die Wirbelviskosität ν_t als Proportionalitätsfaktor, mit dem die REYNOLDS-Spannungen an die Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit geknüpft werden. Allein das Wirbelviskositätsprinzip ist

noch kein vollständiges Turbulenzmodell. Es reduziert jedoch die Anzahl der unbekanntenen Turbulenzgrößen auf die Ermittlung des Proportionalitätsfaktors ν_t . Für die Festlegung dieses Faktors existieren Ansätze unterschiedlicher Komplexität. Diese reichen im einfachsten Fall von einer bereichsweise konstanten Wirbelviskosität (Nullgleichungsmodell, z.B. nach SMAGORINSKY (1963)), über k-Modelle (Eingleichungsmodelle auf der Grundlage der PRANDTL-KOLMOGOROV Beziehung) bis hin zu k- ϵ -Modellen (Zweigleichungsmodelle, z.B. nach LAUNDERS & SPALDING (1974)). Der erstgenannte Ansatz nach SMAGORINSKY (1963) wurde im Programmsystem MIKE21[®] realisiert und ist innerhalb der Schubspannungsterme in Gleichung 8-5 und Gleichung 8-6 implementiert:

$$W = \frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(0,5 hE \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right) \quad (8-18)$$

mit

h	Wassertiefe [m]
E	Viskositätsbeiwert [-]
W	Wirbelviskosität [-]

Der Viskositätsbeiwert E kann außerdem als konstanter Wert oder in seiner räumlichen Verteilung (zeitlich konstant) vorgegeben werden. Wird der Ansatz nach SMAGORINSKY (1963) verwendet, so geht der Viskositätsbeiwert als Funktion der Fließgeschwindigkeitsgradienten ein:

$$E = C_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\delta v_x}{\delta x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_x}{\delta y} + \frac{\delta v_y}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta v_y}{\delta y} \right)^2 \right] \quad (8-19)$$

mit

C_s	SMAGORINSKY-Konstante ($0,25 \leq C_s \leq 1,0$)
Δ	Diskretisierungsweite (Zellgröße) [m]

Da die Fließgeschwindigkeiten jedoch nicht a priori bekannt sind, werden hier die im vorhergehenden Zeitschritt n-1 berechneten Fließgeschwindigkeiten für die Ermittlung der Viskositätsbeiwerte angesetzt. Dies setzt voraus, daß die Zeitschrittlänge entsprechend angepaßt wird, um größere Veränderungen des Turbulenzzustandes zwischen zwei Zeitschritten auszuschließen. Bei großem Viskositätsbeiwert können Stabilitätsprobleme auftreten. Der Beiwert muß daher folgendes Kriterium erfüllen:

$$\frac{E \Delta t}{\Delta x \Delta y} \leq 1/2 \quad (8-20)$$

Die Viskositätsbeiwerte E werden in die Schubspannungskomponenten τ_{ij} aufgenommen:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= E \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \tau_{xy} &= E \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \\ \tau_{yy} &= E \frac{\partial v_y}{\partial y}\end{aligned}\quad (8-21)$$

mit

$$\tau_{i,j} \quad \text{Schubspannungskomponente im i-Rand in j-Richtung [kg/(m s}^2\text{)]}$$

Der Einfluß der CORIOLIS-Kraft wird wie folgt berücksichtigt:

$$\Omega q = \Omega \frac{1}{8} (q_{i,j}^{n-1/2} + q_{i+1,j}^{n-1/2} + q_{i,j-1}^{n-1/2} + q_{i+1,j-1}^{n-1/2} + q_{i,j}^{n+1/2} + q_{i+1,j}^{n+1/2} + q_{i,j-1}^{n+1/2} + q_{i+1,j-1}^{n+1/2}) \quad (8-22)$$

Für die Berücksichtigung des Windschubes müssen die entsprechenden Parameter in allen Knoten des Modellgebietes bekannt sein. Für den Windreibungskoeffizienten werden drei Fälle unterschieden:

$$f = \begin{cases} 0,00063 & \text{für } V < 0 \text{ m/s} \\ 0,00063 + \frac{V}{30 \text{ m/s}} (0,0026 - 0,00063) & \text{für } 0 \text{ m/s} < V < 30 \text{ m/s} \\ 0,0026 & \text{für } V > 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8-23)$$

Quellen und Senken sind in Gleichung 8-4 durch Ergänzung der rechten Seite implementiert:

$$\frac{Q}{(\Delta x \Delta y)} \quad (8-24)$$

mit

$$Q \quad \text{Flächenbezogener Quellen- bzw. Senkenterm [m}^3\text{/s m}^2\text{]}$$

Entsprechendes gilt für die Einbringung von Impulsgrößen in Gleichung 8-5 und Gl. 8-6:

$$\begin{aligned}\text{in x-Richtung:} & \quad Q v \sin(\theta - \theta_{NYC}) \\ \text{in y-Richtung:} & \quad Q v \cos(\theta - \theta_{NYC})\end{aligned}\quad (8-25)$$

mit

- v Einströmgeschwindigkeit für Q in Richtung von θ [m/s]
 θ_{NYC} Lage des Modells [Grad]

Welleninduzierte Strömungen werden durch Einarbeitung entsprechender Geschwindigkeitskomponenten in den Impulsgleichungen realisiert:

$$\begin{aligned} \text{in x - Richtung:} & \quad \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \\ \text{in y - Richtung:} & \quad \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \end{aligned} \quad (8-26)$$

Insbesondere bei der Wahl von Zeitschrittweiten innerhalb des HD-Moduls, die unterhalb einer Wellenperiode liegen, können Synergieeffekte aus Seegang dazu führen, daß der welleninduzierte Anteil der Strömungsgeschwindigkeit einen nicht unerheblichen Anteil einnimmt. Ob diese Erscheinung mit dem örtlichen Geschehen zu verbinden ist, muß im Einzelfall beurteilt werden. Vor allem bei der Simulation in Ästuarien bzw. im Küstenvorfeld sind der Berücksichtigung welleninduzierter Strömungen enge Grenzen gesetzt, da die im Tidebereich notwendige tiefenabhängige Implementierung der „*Radiation Stresses*“, bei ansonsten gleichen Randbedingungen (Wellenhöhe, Wellenlänge), innerhalb des in MIKE21 implementierten EMS-Moduls nicht realisiert ist.

8.2.3 Seegangmodell (EMS-Modul)

Das im Rahmen der Untersuchungen angewandte Elliptic-Mild-Slope Modell (EMS-Modul) ermöglicht es, zeitgemittelte Wellen auf gering geneigten Bathymetrien mit beliebigen Wassertiefen an einem diskreten Simulationszeitpunkt zu berechnen. Die durch Wellen induzierten „*Radiation Stresses*“ werden durch entsprechende Geschwindigkeitskomponenten in die Impulsgleichungen (Gl. 8-5 und Gl. 8-6) des hydrodynamischen Modells eingearbeitet.

Das numerische Modell ist ein lineares Refraktions-Diffraktions Modell, das Wellenbrechen, Reibung und Reflexion berücksichtigt. Dämpfungsschichten (*Sponge Layers*) zur Absorption von Wellenenergie (z.B. an einem offenen Rand) können eingearbeitet werden. Das Modell beinhaltet eine generelle Formulierung der „*Radiation Stresses*“. Diese treten jedoch nur bei sich kreuzenden Wellenzügen und bei starker Diffraction merklich in Erscheinung und gewinnen in diesem Falle auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß innerhalb des hydrodynamischen Modells. Streuungen in der Wellenamplitude und Interaktionen von Welle zu Welle wer-

den nicht berücksichtigt. Auch das EMS-Modul benutzt zur Lösung der Impuls- und Massenerhaltungsgleichungen den ADI-Algorithmus. Die verallgemeinerten Grundgleichungen zur Massen- und Impulserhaltung stellen sich wie folgt dar:

$$\nabla (C_g C \nabla \zeta) = \frac{C_g}{C} \frac{\partial \zeta}{\partial t^2} \quad (8-27)$$

mit

C_g	Gruppengeschwindigkeit [m/s]
C	Wellengeschwindigkeit [m/s]
ζ	Wasserspiegelauslenkung [m]

Die verallgemeinerte Grundgleichung beinhaltet Wellenerzeugung, Wellendämpfung (Adsorption), partielle Reflektion, Sohlreibung und das Brechen von Wellen (WARREN ET AL., 1985 / MADSEN & LARSEN, 1987):

$$\begin{aligned} \frac{C_g}{C} \frac{\partial S}{\partial t} + \left(\frac{C_g}{C} i\omega + f_s \right) S + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} &= SS \\ \frac{C_g}{C} \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\frac{C_g}{C} \omega (i + f_p) + f_s + e_f + e_b \right) P + C_g^2 \frac{\partial S}{\partial x} &= 0 \\ \frac{C_g}{C} \frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{C_g}{C} \omega (i + f_p) + f_s + e_f + e_b \right) Q + C_g^2 \frac{\partial S}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (8-28)$$

mit

S, P, Q	Komplexe Funktionen von x, y und t
ω	Wellenfrequenz [1/s]
i	imaginärer Anteil [-]
SS	Quellterm bezogen auf die Grundfläche [$m^3/(s \cdot m^2)$]
f_p	Linearer Reibungsbeiwert für den Energieverlust in einer durchlässigen Konstruktion [-]
f_s	Linearer Reibungsbeiwert für eine Dämpfungsschicht [-]
e_f	Verlustbeiwert für die Bodenreibung [-]
e_b	Verlustbeiwert für die Wellenreibung [-]

Die Wellengeschwindigkeit bzw. die Gruppengeschwindigkeit sind über die folgenden Beziehungen an die Wassertiefe gebunden:

$$C^2 = (g/k) \tanh(kd) \quad (8-29)$$

$$C_g = 1/2(1 + 2kd / \sinh(2kd))C \quad (8-30)$$

mit

- k Wellenzahl $(2\pi/L)[1/m]$
- d Wassertiefe [m]

Durch Sohlreibung verlieren die Wellen einen Teil ihrer Energie. Bei monochromatischen Wellen berechnet sich der Energieverlust zu:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-1}{6\pi} \frac{fe/2}{g} \left(\frac{\omega H}{\sinh(kd)} \right)^3 \quad (8-31)$$

mit

- dE Energieverlust durch Sohlreibung [1/m]
- ω Frequenz [1/s]
- H Wellenhöhe [m]
- fe Verlustbeiwert für Wellenenergie [-]

Bei RAYLEIGH-verteilten Wellen ergibt sich der Energieverlust zu:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-1}{8\pi^{1/2}} \frac{fe/2}{g} \left(\frac{\omega H_{rms}}{\sinh(kd)} \right)^3 \quad (8-32)$$

mit

- H_{rms} rms-Wert der Wellenhöhe [m]

Der Verlustbeiwert fe wird als Funktion des NIKURADSE-Rauheitsbeiwertes k_n dargestellt [SWART, 1974]:

$$\begin{aligned} fe &= 0,24 & (a_b/k_n) < 2 \\ fe &= \exp(-5,977 + 5,213 (a_b/k_n)^{-0,194}) & (a_b/k_n) \geq 2 \end{aligned} \quad (8-33)$$

mit

- a_b Amplitude der Partikelbewegung an der Sohle [m]
- k_n NIKURADSE-Rauheitsbeiwert [m]

Die Wellen werden innerhalb des Modellgebietes durch einen Quellterm in der Massengleichung generiert, wobei entlang jeder definierten Generierungslinie ein Quellterm hinzugefügt wird. Der Quellterm in Gleichung 8-28 kann als zugefügtes Wasservolumen bei einer zeitgemittelten Welle mit einheitlicher Amplitude interpretiert werden:

$$SS = Q_{Welle} \left(\frac{\Delta s}{\Delta x \Delta y} \right) \quad (8-34)$$

$$SS = C_g \left(\frac{\Delta s}{\Delta x \Delta y} \right) \quad (8-35)$$

mit

Δs Länge der Wellenfront in einer Zelle i,j [m]
 Q_{welle} Zugeführtes Wasservolumen („Pseudo Flux“) [m³/s]

Der zugefügte Quellterm pflanzt sich in zwei entgegengesetzten Richtungen innerhalb des Modells fort, so daß nur die Hälfte der Wellenenergie in das zu modellierende Gebiet einläuft. Daher müssen zwei parallele Generierungslinien in das Modellgebiet aufgenommen werden. Reflektierte Wellen können die Generierungslinien ohne Störung passieren.

Die Ausbreitung von Störungen während eines Zeitschrittes sollte auch innerhalb des EMS-Modells auf eine Zelle pro Zeitschritt begrenzt werden, wofür auch hier das COURANT-Kriterium einzuhalten ist. Für die Berechnung der COURANT-Zahl C_R wird innerhalb des EMS-Modells ein Ansatz für lange Wellen verwandt:

$$C_R = \sqrt{g d_{max} \frac{\Delta t}{\Delta x}} \quad (8-36)$$

mit

d_{max} maximale Wassertiefe im Modellgebiet [m]

Während des Brechungsvorganges verlieren Wellen Energie. Das EMS-Modell benutzt zur Berechnung dieses Energieverlustes die Gleichung nach BATTJES / JANSSEN (1978):

$$E_{diss} = \frac{-1}{4T} \cdot Q_b \cdot H_{max}^2 \quad (8-37)$$

$$H_{max} = \frac{\gamma_1}{k} \tanh\left(\gamma_2 \frac{kd}{\gamma_1}\right) \quad \text{mit } \gamma_1 = 1,00 \text{ und } \gamma_2 = 0,80 \quad (8-38)$$

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^2 \quad (8-39)$$

mit

E_{diss} Energieverlust [m²/s]
 Q_b Anteil an gebrochenen Wellen [-]
 T Wellenperiode [1/s]
 H_{max} maximal zulässige Wellenhöhe [m]
 γ_1 Brecherkonstante (Einfluß der Wellensteilheit) [-]
 γ_2 Brecherkonstante (Einfluß der Wassertiefe) [-]

Die partielle Reflektion an geneigten Wellenbrechern bzw. an Wellenbrechern mit rauher Oberfläche wird in MADSEN / LARSEN (1987) beschrieben. Der Ansatz basiert auf einer Beschreibung des Durchflusses durch ein poröses Medium. Bei Unterwasserwellenbrechern oder bei permeablen Wellenbrechern muß zusätzlich zur Reflektion noch die Wellentransmission über oder durch den Wellenbrecher berücksichtigt werden. Dies führt nach Umformung von Gleichung 8-28 zu den folgenden analytischen Lösungen (MADSEN, 1983):

$$\frac{a_r}{a_i} = \frac{(1-\epsilon) + (1+\epsilon)e^{-i2\kappa B}}{(1+\epsilon) + (1-\epsilon)e^{-i2\kappa B}} \quad \text{impermeabler Kern}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_r}{a_i} &= \frac{(1-\epsilon^2)(e^{i\kappa B} - e^{-i\kappa B})}{(1+\epsilon)^2 e^{i\kappa B} - (1-\epsilon)^2 e^{-i\kappa B}} \\ \frac{a_r}{a_i} &= \frac{4\epsilon}{(1+\epsilon)^2 e^{i\kappa B} - (1-\epsilon)^2 e^{-i\kappa B}} \end{aligned} \right\} \text{permeabler Kern} \quad (8-40)$$

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{1-if_p}} \quad (8-41)$$

$$\kappa = \frac{\omega}{c} \sqrt{1-if_p} \quad (8-42)$$

mit

- a_r Amplitude der reflektierten Welle [m]
- a_i Amplitude der einlaufenden Welle [m]
- a_T Amplitude der transmittierten Welle [m]
- i imaginärer Anteil [-]
- B Breite der wellenbrechenden Struktur [m]
- f_p Linearer Reibungsbeiwert für den Energieverlust in einer durchlässigen Konstruktion [-]

In Wellengruppen mit unterschiedlicher Amplitude tritt ein Überschuß an Impulsenergie in Wellenrichtung auf. Dies bewirkt u.a. Massentransport und Änderungen des mittleren Wasserspiegels. Dieser Effekt tritt verstärkt auf, wenn die mittlere Wassertiefe im Verhältnis zur Länge der Wellengruppe klein ist. LONGUET-HIGGINS / STEWART (1962) führten die Theorie der „Radiation Stresses“ ein, um die Erzeugung der Brandungsströmung zu beschreiben (NIEMEYER, 1974). Der hier benutzte Ansatz wurde von COPELAND (1985) formuliert. Dieser Ansatz behält auch bei reflektierten Wellen seine Gültigkeit:

$$S_{xx} = \frac{1}{2} \gamma^2 A (P_R^2 + P_I^2) - \frac{1}{2} B (F_R^2 + F_I^2) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\gamma D P_R F_R + \gamma D P_I F_I) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} (\gamma D Q_R F_R + \gamma D Q_I F_I) + \frac{1}{4} \rho g (S_R^2 + S_I^2) \quad (8-43)$$

$$S_{yy} = S_{xx} + \frac{1}{2} \gamma^2 A ((Q_R^2 + Q_I^2) - (P_R^2 + P_I^2))$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{1}{2} \gamma^2 A (P_R Q_R + P_I Q_I)$$

$$A \equiv \rho k \frac{1}{4 \sinh^2 kd} (\sinh 2kd + 2kd)$$

$$B \equiv \frac{\rho}{k} \frac{1}{4 \sinh^2 kd} (\sinh 2kd - 2kd) \quad (8-44)$$

$$D \equiv \rho d \frac{1}{4 \sinh^2 kd} \left(\frac{\sinh 2kd}{2kd} - \cosh 2kd \right)$$

$$F_R \equiv \frac{\partial}{\partial x} (\gamma P_R) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma Q_R)$$

$$F_I \equiv \frac{\partial}{\partial x} (\gamma P_I) + \frac{\partial}{\partial y} (\gamma Q_I) \quad (8-45)$$

$$\gamma \equiv \frac{C}{C_g}$$

mit

S_{xx}	Radiation Stress in x-Richtung [kg/s ²]
S_{yy}	Radiation Stress in y-Richtung [kg/s ²]
S_{xy}	Radiation Stress am x-Rand der Zelle in y-Richtung [kg/s ²]
S_{yx}	Radiation Stress am y-Rand der Zelle in x-Richtung [kg/s ²]
d	Wassertiefe [m]

Für die Absorption von Wellenenergie können Dämpfungsschichten angeordnet werden, welche von den Wellen ohne Reflektion durchlaufen werden.

Die Ergebnisse des EMS-Modells werden in Gleichung 8-5 und Gleichung 8-6 anhand von „Radiation Stresses“ eingearbeitet. Das zeitabhängige Verhalten der „Radiation Stresses“ (sich über den Betrachtungszeitraum ändernde Wellenparameter) und das tiefenabhängige Verhalten der „Radiation Stresses“ (vergleiche Gl. 8-43 und Gl. 8-44) können innerhalb des EMS-Modells nicht berücksichtigt werden. Daher ist es notwendig das Modell für jede Änderung der Zustandsvariablen anzuwenden. Die Ergebnisse werden durch Aufteilung der Zeitskala innerhalb des hydrodynamischen Modells (Aufteilung des Betrachtungszeitraumes in mehre-

re Phasen unter der Annahme konstanter Wellenparameter) in die hydrodynamische Simulation eingebunden. Der Einfluß der sich ändernden Wassertiefe wird bei diesem Vorgehen vernachlässigt, was jedoch im Falle der geringen Tiefenänderungen im Bereich von Lahnungsfeldern zulässig ist.

8.2.4 Sedimenttransportmodell (MT-Modul)

Der Sedimenttransport im Watt wird durch ein Zusammenspiel mikroskopischer (Diffusion) und makroskopischer (Dispersion) Prozesse gebildet, die in ihrer Ausprägung unterschiedlichen Einfluß auf das Gesamttransportvolumen haben.

Molekulare Diffusion wird durch die BROWNSche Molekularbewegung verursacht. An den Grenzflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Konzentration entsteht ein Teilchenstrom in Richtung abnehmender Konzentration. Im allgemeinen kann die molekulare Diffusion im Verhältnis zur Dispersion vernachlässigt werden.

Turbulente Diffusion wird durch unterschiedliche zeitliche Verteilungen von Geschwindigkeit und Konzentration verursacht. Analog zum molekularen Massentransport wird eine Proportionalität des turbulenzinduzierten Transports zum Konzentrationsgradienten in Richtung des Transports angenommen. Die Dispersion ist der wichtigste Ausbreitungsvorgang. Sie ist die Folge von örtlichen Unterschieden in Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilungen innerhalb des Gewässers.

Bei Untersuchungen im Bereich des Küsteningenieurwesens ist die vertikale Ausdehnung des Untersuchungsgebietes i.a. erheblich geringer als die horizontale. Die Wassertiefe ist klein gegenüber den Abmessungen der freien Oberfläche. Aus diesem Grunde sind zweidimensionale Modelle zumeist hinreichend gut zur Beschreibung der Hauptströmungsprozesse geeignet. Durch Tiefenintegration wird das vertikale Geschwindigkeitsprofil, welches für zusätzliche Ausbreitungsvorgänge in Strömungsrichtung sorgt, gemittelt.

Sedimentfraktionen mit einem Korndurchmesser kleiner $60\ \mu\text{m}$ werden innerhalb des verwandten Ansatzes als kohäsive Sedimente betrachtet. Sedimentfraktionen mit einem Korndurchmesser größer $60\ \mu\text{m}$ werden als nicht-kohäsive Sedimente eingestuft. Für diese Sedimentarten werden für die Beschreibung der Sedimentations- und Erosionsprozesse unterschiedliche Ansätze verwandt, die im folgenden eingehend erläutert werden. Grundsätzlich wird jedoch für die Beschreibung der advektiven bzw. dispersiven Transportprozesse die zweidimensionale Transportgleichung gelöst:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_x \frac{\partial c}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S \quad (8-46)$$

mit

c	Konzentration [g/m^3]
v_x	Fließgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]
v_y	Fließgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]
D_x	Dispersionskoeffizient in x-Richtung [m^2/s]
D_y	Dispersionskoeffizient in y-Richtung [m^2/s]
h	Wassertiefe [m]
S	Depositions- bzw. Erosionsterm [$\text{g}/(\text{m}^3 \text{s})$]
Q_L	Quellterm bezogen auf die Grundfläche [$\text{m}^3/(\text{s m}^2)$]
C_L	Konzentration des durch den Quellterms eingebrachten Volumens [g/m^3]

Die dargestellte Differentialgleichung wird mit Hilfe des *QICKEST*-Verfahrens (EKEBJAERG / JUSTESEN, 1991) gelöst. Der verwandte Ansatz ähnelt dem LAX-WENDROFF-Verfahren (Konsistenz zweiter Ordnung). Es ist stabil für COURANT-Zahlen kleiner 1. Unter Ausnutzung der in Abb. 8.1 dargestellten Notation und Ansatz einer TAYLOR-Reihenentwicklung ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \frac{c^{n+1} - c^n}{\Delta t} + v_{x,i,j}^n \frac{c_{i+1,j}^n - c_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + v_{y,i,j}^n \frac{c_{i,j+1}^n - c_{i,j-1}^n}{2\Delta y} = \\ & D_x \frac{c_{i+1,j}^n - 2c_{i,j}^n + c_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + D_y \frac{c_{i,j+1}^n - 2c_{i,j}^n + c_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \\ & + \frac{\Delta t \partial^2 c}{2\partial t^2} + \frac{\Delta t^2 \partial^3 c}{6\partial t^3} + u \frac{\Delta x^2 \partial^3 c}{6\partial x^3} + v \frac{\Delta y^2 \partial^3 c}{6\partial y^3} + HOT \end{aligned} \quad (8-47)$$

mit

HOT beinhaltet alle Terme vierter und höherer Ordnung, die im Zuge der implementierten TAYLOR-Reihenentwicklung vernachlässigt werden

Die innerhalb dieses Ansatzes enthaltenen Ableitungen nach der Zeit werden wie folgt approximiert:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} = & v_x^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + 2v_x v_y \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} + v_y^2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \\ & - 2v_x D_x \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} - 2v_y D_x \frac{\partial^3 c}{\partial x^2 \partial y} - 2v_x D_y \frac{\partial^3 c}{\partial x \partial y^2} - 2v_y D_y \frac{\partial^3 c}{\partial y^3} \end{aligned} \quad (8-48)$$

$$\frac{\partial^3 c}{\partial t^2} = -v_x^3 \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} - 3v_x^2 v_y \frac{\partial^3 c}{\partial x^2 \partial y} - 3v_x v_y^2 \frac{\partial^3 c}{\partial x \partial y^2} - v_y^3 \frac{\partial^3 c}{\partial y^3} \quad (8-49)$$

Für die Ableitungen dritter Ordnung in Koordinatenrichtung werden Vorwärtsdifferenzen (hier in x-Richtung dargestellt) verwendet:

$$\frac{\partial^3 c}{\partial x^3} = \frac{(c_{i+1,j} - 2c_{i,j} + c_{i-1,j}) - (c_{i,j} - 2c_{i-1,j} + c_{i-2,j})}{\Delta x^3} \quad (8-50)$$

$$\frac{\partial^3 c}{\partial x^2 \partial y} = \frac{(c_{i+1,j} - 2c_{i,j} + c_{i-1,j}) - (c_{i+1,j-1} - 2c_{i,j-1} + c_{i-1,j-1})}{\Delta x^2 \Delta y} \quad (8-51)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} = \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j} - c_{i,j-1} + c_{i-1,j-1}}{\Delta x \Delta y} + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial^3 c}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\Delta y}{2} \frac{\partial^3 c}{\partial x \partial y^2} \quad (8-52)$$

Die TAYLOR-Reihenentwicklung setzt eine Anpassung der Indizierung in Richtung der lokalen Strömungsrichtungen voraus. Nach Einführung der richtungsabhängigen Courant-Zahlen ($C_{R,x} = v_x \Delta t / \Delta x$ und $C_{R,y} = v_y \Delta t / \Delta y$) und Substitution ergibt sich ein Gleichungssystem, das mit Hilfe des ADI-Verfahrens gelöst wird.

Die verwandten Ansätze für die Beschreibung von Diffusions- und Dispersionsprozessen berücksichtigen verschiedene räumliche Skalen:

- Molekulare Diffusion,
- Turbulente Diffusion,
- Dispersion (im Bereich einer Zelle) und
- Makrodispersion (im gesamten Modellgebiet).

Diese Phänomene werden im verwendeten Ansatz durch einen Dispersionsansatz nach ELDER (1959) beschrieben. Der Dispersionskoeffizient (hier für die x-Richtung dargestellt) ergibt sich zu:

$$D_x^s = 0,404 \frac{u^* H}{0,41^3} \quad (8-53)$$

mit

- | | |
|---------|---|
| D_x^s | Dispersionskoeffizient [m^2/s] |
| u^* | Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s] |

Auf eine vollständige Ableitung wird hier verzichtet und auf ELDER (1959), ABBOT ET AL. (1985), THACKSON (1966) und VIEIRA (1992) verwiesen.

Die Berücksichtigung des Depositions- bzw. Erosionsterms S hängt von den hydrodynamischen Bedingungen innerhalb des Modellgebietes ab. Die Beschreibung der Depositions- und Erosionsvorgänge basiert auf unterschiedlichen Ansätzen, die in Abhängigkeit der auftretenden Fraktion (kohäsiv bzw. nicht kohäsiv) und in Abhängigkeit des auftretenden Strömungszustandes angewandt werden.

(a) Kohäsive Sedimente:

Die in Suspension befindlichen Sedimente werden durch die turbulente Diffusion beeinflusst. Diese bewirkt eine Aufwärtsbewegung, die dem schwerebedingten Absetzen der Sedimentpartikel entgegenwirkt. Das sich infolge dieses Gleichgewichtszustandes einstellende Konzentrationsprofil wird durch folgenden Ansatz berücksichtigt:

$$-\varepsilon \frac{dC}{dz} = wC(z) \quad (8-54)$$

mit

ε	Diffusionskoeffizient [m^2/s]
$C(z)$	Konzentration als Funktion von z [g/m^3]
z	vertikale karthetische Koordinate [m]
w	Sinkgeschwindigkeit des Sediments [m/s]

Unter der Annahme, daß der Diffusionskoeffizient gleich der turbulenten Wirbelviskosität (*Eddy-Viscosity*) ist, ergibt sich ε zu:

$$\varepsilon = \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (8-55)$$

mit

κ	KARMAN Konstante ($\kappa=0,4$) [-]
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]

Diese Annahme setzt voraus, daß die Feststoffteilchen klein gegenüber den sie bewegenden turbulenten Wirbeln sind bzw. die aufwärts gerichteten Geschwindigkeitskomponenten von ausreichender Größe gegenüber der Sinkgeschwindigkeit sind. Für die Bestimmung des Konzentrationsprofils wurde der folgende Ansatz gewählt:

$$C = C_a \left[\frac{a}{h-a} \frac{h-z}{z} \right]^{(w/\kappa u_*)} \quad \text{mit } a \leq z \leq h \quad (8-56)$$

Das Konzentrationsprofil wird außerdem durch den Diffusionskoeffizienten bestimmt:

$$\varepsilon_s = \beta \Phi \varepsilon_f \quad (8-66)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 + \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^2 & \text{für } \frac{w_s}{u_*} < 0,5 \\ 1 & \text{für } 0,5 \leq \frac{w_s}{u_*} \leq 2,5 \\ \text{keine Suspension} & \text{für } \frac{w_s}{u_*} \geq 2,5 \end{cases} \quad (8-67)$$

$$\Phi = 2,5 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^{0,8} \left(\frac{C_a}{C_0}\right)^{0,4} \quad (8-68)$$

mit

ε_s	Diffusionskoeffizient für Sedimentation [m ² /s]
ε_f	Diffusionskoeffizient für turbulente Strömung [m ² /s]
β	Faktor für die Erfassung von Differenzen zwischen dem Verhalten eines diskreten Sedimentpartikels und einem Sedimentpartikel, der durch ein Fluid umgeben ist [-]
Φ	Dämpfungsfaktor um die Beeinflussung des Geschwindigkeitsprofils durch die Sedimentpartikel zu erfassen (konzentrationsabhängig) [-]
C_a	Konzentration in Höhe der Referenzhöhe $z = a$ [g/m ³]
C_0	Konzentration in Höhe der Sohle $z=0$ [g/m ³]

Der Verhältnis C_a/C_0 berechnet sich zu:

$$\frac{C_a}{C_0} = \left(\frac{a(h-z)}{z(h-a)}\right)^z \quad \text{für } z/h < 0,5 \quad (8-69)$$

$$\frac{C_a}{C_0} = \left(\frac{a}{(h-a)}\right)^z \exp\left(-4z\left(\frac{z}{h} - 0,5\right)\right) \quad \text{für } z/h \geq 0,5$$

$$C_a = 0,015 \frac{d_{50} T^{1,5}}{a \left(d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2}\right)^{1/3}\right)^{0,3}} \quad (8-70)$$

Die Depositionsrates ergibt sich somit zu:

$$S_d = -\left(\frac{c_e - \bar{c}}{h^* / w_s}\right) \quad \text{mit} \quad (10^6 F C_a s) = c_e < \bar{c} \quad (8-71)$$

mit

S_d	Depositionsrates [g/(m ³ s)]
F	Relation zwischen Sedimentkonzentration an der Sohle und der mittleren Sedimentkonzentration [-]
\bar{c}	tiefengemittelte Konzentration [g/m ³]
s	spezifische Dichte des Sedimentpartikels [-]

Die Erosionsrate wird im hier verwendeten Ansatz wie folgt beschrieben:

$$S_e = -\left(\frac{c_e - \bar{c}}{h_s / w_s}\right) \quad \text{mit} \quad (10^6 F C_a s) = c_e > \bar{c} \quad (8-72)$$

mit

S_e	Erosionsrate [g/(m ³ s)]
-------	-------------------------------------

Die Ableitung der hier beschriebenen Ansätze bzw. alternative Ansätze zur Beschreibung der Sedimentations- und Erosionsprozesse kohäsiver und nicht kohäsiver Sedimente sind in VAN RIJN (1993) ausführlich beschrieben.

8.3 Berücksichtigung von Systemparametern

8.3.1 Allgemeines

Die in Kap. 8.2 beschriebenen Eingangsparameter numerischer Modelle können unterschiedlich (zeitlich konstant/variabel bzw. räumlich konstant/variabel) Eingang in die numerischen Modelle finden. Zeitunabhängige Modellparameter behalten während des gesamten Simulationszeitraumes ihren zu Beginn spezifizierten Wert bei. Zeitabhängige Parameter sind für jeden zu berechnenden Zeitschritt vorzugeben. Die Anzahl der Zeitschritte gibt mit der Länge eines jeden Zeitintervalls die Länge des zu simulierenden Zeitraumes wieder. An dieser Stelle muß hervorgehoben werden, daß zur zeitlichen Diskretisierung des Simulationszeitraumes die Festlegung von Zeitintervallen variabler Länge zur Zeit durch das Programmsystem MIKE21® nicht unterstützt wird. Das zugrunde liegende Konzept erlaubt es jedoch, Parameter, die zur Zeit noch nicht als zeitabhängige Parameter betrachtet werden können (Bathymetrie, Wirbelviskosität, welleninduzierte Strömungen, Sohl- und Wandrauheiten), einer zeitlich differenzierten Betrachtung zuzuführen.

Da die innerhalb des numerischen Modells gewählte Implementierung die Leistungsfähigkeit desselben und damit die Aussagekraft der späteren Ergebnisse maßgeblich beeinflusst, sollen an dieser Stelle die Art und Weise der Berücksichtigung der vorzugebenden Modellparameter beschrieben werden.

8.3.2 Hydrodynamisches Modell (HD-Modul)

Diskretisierung des Modellgebietes:

Das Modellgebiet (kleiner als das Untersuchungsgebiet) sollte in seinen Dimensionen so konzipiert werden, daß Randeinflüsse auf das eigentliche Aussagegebiet (kleiner als das Modellgebiet) ausgeschlossen werden können. An offenen Rändern ist aus Stabilitätsgründen ein Streifen von 5 bis 10 Gitterpunkten anzuordnen, um Wirbelströmungen auszuschließen.

Das Diskretisierungsraster wird in seinem räumlichen Aufbau als unveränderlich angenommen. Die Bodentopographie wird als zweidimensionales Feld für das zuvor festgelegte Diskretisierungsraster in das hydrodynamische Modell eingelesen. Beim Einlesen der Grunddaten (x-y-z-Werte) besteht die Möglichkeit, anhand einfacher Interpolationsverfahren die Grunddaten auf das Berechnungsgitter zu projizieren. Die Einbindung von digitalen Geländemodellen ist über eine am FRANZIUS-INSTITUT entwickelte Schnittstelle zum Geographischen Informationssystem GRASS 4.1 möglich.

Sohl- und Wandreibung:

Die Sohl- bzw. Wandreibung kann als konstanter Wert bzw. als zweidimensionales Feld (zweidimensionale Parameterverteilung) eingebracht werden. Sie wird als zeitlich konstant angenommen.

Trockenfallen und Fluten von Zellen:

Innerhalb des numerischen Verfahrens werden Entscheidungen notwendig, die dem Gleichungslöser kenntlich machen, ob einzelne Zellen in die Berechnung einfließen (*flooded*) oder ausgeschlossen werden (*dried*). Die minimale Wassertiefe vor dem Trockenfallen kann in einem Bereich von 10 cm bis 20 cm definiert werden. Die minimale Wassertiefe vor dem Fluten in einem Bereich von 20 cm bis 40 cm. Ein Unterschied von 10 cm zwischen den beiden Wassertiefen ist erfahrungsgemäß ausreichend. Beim Auftreten numerischer Konsistenzprobleme kann der Unterschied vergrößert werden.

Berücksichtigung des Windeinflusses:

Die Windverhältnisse können wie folgt berücksichtigt werden:

- als ein konstanter Wind aus gleicher Richtung von konstanter Stärke,

- als ein Wind, bei dem Richtung und Größe variieren, der aber über dem gesamten Modellgebiet die gleichen Werte hat und
- als ein Wind, bei dem die Richtung, die Größe und die Verteilung über dem Modellgebiet variieren (zeitabhängige, zweidimensionale Parameterverteilung).

Für die Berechnung der durch Wind induzierten Schubspannungen an der Wasseroberfläche ist ein Reibungskoeffizient anzugeben. Ein Wert von 0,0026 erzielt erfahrungsgemäß gute Ergebnisse bei mittleren bis starken Winden. Bei schwächeren Winden wird der Koeffizient verkleinert. Der Reibungskoeffizient kann als zeitabhängige Größe in die Berechnungen eingehen.

Anfangs- und Randbedingungen:

Für die Berechnungen des hydrodynamischen Modells werden zahlreiche Anfangs- und Randbedingungen benötigt. Randbedingungen können immer als zeitabhängige Parameter berücksichtigt werden. Die Eingabedaten für die Anfangs- und Randbedingungen werden i.a. aus Messungen in der Natur erhalten. Für das gesamte Diskretisierungsraster müssen die zeitabhängigen Variablen in ihrer räumlichen Verteilung für den Zeitpunkt $t = 0$ bekannt sein.

Eine konsistente Anfangsbedingung für das Strömungsfeld resultiert aus der Forderung nach Divergenzfreiheit (Kontinuitätsbedingung). Alle Strömungsgeschwindigkeiten können daher im einfachsten Fall zu Null gesetzt werden. Anstelle dieser trivialen Lösung ist es jedoch häufig wünschenswert, die Randbedingungen der Fließgeschwindigkeit in den Anfangsbedingungen zu berücksichtigen. Diese sind z.B. im Einlaufquerschnitt von Null verschieden. Ansätze hierzu finden sich in der Theorie der Potentialströmung.

Auf einer festen Berandung gilt die Haftbedingung, d.h. alle Komponenten der Fließgeschwindigkeit werden zu Null. Wird diese Randbedingung in einer Strömungssimulation verwendet, so muß der Bereich der Grenzschicht durch eine hohe räumliche Diskretisierung aufgelöst werden. Die genaue Nachbildung der Grenzschicht ist i.a. von untergeordneter Bedeutung oder im Falle von rauhen Gewässersohlen nicht durchführbar. Durch den Ansatz sogenannter Wandfunktionen werden die in tangentialer Richtung auftretenden Wandschubspannungen spezifiziert [ZANKE, 1982].

Die Lage des Wasserspiegels als einzige freie Oberfläche des Systems ergibt sich aus der Lösung der Strömungsgleichungen. Im Unterschied zu den festen Rändern wird die Geschwindigkeit in Normalenrichtung nicht zu Null. Die freie Beweglichkeit des Randes verbietet die Spezifikation der Fließgeschwindigkeit in Normalenrichtung als DIRICHLET-Randbedingung. Vielmehr wird der Zusammenhang der drei Komponenten der Fließgeschwindigkeit durch eine zusätzliche Gleichung beschrieben [DVWK, 1996]. Sofern die Oberfläche keinem Windeinfluß ausgesetzt ist, ist sie frei von Schubspannungen und kann näherungsweise als Symmetrieebene behandelt werden. Damit werden sämtliche Gradienten der

Fließgeschwindigkeit in Normalenrichtung zu Null. Sofern der Einfluß von Wind gegeben ist, treten an der freien Oberfläche Schubspannungen auf, die analog zu denjenigen an einer festen Oberfläche berücksichtigt werden.

Auf dem Einlauftrand werden die Fließgeschwindigkeiten meist als DIRICHLET-Randbedingung spezifiziert. Grundsätzlich ist es ausreichend, die Normalenkomponente festzulegen. Am Einströmrand wird in der Regel der Durchfluß vorgegeben.

Im Auslaufquerschnitt darf die Fließgeschwindigkeit nicht als DIRICHLET-Randbedingung vorgegeben werden, wenn dieser Randbedingungstyp bereits für den Einlaufquerschnitt gewählt wurde. Die notwendige Vorgabe von NEUMANN-Randbedingungen erfordert, daß der Auslaufquerschnitt in einem Bereich mit nahezu gleichförmigen Strömungsverhältnissen liegt. Damit werden die Gradienten der Fließgeschwindigkeiten in Randnormalenrichtung zu Null. Am Auslaufquerschnitt genügt i.a. die Vorgabe der Wasserspiegelverteilung.

Ergebnisse der numerischen Simulation:

Das Modell berechnet unter Zuhilfenahme der skizzierten Parameter den Wasserstand und die Durchflüsse in x- bzw. y-Richtung für jeden Knoten des Diskretisierungsrasters und jeden Zeitschritt n innerhalb des zu simulierenden Zeitraumes.

8.3.3 Seegangmodell (EMS-Modul)

Zeitliche Diskretisierung:

Das EMS-Modul berücksichtigt keine zeitabhängigen Parameter. Daher beziehen sich alle Ergebnisse auf einen diskreten Zeitpunkt. Um die Voraussetzungen zur Berücksichtigung welleninduzierter Strömungen innerhalb des hydrodynamischen Modells zu schaffen, muß in jedem Falle eine Parametervariation (Wassertiefe, Wellenhöhe und Wellenperiode) durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind dem hydrodynamischen Modell zu den entsprechenden Zeitpunkten zur Verfügung zu stellen.

Diskretisierung des Modellgebietes:

Neben den in Kap. 8.3.2 gemachten Ausführungen zum Aufbau des Diskretisierungsrasters ist das Modellgebiet derart aufzulösen, daß die auftretenden Wellen in ihrer Länge durch mindestens 15 Gitterpunkte aufgelöst werden.

Alle Ränder des Modellgebietes müssen geschlossen sein. Offene Ränder im Natursystem, an denen keine Wellen einlaufen, sind zu schließen, und mit Dämpfungsschichten abzusichern.

In eng begrenzten Bereichen des Diskretisierungsrasters ist die Bathymetrie den Erfordernissen des EMS-Moduls anzupassen, um ein stabiles Laufzeitverhalten zu gewährleisten. Insbesondere im Bereich der Systemränder sollten Sprünge in der Bathymetrie vermieden werden. Die für die Wellenhöhe und Wellenperiode anzusetzenden Werte sind für das gesamte Modellgebiet gültig (räumlich konstant).

Wellengenerierung:

Es müssen zwei Wellenlinien generiert werden. Diese Wellenlinien dürfen nur in einem Modellgebiet generiert werden, bei dem alle Ränder geschlossen sind. Sie sollten in Gebieten mit geringer Sohlneigung liegen. Die eingefügte Wellenenergie, die sich vom Modellgebiet wegbewegt (Rückseite der Generierungslinien) wird üblicherweise durch Dämpfungsschichten absorbiert. Die Dämpfungsschichten („*Sponge Layers*“) werden als zweidimensionale Parameterverteilung mit einem Wert für jeden Knoten des Diskretisierungsrasters eingelesen. Die Dämpfungsschicht kann fünf bis zehn Gitterlinien breit sein. Sie muß vor einem geschlossenen Rand oder vor Landpunkten liegen. Dämpfungsschichten, die auf Landpunkten liegen, haben keinen Einfluß auf die Berechnung.

Reibungsbeiwerte zur Berücksichtigung von Reflexion und Transmission:

Die Reibungsbeiwerte zur Berücksichtigung von Reflexion und Transmission werden als zweidimensionale Parameterverteilung eingelesen. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu steigern, sind die Reibungswerte für das Bauwerk mindestens drei Gitternetzlinien breit. Für undurchlässige Bauwerke werden die Reibungsbeiwerte mit undurchlässigen Landpunkten hinterfüllt. Für den Fall lokaler Strukturen (Buschlahnungen) ist die Diskretisierungsweite so gewählt, daß die o.g. Bedingungen eingehalten werden.

Reibungsbeiwerte zur Berücksichtigung der Sohlreibung:

Die Sohlreibung beschreibt einen Prozeß, bei dem die Welle Energie an den Boden in Form von Reibungswärme abgibt. Die über den NIKURADSE-Rauheitsparameter eingestellte Sohlreibung ist für das gesamte Modellgebiet gültig und wird über den gesamten Simulationszeitraum als konstant angenommen.

Brechen der Welle:

Der Ansatz nach BATTJES / JANSSEN (1978) für das Brechen der Wellen kann nur bei unregelmäßigen Wellen (z.B. bei RAYLEIGH-verteilten Wellen) angewendet werden. Die Parameter γ_1 und γ_2 wurden zu 1,00 bzw. 0,80 gewählt.

Ergebnisse der numerischen Simulation:

Für eine vorgegebene Wellenperiode berechnet das Modell die Wellenhöhe, die Partikelgeschwindigkeit, die Wasserspiegelauslenkung und für den Fall brechender Wellen die „*Radia-*

tion Stresses“. Diese Beschränkung ist nicht in jedem Fall sinnvoll, da auch bei nichtbrechenden Wellen Situationen denkbar sind (z.B. plötzliche Veränderung der Wassertiefe im Bereich eines Riff etc.), die die Berücksichtigung der „Radiation Stresses“ sinnvoll erscheinen lassen. Zur Zeit ist die Berechnung in MIKE21[®] jedoch nur für den Fall brechender Wellen möglich.

8.3.4 Sedimenttransportmodell (MT-Modul)

Depositions-, Erosions- und Sinkgeschwindigkeit:

Innerhalb des Sedimenttransportmodells wird die Charakteristik jeder zu berücksichtigenden Fraktion durch die Angabe der kritischen Depositions- und Erosionsgeschwindigkeiten, der entsprechenden Korndurchmesser bzw. durch Angabe der Sinkgeschwindigkeit (räumlich und zeitlich konstant) beschrieben.

Erosions- und Dispersionskoeffizienten:

Erosions- und Dispersionskoeffizienten bzw. die Ausgangskonzentration sind als zweidimensionale Parameterverteilungen (jeweils als zeitlich unveränderliche Parameter angenommen) berücksichtigt.

Einbringung von Sediment:

Konzentrationen an den Systemrändern bzw. Quellen und Senken sind als zeitlich veränderliche Größen implementiert.

Ergebnisse der numerischen Simulation:

Das Sedimenttransportmodell berechnet aufbauend auf den Ergebnissen des hydrodynamischen Modells (Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüsse) die Sedimentations- bzw. Erosionsmengen in $[g/m^2]$. Das hydrodynamische Modell wird hier dem Sedimenttransportmodell vorgeschaltet. Die Beeinflussung des Strömungszustandes durch die vorliegenden Konzentrationsverteilungen ist nicht implizit (Lösung eines Gesamtgleichungssystems) gelöst, sondern wird durch Modifizierung von Ansätzen innerhalb des Sedimenttransportmodells beschrieben.

8.4 Ergebnisse der numerischen Simulation

8.4.1 Allgemeines

Um die Auswirkungen verschiedener Lahnungsbauweisen auf den Strömungszustand, die Seegangsdämpfung und die Sedimentations- bzw. Erosionsprozesse in den in Kap. 3 bis 7 behandelten Lahnungsfeldern zu untersuchen, wurde das beschriebene Programmsystem MIKE21® (HD-Modul, EMS-Modul und MT-Modul) angewendet.

Eingangsparameter für die verschiedenen Modelle (Morphologie, Hydrologie, Seegang und sedimentologische Parameter) wurden aus Messungen in der Natur im Testgebiet „Ockholm“ gewonnen bzw. aus physikalischen Versuchen im Wellenkanal bzw. der Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS (Permeabilität der Lahnungsbauwerke) abgeleitet.

Ein Vergleich für das Testgebiet „Ockholm“ mit in der Natur gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentations- und Erosionsraten in diesem Gebiet erlaubte eine Einschätzung über die Güte der auf numerischen Wege gewonnenen Ergebnisse.

Die für das Testgebiet „Ockholm“ durchgeführten Untersuchungen werden im folgenden Kapitel eingehend beschrieben. Im Anschluß wird eine Parameterstudie mit schematisierten Randbedingungen vorgestellt, deren Ergebnisse generalisierbar und zu einem bestimmten Grad auf andere Küstenabschnitte übertragbar sind.

8.4.2 Untersuchungen im Testgebiet "Ockholm"

8.4.2.1 Auswahl von Systemparametern

Modellgebiet:

Die Lage der Lahnungsfelder im Testgebiet „Ockholm“ ist in Abb. 8.1 dargestellt. Die Lahnungsfelder wurden hier in einer Größe von ca. 200 m x 200 m (seeseitige Lahnungsfelder) bzw. 200 m x 300 m (deichseitiges Lahnungsfeld) in zweireihiger Anordnung realisiert. Für eine ausführliche Beschreibung des Testgebietes wird hier auf Kapitel 6 verwiesen.

Das für das hydrodynamische Modell gewählte Rechengitter hat eine Diskretisierungsweite von 2 m. Auf dieser Grundlage ergeben sich COURANT-Zahlen, die unterhalb des kritischen Grenzwertes von 1 liegen. Die Zeitschrittlänge wurde auf 2 s begrenzt.

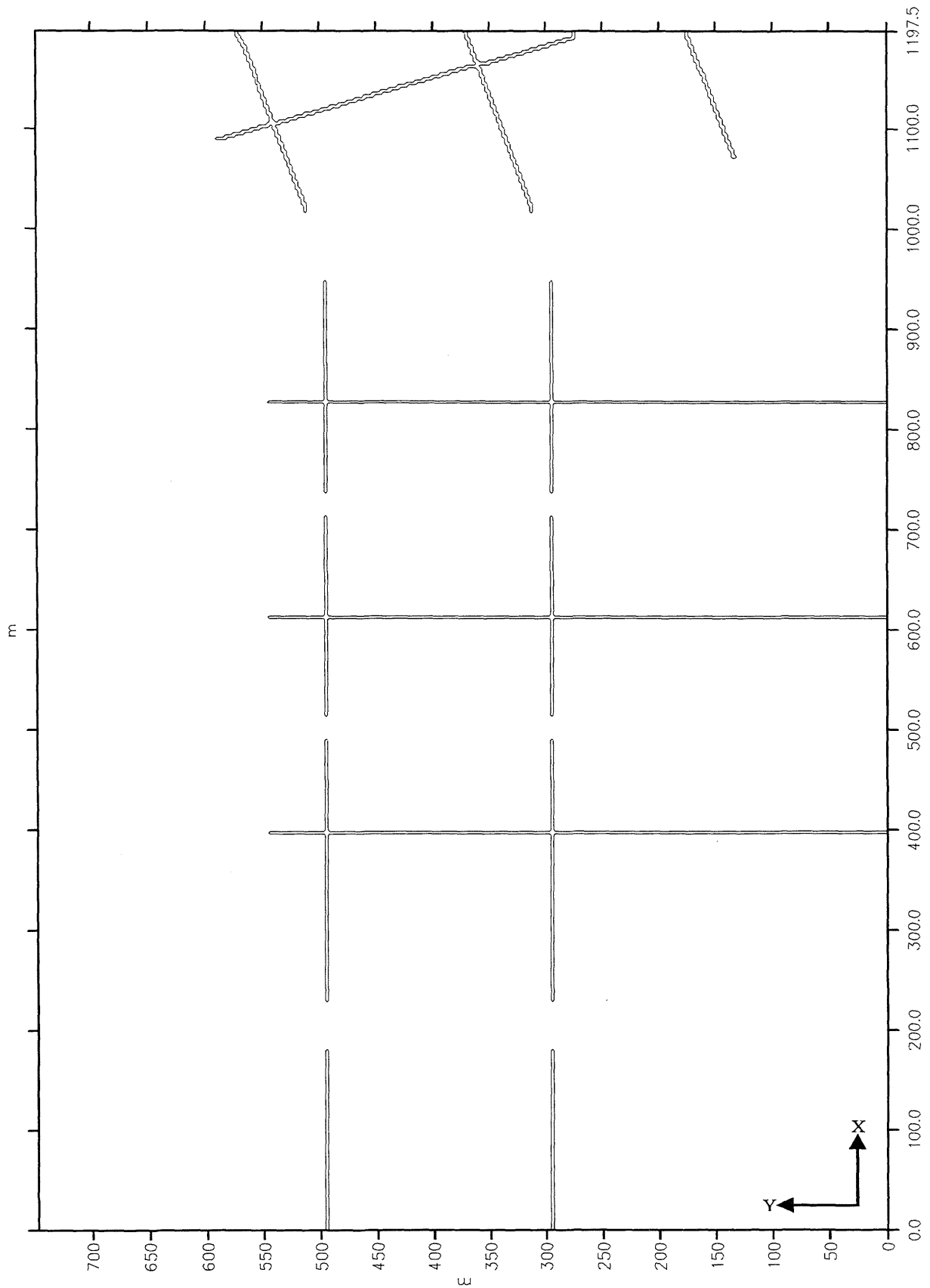


Abb. 8.1: Testgebiet „Ockholm“ mit vorhandenen Lahnungsfeldern
(Distanzen in x- und y-Richtung in [m])

Festlegung der Randbedingungen:

Der seeseitige Rand des numerischen Ersatzsystems ist offen. Über ihn wird die Tide (Abb. 8.2) als Wasserstandsbedingung eingesteuert. Da das Programmsystem MIKE21® keine negativen Tidewasserstände verarbeitet, wurde die in Abb. 8.2 dargestellte Tidekurve aus der mittleren Tidekurve für die Abflußjahre 1981 bis 1990 des Pegels "Schlüttsiel" (Abb. 8.3 und vergl. Kap. 6.2.1) durch Festlegung eines neuen Bezugshorizontes höhenmäßig verschoben. Die ausgewählte Tidekurve beschreibt somit die mittleren Tideverhältnisse im Testgebiet „Ockholm“. Die Höhenlage 0,0 m entspricht 5,45 m über PN (NN+0,45m).

Aus Stabilitätsgründen wurden die ersten drei Zeilen des offenen Randes mit einem Rauheitskoeffizienten von $8 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ versehen. Die Strömungsrichtung wurde senkrecht zur Küste gewählt. Der Einfluß von Wind wurde nicht berücksichtigt.

Die verbleibenden drei Ränder des Modellgebietes sind geschlossen.

Bathymetrie:

Die zur Kalibrierung verwendete Bathymetrie findet sich in Abb. 8.4. Erkennbar sind hier die bereits angelegten Hauptentwässerungsgräben im Bereich der mittleren Lahnungsfelder. Anwurf und Gruppen waren zum Zeitpunkt der Kalibrierung noch nicht erstellt und wurden daher bei der Kalibrierung nicht berücksichtigt.

Die Höhe der Lahnung wurde so gewählt, daß sie bei mittleren Tideverhältnissen nicht überströmt wird.

Durchlässigkeit der Lahnungsbauwerke:

Die Durchlässigkeit der Lahnungsbauwerke wurde aufbauend auf den in der Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführten Versuchen (FRANZIUS-INSTITUT, 1996) zu 20 % angenommen und durch eine Modifizierung der Sohlrauheit im numerischen Modell realisiert. Hierzu wurde der MANNING-STRICKLER-Rauheitswert für eine Gitternetzreihe im Bereich des Lahnungsbauwerkes mit $1,25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ angenommen. Dieser Wert wurde aus einem numerischen Modell abgeleitet, das parallel zu den physikalischen Versuchen im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS aufgebaut wurde und dessen Aufgabe es war, das innerhalb dieser Versuche untersuchte Transmissionsverhalten von Buschlahnungen nachzubilden.

Eine sich zeitlich verändernde Durchlässigkeit (Eintrag von Sand in das Lahnungsbauwerk und Wachstum von Algen) wurde nicht berücksichtigt.

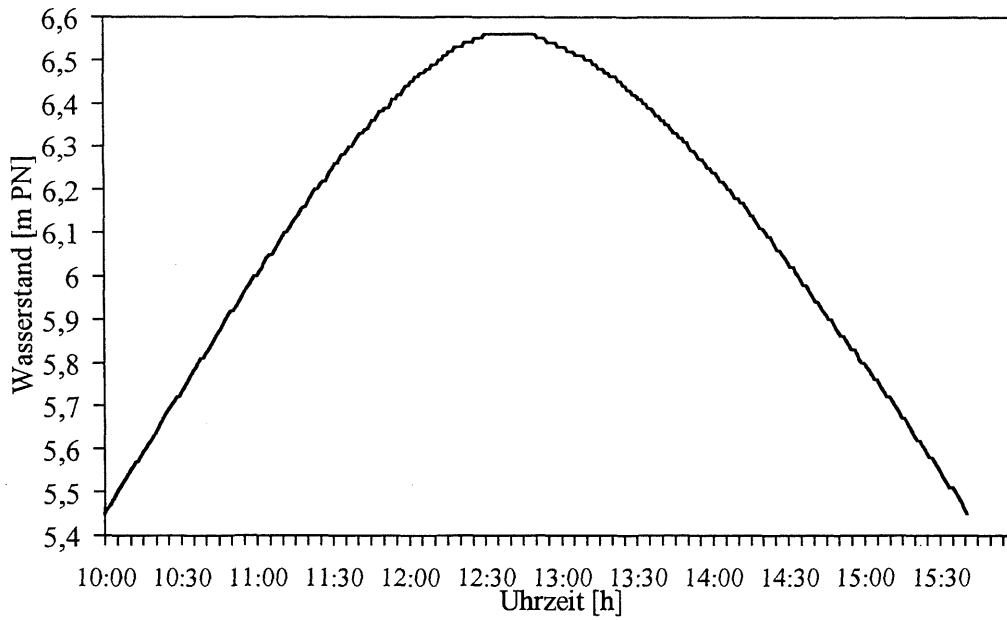


Abb. 8.2: Mittlere Tidekurve am Pegel "Schlüttsiel" der Jahresreihe 1981 bis 1990

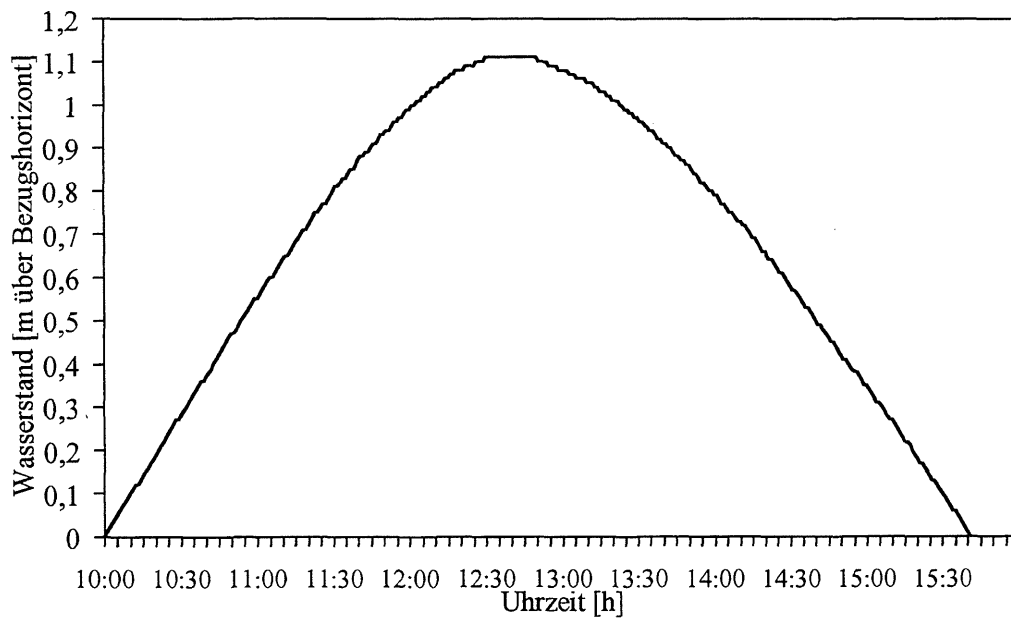


Abb. 8.3: Am seeseitigen Modellrand eingesteuerte Tidekurve im Testgebiet "Ockholm"

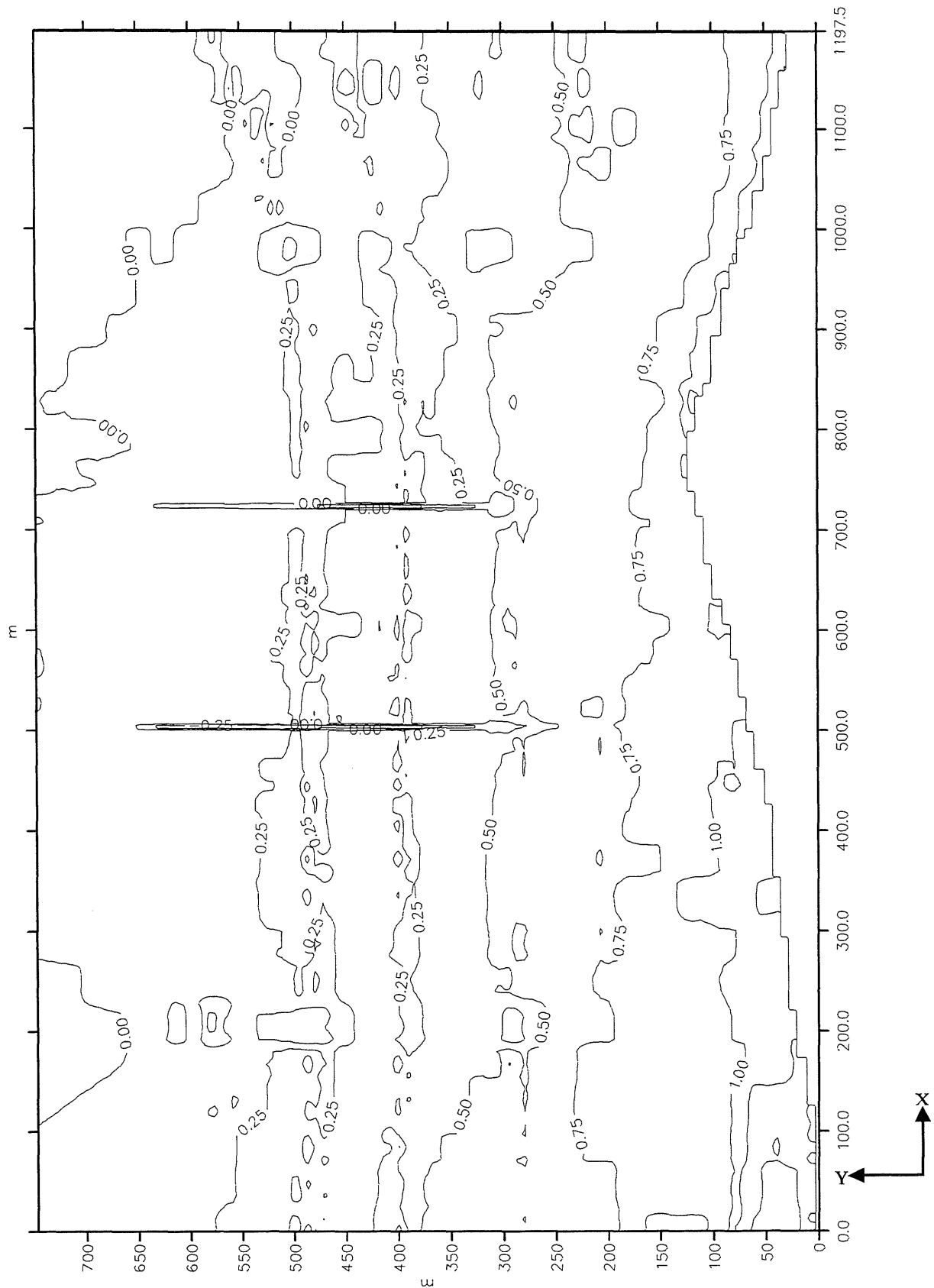


Abb. 8.4: Im Rahmen der Kalibrierung verwendete Bathymetrie im Testgebiet "Ockholm" in [m über Bezugshorizont] (Distanzen in x- und y-Richtung in -8m)

Wellenparameter:

Für das Testgebiet „Ockholm“ wurden die Wellenparameter (Wellenhöhe und Wellenperiode) aus Messungen in der Natur abgeleitet [FRANZIUS-INSTITUT, 1996]. Die Berechnungen wurden für die in Taf. 8.1 dargestellten Wellenparameter durchgeführt. In der numerischen Simulation wurden die Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe als Ausgangswellenhöhe definiert und am oberen Rand des Modellgebietes eingesteuert. Die Wellenperiode wurde einheitlich zu $T = 3$ s angenommen. Innerhalb des EMS-Moduls ist das Modellgebiet derart aufgelöst, daß die auftretenden Wellen in ihrer Länge durch mindestens 15 Gitterpunkte (Diskretisierungsweite 0,50 m) aufgelöst werden.

Wellenhöhe [cm]	Wassertiefe [m]
8 cm	0,4 m
10 cm	0,5 m
15 cm	0,6 m
20 cm	0,8 m
23 cm	0,9 m

Taf. 8.1: Wellenhöhe in Abhängigkeit von der Wassertiefe im Bereich der Lahnungsöffnung

Die zur Ermittlung welleninduzierter Strömungen im EMS-Modul berechneten „*Radiation Stresses*“ für eine RAYLEIGH-verteilte Eingangswellenhöhe (charakteristische Wellenhöhe, vergl. Kap. 6.6.2) von 10 cm und eine Wassertiefe von 50 cm im Bereich der Lahnungsöffnung wurden für den Zeitraum von 11.45 bis 13.45 Uhr (siehe Abb. 8.3) innerhalb des hydrodynamischen Modells eingebunden. Diese eingeschränkte Berücksichtigung welleninduzierter Strömungen ist zulässig, da eine merkliche Beeinflussung des Geschwindigkeitsfeldes durch Wellen erst bei Wassertiefen ab 40 cm auftritt. Für die korrekte Berücksichtigung welleninduzierter Strömungen im hydrodynamischen Modell hätte für jeden eingesteuerten Wasserstand oberhalb der gewählten Erfassungsgrenze (Wassertiefe von 50 cm im Bereich der Lahnungsöffnung) ein Rechenlauf des EMS-Moduls für die Bestimmung der „*Radiation Stresses*“ durchgeführt werden müssen. Die so bestimmten „*Radiation Stresses*“ hätten als Eingangsparameter des hydrodynamischen Modells diesem zeitschrittabhängig zur Verfügung gestellt werden müssen. Da das verwendete Programmsystem MIKE21[®] dieses Vorgehen jedoch nicht unterstützt, wäre jeder Zeitschritt mit einem Neustart des hydrodynamischen Modells verbunden gewesen. Bei einer Zeitschrittweite von $\Delta t = 2$ s ist dies jedoch nicht realisierbar. Daher wurden für die weiteren Untersuchungen die sich bei einer Wassertiefe von 50 cm (im Bereich der Lahnungsöffnung) einstellenden „*Radiation Stresses*“ vereinfachend für den gesamten Simulationszeitraum von 11.45 bis 13.45 Uhr angenommen.

Transmissionskoeffizienten:

Die Lahnungsbauwerke wurden als durchlässige Wellenbrecher aufgefaßt und als solche über einen Transmissionskoeffizienten (zweidimensionale Parameterverteilung) im numerischen Modell abgebildet. Der Parameter wurde mit Hilfe von Transmissionsversuchen im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS zu $K_T = H_T/H_i = 1,5$ (mit H_T : Wellenhöhe im Transmissionsbereich, H_i : Ausgangswellenhöhe) bestimmt.

Einbringung des Sedimentes und Sedimenttransportparameter:

Das Sedimentvolumen wird über den seeseitigen Modellrand in Form einer zeitlich konstanten Quelle mit $c_{Quelle}=350 \text{ g/m}^3$ eingebracht. Damit ergibt sich ein Sedimenteintrag nur bei auflaufender Tide.

Hierbei wurden die in Taf. 8.2 aufgeführten Fraktionen berücksichtigt, die in Absprache mit dem FTZ-Westküste ausgewählt wurden. Die angesetzten Werte für kritische Depositionsgeschwindigkeit und Erosionsgeschwindigkeit bzw. mittlere Sinkgeschwindigkeit, Erosionskoeffizient und Dispersionskoeffizienten wurden aus Literaturwerten (VAN RIJN, 1993) abgeleitet.

Die Sedimentations- bzw. Erosionsraten für die einzelnen Fraktionen wurden mit Hilfe des am FRANZIUS-INSTITUTS entwickelten Programmsystems FNHDSS aus den Datenbeständen des Programmsystems MIKE21[®] ausgelesen und überlagert.

		Fraktion 1 (1 µm)	Fraktion 2 (6 µm)	Fraktion 3 (10 µm)
Krit. Depositionsgeschw.	[m/s]	0,05	0,06	0,07
Krit. Erosionsgeschwindigkeit	[m/s]	0,30	0,30	0,30
Mittl. Sinkgeschwindigkeit	[m/s]	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Rel. Höhe des Sedimenteintrags	[-]	0,3	0,3	0,3
Erosionskoeffizient	[kg/s/m ²]	0,0005	0,0005	0,0005
Anteil der Kornfraktionen des anfänglichen Sohlzustandes	[%]	30	65	5
Dispersionskoeff. in x-Richtung	[m ² /s]	0,1	0,1	0,1
Dispersionskoeff. in y-Richtung	[m ² /s]	0,1	0,1	0,1
Konzentration des eingebrachten Sedimentes am seeseitigen Modellrand	[g/m ³]	105,0	227,5	17,5

Taf. 8.2: Parameter des Sedimenttransportmodells nach Absprache mit dem FTZ-Westküste bzw. nach VAN RIJN (1993)

8.4.2.2 Verifikation und Kalibrierung

Als Kontrollparameter für die Kalibrierung wurden die Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen an insgesamt 14 Meßstationen ausgewählt. Als Eichparameter wurde der Rauheitskoeffizient gewählt. Die Lage der Meßstationen und die Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der in den Anlagen dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten wurden bereits in Kap. 6.5 beschrieben. Die Kalibrierung wurde auf der Grundlage von gemessenen Strömungen bei 3 Tiden (30.10.1995, 06.11.1995 und 10.11.1995) durchgeführt. Die Lage der Meßstationen ist in Abb. 8.5 dargestellt. Die Sohlrauheit wurde als MANNING-Zahl angegeben und für das gesamte Modellgebiet aufgrund der Kalibrierung zu $35\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ festgelegt.

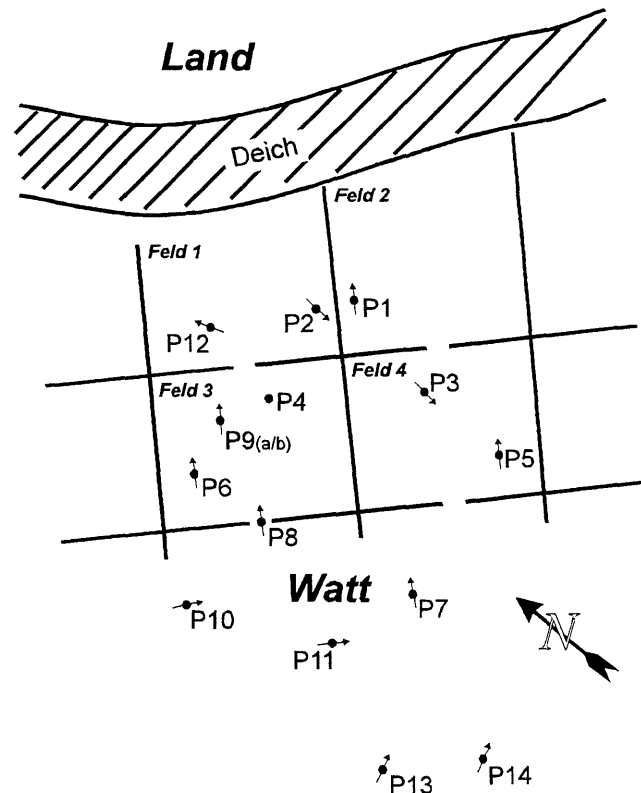


Abb. 8.5: Positionen der Strömungsmeßgeräte im Testgebiet „Ockholm“
in der Strömungsmeßperiode vom 30. 10. bis 30. 11.1995

Ergebnisse der Eichung sind beispielhaft für die Tide vom 06.11.1995 in Anlage 8-1 bis Anlage 8-12 und für die Meßstation 3 in Abb. 8.6 dargestellt. Die berechneten und die in der Natur gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten betragen im Bereich der Lahnungsfelder (Meßstationen 2, 3, 5, 6, 9 und 12) maximal 10 cm/s, abgesehen von Strömungsgeschwindigkeiten in der Lahnungsöffnung (Meßstation 8) von maximal 60 cm/s. Die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten ergeben sich zu 2 bis 5 cm/s. Die Zu- und Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeiten über die Tide sind im Modell etwa gleich denen in der Natur. Größere Abweichungen ergeben sich in diesem Bereich lediglich zu Beginn und am Ende der Simulation an der Meßstation 6 und an der Meßstation 2.

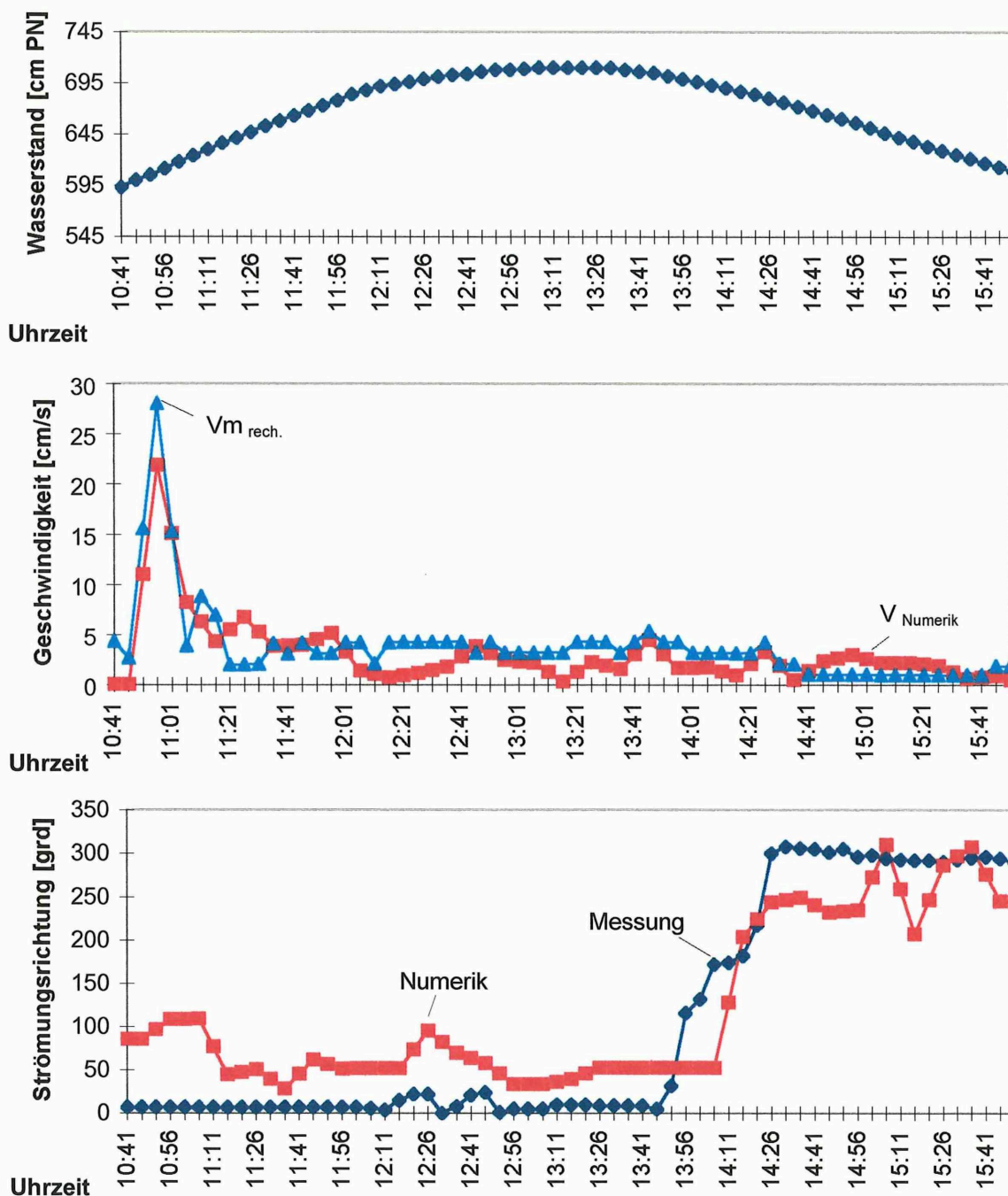


Abb. 8.6: Ergebnisse der Kalibrierung an der Meßstation 3
 (Tidekurve am Pegel Schlüttsiel vom 06.11.1995)

Diese Abweichungen in eng begrenzten Zeitabschnitten sind auf numerische Inkonsistenzen bei der Beschreibung gerade gefluteter Zellen (Beginn der Simulation) bzw. auf die gewählte Implementierung beim Trockenfallen von Zellen zurückzuführen. Durch das stoßhafte Freigeben gefluteter Zellen bei auflaufendem Wasser bzw. das Zurückhalten noch nicht flutbarer Zellen können Geschwindigkeitssprünge auftreten, die im weiteren Verlauf der Simulation, d.h. zunehmendem Wasserstand, schnell abklingen.

Die Messungen der Strömungsrichtungen in der Natur ergaben im Seebereich vor den Lahnungsfeldern (Meßstationen 10, 7, 11, 13, 14) insbesondere bei ablaufendem Wasser Küstenlängsströmungen nahezu parallel zu den Querlahnungen. Diese küstenparallelen Strömungen stellten sich bei der numerischen Simulation entsprechend der Festlegung der Strömungsrandbedingungen an der seeseitigen Modellgrenze nicht ein. Bei auflaufendem Wasser sind die Strömungen senkrecht auf die Querlahnungen hin und bei ablaufendem Wasser senkrecht von den Querlahnungen weg gerichtet.

In der Öffnung des nordwestlichen Lahnungsfeldes (Meßstation 8) stimmen die Strömungen nach den Messungen mit der numerischen Simulation bei auf- und bei ablaufendem Wasser senkrecht zur Querlahnung überein. Das naturgemäße Einströmen in das Lahnungsfeld hinein und das Ausströmen aus dem Lahnungsfeld heraus mit nahezu gleichen Strömungsgeschwindigkeiten im Modell und in der Natur, was auch auf das südöstliche Lahnungsfeld übertragbar ist, gewährleisten in der numerischen Simulation insgesamt ein Füllen und Entleeren des Lahnungsfeldes wie in der Natur.

In den Lahnungsfeldern weichen die berechneten Strömungsrichtungen während kurzer Phasen von den gemessenen Richtungen ab, insbesondere in den küstennahen Feldern. Das dürfte auf die, mit der Zeit veränderliche und unregelmäßige Oberflächenstruktur und die damit verbundene ungleichmäßige Beflutung und Entleerung zurückzuführen sein, die im numerischen Modell schematisiert werden muß. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß die Trägheit der Richtungsanzeige der eingesetzten Meßgeräte und zeitweise geringe Wassertiefen bzw. der Einfluß des Windes, zu von den Meßergebnissen abweichenden Simulationsergebnissen führen können.

Die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen stellen daher eine akzeptable Näherung für die tatsächlichen Strömungsverhältnisse in Lahnungsfeldern dar.

8.4.2.3 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen

Die sich bei Anwendung der o.g. Parameter bei mittleren Tideverhältnissen einstellenden Strömungszustände sollen im folgenden beschrieben werden, um so einen Vergleich mit der noch darzustellenden Parameterstudie zu erlauben.

Für die Darstellung der Ergebnisse wurden 8 Punkte (P1 bis P8) innerhalb der Lahnungsfelder und zwei Schnitte (S1 und S2) ausgewählt (Abb. 8.7), für welche die Strömungsgeschwindigkeiten in x- bzw. y-Richtung und die aus beiden resultierende Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen werden.

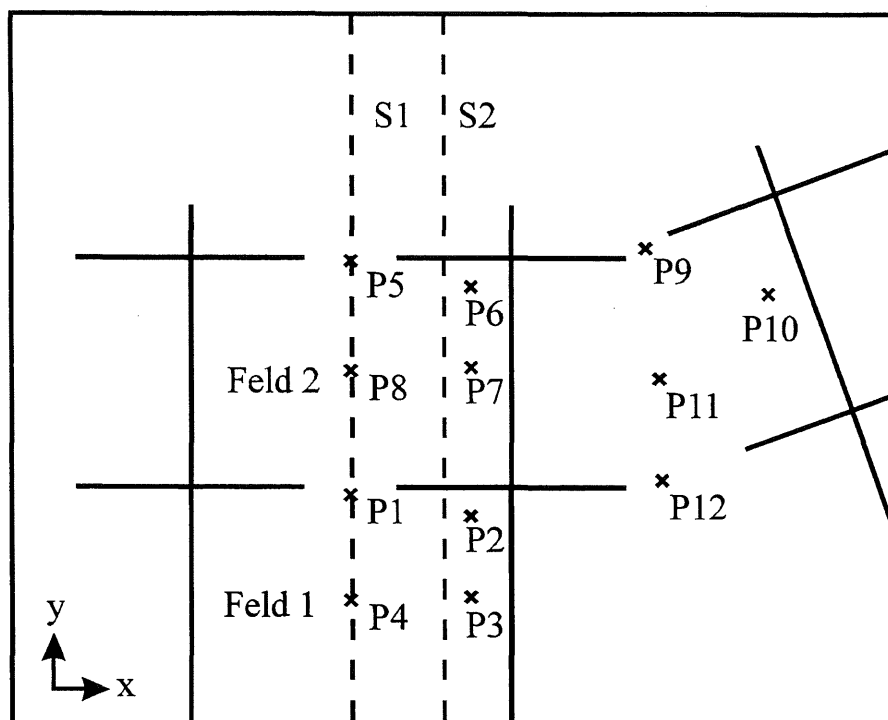


Abb. 8.7: Lage ausgewählter Referenzpunkte zur Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten im Testgebiet "Ockholm" (schematisch)

Punkt/ Schnitt	Lage in x-Richtung [m]	Lage in y-Richtung [m]	Gitterpunkt in x-Richtung	Gitterpunkt in y-Richtung
P1	725	295	290	118
P2	795	263	318	105
P3	795	195	318	78
P4	725	195	290	78
P5	725	495	290	198
P6	795	463	318	185
P7	795	395	318	158
P8	725	395	290	158
P9	983	503	393	201
P10	1075	450	430	180
P11	983	403	393	161
P12	983	303	393	121
S1	725	0 bis 747	290	0 bis 299
S2	795	0 bis 747	318	0 bis 299

Taf. 8.3: Lage der Referenzpunkte und Schnitte in x- und y-Richtung
 und ihre Zuordnung zu Gitterpunkten im numerischen Modell

In den schräg neben den rechteckigen Testlahnungsfeldern liegenden Lahnungsfeldern treten in der Lahnungsöffnung am Referenzpunkt P9 Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung von maximal 0,22 m/s bei auflaufendem Wasser und 15 cm/s bei ablaufendem Wasser auf. Damit sind die Strömungsgeschwindigkeiten in der fast dreimal so breiten Lahnungsöffnung wie im Testfeld 2 nur etwa halb so groß wie die am Punkt P5. Die Oberfläche der Lahnungsfelder hinter der breiteren Öffnung sind allerdings größer als die Testfelder 1 und 2. Im Lahnungsfeld treten nahezu gleich große Strömungsgeschwindigkeiten wie in den Testfeldern 1 und 2 auf.

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden auch in ihrer räumlichen Verteilung den natürlichen Verhältnissen entsprechend nachgebildet. Auf den Anlagen 8-19 bis 8-23 sind Strömungsverteilungen über die gesamte Modellfläche zu verschiedenen Tidezeiten dargestellt. Erkennbar sind die auf die Lahnungsöffnungen hin ausgerichteten Flut- und Ebbeströmungen. Die geringe Durchströmung der Lahnungsbauwerke zeigt sich durch die in diesem Bereich niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Im Bereich um Tidehochwasser sind die während des Füllvorganges entstandenen langsam drehenden Walzen in den Ecken der Lahnungsfelder (Anlage 8-21) mit Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 0,05 m/s noch vorhanden. Das Einströmen in Lahnungsfelder über das Watt ohne Priele oder Entwässerungsgräben durch breitere Öffnungen als in den Testfeldern zeigt sich in den neben den Testfeldern liegenden Lahnungsfeldern (Anlage 8-20). Hier treten breitere Bereiche mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten auf als in den Bereichen mit schmalen Öffnungen und einer Konzentration der Einströmung auf die Entwässerungsgräben.

8.4.2.4 Seegangsverhältnisse

Für das Testgebiet „Ockholm“ wurden die in Taf. 8.1 dargestellten Fälle untersucht. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die Schnitte S1 und S2 (vgl. Abb. 8.7) bei einer Wellenhöhe von $H = 10$ cm und einer Periode von $T = 3$ s in Anlage 8-24 und Anlage 8-25 dargestellt. Dieser Fall wurde ausgewählt, da er die seegangsdämpfende Wirkung des Lahnungsbauwerkes besonders gut verdeutlicht.

Im Schnitt S1 (Schnitt durch die Lahnungsöffnung) verringert sich die Wellenhöhe bis zum Erreichen der Lahnungsöffnung auf ca. 0,02 m. Bedingt durch den lokal vorhandenen Hauptentwässerungsgraben und die damit einhergehende Vertiefung, nimmt die Wellenhöhe in diesem Schnitt relativ schnell ab. Durch die im weiteren Verlauf des Hauptentwässerungsgrabens abnehmende Wassertiefe baut sich die Welle erneut auf und bricht innerhalb des ersten Lahnungsfeldes am Ende des Hauptentwässerungsgrabens (vgl. Abb. 8.4). Infolge des ungehinderten Einlaufens durch die Lahnungsöffnung wird ein Großteil der Wellenenergie im Schnitt S1

in das zweite Lahnungsfeld eingetragen und führt hier zu einer Erhöhung der Wellenhöhe auf ca. 0,09 m. Damit ist die Ausgangswellenhöhe nahezu erreicht.

Im Vergleich hierzu kommt es im Schnitt S2 zu einer deutlichen Dämpfung im Bereich des zweiten Lahnungsbauwerkes, die sich in einer Abnahme der Wellenhöhe um 0,03 m äußert. Danach baut sich die Welle erneut bis auf Höhen um 0,07 m auf. Infolge des Energieverlustes am zweiten Lahnungsbauwerk, werden die Wellenhöhen aus dem Schnitt S1 nicht erreicht. Die Ausgangswellenhöhe wird um den Differenzbetrag (Abnahme der Wellenhöhe am zweiten Lahnungsbauwerk - 0,03 m) unterschritten, worin der Energieverlust am permeablen Lahnungsbauwerk deutlich wird.

8.4.2.5 Sedimentation und Erosion

Die sich im Verlaufe einer Modelltide einstellenden Sedimentationsraten sind in den Abb. 8.8 bis Abb. 8.10 dargestellt. Auf eine Umrechnung der sedimentierten Massen in Watthöhen wurde hier verzichtet, da der zeitliche Verlauf der Lagerungsdichten auf Schlickwattflächen und der Konsolidierungsprozeß nicht Thema dieser Arbeit sind.

Bei auflaufender Tide ergeben sich in den Lahnungsöffnungen der Testlahnungsfelder eng begrenzte Erosionsbereiche (Abb. 8.8 für $y = 500$ m und $x = 500$ m, $x = 700$ m), die für den Fall größerer Lahnungsöffnungen wie in den neben den Testfeldern liegenden Lahnungsfeldern größer ausfallen und sich bis in die Mitte der seewärts gelegenen Lahnungsfelder fortsetzen (Abb. 8.8 für $y = 500$ m und $x = 200$ m, $x = 1000$ m).

In den Eckbereichen der Lahnungsfelder deuten sich schon zu diesem Zeitpunkt (11.45 Uhr) spätere Sedimentationsbereiche an. Auch im Bereich der Lahnungsköpfe außerhalb des Lahnungsfeldes sind Auflandungen erkennbar, die durch die im Staubereich der Querlahnungen geringen Strömungsgeschwindigkeiten ermöglicht werden. Im Bereich der abgeminderten Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der teildurchlässigen Querlahnungen zeigt sich bereits eine erhöhte Sedimentation in den Seitenbereichen der Lahnungsfelder.

Bei Tidehochwasser (12.45 Uhr) haben sich die Anlandungen, insbesondere im Bereich der Lahnungsköpfe und unmittelbar oberhalb der Querlahnungen weiter verstärkt. Erkennbar sind auch Bereiche in den Lahnungsöffnungen bzw. im sich unmittelbar anschließenden Feldbereich mit sehr geringen Sedimentationen. Diese Bereiche haben für den Fall einer größeren Lahnungsöffnung eine wesentlich größere Ausdehnung (südöstliches Lahnungsfeld und schräg angeordnetes, nordwestliches Lahnungsfeld).

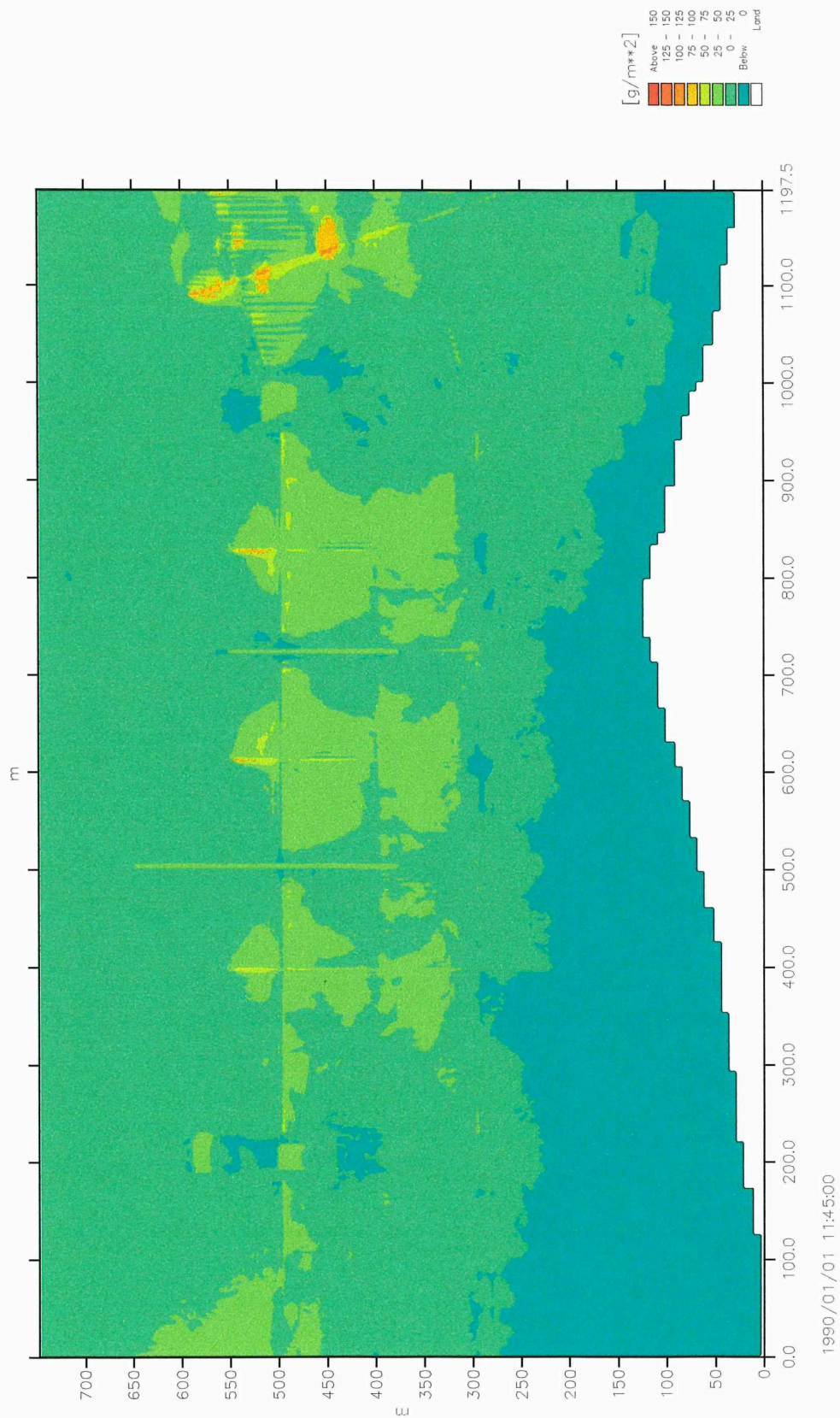


Abb. 8.8: Sedimentation / Erosion im Testgebiet „Ockholm“ [g/m²]
bei auflaufender Tide (11.45 Uhr)
mit einem Sedimenteintrag von 350 g/m³ am seeseitigen Modellrand

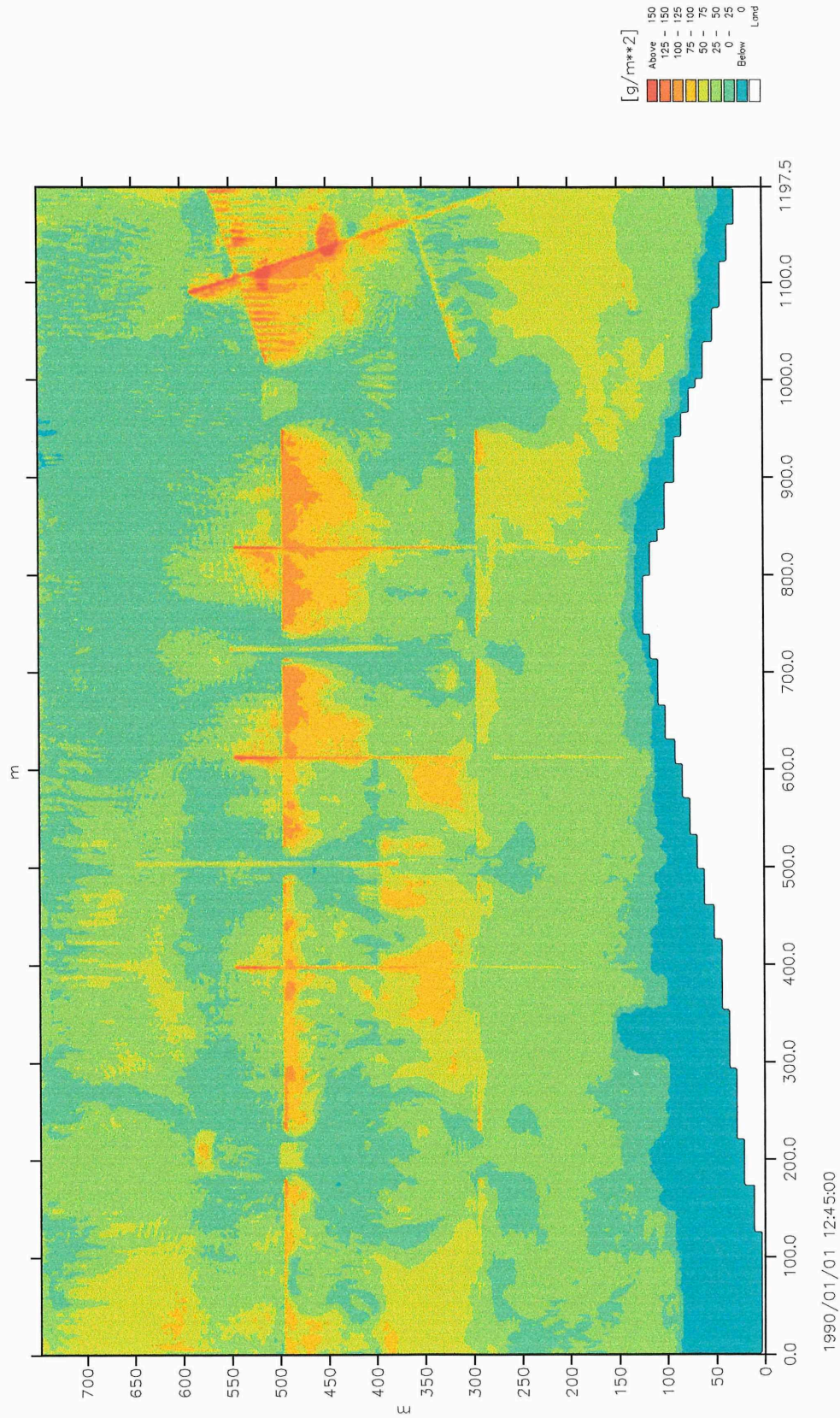


Abb. 8.9: Sedimentation im Testgebiet „Ockholm“ [g/m^2]
bei Tidehochwasser (12.45 Uhr)
mit einem Sedimenteintrag von $350 \text{ g}/\text{m}^3$ am seeseitigen Modellrand

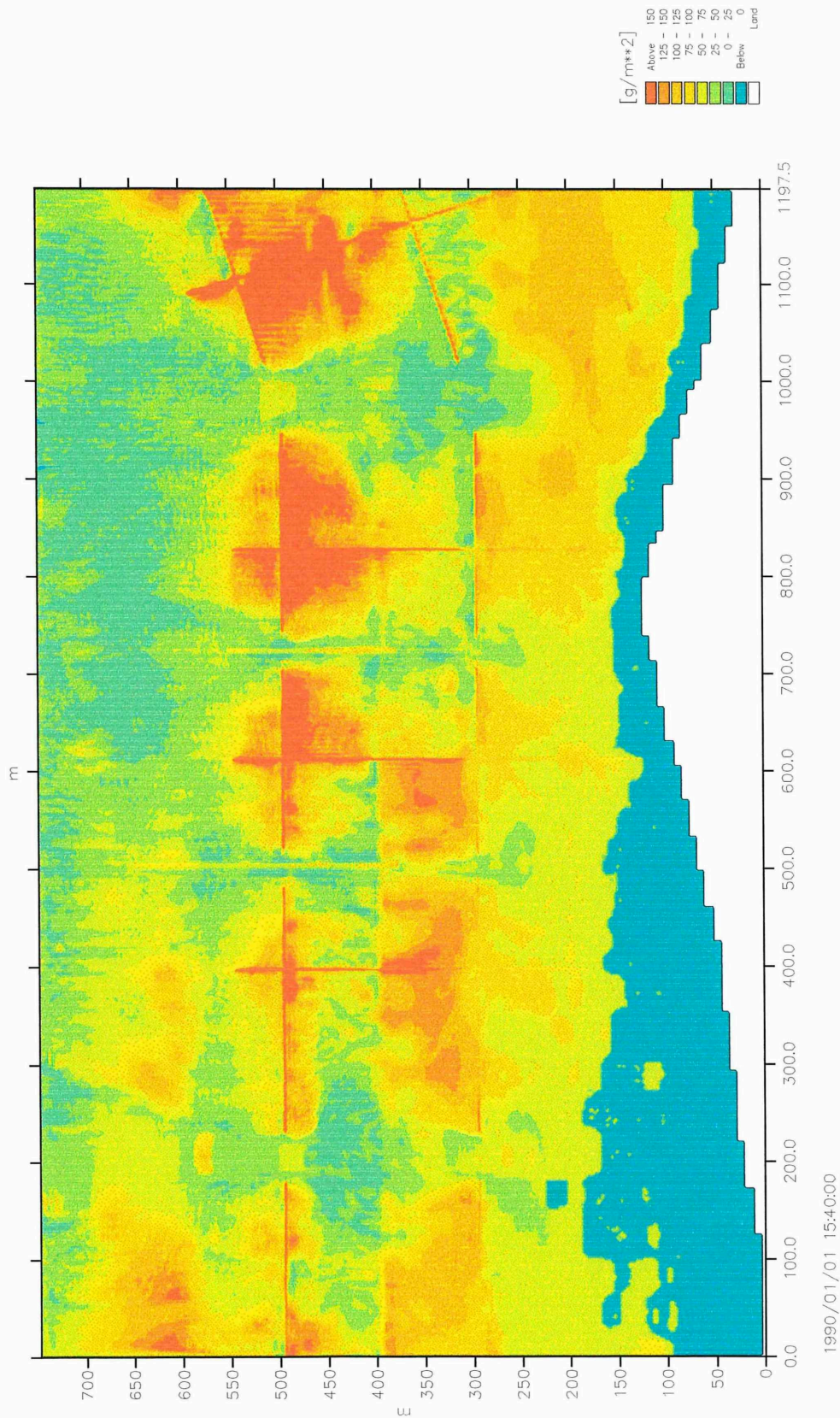


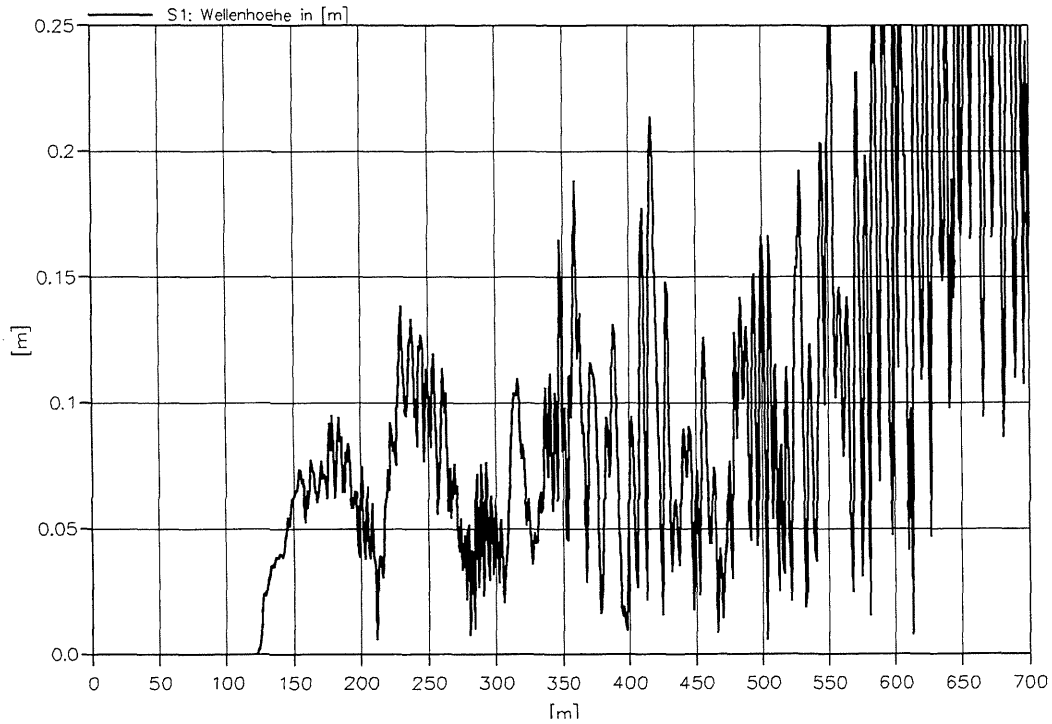
Abb. 8.10: Sedimentation im Testgebiet „Ockholm“ [g/m^2]
nach Ablauf einer Tide (15.40 Uhr)
mit einem Sedimenteintrag von $350 \text{ g}/\text{m}^3$ am seeseitigen Modellrand

In den schräg angeordneten Lahnungsfeldern (nordwestlich der Testfelder) waren die Strömungsverteilungen bei auflaufender Tide anders als in den Testfeldern, so daß auch im küstenseitigen Lahnungsfeld begrenzt große Bereiche mit sehr geringen Sedimentationen auftreten (Abb. 8.8; $y = 300$ m, $x = 950$ m bis 1050 m). Diese sind im südöstlichen Lahnungsfeld mit ebenfalls großer Lahnungsöffnung nicht in dieser Form erkennbar.

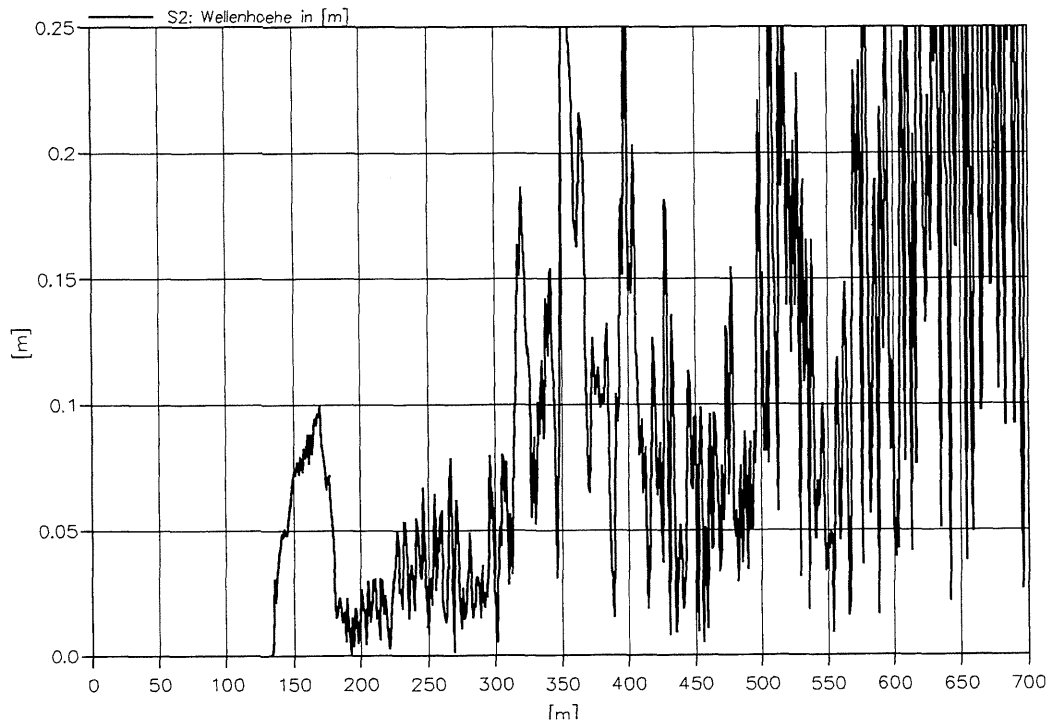
Am Ende der Tidephase, in der die Lahnungsfelder überflutet sind (15.40 Uhr), ergeben sich Sedimentationen in unterschiedlichen Bereichen der beiden Testlahnungsfelder und der im Nordwesten und im Südosten angrenzenden Lahnungsfelder (Abb. 8.9). So haben die unterschiedlichen Ausstattungen der Lahnungszäune und der Querentwässerungen, die jeweils in der Bathymetrie berücksichtigt sind, Einfluß auf die Strömungsverteilungen und damit auf die Sedimentationsbereiche.

An der seeseitigen Querlahnung des, von See her gesehen, linken Testfeldes ist der Anwurf als Schwelle wirksam (Schnitt in y -Richtung bei $x = 795$ m, Abb. 8.10). Der Füllstrom vorwiegend im Hauptentwässerungsgraben durch das Lahnungstor führt zur Ausbildung von Strömungswalzen beiderseits des Hauptentwässerungsgrabens, ungestört von einer Strömung, die bei einem durchlässigen Lahnungsaun auftreten würde. In den Walzen findet Sedimentation statt. Im hinteren Teil des Feldes 2 ist die Sedimentation zwangsläufig geringer. Darüber hinaus verursacht die geringe Höhe des Aushubs aus der Querentwässerung keine Strömung (Walzen), die eine Sedimentation in diesem Bereich begünstigen würde. Die Oberflächenstruktur im Lahnungsfeld nordwestlich neben den Testlahnungsfeldern ist in ähnlicher Weise berücksichtigt wie im linken Testfeld. Deshalb ergibt sich ein ähnliches Sedimentationsbild.

Im rechten Testfeld ist nahezu kein Anwurf an der Querlahnung, wohl aber der Aushub aus der Querentwässerung höher als im linken Testfeld in der Bathymetrie nachgebildet (Schnitt in y -Richtung bei $x = 450$ m, Abb. 8.11). Eine Walzenströmung kann sich hinter der Querlahnung aufgrund der Durchströmung der teildurchlässigen Lahnung nicht ausbilden, so daß hier geringere Sedimentation im vorderen Teil des Feldes 2 stattfindet als im hinteren. Im hinteren Teil des Feldes 2 wird die Sedimentation hinter dem Aushub des Querentwässerungsgrabens in der flacheren Senke stattfinden. Ähnlich wie im rechten Testlahnungsfeld werden die Querlahnung und der Aushub der Querentwässerung im südöstlich neben den Testfeldern liegenden größeren Lahnungsfeld in der Bathymetrie berücksichtigt. Die Sedimentationsbereiche liegen wie im rechten Testlahnungsfeld vor der landseitigen Querlahnung.



Schnitt in y-Richtung bei x = 450 m durch das Lahnungsfeld südöstlich der Testlahnungsfelder



Schnitt in y-Richtung bei x = 795 m durch das nordwestliche Testlahnungsfeld (Schnitt S2)

Abb. 8.11: Schnitte der Vorlandmorphologie in benachbarten Lahnungsfeldern

Beachtenswert ist zudem, daß die in die Lahnungsfelder eingetragenen Sedimentmengen vornehmlich in den seeseitigen Feldern abgelagert werden und nicht bis in die küstennahen Bereiche vordringen können. Hieraus läßt sich ableiten, daß die seeseitigen Felder erst dann anzulegen sind, wenn im küstennahen Bereich das gewünschte Geländeniveau schon nahezu erreicht ist.

Die Aufsummierung der berechneten, flächenbezogenen Sedimentationsmengen für die Teilbereiche verschiedener Lahnungsfelder (Taf. 8.4) unterstützen die oben gemachten Ausführungen. Erste Schlußfolgerungen über die Beeinflussung der ablaufenden Prozesse durch die Breite der Lahnungsöffnung, Hauptentwässerungsgraben bzw. Anordnung von Doppelgeometrie können daraus abgeleitet werden.

			Seeseitiges Lahnungsfeld	Küstennahes Lahnungsfeld
Lahnungsfeld südöstlich der Testlahnungsfelder; breite Öffnung ohne Hauptentwässerung	S	kg/Tide	6.002	3.447
	O_{Thw}	m ²	77.000	78.000
	S_m	kg/(Tide·m ²)	0,078	0,044
Nordwestliches Testlahnungsfeld; schmale Öffnung mit Hauptentwässerung	S	kg/Tide	3.720	2.244
	O_{Thw}	m ²	41.000	42.000
	S_m	kg/(Tide·m ²)	0,091	0,053
Lahnungsfeld nordwestlich der Testlahnungsfelder, breite Öffnung ohne Hauptentwässerung	S	kg/Tide	4.961	6.628
	O_{Thw}	m ²	56.000	99.000
	S_m	kg/(Tide·m ²)	0,089	0,067

- S = Sedimentationsmenge im Lahnungsfeld in einer Tide
- O_{Thw} = Oberfläche des Lahnungsfeldes bei Thw
- S_m = mittlere Sedimentationsmenge im Lahnungsfeld in einer Tide

Taf. 8.4: Sedimentationsmengen in den Lahnungsfeldern des Testgebietes "Ockholm" nach Ablauf einer Modelltide (Sedimenteintrag am seeseitigen Modellrand von 350 g/m³)

Offensichtlich behindert die kleinere Lahnungsöffnung im Testfeld die Sedimentationsvorgänge nicht. Vielmehr unterstützt sie den Absetzvorgang in Verbindung mit dem Hauptentwässerungsgraben durch die Abminderung der einlaufenden Wellen und minimiert so die in diesen Bereichen auftretenden Sohlschubspannungen. In den küstennahen Feldern sedimentiert weniger Material als in den seeseitigen Lahnungsfeldern, was durch die durchgeführten Naturmessungen im Testgebiet „Ockholm“ bestätigt wurde. Das größere Füllvolumen im küstennahen Feld des nordwestlich der Testfelder liegenden Lahnungsfeldes, das infolge des flacher anstei-

genden Vorlandes größer ist als das im Südosten liegende Lahnungsfeld, wirkt sich in einer rd. 50 % größeren mittleren Sedimentationsmenge aus.

8.4.2.6 Diskussion und Wertung der Ergebnisse

Die Sedimentation und Erosion im Testgebiet „Ockholm“ wurde für mittlere Tideverhältnisse und eine charakteristische Wellenparameter ($H = 10$ cm, $T = 3$ s) untersucht. Bei höher auflaufenden Tiden (Windfluten, Sturmfluten) mit größeren Steiggeschwindigkeiten der Tidewasserstände werden in den Lahnungsfeldern höhere Strömungsgeschwindigkeiten als bei mittleren Tiden auftreten. Die Strömungsbelastung der Vorlandsohle wird aber überwiegend unmittelbar vor und hinter der Lahnung (Überströmung) auftreten (ERCHINGER ET AL., 1994). Intensiverer Seegang, der in der Regel bei Wind- und Sturmfluten auftritt, wird bei den dann höheren Wasserständen durch die Lahnungen weniger gedämpft als bei mittleren Tideverhältnissen, so daß mit zusätzlicher Belastung der Sohle in den Lahnungsfeldern gerechnet werden muß. Die morphologische Struktur des Vorlandes und der Lahnungsfelder wird aber durch die langfristig wirkenden mittleren Tide- und Seegangsverhältnisse geprägt und nicht durch kurzzeitig auftretende Extremereignisse.

Deshalb erlauben die durchgeführten Untersuchungen bei mittleren Tideverhältnissen eine generelle Einschätzung des Systemverhaltens. Die zuvor beschriebenen Ergebnisse haben in diesem Zusammenhang eine hohe Aussagekräftigkeit, auch weil das Naturmodell auf der Grundlage von Strömungsmessungen in drei verschiedenen Meßkampagnen geeicht wurde. Ein Vergleich der in den Eichzuständen berechneten Strömungen mit den in der Natur gemessenen ergab Abweichungen der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten von maximal 10% (im Mittel unter 5%).

Die vor den Lahnungsfeldern erkennbaren Sedimentationsbereiche, insbesondere im Bereich der Lahnungsköpfe, sind nach den durchgeführten Untersuchungen des FTZ-Westküste nicht in dieser Form aufgetreten. Es steht zu vermuten, daß insbesondere hier das mittlere Systemverhalten durch Extremereignisse überprägt wird und vor den Lahnungsfeldern zuvor abgesetzten Sedimentmengen erodiert werden. Bei mittleren Tideverhältnisse sind die Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertiefen aber so gering, daß vor den Lahnungen Sedimentationen potentiell auftreten könnten.

Die Permeabilität des Lahnungsbauwerkes (Buschlahnungen) wurde durch eine Modifizierung der Rauheitskoeffizienten erfaßt. Dieser Ansatz hat sich bewährt, was die erzielten Ergebnisse im Testgebiet „Ockholm“ belegen.

Der seegangsdämpfende Einfluß der Lahnungsbauwerke konnte im numerischen Modell nachvollzogen werden. Dies wurde durch begleitende numerische Untersuchungen der physikalischen Versuche im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS, aus denen die Eingangswerte für Rauheitskoeffizienten und Transmissionskoeffizienten abgeleitet wurden, abgesichert.

Die angesetzten sedimentologischen Parameter wurden auf der Grundlage von Erfahrungswerten gewählt. Die aufgetretenen Abweichungen des Sedimentationsverhaltens von dem in der Natur beobachteten können auch durch in der Natur vorhandene Küstenlängsströmungen und den sich infolgedessen einstellenden Küstenlängstransport hervorgerufen werden. Trotzdem ist es auf der Grundlage des angewendeten Modells möglich, den Einfluß der Lahnungsbauwerke auf den Sedimentations- bzw. Erosionsvorgang zu beurteilen. Bereiche unterschiedlicher Sedimentationen sind schlüssig und nachvollziehbar. Es kann davon ausgegangen werden, daß die zu beschreibenden Naturprozesse mit den angewandten Verfahren beschreibbar sind.

8.4.3 Parameterstudie

8.4.3.1 Allgemeines

Die in der Parameterstudie durchgeführten Untersuchungen und die aus ihnen hervorgegangenen Ergebnisse wurden gezielt für die Beantwortung bestimmter Fragestellungen ausgewertet und dargestellt (Taf. 8.5). Als Systemverhalten werden in diesem Zusammenhang die Strömungsgeschwindigkeiten und ihre räumliche Verteilung, die seegangsdämpfende Wirkung des Lahnungsbauwerkes und die Höhe der Sedimentations- bzw. Erosionsraten verstanden.

Welchen Einfluß auf das Systemverhalten hat die Öffnungsweite des Lahnungsbauwerkes?

Bewirkt eine Begrüppung eine Änderung des Systemverhaltens?

Welche Auswirkungen hat ein Anwurf an den Lahnungen?

Kann die Sedimentation durch die Anordnung eines zweiten Feldes weiter verstärkt werden?

Taf. 8.5: In der Parameterstudie untersuchte Fragestellungen

Im Hinblick auf diese Fragestellungen werden die Ergebnisse der Untersuchungen in den folgenden Kapiteln ausgewertet und interpretiert, um den Einfluß der verschiedenen Parameter auf die Sedimentations- und Erosionsprozesse darzustellen.

Modellnummer	Feldgröße	Anzahl der Felder	Öffnungsweite	Gruppen	Anwurf	Anlage ^{*)}
m_1	200 m x 200 m	1	25 m	nein	nein	8-66
m_2	200 m x 200 m	1	35 m	nein	nein	8-67
m_3	200 m x 200 m	1	40 m	nein	nein	8-68
m_4	200 m x 200 m	1	50 m	nein	nein	8-69
m_5	200 m x 200 m	1	70 m	nein	nein	8-70
m_6	200 m x 200 m	1	90 m	nein	nein	8-71
m_7	200 m x 200 m	2	25 m	nein	nein	8-72
m_8	200 m x 200 m	2	35 m	nein	nein	8-73
m_9	200 m x 200 m	2	40 m	nein	nein	8-74
m_10	200 m x 200 m	2	50 m	nein	nein	8-75
m_11	200 m x 200 m	2	70 m	nein	nein	8-76
m_12	200 m x 200 m	2	90 m	nein	nein	8-77
m_13	200 m x 200 m	1	25 m	nein	ja	8-78
m_14	200 m x 200 m	1	35 m	nein	ja	8-79
m_15	200 m x 200 m	1	40 m	nein	ja	8-80
m_16	200 m x 200 m	1	50 m	nein	ja	8-81
m_17	200 m x 200 m	1	70 m	nein	ja	8-82
m_18	200 m x 200 m	1	90 m	nein	ja	8-83
m_19	200 m x 200 m	2	25 m	nein	ja	8-84
m_20	200 m x 200 m	2	35 m	nein	ja	8-85
m_21	200 m x 200 m	2	40 m	nein	ja	8-86
m_22	200 m x 200 m	2	50 m	nein	ja	8-87
m_23	200 m x 200 m	2	70 m	nein	ja	8-88
m_24	200 m x 200 m	2	90 m	nein	ja	8-89
m_25	200 m x 200 m	1	25 m	ja	nein	8-90
m_26	200 m x 200 m	1	35 m	ja	nein	8-91
m_27	200 m x 200 m	1	40 m	ja	nein	8-92
m_28	200 m x 200 m	1	50 m	ja	nein	8-93
m_29	200 m x 200 m	1	70 m	ja	nein	8-94
m_30	200 m x 200 m	1	90 m	ja	nein	8-95
m_31	200 m x 200 m	2	25 m	ja	nein	8-96
m_32	200 m x 200 m	2	35 m	ja	nein	8-97
m_33	200 m x 200 m	2	40 m	ja	nein	8-98
m_34	200 m x 200 m	2	50 m	ja	nein	8-99
m_35	200 m x 200 m	2	70 m	ja	nein	8-100
m_36	200 m x 200 m	2	90 m	ja	nein	8-101
m_37	200 m x 200 m	1	25 m	ja	ja	8-102
m_38	200 m x 200 m	1	35 m	ja	ja	8-103
m_39	200 m x 200 m	1	40 m	ja	ja	8-104
m_40	200 m x 200 m	1	50 m	ja	ja	8-105
m_41	200 m x 200 m	1	70 m	ja	ja	8-106
m_42	200 m x 200 m	1	90 m	ja	ja	8-107
m_43	200 m x 200 m	2	25 m	ja	ja	8-108
m_44	200 m x 200 m	2	35 m	ja	ja	8-109
m_45	200 m x 200 m	2	40 m	ja	ja	8-110
m_46	200 m x 200 m	2	50 m	ja	ja	8-111
m_47	200 m x 200 m	2	70 m	ja	ja	8-112
m_48	200 m x 200 m	2	90 m	ja	ja	8-113

*) Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentationen an den Referenzpunkten im Verlauf einer Tide, Sedimentationen nach Ablauf einer Tide in den Lahnungsfeldern

Taf. 8.6: Varianten der Parameterstudie und zugrunde liegende Systemparameter

8.4.3.2 Berücksichtigung von Systemparametern

Die in der Parameterstudie festgelegten Systemparameter (Neigung der Bathymetrie, Tidewasserstände, Wellenhöhen, Wellenlänge, sedimentologische Kennwerte) wurden aus den im Testgebiet „Ockholm“ durchgeführten Messungen in der Natur abgeleitet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Transmissionskoeffizienten der Lahnungen wurden aus den im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführten Modelluntersuchungen übernommen. Die sedimentologischen Parameter wurden mit dem FTZ-Westküste abgestimmt.

In den untersuchten Varianten wurden die Anzahl der Lahnungsfelder und die Öffnungsweite der Lahnungsfelder variiert. Die so aufgebauten Geometrievarianten wurden für Fälle mit und ohne Grüppen bzw. für Fälle mit und ohne Anwurf realisiert. Die Berechnungsvarianten und die berücksichtigten Parameter sind in Taf. 8.6 zusammengestellt.

Die Lahnungsfelder wurden in einer Größe von 200 m x 200 m realisiert. Da Lahnungsfelder i.a. nebeneinander in Küstenlängsrichtung angeordnet werden, konnten für den Aufbau des numerischen Ersatzsystems die Symmetrieeigenschaften der natürlichen Bauweise genutzt werden. Daher wurden für den Fall einer einreihigen bzw. zweireihigen Anordnung der Lahnungsfelder die in den Abb. 8.12 und Abb. 8.13 dargestellten Systemgeometrien implementiert. Die Öffnungsweiten der Lahnungsfelder variieren zwischen 25 m und 90 m.

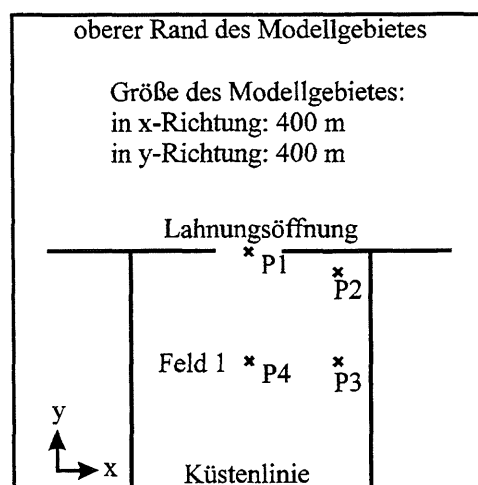


Abb. 8.12: Ausdehnung des Modellgebietes und Lage von Referenzpunkten für Varianten mit Einfachgeometrie (einreihige Anordnung)

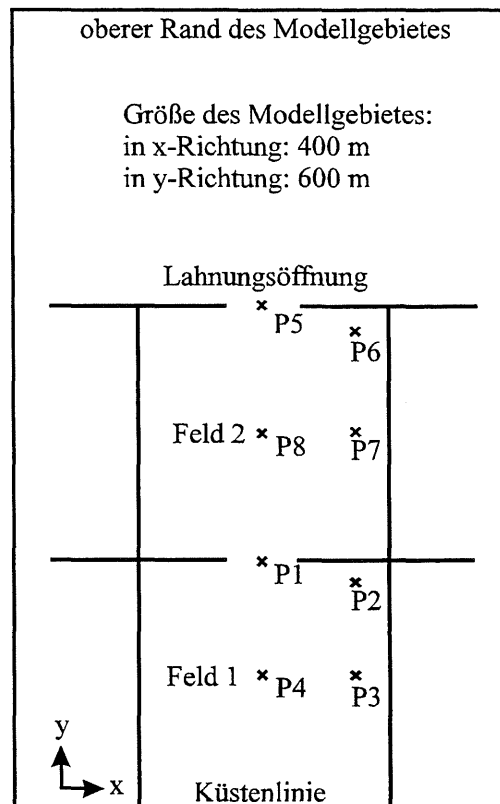


Abb. 8.13: Ausdehnung des Modellgebietes und Lage von Referenzpunkten für Varianten mit Doppelgeometrie (zweireihige Anordnung)

Die Abmessungen des Modellgebietes wurden auf 400 m x 400 m (einreihige Anordnung - Einfachgeometrie) bzw. 400 m x 600 m (zweireihige Anordnung - Doppelgeometrie) ausgedehnt, um mit dem Strömungszustand seeseits der Lahnungsfelder eine natürliche Anströmung der Lahnungsbauwerke zu gewährleisten. Der seeseitige Rand des Modellgebietes ist offen. Über ihn wird die Tide als Wasserstandsbedingung eingesteuert. Die verbleibenden drei Ränder sind geschlossen. Die Bodenneigung wurde schematisiert und auf 1:800 festgelegt. Diese Neigung wurde innerhalb des gesamten Modellgebietes angewendet. Das gewählte Rechengitter hat eine Diskretisierungsweite von 2 m. Die Zeitschrittlänge wurde auf 2 s begrenzt. Auf dieser Grundlage ergeben sich COURANT-Zahlen, die unterhalb des kritischen Grenzwertes von 1 liegen.

Für den Fall ohne Anwurf wurden die Lahnungen mit einer Durchlässigkeit von 20 % berücksichtigt und über die Sohlrauheit realisiert. Für Varianten mit Anwurf wurde die Bathymetrie im Nahbereich der Lahnungen derart modifiziert, daß ein voll konsolidierter Bodenkörper seitlich der Lahnung entstand. Dieser Bodenkörper wurde als wasserundurchlässig angesehen. Seine Neigung beträgt 1:3,33 (Abb. 8.14). Der Wall hat eine Höhe von 0,60 m über der Sohle und eine Gitterzeile eine Breite von 2,00 m.

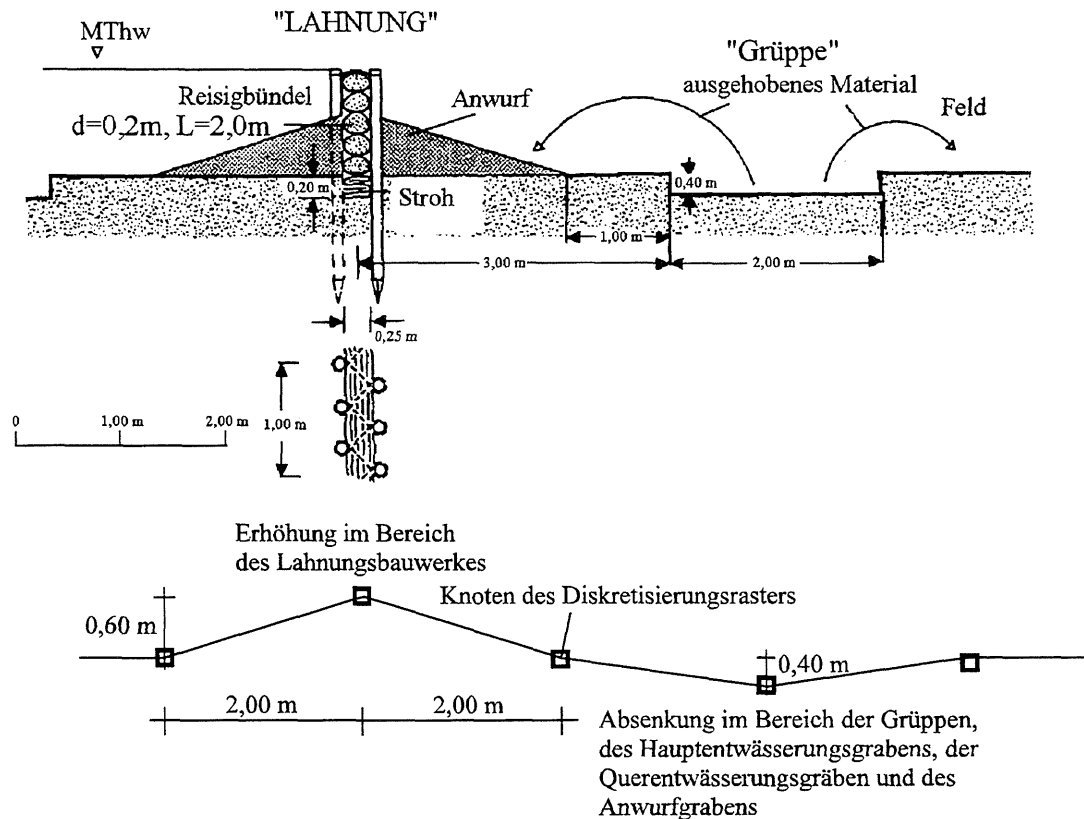


Abb. 8.14: Aufbau eines Lahnungsbauwerkes mit Anwurf und Grütpe und Abbildung der Geometrie (Bathymetrie) im numerischen Modell

Die Höhe der Lahnung auf Thw der Modelltide wurde so gewählt, daß sie bei mittleren Tideverhältnissen nicht überströmt wird. Die Durchlässigkeit wurde in Versuchen am FRANZIUS-INSTITUT mit einer Größe von 20 % ermittelt. Eine sich zeitlich verändernde Durchlässigkeit (Eintrag von Sediment in das Lahnungsbauwerk und Wachstum von Algen) bzw. der Abtrag des Anwurfes wurde nicht berücksichtigt.

Die Sohlrauheit wurde als MANNING-Zahl angegeben und für das gesamte Modellgebiet wie im Testgebiet „Ockholm“ zu $35\text{ m}^{1/3}\text{ s}^{-1}$ gewählt. Die Permeabilität und damit die Beeinflussung des Strömungszustandes durch das Lahnungsbauwerk wurde durch eine Anpassung der MANNING-STRICKLER-Rauheitskoeffizienten realisiert. Diese wurden für eine Gitternetzreihe auf $1,25\text{ m}^{1/3}\text{ s}^{-1}$ gesetzt. Aus Stabilitätsgründen wurden die ersten drei Zeilen des seeseitigen Modellrandes mit einem Rauheitsbeiwert von $8\text{ m}^{1/3}\text{ s}^{-1}$ versehen.

Für die Erfassung von Grütten wurden in die Bathymetrie Entwässerungsgräben eingefügt (Abb. 8.14 und Abb. 8.15). Aufgrund der Modellauflösung von 2 m sind die Anwurfgräben, die Grütten und die Querentwässerungsgräben gleich dimensioniert. Ihre Abmessungen betragen 2 m in der Breite und 90 m in der Länge. Der Abstand der Grütten untereinander beträgt 10 m . Am Rand werden die Grütten bis auf 4 m an die Lahnung herangeführt. Es ergeben sich vier Hauptentwässerungsfelder, die in den Hauptentwässerungsgräben münden (Abb. 8.15).

Der Hauptentwässerungsgraben beginnt 4 m vor dem Deichfuß, ist 4 m breit und endet ca. 64 m seeseits der Lahnung. Er hat ebenfalls eine Tiefe von 40 cm. Außerhalb des Lahnungsfeldes wurde er linear bis auf die Watthöhe angehoben.

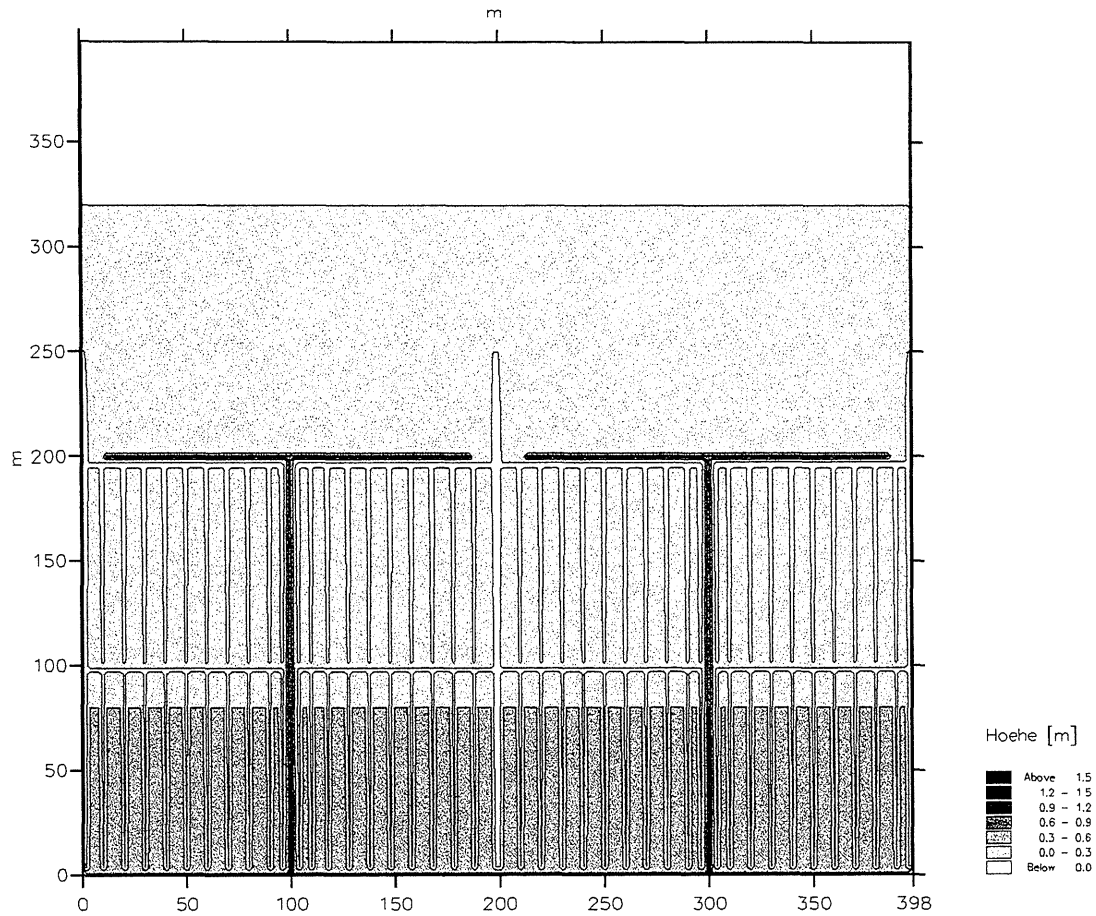


Abb. 8.15: Begrüpfung: Hauptentwässerungsgraben, Querentwässerungsgräben und Anwurfgräben (Höhenangaben in m über Bezugshorizont)

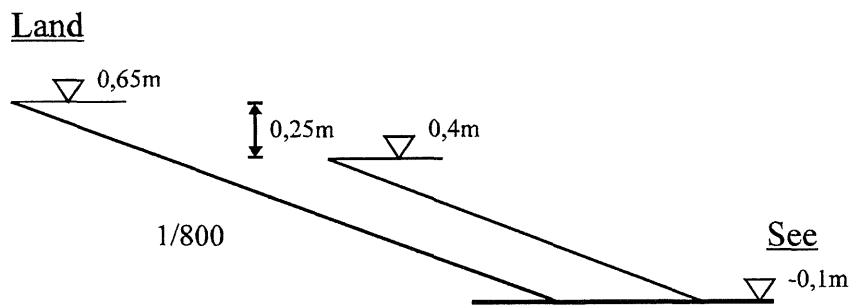


Abb. 8.16: Höhenänderung des Landanschlusses für Einfach- und Doppelgeometrie (Höhenangaben in m über Bezugshorizont)

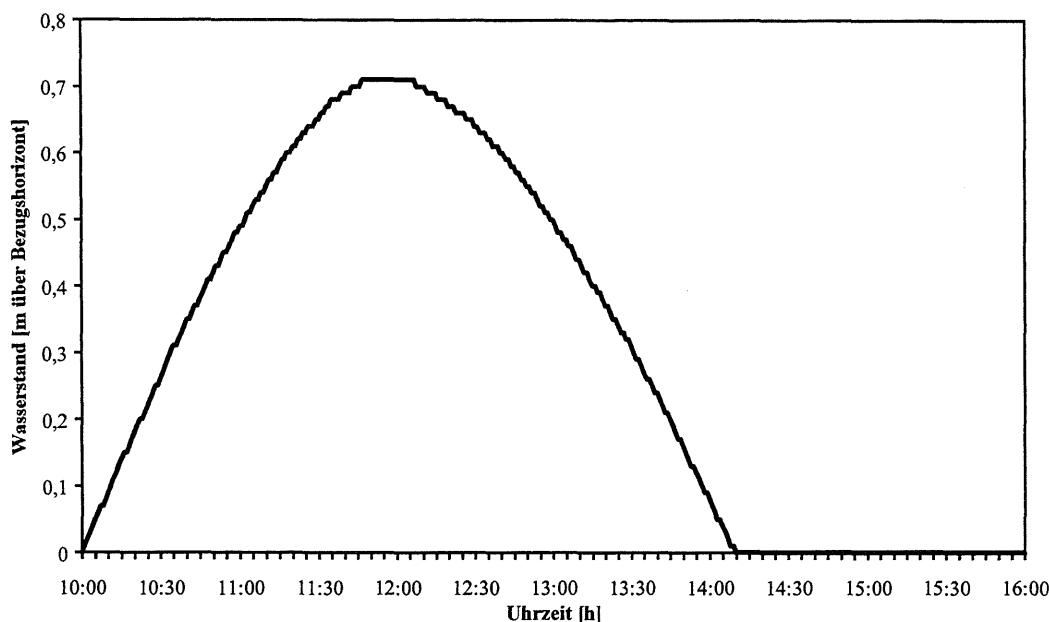


Abb. 8.17: Modelltide für Einfach- und Doppelgeometrien
(Wasserstand in m über Bezugshorizont)

Die Höhenlage am seewärtigen Rand des Untersuchungsgebietes wurde auf $-0,1$ m über Bezugshorizont festgelegt. Damit ergibt sich für die Doppelgeometrie, bedingt durch deren Länge und einer Sohlenneigung von $1:800$, ein um 25 cm höher liegender Landanschluß (Abb. 8.16). Die Höhenlage des Bezugshorizontes (BH) über dem Pegelnul (PN) der Modelltide mußte deshalb für die Modellbereiche mit Einfachgeometrie und mit Doppelgeometrie im Hinblick auf nicht zulässige negative Wassertiefen im Simulationsgebiet und auf gleiche Tidewasserstandsverläufe im landseitigen Lahnungsfeld unterschiedlich festgelegt werden. Bei Festlegung des Bezugshorizontes am landseitigen Modellrand des Modellbereiches mit Einfachgeometrie ($y = 400$ m) auf 585 cm PN herrscht bei $MThw = 653$ cm PN der Jahresreihe 1981/90 am Pegel "Schlüttsiel" eine Wassertiefe am seeseitigen Modellrand bei $-0,1$ m BH von 78 cm. Bei einem seewärts um 200 m bis $y = 600$ m verlängerten Modell muß der Bezugshorizont bei einer Sohlenneigung des Vorlandes von $1:800$ um 25 cm tiefer, d.h. auf 560 cm PN, gelegt werden. Bei $MThw$ beträgt die Wassertiefe am seeseitigen Modellrand im Modell mit Doppelgeometrie bei $-0,1$ m BH dann 103 cm und bei $x = 400$ m, wie im Modell mit Einfachgeometrie, 78 cm.

Als Modelltide wurde eine die mittleren Tideverhältnisse beschreibende Tidekurve (vergl. die in Abb. 8.2 dargestellte mittlere Tidekurve 1981/90 des Pegels Schlüttsiel und Abb. 8.17) verwendet. Diese Tide mußte für Varianten mit Gruppen zeitlich weiter verlängert werden, um den verzögerten Abfluß bis zur Strömungsgeschwindigkeit 0 m/s darstellen zu können. Diese Verlängerung besteht aus 0 m BH-Werten; diese entsprechen dem Startwasserstand. Die Tide wird am seeseitigen Modellrand eingesteuert. Die Strömungsrichtung wurde senkrecht zur Küste gewählt. Der Einfluß von Wind wurde nicht berücksichtigt.

Die Wellenparameter (Wellenhöhe und Wellenperiode) wurden aus dem Testgebiet "Ockholm" übernommen. In der numerischen Simulation wurden die Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe als Ausgangswellenhöhe definiert (Taf. 8.7). Das Lahnungsbauwerk wird durch die eingesteuerten Wellen nicht überströmt. Die Wellenperiode wurde einheitlich zu 3 s angenommen. Die im EMS-Modul berechneten „*Radiation Stresses*“ für eine RAYLEIGH-verteilte Eingangswellenhöhe von 10 cm und eine Wassertiefe von 50 cm im Bereich der Lahnungsöffnung (bei $y = 200$ m), wurden für den Zeitraum von 11.20 Uhr bis 12.40 Uhr in das HD-Modul eingebunden.

Wellenhöhe [cm]	Wassertiefe [m]
8 cm	0,4 m
10 cm	0,5 m
15 cm	0,6 m
20 cm	0,8 m
23 cm	0,9 m

Taf. 8.7: Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Wassertiefe
im Bereich der Lahnungsöffnung

Außerdem wurden zusätzliche Dämpfungsschichten hinter der wellenerzeugenden Linie am seeseitigen Rand des Modellgebietes und am landseitigen Rand definiert, um die modellbedingt doppelt in das Modellgebiet eingebrachte Wellenenergie am seeseitigen Modellrand herauszufiltern bzw. den wellendämpfenden Einfluß des Landanschlusses zu simulieren. Die geschlossenen Seiten des Modellgebietes wurden ebenfalls durch Dämpfungsschichten abgesichert, um Reflektionen an diesen geschlossenen Rändern auszuschließen.

Die Lahnungsbauwerke wurden als durchlässige Wellenbrecher aufgefaßt und als solche über einen Transmissionskoeffizienten (zweidimensionale Parameterverteilung) im numerischen Modell abgebildet. Der Parameter wurde nach Transmissionsversuchen im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS zu $K_T = H_T/H_i = 1,5$ (H_T : Wellenhöhe im Transmissionsbereich; H_i : Ausgangswellenhöhe) bestimmt.

Für das Sedimenttransportmodell (MT-Modul) wurden die bereits in Kap. 8.4.2.2 beschriebenen Parameter verwandt.

Neben der Darstellung zweidimensionaler Parameterverteilungen, wurden diskrete Punkte P1 bis P8 und zwei Schnitte S1 und S2 für eine lokale Betrachtung und Darstellung des Verhaltens einzelner Zustandsgrößen ausgewählt (Abb. 8.12 und Abb. 8.13). Die Schnitte S1 und S2

sind in Abb. 8.12 und Abb. 8.13 nicht dargestellt. Sie verlaufen land-seewärts durch die Mitte der Lahnungsöffnung (S1) bzw. durch die Mitte der Querlahnung (S2) (Taf. 8.8).

Varianten mit Anwurf wurden durch eine Erhöhung der Bathymetrie im Bereich des Anwurfes realisiert. Die Höhe des Anwurfes wurde auf Höhe von MThw gewählt. Damit ist ein Überströmen des Anwurfes ausgeschlossen.

Punkt/Schnitt	Lage in x-Richtung [m]	Lage in y-Richtung [m]
P1	200	200
P2	270	170
P3	270	100
P4	200	100
P5	200	400
P6	270	370
P7	270	300
P8	200	300
S1	200	0 bis 400 bzw. 600
S2	250	0 bis 400 bzw. 600

Taf. 8.8: Lage der Referenzpunkte und Schnitte in x- und y-Richtung und ihre Lage im numerischen Modell

Die hier untersuchten Tidephasen sind in 5 (Einfachgeometrie) bzw. 6 Zeitschritte (Doppelgeometrie) von je 30 Minuten unterteilt (Taf. 8.9).

Uhrzeit	Bemerkung	[m BH]
11:00	Flutstrom hat das Feld halb geflutet	+ 0,50
11:30	Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten	+ 0,65
12:00	Tidehochwasser	+ 0,71
12:30	Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten	+ 0,65
13:00	erste Bereiche des Feldes fallen trocken	+ 0,50
13:30	nur für Doppelgeometrien	+0,30

Taf. 8.9: Zeitpunkte für die Beschreibung des Systemverhaltens (Wasserstände in [m BH] sind für die Einfachgeometrien angegeben)

8.4.3.3 Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen

8.4.3.3.1 Allgemeines

Die in diesem Kapitel für verschiedene Varianten beschriebenen Strömungszustände beinhalten bereits die durch Wellen induzierten Strömungskomponenten für eine Wellenhöhe von $H = 10$ cm und eine Wellenperiode von $T = 3$ s für den Zeitraum von 11.20 Uhr bis 12.40 Uhr.

Die Ausbildung des sich einstellenden Strömungszustandes wird zunächst für die Varianten m_01 (Einfachgeometrie ohne Anwurf und ohne Grüppen) und m_07 (Doppelgeometrie ohne Anwurf und ohne Grüppen) erläutert, um einen generellen Eindruck des hydrodynamischen Verhaltens des Systems über den Verlauf einer Tide zu geben. Die Varianten m_01 und m_07 stellen die einfachsten untersuchten Fälle dar (keine Grüppen, kein Anwurf). Daher können an ihnen die grundlegenden Strömungsvorgänge im Bereich der Lahnungsfelder anschaulich nachvollzogen werden.

Die Hauptströmungsrichtung ist die y-Richtung. In x-Richtung treten nur in Fällen mit Anwurf merkliche Strömungsgeschwindigkeiten auf.

8.4.3.3.2 Darstellung der Varianten m_01 und m_07

Variante m_01:

Zeitschritt 11.00 Uhr (Anlage 8-26): Das Wasser strömt gleichmäßig über den seeseitigen Rand in das Modell ein und wird an der Lahnung zum Teil in Richtung der Lahnungsöffnung umgeleitet. Außerhalb der Lahnung herrschen mittlere Strömungsgeschwindigkeiten von 0,10 m/s. In der Lahnungsöffnung erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten auf bis zu 0,30 m/s, an den Rändern der Lahnungsöffnung auf bis zu 0,40 m/s. Im Bereich gerade geflutterter Zellen ergeben sich unrealistisch hohe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,80 m/s, da diese Zellen innerhalb eines Zeitschrittes der Länge $\Delta t = 2$ s gefüllt werden müssen. Bei einer gewählten „flood“-Höhe von 0,15 m und einer Zeitschrittweite von 2 s ergibt sich z.B. eine Strömungsgeschwindigkeit über den Zustromrand (reine Füllung über den oberen Zellenrand, d.h. Vernachlässigung von Querströmungen) von 0,75 m/s.

Zeitschritt 11.30 Uhr (Anlage 8-27): Die Strömungsgeschwindigkeiten sind deutlich geringer, da jetzt der flachere Bereich der Tidekurve 30 Min. vor Tidehochwasser erreicht ist. Im Mittel treten Geschwindigkeiten unter 0,10 m/s auf, wobei in der Nähe des Lahnungsfeldes keine Geschwindigkeiten mehr wahrnehmbar sind ($<0,05$ m/s). Die Überlagerung der tidebedingten Strömungen mit seegangsinduzierten Strömungen - seit 11.20 Uhr wird Seegang simuliert - führt am seeseitigen Modellrand zu einem Strömungsbild, das von den rein tidebedingten Strömungen, z.B. um 11.00 Uhr, abweicht. In der Lahnungsöffnung steigen die Strömungsgeschwindigkeiten auf 0,15 m/s an. Im Lahnungsfeld haben sich Strömungswalzen, angeregt durch die Überlagerung von tidebedingten und seegangsbedingten Strömungen, beiderseits des Hauptfüllstromes bis zu den Längslahnungen hin ausgebildet.

Zeitschritt 12.00 Uhr (Anlage 8-28): Die Strömungen im Lahnungsfeld sind bei Thw durchgehend nahezu auf Null zurückgegangen. Die in der Lahnungsöffnung noch sichtbaren Strömungen sind auf den durch den Flutvorgang induzierten Impuls zurückzuführen. Die Walzenströmung im Lahnungsfeld hat sich aufgelöst.

Zeitschritt 12.30 Uhr (Anlage 8-29): Die Tide ist gekentert, und der Ebbestrom hat eingesetzt. Am seeseitigen Modellrand ist keine gerichtete Strömung erkennbar. Das Wasser strömt sowohl durch das Lahnungsbauwerk (ca. 0,05 m/s), als auch im verstärkten Maße durch die Lahnungsöffnung (ca. 0,1 m/s), aus dem Lahnungsfeld heraus. Die Strömungen im Lahnungsfeld sind überwiegend parallel zur Längslahnung gerichtet. Im Bereich der Lahnungsöffnung treten mit ca. 0,15 m/s die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten auf.

Zeitschritt 13.00 Uhr (Anlage 8-30): Der Ebbestrom hat voll eingesetzt. Seegang wird zu dieser Zeit nicht mehr simuliert. Die zu dieser Tidephase rein tidebedingten Strömungen in und vor dem Lahnungsfeld sind überwiegend parallel zur Längslahnung gerichtet. Sie schwenken ca. 50 m vor der Querlahnung auf die Lahnungsöffnung zu um und breiten sich auf einer Strecke von 50 m hinter der Lahnung wieder aus. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind in der Lahnungsöffnung mit ca. 0,20 m bis 0,30 m/s am größten.

Variante m_07:

Zeitschritt 11.00 Uhr (Anlage 8-31): Im Modell sind, anders als in Variante m_01, 2 hintereinander liegende Lahnungsfelder nachgebildet. Das seeseitige Lahnungsfeld ist bereits geflutet. Die größten Strömungsgeschwindigkeiten (0,30 m/s) treten in den Lahnungsöffnungen auf. Das Wasser dringt aber auch mit 0,05 m/s durch die teildurchlässigen Lahnungen in die Lahnungsfelder ein. 50 m vor den Lahnungsöffnungen beginnt die Strömung in Richtung der Öffnungen umzuschwenken. Im landseitigen Lahnungsfeld treten in dieser Füllphase keine geordneten Strömungsrichtungen auf. Das seeseitige Lahnungsfeld wird nahezu parallel zu den Längslahnungen durchströmt.

Zeitschritt 11.30 Uhr (Anlage 8-32): In der Mitte der Lahnungsfelder entstehen deutliche Walzenströmungen mit einer Drehgeschwindigkeit von ca. 0,10 m/s. Es ist erkennbar, daß der Füllvorgang 30 Min. vor Thw kurz vor dem Abschluß steht (diffuses Strömungsbild vor der seeseitigen Lahnungsöffnung). Nennenswerte Strömungsgeschwindigkeiten von 0,08 m/s bis 0,10 m/s treten nur im Bereich der Lahnungsöffnungen auf.

Zeitschritt 12.00 Uhr (Anlage 8-33): Bei Thw ist der Füllvorgang abgeschlossen. In den Lahnungsöffnungen und im Bereich des Lahnungsbauwerkes sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf Null zurückgegangen. Die während der Füllung der Lahnungsfelder in der Flutphase entstandenen Walzenströmungen zwischen den Querlahnungen beiderseits des Hauptfüllstromes in der Mitte der Lahnungsfelder bestehen infolge der Trägheit der Wasserbewegung und

der anhaltenden Wirkung der seegangsbedingten Strömungen noch. Sie sind aber vor der Auflösung bei einsetzender Entleerung bereits in kleinere Walzen zerfallen.

Zeitschritt 12.30 Uhr (Anlage 8-34): Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen in umgekehrter Richtung wieder zu. Das Wasser strömt durch die Lahnungen und mit 0,10 m/s bis 0,20 m/s durch die Lahnungsöffnungen wieder hinaus. Die Walzenströmungen haben sich im seeseitigen Lahnungsfeld seewärts verschoben und liegen nun direkt vor dem Lahnungsbauwerk. Im landseitigen Lahnungsfeld sind die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Lahnungsöffnung auf 0,10 m/s bis 0,15 m/s angewachsen.

Zeitschritt 13.00 Uhr (Anlage 8-35): Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Lahnungsöffnungen sind weiter auf 0,20 m/s bis 0,30 m/s angestiegen. Die Entleerung konzentriert sich somit vornehmlich auf die Lahnungsöffnung. Innerhalb der Lahnungsfelder nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten seewärts zu. Die Strömungen sind parallel zu den Längslahnungen ausgebildet. Beide Lahnungsfelder laufen gleichmäßig leer. Walzenströmungen bilden sich nicht aus.

Zeitschritt 13.30 Uhr (Anlage 8-36): Das landseitige Lahnungsfeld ist fast entleert. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung dieses Lahnungsfeldes liegen bei 0,20 m/s. Die Strömungsgeschwindigkeit in den Feldern liegt bei 0,05 m/s. Die Strömungen sind überwiegend parallel zu den Längslahnungen ausgerichtet. Eine Ausnahme bildet wiederum der Bereich vor und hinter den Lahnungsöffnungen. Dort werden die Strömungen zu den Lahnungsöffnungen hin umgelenkt. Walzenströmungen in der Mitte der seeseitigen Felder entstehen nicht.

8.4.3.3 Einfluß der Öffnungsweite

In den Varianten mit Gruppen, insbesondere mit einem Hauptentwässerungsgraben im Bereich der Lahnungsöffnungen (m_{25} bis m_{48}), ist bei Vergrößerung der Lahnungsöffnung keine nennenswerte Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung erkennbar. Daher wurden in Taf. 8.10, sowie in Abb. 8.18, Abb. 8.19 und Abb. 8.20 Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Öffnungsweiten an den Referenzpunkten P1 und P2 in den Lahnungstoren (Abb. 8.12 und Abb. 8.13) lediglich für Varianten ohne Begrüppung dargestellt.

Die Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung nehmen bei Vergrößerung der Öffnungsweite ab. Bei Öffnungsweiten von mehr als 70 m ist die weitere Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung nur noch gering erkennbar. Eine weitere Vergrößerung der Öffnungsweite hat keinen Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung mehr.

Öffnungsweite [m]	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]	Öffnungsweite [m]	Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]
P1: Einfachgeometrie, ohne Anwurf		P1: Einfachgeometrie, mit Anwurf	
25	0,24	25	0,42
35	0,21	35	0,32
40	0,20	40	0,29
50	0,18	50	0,23
70	0,14	70	0,15
90	0,12	90	0,13
P1: Doppelgeometrie, ohne Anwurf		P1: Doppelgeometrie, mit Anwurf	
25	0,24	25	0,42
35	0,20	35	0,32
40	0,20	40	0,29
50	0,18	50	0,22
70	0,14	70	0,16
90	0,14	90	0,13
P5: Doppelgeometrie, ohne Anwurf		P5: Doppelgeometrie, mit Anwurf	
25	0,33	25	0,53
35	0,26	35	0,41
40	0,24	40	0,37
50	0,20	50	0,28
70	0,17	70	0,20
90	0,12	90	0,16

Taf. 8.10: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung an den Referenzpunkten P1 und P5 in den Lahnungsöffnungen (Einfach- und Doppelgeometrie) für verschiedene Öffnungsweiten (Varianten ohne Gruppen)

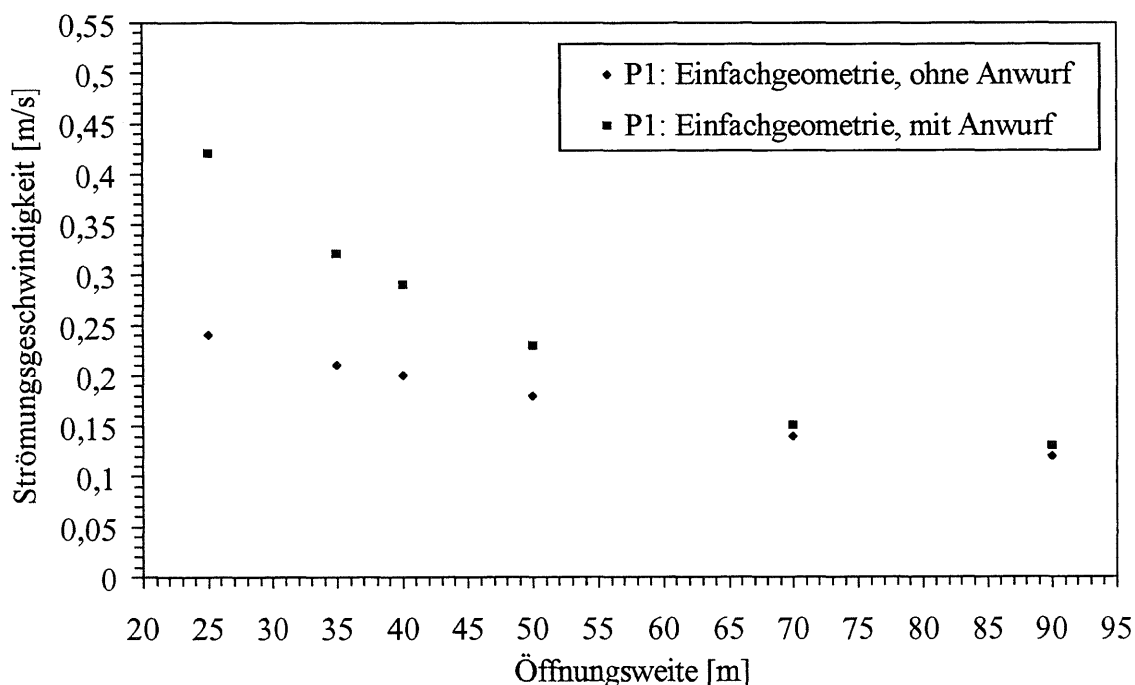


Abb. 8.18: Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung am Referenzpunkt P1 in der Öffnung des küstennahen Lahnungsfeldes (Einfachgeometrie) in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (Varianten ohne Gruppen)

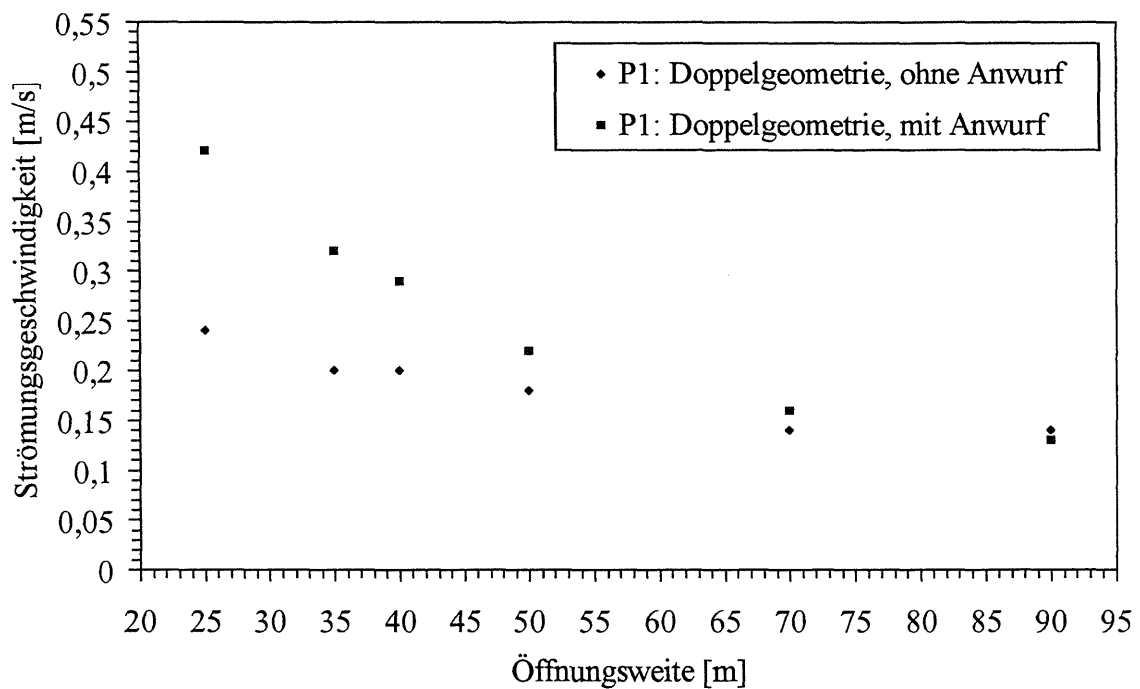


Abb. 8.19: Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung am Referenzpunkt P1 in der Öffnung des küstennahen Lahnungsfeldes (Doppelgeometrie) in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (Varianten ohne Gruppen)

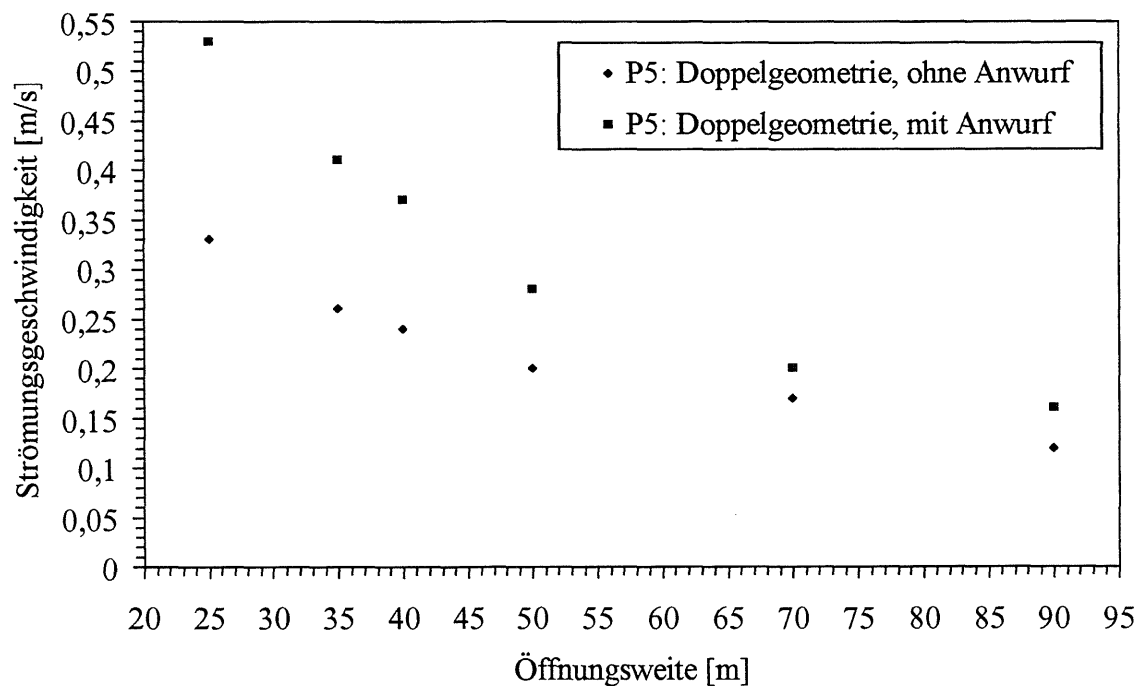


Abb. 8.20: Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung am Referenzpunkt P5 in der Öffnung des seeseitigen Lahnungsfeldes (Doppelgeometrie) in Abhängigkeit von der Öffnungsweite (Varianten ohne Gruppen)

8.4.3.3.4 Einfluß der Begrüppung

In Varianten mit Begrüppung läuft das ansteigende Wasser zunächst mit relativ hohen Fließgeschwindigkeiten in die Gräben und Gruppen ein. Vom Hauptentwässerungsgraben wird das einlaufende Wasser in die Querentwässerungsgräben und schließlich in die Gruppen geleitet. Nach Füllung der Gruppen verlieren diese ihren strömungsführenden Einfluß. Das Wasser verteilt sich dann relativ unregelmäßig über die Beete. Hierbei entsteht ein diffuser Strömungszustand. Bei der Beurteilung der dargestellten Untersuchungsergebnisse ist zu beachten, daß alle Referenzpunkte innerhalb von Gruppen liegen.

An den Referenzpunkten P1, P4, P5 und P8 treten bei auflaufender Tide höhere Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung auf als im Zustand ohne Gruppen (vgl. Anlagen 8-66 und 8-90 bzw. Anlagen 8-72 und 8-96). Hieraus kann geschlossen werden, daß Gruppen und Hauptentwässerungsgraben das frühzeitige Einlaufen des Wassers in das Lahnungsfeld erleichtern.

Nach Flutung der Gruppen stellt sich in allen Fällen ein den Varianten ohne Begrüppung nahezu entsprechender Strömungszustand ein. Dieser hebt sich erst wieder von dem ohne Begrüppung ab, wenn bei ablaufender Tide die Gruppen beginnen trockenzufallen.

Generell tragen Gruppen zur Verminderung von Walzenbildungen innerhalb der Lahnungsfelder bei, da sie den Aufbau eines am Füllstrom durch das Lahnungstor orientierten Strömungszustandes während der ersten Flutphase unterbinden und damit die Entstehung von Walzen erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist.

8.4.3.3.5 Einfluß des Anwurfs

Unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung zwischen den Varianten mit und ohne Anwurf ergeben sich nur für Fälle ohne Begrüppung. In diesen Varianten erhöhen sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung im Bereich der Lahnungsöffnungen (Referenzpunkte P1 und P5). Ab einer Öffnungsweite von ca. 70 m ist dieser Einfluß des Anwurfes nicht mehr erkennbar (vgl. Abb. 8.18, Abb. 8.19 und Abb. 8.20).

Die Füllung des Lahnungsfeldes kann bei Varianten mit Anwurf nur über die Lahnungsöffnung erfolgen. Die Strömungen im Lahnungsfeld können nicht mehr von den Strömungen durch die teildurchlässigen Lahnungen beeinflusst werden, sondern werden durch den Füllstrom bestimmt. Daher trägt der Anwurf maßgeblich zu Bildung von Walzen im Inneren der Lahnungsfelder bei. Die Walzen dehnen sich bei größerer Öffnungsweite stärker aus. Ihre Drehge-

schwindigkeiten nehmen zu, was sich in der Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung widerspiegelt (vgl. Anlagen 8-66 bis 8-71 mit Anlagen 8-90 bis 8-95).

8.4.3.3.6 Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie - Doppelgeometrie)

Die Anordnung eines zweiten Lahnungsfeldes hat auf die Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung des landseitigen Lahnungsfeldes (Feld 1) keinen Einfluß, wenn keine Begrüppung vorgenommen wurde. Sind keine Gruppen vorhanden, so entstehen im Feld 1 größere Strömungswalzen, die in den vergleichbaren Varianten der Einfachgeometrie nicht in dieser Stärke auftreten (vgl. z.B. Anlage 8-66 und Anlage 8-72). Dies äußert sich in höheren Strömungsgeschwindigkeiten in x-Richtung im Referenzpunkt P3.

Sind Gruppen vorhanden, so erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten in y-Richtung im landseitigen Lahnungsfeld der Doppelgeometrie am Referenzpunkt P1 in der Lahnungsöffnung auf das 3- bis 4-fache und am Referenzpunkt P4 in der Mitte des Feldes sogar bis auf das 10-fache (vgl. z.B. Anlage 8-89 und Anlage 8-95). Allerdings muß beachtet werden, daß die Punkte P1 und P4 im Hauptentwässerungsgraben liegen.

8.4.3.4 Seegangsverhältnisse

8.4.3.4.1 Allgemeines

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die in das hydrodynamische Modell übernommenen Varianten (Wellenhöhen $H = 10$ cm und Wellenperiode $T = 3$ s) beschrieben. In den Anlagen 8-37 bis 8-54 sind die Untersuchungsergebnisse für die Schnitte S1 und S2 exemplarisch für Einfachgeometrien (jeweils für die kleinste und größte Öffnungsweite) bzw. für Doppelgeometrien (ohne Anwurf/Gruppen für die kleinste und größte Öffnungsweite) dargestellt.

Die Wellen laufen parallel auf die (erste) Querlahnung zu. Durch das Lahnungsbauwerk wird die Wellenhöhe verringert. Nur durch die Öffnung laufen die Wellen mit nahezu gleichbleibender Höhe in das Lahnungsfeld ein. Die Wellenhöhe vermindert sich mit der Lauflänge in Richtung Ufer. Die Wellen werden an der Öffnung gebeugt, laufen in Richtung Ufer, steilen sich in diesem Bereich auf und brechen schließlich.

8.4.3.4.2 Einfluß der Öffnungsweite

Hinter der Lahnung bleibt die transmittierte Wellenhöhe in der Variante m_{01} mit enger Lahnungsöffnung bis zur Mitte des Lahnungsfeldes konstant, danach steigt sie wieder an. Dieser

Anstieg ist auf eine Überlagerung mit Wellen aus Diffraction und Reflexion zurückzuführen. Weiter zum Ufer hin nimmt die Wellenhöhe wieder ab.

Bei größeren Öffnungsweiten können die Wellen nahezu ungehindert in die Lahnung einlaufen. Das heißt, die Wellenhöhe vermindert sich erst beim Auftreffen auf das Ufer und die Bereiche hoher Wellen nahe der Lahnungsöffnung dehnen sich seitlich und in Richtung Ufer aus. Die Wellenbeugung an der Lahnungsöffnung hat bei größeren Öffnungsweiten einen geringeren Einfluß auf das Wellenbild im Lahnungsfeld.

Für Varianten mit Gruppen und Anwurf (z.B. Variante m_37 und m_42) hat die Öffnungsweite einen kaum wahrnehmbaren Einfluß auf die Wellenhöhen.

8.4.3.4.3 Einfluß der Begrüppung

Als Folge einer Begrüppung treten im Lahnungsfeld höhere Wellen auf. Beim Einlaufen in den Hauptentwässerungsgraben nimmt die Wellenhöhe in diesem Bereich ab.

Durch Gruppen können sich die im Bereich der Lahnungsöffnung gebeugten Wellen schneller im Lahnungsfeld entlang der Gruppen ausbreiten. Hinter der Lahnung nehmen die Wellenhöhen bei Varianten mit Begrüppung stärker zu als bei Varianten ohne Begrüppung.

Ohne die Anlage von Gruppen wird das Wellenspektrum merklich eingengt. So betragen die Wellenhöhen im Lahnungsfeld der Variante m_06 (keine Gruppen) durchgängig ca. 5 cm. In der Variante m_30 (mit Gruppen) liegen die Wellenhöhen im Lahnungsfeld zwischen 3 cm und 8 cm.

8.4.3.4.4 Einfluß des Anwurfs

Der Anwurf wurde bei diesen Untersuchungen als insgesamt undurchlässiges Lahnungsbauwerk angenommen. Dadurch wird für die hier eingesteuerten Wellenhöhen bei Einfachgeometrien bzw. bei Doppelgeometrien im landseitigen Lahnungsfeld eine Transmission durch die Lahnungsbauwerke verhindert.

Durch Reflexion am Lahnungsbauwerk entstehen seeseitig der Lahnung höhere Wellenamplituden.

Sind keine Gruppen vorhanden, so führt der Anwurf zu einer merklichen Dämpfung der Wellenhöhen hinter dem Lahnungsbauwerk.

8.4.3.4.5 Einfluß der Feldanzahl (Einfachgeometrie - Doppelgeometrie)

Wird eine zweite Lahnung vorgeschaltet (Doppelgeometrie), so reduzieren sich die Wellenhöhen im Feld 1 gegenüber denen in Varianten ohne vorgeschaltetes Lahnungsfeld.

Im zweiten Lahnungsfeld (seeseitiges Feld) nehmen die Wellenhöhen ab. Für eine Öffnungsweite von 25 m dämpft das seeseitige Lahnungsfeld die auflaufenden Wellen stark ab. Für Öffnungsweiten von 90 m ist dies nicht mehr erkennbar. Die durch das vorgeschaltete Lahnungsfeld erreichbare Dämpfung fällt bei den eingesteuerten Wellenhöhen mit 2,5 cm (bei Vergleich der Varianten m_01 und m_07) relativ gering aus.

8.4.3.5 Sedimentations- und Erosionsprozesse

8.4.3.5.1 Allgemeines

Die sich nach Ablauf einer Modelltide einstellenden Sedimentations- und Erosionsraten sind in den Anlagen 8-66 bis 8-113 dargestellt. Damit ist ein Vergleich jeder einzelnen Variante bzw. einen Vergleich mit den im Testgebiet „Ockholm“ erzielten Ergebnissen möglich.

Im folgenden sollen wiederum beispielhaft die Sedimentations- bzw. Erosionsprozesse für die beiden Fälle m_01 und m_07 beschrieben werden. Des weiteren werden die im Anhang dokumentierten Ergebnisse gezielt auf die in Taf. 8.5 beschriebenen Fragestellungen hin ausgewertet.

8.4.3.5.2 Darstellung der Varianten m_01 und m_07

Die Varianten m_01 und m_07 sollen im folgenden für ausgewählte Zeitschritte beschrieben werden. Durch einen Vergleich mit den in den Anlagen 8-26 bis 8-36 dargestellten Strömungszuständen können direkte Rückschlüsse auf das Sedimentations- bzw. Erosionsverhalten gezogen werden. Ein späterer Vergleich dieser grundlegenden Varianten (kein Anwurf, keine Gruppen) mit den entsprechenden Varianten mit Anwurf bzw. Gruppen erlaubt eine einfache visuelle Beurteilung der sich ergebenden Unterschiede im Sedimentations- und Erosionsverhalten.

Variante m_01:

Zeitschritt 11.00 Uhr (Anlage 8-55): Zu diesem frühen Zeitpunkt ist das Lahnungsfeld erst halb geflutet. Die Sedimentation ist jetzt kaum wahrnehmbar. Beachtenswert ist, daß sich im Bereich der Lahnungsöffnung kein Material ablagert.

dazwischenliegenden Varianten zeigen eine lineare Abnahme der Sedimentationsmenge auf die Werte für maximale Öffnungsweiten.

Bei allen untersuchten Varianten nimmt die Gesamtmenge sedimentierten Materials mit zunehmender Öffnungsweite ab.

Bei Einbau eines Anwurfes nimmt die Sedimentationsmenge im Vergleich zu Varianten ohne Anwurf ab. Diese Abnahme ist bei Varianten ohne Gruppen höher als bei Varianten mit Gruppen.

Die Begrüpfung der Felder führt bei den Varianten mit Anwurf zu einer Zunahme der Gesamtmenge sedimentierten Materials.

Fall	Öffnungsweite [m]	Feld 1	Feld 2
Einfachgeometrie, ohne Gruppen, ohne Anwurf			
m_01	25	2551	
m_06	90	2517	
Doppelgeometrie, ohne Gruppen, ohne Anwurf			
m_07	25	2149	2131
m_12	90	1990	2089
Einfachgeometrie, ohne Gruppen, mit Anwurf			
m_13	25	2087	
m_18	90	1739	
Doppelgeometrie, ohne Gruppen, mit Anwurf			
m_19	25	1893	1794
m_24	90	1621	1681
Einfachgeometrie, mit Gruppen, ohne Anwurf			
m_25	25	2435	
m_30	90	2169	
Doppelgeometrie, mit Gruppen, ohne Anwurf			
m_31	25	2278	2999
m_36	90	1851	2463
Einfachgeometrie, mit Gruppen, mit Anwurf			
m_37	25	3336	
m_42	90	3138	
Doppelgeometrie, mit Gruppen, mit Anwurf			
m_43	25	2475	2499
m_48	90	2185	2271

Taf. 8.11: Sedimentiertes Material [kg] nach Verlauf einer mittleren Tide

Bei der Anordnung eines zweiten Lahnungsfeldes werden die Sedimentationsmengen in Feld 2 hinzugewonnen. Die Sedimentationsmengen in Feld 1 der Doppelgeometrien liegen jedoch unterhalb der Werte vergleichbarer Einfachgeometrien, sofern keine Gruppen vorhanden sind.

8.4.3.6 Diskussion und Wertung der Ergebnisse

Die Simulation der Sedimentations- und Erosionsprozesse im Testgebiet „Ockholm“ basiert auf einer sich bei mittleren Tideverhältnissen einstellenden Strömungssituation. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde davon ausgegangen, daß diese mittleren Verhältnisse prägend für die Vorlandbildung im Bereich von Lahnungsfeldern und die in diesem Zusammenhang ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse sind. Die durchgeführten Untersuchungen erlauben somit eine generelle Einschätzung des Systemverhaltens bei mittleren Tideverhältnissen. Die zuvor beschriebenen Ergebnisse haben in diesem Zusammenhang eine hohe Aussagekraft, da ein Vergleich mit den Ergebnissen (Messungen in der Natur) im Testgebiet „Ockholm“ eine gute Übereinstimmung der grundlegenden Prozeßverläufe zeigt. Die Aussagefähigkeit dieses Naturmodell kann als gut eingestuft werden, da auf der Grundlage von drei verschiedenen Meßkampagnen geeicht wurde. Die bei allen drei Meßkampagnen erzielten Eichergebnisse waren durchaus zufriedenstellend. Die Abweichungen der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen betragen maximal 10% (im Mittel unter 5%).

Die vor den Lahnungsfelder erkennbaren Sedimentationsbereiche, insbesondere im Bereich der Lahnungsköpfe, sind aus den durchgeführten Geländeaufnahmen und sedimentologischen Untersuchungen des FTZ-Westküste allerdings nicht abzuleiten. Das mittlere Systemverhalten (wie hier für mittlere Tideverhältnisse betrachtet), wird durch Extremereignisse, mit unterschiedlichen Einflüssen auf die Sedimentation in und vor den Lahnungsfeldern, überlagert. Bei diesen Extremereignissen könnten die vor den Lahnungsfeldern zuvor abgesetzten Sedimentmengen erodiert werden. Innerhalb der Lahnungsfelder treten derartige Erosionen infolge der seegangsdämpfenden Wirkung der Lahnungsfelder nicht auf; es kommt infolge des höheren Schwebstoffgehaltes des Wassers in den Lahnungsfeldern sogar zu verstärkten Sedimentationen. Werden die Extremereignisse meßtechnisch nicht verfolgt, scheinen vor dem Lahnungsfeld keine Sedimentationen aufzutreten. Das ist jedoch nicht nachvollziehbar, weil auch hier die Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertiefen bei mittleren Tideverhältnissen so gering sind, daß Sedimentation potentiell auftreten kann. Auf einen Vergleich der Ergebnisse mit den über einen längeren Zeitraum durchgeführten sedimentologischen Messungen bzw. den Geländeaufnahmen wurde hier verzichtet, da eine reine Superposition des mittleren Systemverhaltens der Sedimentation, über z.B. ein Jahr, zu unzulässigen Aussagen des Gesamtsedimentationsverhaltens geführt hätte.

Der seegangsdämpfende Einfluß der Lahnungsbauwerke kann im numerischen Modell nachvollzogen werden. Dies wurde durch begleitende numerische Untersuchungen der physikalischen Versuche im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS, aus denen die Eingangswerte für Rauheitskoeffizienten und Transmissionskoeffizienten abgeleitet wurden, abgesichert. Der hier angewendete „*Elliptic Mild Slope*“-Ansatz ist jedoch in der Praxis grundsätzlich auf seine Anwendbarkeit hin zu überprüfen, um seine Einbeziehung in das Modell hinsichtlich der modellierbaren Sohlneigung sicherer zu machen.

Die angesetzten sedimentologischen Parameter wurden auf der Grundlage von Erfahrungswerten in ähnlich gelagerten Projekten und auf der Grundlage von Literaturwerten gewählt. Die aufgetretenen Abweichungen der berechneten Sedimentations- und Erosionsraten im Testgebiet „Ockholm“ von den in der Natur gemessenen können durch in der Natur vorhandene Küstenlängsströmungen und den sich infolgedessen einstellenden Küstenlängstransport begründet werden. Trotzdem ist es möglich, auf der Grundlage des aufgebauten numerischen Modells im Testgebiet „Ockholm“ den Einfluß der Lahnungsbauwerke auf den Sedimentations- bzw. Erosionsvorgang zu beurteilen. Bereiche hoher und niedriger Sedimentation/Erosion sind schlüssig und nachvollziehbar. Es kann davon ausgegangen werden, daß die zu beschreibenden Naturprozesse mit den angewandten Verfahren beschreibbar sind.

Aus dieser Übereinstimmung im Testgebiet „Ockholm“ kann geschlossen werden, daß die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie tendenziell auf beliebige Küstenabschnitte übertragbar sind. Das prinzipielle Systemverhalten kann aus dieser Studie abgeleitet werden.

Im Rahmen der Parameterstudie konnten grundlegende Fragestellungen beantwortet werden, die es dem Praktiker erlauben, eine sinnvolle Vorauswahl der Ausführungsvariante zu treffen. Bei allen untersuchten Varianten nimmt die Gesamtmenge sedimentierten Materials mit zunehmender Öffnungsweite ab, was auf das weniger behinderte Einlaufen des Seegangs zurückzuführen ist. Bei Einbau eines Anwurfes nimmt die Sedimentationsmenge im Vergleich zu Varianten ohne Anwurf ab, da die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die sedimentationsverzögernde Strömungsturbulenz im Lahnungsfeld zunehmen. Diese Abnahme der Sedimentationsmenge ist bei Varianten ohne Gruppen höher als bei Varianten mit Gruppen, da Gruppen im allgemeinen die Ausbildung von Walzen in den Lahnungsfelder behindern. Die seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungsfeldern hat einen großen Einfluß auf die im Feld ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse. Ihrer Berücksichtigung sollte in der Praxis besondere Aufmerksamkeit zukommen.

Mit den Ergebnissen der durchgeführten Parameterstudie stehen dem Praktiker erste Anhaltspunkte für die Vorauswahl einer den örtlichen Verhältnissen angepaßten Ausführungsvariante zur Verfügung. Es empfiehlt sich jedoch in jedem Fall der Einsatz eines numerischen Modells.

Mit Hilfe der angewandten Methodik können dann innerhalb kurzer Zeit optimierte Ausführungsvarianten konzipiert werden, die auf die örtlichen Bathymetrieverhältnisse, den einlaufenden Seegang im Projektgebiet und die vorhandenen sedimentologischen Randbedingungen angepaßt sind.

8.5 Übertragbarkeit auf andere Küstenabschnitte und Anwendbarkeit der numerischen Modellierung

Bei der Übertragung der dargestellten Untersuchungsergebnisse auf andere Küstenabschnitte sind in jedem Falle die örtlich stark variierenden Eingangsparameter (Bathymetrie, Tide- und Seegangsverhältnisse sowie sedimentologische Parameter) zu prüfen und anzupassen und mit den hier verwendeten Parametern zu vergleichen. Gerade im Bereich der sedimentologischen Parameter können geringfügige Abweichungen (Fraktionierung, mittlere Sinkgeschwindigkeit, kritische

Sedimentations- und Erosionsgeschwindigkeit, Sedimenteintrag in Betrag und Richtung) die resultierenden Sedimentations- und Erosionsraten stark beeinflussen. Der Erhebung der Grundlagendaten kommt somit eine besondere Bedeutung zu. Da die Sedimentation bzw. Erosion in Lahnungsfeldern langfristig zu betrachten ist, ist die Berücksichtigung von Extremereignissen wichtig. Für die letztendlich Auswahl der Bauweise, Anordnung und Ausgestaltung des Lahnungsfeldes dürfen sie keinesfalls vernachlässigt werden.

Die erzielten Ergebnisse sind teilweise mit den überlieferten Erfahrungswerten deckungsgleich (z.B. für die Wahl der Öffnungsbreite) und sichern diese zusätzlich ab. Teilweise widerlegen die Ergebnisse jedoch auch die bisher vorherrschenden Auffassungen über die sedimentologischen Auswirkungen eines Anwurfes, wenngleich die konstruktive Bedeutung außer Frage steht.

Die Auswirkungen verschiedener Lahnungsbauweisen können auf der Grundlage der vorliegenden Studie abgeschätzt werden und auch im Bereich anderer Küstenabschnitte prinzipiell angewendet werden. Sie können in diesem Zusammenhang u.a. als Grundlage für den Aufbau numerischer Modelle dienen, welche für die örtlichen Gegebenheiten Anhaltswerte für eine optimierte Anordnung und Gestaltung der Lahnungsfelder liefern können.

Die Beurteilung des Natursystems auf der Grundlage numerischer Modelle ist möglich. Die Anwendung derselben kann hier einen ersten Eindruck über das Systemverhalten liefern und so zu einer Optimierung der Küstensicherungsarbeiten beitragen. Eine weitere Verbesserung der eingeleiteten Maßnahmen kann dann auf der Grundlage eines Systemmonitorings bzw. durch die weitere Verfeinerung des numerischen Modells (Langfristanalyse, Extremereignisse, Abgleich mit langfristigen Naturmessungen) erreicht werden.

9 Zusammenfassung

Veranlassung und Aufgabenstellung

Ein bedeutendes Küstenschutzelement und ein ökologisch wertvoller Bereich des Küstenvorfeldes sind hohe und breite Vorländer mit einem flach geneigten Übergang zum Watt. Vorlandbildung kann durch die Anlage und Bewirtschaftung von Lahnungsfeldern beschleunigt werden. Für die Gestaltung von Lahnungsfeldern, für die Bemessung und den Aufbau der Lahnungen und für die Bearbeitung des Anwachsens in den Lahnungsfeldern werden seit rd. 200 Jahren an der deutschen Nordseeküste vor allem praktische, oft ortsspezifische Erfahrungen herangezogen. Für eine Optimierung der Vorlandgewinnung mit Lahnungen fehlt bisher eine wissenschaftliche Analyse der hydromechanisch-morphologischen Wechselwirkungen in den Lahnungsfeldern. Im Rahmen des Forschungsvorhabens des KFKI „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ sollten deshalb mit wissenschaftlichen Methoden Grundlagen für einen effektiven Einsatz von Lahnungen für die Vorlandbildung erarbeitet werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens, das vom BUNDESMINISTER FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF; ehemals: BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMFT)) gefördert wurde, wurde unter Federführung des LANDESAMTES FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (LANU; ehemals: LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN) vom FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der UNIVERSITÄT HANNOVER das Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ bearbeitet.

Aufgabe des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“, war es, neben einem Literaturstudium zu den Themenkomplexen „Lahnungen/Lahnungsfelder“ und „hydrologisch-morphologische Wechselwirkungen an kohäsiven Wattböden“, die in Lahnungsfeldern unter bestimmten Randbedingungen auftretenden Strömungs- und Seegangsbedingungen zu erfassen und die hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen zu beurteilen. Die Strömungs- und Seegangsverhältnisse wurden mit den Modulen „*Hydro-Dynamic* (HD) Module“ und „*Elliptic-Mild-Slope* (EMS) Module“ des am Institut vorhandenen Standardsoftwarepaketes MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI) simuliert, ausgewertet und interpretiert. Detailuntersuchungen zum Verständnis der hydrodynamischen Wechselwirkungen am Bauwerk einer Lahnung wurden in physikalischen Modellen durchgeführt.

In zwei eigens für das Forschungsvorhaben durch die ÄMTER FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ÄLW) HEIDE und HUSUM eingerichteten Testgebieten an der Westküste Schleswig-Holsteins wurden im Bereich der dort im Herbst 1993 bzw. Frühjahr 1995 angelegten Lahnungsfelder topographische Messungen sowie Seegangs- und Strömungsmessungen

von den ÄLW HEIDE und HUSUM durchgeführt. Die Seegangsmessungen wurden von der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (FSK) des NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR ÖKOLOGIE NORDERNEY (NLÖ) ausgewertet. In Verbindung mit diesen Messungen in der Natur, die durch das FRANZIUS-INSTITUT analysiert wurden, und den durch das FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEZENTRUM (FTZ) WESTKÜSTE der CHRISTIAN-ALBRECHT-UNIVERSITÄT ZU KIEL durchgeführten morphologisch/sedimentologischen Untersuchungen in den beiden Testgebieten wurden mit dem Modul „*Mud Transport* (MT)“ des DHI-Softwarepaketes zu erwartende Erosions- und Sedimentationsvorgänge numerisch simuliert und im Hinblick auf vergleichende Aussagen bei unterschiedlichen Lahnungsgeometrien, baulichen Ausführungen sowie hydrodynamischen Randbedingungen analysiert.

Analyse von Meßdaten aus der Natur

Im Teilprojekt „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ wurden im nördlicheren der beiden Testgebiete (Testgebiet „Ockholm“) im Verlauf des Projektes insbesondere in den Monaten Dezember 1994 bis März 1995 und August/September 1995 aufgezeichnete Strömungs- und Seegangsdaten in Verbindung mit zur Verfügung stehenden Pegel- und Winddaten sowie topographischen Informationen ausgewertet.

Die Auswertung von Strömungsmeßdaten war wesentliche Grundlage der Kalibrierung der eingesetzten numerischen Modelle. Während der Meßkampagne herrschten im wesentlichen mittlere Tideverhältnisse und Winde, die nahezu senkrecht auf die im Testgebiet angeordneten 1 x 2 bzw. 2 x 2 Lahnungsfelder (Größe: jeweils rd. 200 m x 200 m) trafen. Die Auswertung der Strömungsmessungen zeigte erwartungsgemäß bei steigender und fallender Tide maximale und um die Kenterzeit nahezu konstante, geringere Strömungsgeschwindigkeiten. Auf der Wattfläche vor den Lahnungsfeldern traten Strömungsgeschwindigkeiten im Mittel von ca. 0,04 m/s bis ca. 0,08 m/s auf. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten betragen bis zu rd. 0,22 m/s.

Analog zur Windrichtung strömte Wasser im wesentlichen senkrecht auf die Lahnungsfelder zu, wurde durch die Hauptentwässerungsgräben in die seeseitigen Felder geführt und von dort weiter mit gleicher Richtung in die deichnahen Felder. Die Einströmung in die Lahnungsfelder wurde während der Messungen zuerst an den in den Hauptentwässerungsgräben liegenden Meßpositionen verzeichnet, noch bevor die Wattflächen geflutet wurden. Das einströmende Wasser wird zunächst durch die Hauptentwässerungsgräben in die Felder geführt. Erst später werden die seeseitigen Felder geflutet, und nach ca. einer weiteren halben Stunde die deichnahen Felder.

Im Rahmen der Auswertung der Seegangsdaten aus den Untersuchungsmonaten wurden u.a. die Zeitbereichsparameter H_s (= $H_{1/3}$) und T_{Hs} (= $T_{H1/3}$) bzw. H_{max} und T_{Hmax} analysiert. Hier

zeigte sich eine Konzentration der signifikanten Wellenperioden auf einen Bereich von 1,8 s bis 5,3 s und der am häufigsten aufgetretenen Wellenhöhen zwischen 0,05 m und 0,17 m.

Ergebnisse der Zuordnung von Wasserständen zu den Wellenhöhen belegen im wesentlichen eine lineare Zunahme der signifikanten und maximalen Wellenhöhen mit der Wassertiefe. Die Wasserstände in den betrachteten Monaten lagen zwischen rd. 0,50 m unter MThw und 1,85 m über MThw. Sturmfluten mit Tidehochwasserständen oberhalb MThw + 1,50 m wurden nur während wenigen Tiden Anfang Januar 1995 registriert. Zwischen dem Verlauf der Tidekurve und dem der Wellenhöhen ist eine strenge Korrelation zu verzeichnen.

Eine Zuordnung von Wind- und Seegangsdaten läßt eine Beanspruchung des sich bildenden Vorlandes infolge Seegangs im Testgebiet "Ockholm" erst ab Windstärken von 4 Bft (ca. 5,5 m/s bis 7,9 m/s) aus vorwiegend südwestlicher Richtung erkennen. Die Wellenhöhe nimmt mit ansteigender Windgeschwindigkeit zu. Bei 6 Bft (ca. 12 m/s) wird eine maximale Wellenhöhe von 0,40 m nur selten überschritten, bei 7 Bft bis 8 Bft (ca. 14 m/s bis 20 m/s) liegt sie zwischen 0,40 m und 0,90 m. Prinzipiell gleich verhalten sich die signifikanten Wellenhöhen, sie liegen jedoch bei 6 Bft (ca. 12 m/s) unterhalb von 0,25 m und erreichen im Bereich zwischen 7 Bft bis 8 Bft (ca. 14 m/s bis 20 m/s) bis zu 0,60 m. Der zeitabhängige Verlauf der Windintensitäten entspricht im allgemeinen dem der Wellenhöhen und Wassertiefen.

Mit dem Ziel, vor und innerhalb von Lahnungsfeldern den Energiefluß bei unterschiedlichen Wetterbedingungen zu berechnen, wurde dieser für einzelne Tidezyklen für zwei nebeneinander angeordnete Lahnungsfelder ermittelt. Für die ausgewählten Beispiele zeigt sich, aufgetragen über die Zeit, eine mehr oder weniger deutliche Energiereduzierung durch das Lahnungsbauwerk in Abhängigkeit vom Wasserstand: Die Energien an den Meßpositionen innerhalb von Lahnungsfeldern sind vergleichsweise geringer als die vor den Feldern. Prozentual werden die Energien im Fall mittlerer Tiden und geringer Seegangsbelastung bis zu rd. 55% reduziert. Die maximale Energiereduzierung im Fall der ausgewählten Sturmflut ist vergleichsweise größer als bei erhöhten Tidewasserständen und im Mittel höheren Wellen. Während die Energie im Fall der Sturmflut in der Regel reduziert wird, sind während erhöhter Wasserstände keine Energiereduzierungen im Lahnungsfeld zu verzeichnen. Hier kann das Lahnungsbauwerk also keinen energiemindernden und für das Sedimentationsverhalten im Feld entscheidenden Einfluß mehr ausüben.

Im allgemeinen ist zwar eine Zunahme der Wellenenergie mit steigenden Tidewasserständen zu verzeichnen, jedoch ist sie im wesentlichen von der Wellenhöhe abhängig. Bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“ wurde darauf hingewiesen, „daß der Energiegehalt von Wellen nicht linear, sondern vielmehr exponentiell mit der Wellenhöhe

ansteigt“, so daß „die Hellekante und -oberfläche bereits bei einer nur geringen Zunahme der Wellenhöhe erheblich stärker belastet“ wird (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 49).

Aus dem Verhältnis der Wellenhöhen an den Meßpositionen in den Lahnungsfeldern zu den Wellenhöhen der Meßpositionen vor den Querlahnungen wurde der Dämpfungsgrad der Wellen, der durch den Transmissionskoeffizienten beschrieben werden kann, in Abhängigkeit von der Wassertiefe ermittelt. Die Auswertung zeigt, ähnlich wie die Ergebnisse der Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ bzw. „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der Deutschen Bucht“, daß ab einer bestimmten Wassertiefe der Seegang durch die Lahnungen nur noch unwesentlich oder nicht mehr gedämpft werden kann und die Wellenhöhen sogar im Feld höher als außerhalb sein können. Im Bereich der geringeren Wassertiefen verläuft der Transmissionskoeffizient mit rd. 30% beginnend, etwa linear, nach der genannten „Grenzwassertiefe“ im wesentlichen konstant. Dies gilt sowohl für die maximalen als auch die signifikanten Wellenhöhen.

Die zum Zeitpunkt der Messungen vorhandenen Lahnungen mit einer Höhe von rd. 0,70 m für Wasserstände oberhalb MThw + 0,70 m können für die Situation im Testgebiet „Ockholm“ als nicht wirksam eingestuft werden. Hier ist jedoch anzumerken, daß Wasserstände oberhalb MThw + 0,50 m für die ausgewerteten Tidephasen lediglich in 23 von 100 Tiden auftraten.

Untersuchungen in physikalischen Modellen

Im Rahmen der physikalischen Untersuchungen des Teilprojektes „Wellenuntersuchungen in Modell-Lahnungen“ wurde zunächst in einer Strömungsrinne das Durchströmungsverhalten einer Buschlahnung mit und ohne seitlichen Anwurf im Maßstab 1:1 untersucht. In einem weiteren Schritt wurden die Nadelholzfaschinen im Zwischenraum der Buschlahnung durch den Einbau von definierten Filtern mit einer Lang- bzw. Rundlochung schematisiert, so daß in Abhängigkeit vom Wasserstand (bzw. vom Durchfluß) vor der Lahnung eine Ermittlung der Größenordnung des Porositätsbeiwertes als Eingangsparemeter für die numerischen Simulationen möglich wurde. Der Porositätsbeiwert wurde zu rd. 20% bestimmt.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Versuche mit einer Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf, mit einem seitlichen Anwurf von 0,17 m Höhe und einem Anwurf von 0,30 m Höhe zeigt, daß für die Lahnung mit einem Anwurf von 0,17 m Höhe im Vergleich zur Lahnung ohne Anwurf nur geringfügige Abweichungen im Strömungsverhalten eintreten. Der Anwurf von 0,30 m Höhe hingegen erhöht den Durchströmungswiderstand der Lahnung in der Art, daß der Wasserstand im Unterwasser deutlich reduziert wird und die Strömungsgeschwindigkeit im Unterwasser zunimmt. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß lokale Strömungsspitzen Ursache für Auskolkungen im Bereich von Buschlahnungen sind.

Untersuchungen zum Transmissionsverhalten von Buschlahnungen wurden im Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS am Schneiderberg (WKS) analog zu den Durchströmungsversuchen in der Strömungsrinne und unter Berücksichtigung der ausgewerteten Seegangsdaten im Maßstab 1:1 durchgeführt. Bei variablen Wasserständen und Seegangsbedingungen wurden die Parameter

- Bauwerksbreite B
- Relative Bauwerkshöhe h/d (h = Bauwerkshöhe, d = Wassertiefe)
- Grad der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom gewählten Füllmaterial bzw. einem seitlichen Anwurf

variiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß für den Bereich der untersuchten Wasserstände bis 0,60 m über der Bauwerkskrone Buschlahnungen in ihrer Konstruktion als wirkungsvoll bezüglich der Seegangsdämpfung beurteilt werden können. Die zusätzliche Analyse von Meßdaten aus der Natur belegt, daß eine Anordnung der Lahnungskrone oberhalb MThw als in der Praxis sinnvoll zu erachten ist.

Mit zunehmender Breite des Lahnungsbauwerkes kann der Transmissionskoeffizient im Bereich von Wasserständen unterhalb der Lahnungsoberkante wirkungsvoll reduziert werden. Im Hinblick auf eine praktische Realisierbarkeit sind insbesondere Aspekte der Wirtschaftlichkeit sowie der Sicherung des Lahnungsbauwerkes gegen die infolge zunehmender Bauwerksbreite wachsende Gefahr des Aufschwimmens der Lahnung zu berücksichtigen (vgl. HINRICHS, 1931, S. 68).

Mit Rauhpunddielen gedichtete Buschlahnungen, wie sie häufig in Ostfriesland zu finden sind, können auf Grundlage der durchgeführten Versuche mit 0,40 m hohen Lahnungen – also beispielsweise bereits stark verlandete Lahnungen – im Bereich von Wasserständen bis zu rd. 0,30 m über der Lahnungsoberkante als wirkungsvoller als die nicht gedichteten Lahnungen eingeschätzt werden. Für höhere Wasserstände zeigen beide Varianten vergleichbare Ergebnisse, und keine der beiden Varianten kann im Hinblick auf die Reduzierung des Seegangs begründet bevorzugt werden.

Die Wirkung eines seitlichen Anwurfs an die Buschlahnung konnte nur in begrenztem Umfang untersucht werden. Es zeichnet sich für die untersuchten Wasserstände jedoch ab, daß die Buschlahnung ohne seitlichen Anwurf im Vergleich zur Buschlahnung mit seitlichem Anwurf bezüglich der Seegangsdämpfung als wirkungsvoller einzuschätzen ist. Hierbei wurde der stabilisierende und der Buschlahnung Standsicherheit verleihende Aspekt sowie der Einfluß eines

seitlichen Anwurfes auf die Strömungsgeschwindigkeiten, welche für den Transport von Sedimenten in Lahnungsfeldern von Bedeutung sind, nicht berücksichtigt.

Das Hauptaugenmerk der dreidimensionalen Seegangsuntersuchungen an einem Ausschnitt einer im Originalmaßstab eingebauten Buschlahnung im Wellenbecken wurde auf ein im Rahmen der numerischen Untersuchungen aufgetretenes Phänomen gerichtet: Die Ergebnisse der Simulation seegangsinduzierter Strömungen für tideabhängige Wassertiefen zeigten auf die Lahnungen gerichtete Strömungsvektoren, also einen Einströmvorgang durch die Lahnungen hindurch, während die Vektoren in der Öffnung der Lahnung seewärts zeigen. Das geschilderte Phänomen konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen beobachtet und bestätigt werden (vgl. PILARCZYK/ZEIDLER, 1996, S. 21).

Die Untersuchungen im Wellenbecken mit dem Ausschnitt eines im Maßstab 1:1 nachgebildeten naturnahen Lahnungsfeldes zeigen, daß das seegangsinduzierte Strömungsverhalten in Lahnungsfeldern, insbesondere im Bereich der Lahnungsöffnung unter Annahme vereinfachter Randbedingungen mit dem eingesetzten Modul „*Elliptic-Mild-Slope (EMS)*“ des Softwarepaketes MIKE21[®] des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI) wiedergegeben werden kann.

Neben den o.g. theoretischen Vorarbeiten und den Untersuchungen in physikalischen Modellen, wurden numerische Untersuchungen der Sedimentations- und Erosionsprozesse in Lahnungsfeldern durchgeführt.

Simulationen in numerischen Modellen

Die Simulation der Sedimentations- und Erosionsprozesse wurde zunächst für das Testgebiet „Ockholm“ durchgeführt. Sie basiert auf einer sich bei mittleren Tideverhältnissen einstellenden Strömungssituation, die als prägend für die Vorlandbildung im Bereich von Lahnungsfeldern angenommen wurde. Wie der Vergleich mit vorliegenden Meßergebnissen zeigte, kann die Aussagefähigkeit dieses Naturmodells als gut eingestuft werden (Abweichungen der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen betragen maximal 10% - im Mittel unter 5%). Die vor den Lahnungsfelder erkennbaren Sedimentationsbereiche, insbesondere im Bereich der Lahnungsköpfe, sind aus den Untersuchungen des FTZ-WESTKÜSTE nicht abzuleiten. Es ist zu vermuten, daß das mittlere Systemverhalten durch Extremereignisse überlagert wird. Trotzdem ist es möglich auf der Grundlage des aufgebauten numerischen Modells im Testgebiet „Ockholm“ den Einfluß der Lahnungsbauwerke auf den Sedimentations- bzw. Erosionsvorgang zu beurteilen. Bereiche hoher und niedriger Sedimentation/Erosion sind schlüssig und nachvollziehbar. Es kann davon ausgegangen werden, daß die zu beschreibenden Naturprozesse mit den angewandten Verfahren beschreibbar sind.

Aus dieser Übereinstimmung im Testgebiet „Ockholm“ wurde geschlossen, daß die Ergebnisse der anschließend durchgeführten Parameterstudie tendenziell auf andere Küstenabschnitte übertragbar sind, sofern die Randbedingungen den örtlichen Gegebenheiten angepaßt werden.

Im Rahmen der Parameterstudie konnten grundlegende Fragestellungen beantwortet werden, die es dem Praktiker erlauben, eine sinnvolle Vorauswahl der Ausführungsvariante zu treffen. Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen wurden die maßgebenden Systemparameter (Einbau einer Einfachgeometrie bzw. Doppelgeometrie, Öffnungsbreite stufenweise von 25 m bis 90 m, Varianten mit und ohne Grüppen, Varianten mit und ohne Anwurf) verändert. Als Bathymetrie wurde eine mit 1:800 geneigte Fläche angenommen, was den natürlichen Verhältnissen in Wattgebieten in etwa entspricht.

Bei allen untersuchten Varianten nimmt die Gesamtmenge sedimentierten Materials mit zunehmender Öffnungsweite ab, was auf das ungehinderte Einlaufen des grundsätzlich sedimentationshemmenden Seegangs zurückzuführen ist. Bei Einbau eines Anwurfes nimmt die Sedimentationsmenge im Vergleich zu Varianten ohne Anwurf ab, da die Strömungsgeschwindigkeiten im Lahnungsfeld zunehmen. Diese Abnahme der Sedimentationsmenge ist bei Varianten ohne Grüppen höher als bei Varianten mit Grüppen, da Grüppen im allgemeinen die Ausbildung von Walzen in den Lahnungsfelder behindern. Die seegangsdämpfende Wirkung von Lahnungsfeldern hat einen großen Einfluß auf die im Feld ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse. Ihrer Berücksichtigung sollte in der Praxis besondere Aufmerksamkeit zukommen.

Das prinzipielle Systemverhalten kann aus dieser Studie abgeleitet werden. Mit den Ergebnissen stehen dem Praktiker Anhaltspunkte für die Auswahl einer den örtlichen Verhältnissen angepaßten Ausführungsvariante zur Verfügung. Es empfiehlt sich jedoch in jedem Fall der Einsatz eines erfolgreich erprobten numerischen Modells, insbesondere dann, wenn die für dessen Aufbau benötigten Daten zur Verfügung stehen. Mit Hilfe der angewandten Methodik können dann innerhalb kurzer Zeit optimierte Ausführungsvarianten konzipiert werden, die auf die örtlichen Bathymetrieverhältnisse, den einlaufenden Seegang im Projektgebiet und die vorhandenen sedimentologischen Randbedingungen angepaßt sind.

Um das Systemverhalten von Lahnungsfeldern bzgl. der in ihnen ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse auch für längere Zeiträume (Langzeitverhalten) voraussagen zu können, bedarf es zukünftig weitergehender Untersuchungen. Ziel dieser Untersuchungen muß es sein, den Einfluß von Extremereignissen (Starkwindereignisse) und die Auswirkungen von Eisgang abschließend zu klären.

Die Optimierung der Feldgröße in natürlichen Systemen unter verschiedenartigen Randbedingungen muß ebenfalls Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten sein. In diesem Zusam-

menhang ist dem Transport und dem Absetzverhalten der kohäsiven Sedimente besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Die Einbindung der in Lahnungsfeldern lokal ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozesse in den regionalen Sedimentkreislauf ist mit Hilfe numerischer Modelle zu untersuchen, um die Möglichkeiten einer den ökologischen Rahmenbedingungen angepaßten Vorlandentwicklung abschätzen zu können.

Diese Ziele können durch eine Anpassung und gezielte Erweiterung der Meßprogramme erreicht werden, die auf den im KFKI-Forschungsvorhaben „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ vorgestellten Ergebnissen aufbauen.

10. **Schrifttum**

10.1 **Schrifttum zu Kapitel 3**

1. Abrahamse, J. et al. Wattenmeer.
Ein Naturraum der Niederlande, Deutschlands und Dänemarks.
4. Aufl., Wachholtz Verlag, Neumünster, 1984.
2. Alexis, A. et al. Consolidation des Sediments cohesifs: Unification des Theories, Modelisation Numerique et Experitations In situ.
Collection de Notes internes de la Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France (EDF), 1993.
3. Arbeitsgemeinschaft Grundlagen für den Artenschutz.
Deutscher Beauftragter Jahrbuch für Naturschutz und Landschaftspflege, Bd. 30,
für Naturschutz und 1980.
Landschaftspflege
(Hrsg.)
4. Bakker, J.P. Strategies for Grazing Management on Salt Marshes.
Wadden Sea Newsletter, H. 1, 1993, S. 8-10.
5. Blindow, H. Frieslands Salzwiesen. Bedeutung und Schutz.
C.L. Mettcker & Söhne, Vertriebs- und Verlagsgesellschaft
mbH, Jever, 1987.
6. Bothmann, W. Die Bedeutung der Landgewinnungsarbeiten für den Küsten-
schutz an der Nordsee.
Landwirtschaftlicher Wasserbau, H. 6, 7 und 8, Beilage der
Zeitschrift Deutsche Wasserwirtschaft 46, 1941.
7. Brahms, A. Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst.
2. verb. Aufl., Aurich, 1754.
8. Brongers, M. et al. Der Einfluß unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf die
Salzwiesenvegetation in der Leybucht (Niedersachsen).
Natur und Landschaft, Jg. 65, H. 6, 1990, S. 311-314.
9. Coldewey, H.-G. Deichvorland: Seine Entwicklung zwischen Ems und Jade und
Erchinger, H.F. die Untersuchungen im Forschungsvorhaben „Erosionsfestig-
keit von Hellern“.
Die Küste, H. 54, 1992, S. 169-187.
10. Der Rat von Sachver- Umweltprobleme der Nordsee.
ständigen für Umwelt- Sondergutachten.
fragen (SRU) Kohlhammer Verlag, Stuttgart und Mainz, 1980.

11. Dieckmann, R. Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Hannover, H. 60, 1985, S. 133-361.
12. Dieckmann, R. Bedeutung und Wirkung der Deichvorländer für den Küstenschutz.
In: Kempf, N. et al. (Red.): Salzwiesen, geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur?, Tagungsbericht 1, WWF-Deutschland, 2. Aufl., 1988, S. 163-187.
13. Dijkema, K.S. et al. Effecten von rijzendammen op opslibbing en omvang van de vegetatiezones in de Friese en Groninger landaanwinningwerken.
Rijkswaterstaat, Directie Groningen, Nota GRAN, 1988, S. 1988-2010.
14. Dijkema, K.S. et al. Possibilities for the Wadden Sea Marshes to Survive Future Sea-Level Rise.
In: Ovesen, C.H.: Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region, Rømø, Denmark, 10. - 13. October 1989, Ministry of the Environment. The National Forest and Nature Agency, 1990a, S. 125-145.
15. Dijkema, K.S. et al. Salt Marshes in the Netherlands Wadden Sea: Rising High Tides and Accretion Enhancement.
In: Beukema, J.J., Wolff, W.J. & Brouns, J.J.W.M.: Expected Effects of Climatic Change on Marine Coastal Ecosystems, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1990b, S. 123-131.
16. Dijkema, K.S. et al. Experiment natuurbeheer rijkslandaanwinningwerken: samenvatting van de onderzoeksresultaten en jaarverslag over 1989 en 1990.
Rijkswaterstaat, Directie Groningen, Nota GRAN, 1990c, S. 1990 - 2006.
17. Dockhorn, U. Vorland: Ökologie, Entstehung und Bedeutung im Nordfriesischen Wattenmeer.
ALW Husum, o.Jg.
(unveröffentlicht)
18. Dolder, W.
Dolder, U. Nordseeküste und Wattenmeer
Naturparadiese Europas 2.
Lingen Verlag, Köln, 1988.
19. Eckman, J.E. et al. Sediment Destabilization by Animal Tubes.
J. Mar. Res., H. 39, 1981, S. 361-374.

20. Ehlers, J. Geomorphologie und Hydrologie des Wattenmeeres.
In: Lozán, J.L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer,
Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 1994, S. 1-11.
21. Engel, H. Über die Landgewinnung im Wattengebiet.
Dissertation.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover,
Hannover, H. 22, 1963, S. 1-93.
22. Erchinger, H.F. Küstenschutz durch Vorlandgewinnung, Deichbau und Dei-
cherhaltung in Ostfriesland.
Die Küste, H. 19, 1970.
23. Erchinger, H.F. Landgewinnung und Lahnungsbau im Wattgebiet.
Die Küste, H. 21, 1971.
24. Erchinger, H.F. Vorlandsicherung.
In: Brößkamp, K.H.: Seedeichbau in Theorie und Praxis.
Vereinigung der Naßbaggerunternehmen e.V., Hamburg,
1976, S. 446-473.
25. Erchinger, H.F. Vorlandgewinnung und Sicherung.
In: Bretschneider, H. et al.: Taschenbuch der Wasserwirt-
schaft, 6. Aufl., Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin,
1982, S. 699-701.
26. Erchinger, H.F. et al. Erosionsfestigkeit von Hellern.
Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473,
Norden, 1994.
(unveröffentlicht).
27. Erchinger, H.F. et al. Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im For-
schungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“.
Die Küste, H. 58, 1996, S. 1-45.
28. Esselink, P. „Nature Management“ auf Festlandsalzwiesen: Beurteilung
aus 10-jähriger Erfahrung im Dollard.
Vortragskurzfassung zum Workshop „Deichvorlandsicherung
und Salzwiesenmanagement“, Norden, 1995.
(unveröffentlicht).
29. Fachnormenausschuß Baugrund und Grundwasser: Benennen und Beschreiben von
Wasserwesen (FNW) Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne
im deutschen Normen- durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden
ausschuß (DNA) und im Fels.
DIN 4022, 1987.
30. Fager, E.W. Marine Sediments: Effects of a Tube-Building Polychaete.
Science, H. 143, 1964, S. 356-359.

31. Fahse, H. Modellversuch für die Landgewinnung.
Technische Hochschule Hannover, Hannover, o.Jg.
(unveröffentlicht).
32. Fiege, M.
Lass, B. Analyse der Vorlandentwicklung im Gebiet des heutigen
Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koogs.
Studienarbeit am Franzius-Institut für Wasserbau und Kü-
steningenieurwesen, Universität Hannover, Hannover, 1995.
(unveröffentlicht)
33. Fiege, M. et al. Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und
Entwässerungssysteme.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover,
Hannover, H. 78, 1996, S. 209-353.
34. Führböter, A. Küstenschutz auf neuen Wegen.
Zeitschrift VDI, Nr. 8, 1974, S. 579-666.
35. Führböter, A. Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei
Sandwatten.
Wasser & Boden, H. 3, 1983, S. 106-116.
36. Gönnert, G.
Ferk, U. Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von
Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe.
In: Sterr, H./Preu, C. (Hrsg.): Beiträge zur aktuellen Küsten-
forschung, Aspekte – Methoden – Perspektiven, Vechtaer
Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissen-
schaft (VSAG), Bd. 18, 1996, S. 13-31.
37. Grumblat, J.-D. Auswirkungen von Beweidungsformen und Mahd auf Sedi-
mentation und Erosion.
In: Kempf, N. et al. (Red.): Salzwiesen: Geformt von Küsten-
schutz, Landwirtschaft oder Natur? 2. Aufl., Tagungsbericht
1, WWF-Deutschland, 1988, S. 189-213.
38. Haber, B. Über den Erosionsbeginn bei der Überströmung von flexiblen
Rauhigkeitselementen.
Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der
Technischen Universität Braunschweig, H. 74, Braunschweig,
1982.
39. Hagen, G. Handbuch der Wasserbaukunst.
2. Aufl., Bd. 1, Teil 3, Berlin, 1878.
40. Heinzelmann, C. Hydraulische Untersuchung über den Einfluß benthischer
Diatomeenfilme auf Strömungswiderstand und Transportbe-
ginn ebener Sandsohlen.
Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik,
Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt,
Darmstadt, H. 48, 1992.

41. Heiser Landerhaltung und Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste.
Bautechnik, Jg. 11, H. 13 und Jg. 11, H. 27, Berlin, 1933.
42. Heydemann, B. Die biologische Grenze Land-See im Bereich der Salzwiesen.
Franz Steiner Verlag GmbH, Wiesbaden, 1967.
43. Heydemann, B. Das Ökosystem „Küsten-Salzwiese“ – ein Überblick.
Faunistisch-Ökologische Mitteilungen, H. 5, 1983/84.
44. Heydemann, B. Müller-Karch, J. Biologischer Atlas Schleswig-Holstein.
Wachholtz, Neumünster, 1980.
45. Hinrichs, W. Nordsee-Deiche, Küstenschutz und Landgewinnung.
Husum, 1931.
46. Hoffmann, B. Vergleichende Benthosuntersuchungen in den Entwässerungsgräben unterschiedlich genutzter Salzwiesen in Ostfriesland.
Diplomarbeit am Institut für Zoologie der Universität Hohenheim, 1984.
(unveröffentlicht)
47. Hofstede, J.L.A. Zusammenfassungen aus der niederländischen Vorlandliteratur: Lahnungsfelder und Grüppmethoden.
Tischvorlage für die KFKI-Arbeitsgruppensitzung „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Tidegebiet“ am 27.01.1992 im BSH, Hamburg.
Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holsteins, Kiel, 1992.
(unveröffentlicht)
48. Hofstede, J.L.A. Systemanalyse der Salzwiesen im Wattenmeer von Schleswig-Holstein.
In: Sterr, H./Preu, C. (Hrsg.): Beiträge zur aktuellen Küstenforschung, Aspekte – Methoden – Perspektiven, Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft (VSAG), Bd. 18, 1996, S. 53-64.
49. Hofstede, J.L.A. Schirmacher, R. Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein.
Die Küste, H. 58, 1996, S. 61-73.
50. Horn, R. Zhang, H. Untersuchungen zur Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien.
Zwischenbericht 1992.
Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung und Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ, Büsum) der Universität Kiel, 1992.
(unveröffentlicht)

51. Horn, R.
Zhang, H. Untersuchungen zur Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. Zwischenbericht 1993. Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung und Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ, Büsum) der Universität Kiel, 1993. (unveröffentlicht)
52. Horn, R.
Zhang, H. Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein. Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung und Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ, Büsum) der Universität Kiel, 1995. (unveröffentlicht)
53. Houwing, E.J. et al. Salt Marshes and Sea Level Rise: Plant Dynamics in Relation to Accretion Enhancement Techniques. Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, IMAU-report R95-27, Utrecht, 1995.
54. Irmeler, U. et al. Auswirkungen von Beweidungsformen und Mahd auf Sedimentation und Erosion. In: Kempf, N. et al. (Red.): Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur? 2. Aufl., Tagungsbericht 1, WWF-Deutschland, 1988, S. 243-254.
55. Janke, K.
Kremer, B.P. Das Watt. Kosmos Naturführer, Franckh-Kosmos-Verlag, Stuttgart, 1990.
56. Kambeck, W. Küstenschutz der Marschen in Nordfriesland. Sonderdruck aus „Allgemeine Bauzeitung“, Ausgaben 37, 40 und 42, Patzer Verlag, Hannover, 1980.
57. Kamps, L. F. Mud Distribution and Land Reclamation in the Eastern Wadden Shallows. Rijkswaterstaat Commun. 4, 1962.
58. Katzenbach, R.
Arslan, U. Geotechnik: Bodenmechanik und Felsmechanik. Studienunterlagen des Instituts für Geotechnik der Technischen Hochschule Darmstadt, 1994. (unveröffentlicht)
59. Kempf, N. et al.
(Red.) Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur? Internationale Fachtagung zu Perspektiven für Schutz und Pflege von Salzwiesen im Wattenmeer, 2. Aufl., Tagungsbericht 1, WWF-Deutschland, 1988.

60. Kempf, N. Wieviele Schafe sind's denn nun? - Salzwiesenbeweidung in Schleswig-Holstein.
Wattenmeer International, H. 3. 1995, S. 11-13.
61. Kiehl, K.
Stock, M. Natur- oder Kulturlandschaft? Wattenmeersalzwiesen zwischen den Ansprüchen von Naturschutz, Küstenschutz und Landwirtschaft.
In: Lozán, J.L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 1994, S. 190-196.
62. Köster, R. Geologisches Gutachten zu den geplanten Küstenschutzmaßnahmen im südlichen nordfriesischen Wattenmeer.
Kurzfassung.
Gutachten zur geplanten Vordeichung der Nordstrander Bucht, Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein, H. 12, 1981.
63. Kramer, J. Welche Lahnungsbauweise und welche Aufteilung der Landgewinnungsfelder sind beim Küstenschutz durch Landgewinnung am zweckmäßigsten?
Wasser & Boden, Jg. 12, H. 9, 1960.
64. Kramer, J. Sturmflut 1962 – Sturmfluten und Küstenschutz zwischen Ems und Weser.
Arbeitsgemeinschaft der Sparkassen Ostfrieslands und Oldenburg (Hrsg.), Norden, 1967.
65. Kramer, J. Sturmfluten.
Küstenschutz zwischen Ems und Weser.
6. überarb. Aufl., Verlag Soltau GmbH (Ostfriesischer Kurier), Norden, 1990.
66. Kramer, J.
Janssen, T. Deichbau an der ostfriesischen Küste unter Anwendung von Asphaltbauweisen.
Bitumen, H. 38, Jg. 1976, 1976, S. 81-87.
67. Kroeze, T.A.G. et al. Experiment natuurbeheer rijkslandaanwinningwerken.
Jaarverslag medio 1990 - medio 1991.
RWS, Directie Groningen, Dienstkring, Delfzijl, 1991.
68. Laane, R.W.P.M.
Wolff, W.J. The Role of Organic Matter in The Wadden Sea.
Proc. of the 4th Int. Wadden Sea Symposium, 1.-3. November 1983, Texel, Niederlande, Netherlands Institute for Sea Research, H. 10, 1994.
69. Lafrenz, P. Über Pflege und Nutzung des Anwachsens und der Deiche an der Dithmarscher Küste.
Die Küste, Jg. 6, H. 2, 1957, S. 94-129.

70. Lafrenz, P. Seedeich- und Vorlandnutzung im Wandel der Zeit.
In: Zietz, W. (Hrsg.): Land aus dem Meer, 125 Jahre Wesselburener Koog / 100 Jahre Wesselburener Koog, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1963 / 1987, S. 84-90.
71. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer (Hrsg.) Nationalpark schleswig-holsteinisches Wattenmeer.
Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Tönning, 1992.
72. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer (Hrsg.) Der Nationalpark.
Faltblatt, Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Tönning, (a).
73. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer (Hrsg.) Wattwandern im Nationalpark.
Faltblatt, Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Tönning, (b).
74. Lorenzen, J.M. Planung und Forschung im Gebiet der Schleswig-Holsteinischen Westküste.
Westküste, H. 1, 1938.
75. Lorenzen, J.M. Vorarbeiten für Seebauten.
Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, Bd. 18, 1939/40.
76. Lorenzen, J.M. Hundert Jahre Küstenschutz an der Nordsee.
Die Küste, Jg. 3, H. 1/2, 1955.
77. Lorenzen, J.M. 25 Jahre Forschung im Dienst des Küstenschutzes.
Die Küste, Jg. 8, 1960, S. 7-28.
78. Lüders, K. Historische Fachbegriffe aus dem Deichwesen im Küstengebiet der südlichen Nordsee.
Arbeiten aus der Forschungsstelle Norderney, Nr. 9, Norderney, 1984.
79. Lüders, K.
Luck, G. Kleines Küstenlexikon.
Natur und Technik an der deutschen Nordseeküste.
3. Aufl., Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim, 1976.
80. Lull, H.W. Soil Compaction on Forest and Range Land.
U.S. Dept. Agr. Misc. Publ. 768, Washington, 1959.

81. Manzenrieder, H. Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs.
Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, H. 79, 1983.
82. Massel, S.R. Wave Motion in Vegetated and Non-Vegetated Coastal Zones.
In: Dally, W.R./Zeidler, R.B.: Proc. of the Int. Conf. on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments, 4.-8. September 1995 in Danzig, Waterway, Port, Coastal and Ocean Division of the American Society of Civil Engineers, 1996, S. 1-12.
83. Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Fischerei und Forsten (MELFF, Hrsg.) Prüfungsunterlagen für die verwaltungseigene Prüfung der Wasserbauarbeiterinnen/Wasserbauarbeiter an der Westküste Schleswig-Holsteins im Lehrberuf Wasserbauer.
Fragen- und Antwortkatalog, 1993.
84. Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Fischerei und Forsten (MELFF, Hrsg.) Vorlandmanagement in Schleswig-Holstein.
Endbericht der MELFF/MNU-Arbeitsgruppe „Vorland“, Kiel, 1995.
85. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF) Saltmarsh Erosion and Accretion Processes.
Cambridge Environmental Research Consultants Ltd. (CERC), Research News from Flood Defence Division, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, H. 1, November 1992, S. 2-3.
86. Misdorp, R. et al. Climate Change, Sea Level Rise and Morphological Developments in the Dutch Wadden Sea, a Marine Wetland.
In: Beukema, J.J. et al. (Hrsg.): Expected Effects of Climate Change on Marine Coastal Ecosystems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.
87. Montague, C.L. Influence of Biota on Erodibility of Sediments.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediments Dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, H. 14, Springer Verlag, 1986, S. 251-269.
88. Müller, C.D. Fauna und Sediment in der Leybucht.
Biologisch-bodenkundliche Wattuntersuchung mit Stellungnahme zur Landgewinnung.
Forschungsstelle Norderney der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung, Jahresbericht 1959, Bd. XI, 1960, S. 39-179.
89. Müller, F.
Fischer, O. Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste.
Teil III: Das Festland, Bd. 4., Nordstrand, 1955.

90. Nationalparkverwaltung „Niedersächsisches Wattenmeer“ (Hrsg.) Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Broschüre, 4. Aufl., 1992.
91. Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (NMELF, Hrsg.) Dünen, Watt und Salzwiesen. Schutz und Erhaltung von Küste und Inseln, Tier- und Pflanzenwelt. Verlag Soltau-Kurier, Norden, 1985.
92. Niemeyer, H.D. et al. Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. Die Küste, H. 57, 1995a, S. 65-94.
93. Niemeyer, H.D. et al. Naturuntersuchungen von Wattseegang am der deutschen Nordseeküste. Berichte der Forschungsstelle Küste, Bd. 40, Norderney, 1995b, S. 145-186.
94. Niesel, S. Neue Betrachtungen über den stabilisierenden Einfluß der biologischen Komponente auf das Sandwatt. Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, 1981. (unveröffentlicht)
95. Osterthun, M. Veränderungen der Morphologie des Küstenvorfeldes der deutschen Nordseeküste - Quantifizierung und Analyse. Hansa, Jg. 130, H. 11, 1993a.
96. Osterthun, M. Veränderungen der Morphologie des Küstenvorfeldes der deutschen Nordseeküste - Möglichkeiten der Quantifizierung und Analyse. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, Bd. 48, Hamburg, 1993b.
97. Osterthun, M. Partensky, H.W. Vorlandbildung an Deichen und Sicherungsdämmen, Teil 1: Morphologische Analyse der Vorlandentwicklung. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, H. 72, Hannover, 1991a, S. 367-391.
98. Osterthun, M. Partensky, H.W. Changing Salt-marshes along the Southern North Sea Coast. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries (COPEDEC III), Vol. II, Kenya, Mombasa, 1991b, S. 1093-1109.
99. Ovesen, C.H. Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region. Proc. 2nd Trilateral Working Conference, Rømø, Denmark, Ministry of the Environment, The National Forestry Agency, 1990.

10.2 Schrifttum zu Kapitel 4

1. Abdel-Mawla, S. Deposition and Entrainment of Cohesive Sediments under Waves.
Fundamental Research Concept, Report 1.
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover, 1997.
(unveröffentlicht)
2. Alexis, A. et al. Consolidation des Sediments cohesifs: Unification des Theories, Modelisation Numerique et Experiments In situ.
Collection de Notes internes de la Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France (EDF), 1993.
3. Bagnold, R.A. The Flow of Cohesionless Grain in Fluids.
Phil. Trans. Roy. Soc., A 964, 1956, S. 243.
4. Been, K.
Sills, G.C. Self-weight consolidation of Soft Soils: An Experiment and Theoretical Study.
Geotechnique, Jg. 31, H. 4, 1983, S. 519-535.
5. Burt, N.T. Field Settling Velocities of Estuary Muds.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, Nr. 14, Springer-Verlag, 1986, S. 126-150.
6. Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) Umweltprobleme der Nordsee.
Sondergutachten.
Kohlhammer Verlag, Stuttgart und Mainz, 1980.
7. Dieckmann, R. Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Hannover, H. 60, 1985, S. 133-361.
8. Düring, T. Ansätze und Untersuchungen für die Beschreibung der Erosion und Sedimentation – insbesondere der Konsolidierung – von Wattsedimenten unter Strömungs- und Welleneinfluß.
Studienarbeit am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover, 1996.
(unveröffentlicht)
9. Dyer, K.R. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics.
John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986.

10. Einstein, H.A. The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows.
Technical Bulletin No.1026, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 1950.
11. Eisma, D. Sediment Distribution in the North Sea in Relation to Marine Pollution.
In: Goldberg, E.D. (Hrsg.): North Sea Science, NATO North Sea Science Conf. Aviemore, Schottland, M.I.T. Press, Cambridge, 1971.
12. Engelund, F.
Fredsoe, J. A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels.
Nordic Hydrology, H. 7, 1976.
13. Erchinger, H.F. et al. Erosionsfestigkeit von Hellern.
Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473, Norden, 1994.
(unveröffentlicht).
14. Führböter, A. Küstenschutz auf neuen Wegen.
Zeitschrift VDI, Nr. 8, 1974, S. 579-666.
15. Gibson, R.E. The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays.
Geotechnique, Jg. 17, 1967, S. 261-273.
16. Güven, N. Molecular Aspects of Clay-water Interactions.
In: Güven, N./Pollastro, R.M. (Hrsg.): Clay-Water Interface and its Rheological Implications, H. 4, The Clay Mineral Society, 1992, S. 1-80.
17. Hickel, W. Das Wattenmeer als Sinkstoff-Falle.
Umschau, H. 19, 1979, S. 608-609.
18. Hinrichs, W. Nordsee-Deiche, Küstenschutz und Landgewinnung.
Husum, 1931.
19. Horikawa, K. Present State of Coastal Sediment Studies.
Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, H. 56, 1977, S. 77-197.
20. Kambeck, W. Küstenschutz der Marschen in Nordfriesland.
Sonderdruck aus „Allgemeine Bauzeitung“, Ausgaben 37, 40 und 42, Patzer Verlag, Hannover, 1980.
21. Kendrick, M.P.
Waters, C.B. Field Laboratory Measurements of a Fluid Mud Layer.
Proc. of the 2nd Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries (COPEDEC II), Beijing, 1987.

22. Kirby, R. Suspended Fine Cohesive Sediment in the Severn Estuary and inner Bristol Channel, U.K.
Report to United Kingdom Atomic Energy Authority under Contract No. E/5A/CON/4042/1394, 1986.
23. Krone, R.B. Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes.
Hydraulic Engineering and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, 1962.
24. Kynch, G.J. A Theory of Sedimentation.
Transaction Faraday Society, Jg. 48, 1952, S. 166-176.
25. Lagaly, G. Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen.
In: Lang, H.J. (Hrsg.): Tonmineralogie und Bodenmechanik, Eidgenössische Hochschule Zürich, 1988, S. 7-22.
26. Lick, W. et al. Flocculation and its Effect on the Vertical Transport of Fine-grained Sediments.
In: Hart, B.T./Sly, P.G. (Hrsg.): Sediment/Water Interactions, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1992, S. 1-16.
27. Lick, W. et al. Flocculation and the Physical Properties of Floccs.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, American Geophysical Union, 1993, S. 21-39.
28. Mehta, A.J. Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Processes in Estuaries.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediments Dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, H. 14, Springer Verlag, 1986, S. 290-325.
29. Meyer-Peter, E.
Müller, R. Formulas for Bed-Load Transport.
IAHR, Stockholm, 1948.
30. Migniot, C.
Bouloc, J. Erosion et sédimentation en mer et en rivière.
La Pratique des Sols et des Fondations, Edition Moniteur, 1981.
31. Mimura, N. Rates of Erosion and Deposition of Cohesive Sediments under Wave Action.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, American Geophysical Union, 1993, S. 247-264.
32. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF) Coastal Defence and the Environment.
A guide to good practice.
Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1993.

33. Montague, C.L. Influence of Biota on Erodibility of Sediments.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediments Dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, H. 14, Springer Verlag, 1986, S. 251-269.
34. Muuß, U.
Petersen, M. Die Küsten Schleswig-Holsteins.
2. verb. Aufl., Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1974.
35. Nichols, M.M. Effects of Fine Sediment Suspendension in Estuaries.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine cohesive sediments dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, H. 14, Springer Verlag, 1986, S. 5-42.
36. Nielson, P. Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport.
Advanced Series on Ocean Engineering, H. 4, 1992.
37. Ongley, E.D. et al. Cohesive Sediment Transport: Emerging Issues of Toxic Chemical Management.
In: Hart, B.T./Sly, P.G. (Hrsg.): Sediment/Water Interactions, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1992, S. 177-187.
38. Osterthun, M. Sedimentherkunft, -eintrag und -transport in Nordsee, Wattenmeer und Küstennahbereich.
Festschrift für Prof. Hans-Werner Partenscky zu seinem 70. Geburtstag von seinen Doktoranden und Habilitanden, 1996, S. 197-213.
(unveröffentlicht)
39. Parker, W.R. On the Observation of Cohesive Sediment Behaviour for Engineering Purposes.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediments Dynamics, Lecture notes Coastal Estuarine Studies, H. 14, Springer Verlag, 1986, S. 270-289.
40. Partheniades, E. The Present State of Knowledge and Needs for Future Research on Cohesive Sediment Dynamics.
3rd Int. Symp. on River Sedimentation, 31. März - 4. April 1986, The University of Mississippi, 1986, S. 3-25.
41. Raudkivi, A.J. Grundlagen des Sedimenttransports.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
42. Reineck, H.-E. Die Watten der deutschen Nordseeküste.
Die Küste, H. 32, 1978, S. 66-83.
43. van Rijn, L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas.
Aqua Publications, Niederlande, 1993.

44. van Rijn, L.C.
Louisse, C.J. The Effect of Waves on Cohesive Bed Surfaces.
Proc. of the 2nd Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries (COPEDEC II), Beijing, 1987.
45. Runze, P. et al. Experimental Study on Settling of Flocculated Sediment in Turbulent Flow in the Yangtze Estuary.
Proc. of the 4th Intern. Symp. on River Sedimentation, Beijing, China, 1989, S. 633-640.
46. Schröder, R.C.M. Vergleichbarkeit von Geschiebetransportformeln.
Wasserwirtschaft, H. 75, 1985, S. 217-221.
47. Schulz, N. Grundlagen einer mathematischen Modellierung des Geschiebetransportes über Sedimentriffeln.
Diplomarbeit am Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1993.
(unveröffentlicht)
48. Shields, A. Anwendung der Ähnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.
Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, 1936.
49. Sills, G.C.
Elder, D. McG. The Transition from Sediment Suspension to Settling Bed.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, Nr. 14, Springer Verlag, 1986, S. 192-205.
50. Sleath, J.F.A. Seabed Mechanics.
Enke-Verlag, Stuttgart, 1984.
51. Teisson, C.
Fritsch, D. Numerical Modelling of Suspended Sediment Transport in the Loire Estuary.
Proc. of the IAHR Symp. on Mathematical Modelling of Sediment Transport in Coastal Zones, 30. Mai - 1. Juni 1988, Kopenhagen, Dänemark, 1988, S. 14-21.
52. Terzaghi, K. Erdbautechnik auf bodenphysikalischer Grundlage.
Franz Deuticke Verlag, Leipzig, Wien, 1925.
53. Thies, M. Biologie des Wattenmeeres.
Aulis-Verlag Deubner, Köln, 1985.
54. Thorenz, F. Die geologische Entstehung der Nordsee und die Erosionstabilität ihrer Wattsedimente gegen Strömungs- und Wellenangriff.
Sonderübung am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover, 1991.
(unveröffentlicht)

55. Vollmers, H.
Pernecker, L. Beginn des Feststofftransportes für feinkörnige Materialien in einer richtungskonstanten Strömung.
Die Wasserwirtschaft, H. 6, 1967.
56. Watanabe, A.
Jiang, Q. Rheological Properties of soft Mud and a Numerical Model for its Motion under Waves.
Coastal Engineering in Japan, Jg. 38, H. 2, 1995, S. 195-214.
57. Williams, D.J.A. Rheology of Cohesive Suspensions.
In: Mehta, A.J. (Hrsg.): Estuarine Cohesive Sediments Dynamics, Lecture Notes Coastal Estuarine Studies, H. 14, Springer Verlag, 1986, S. 110-125.
58. de Wit, P.J. Liquefaction of Cohesive Sediments Caused by Waves.
Commun. on Hydraulic and Geotechnical Engineering, H. 95-2, 1995.
59. Wohlenberg, E. Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm.
Die Küste, Jg. 2, H. 2, 1954, S. 33-94.
60. Yamamoto, T.
Takahashi, S. Wave Damping by Soil Motion.
Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Jg. 111, H. 1, 1985, S. 62-77.
61. Zanke, U. Grundlagen der Sedimentbewegung.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
62. Zhu, J. Numerische Simulation der Vorlandentwicklung im Tidebereich (Dissertation).
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, H. 74, Hannover, 1993.
63. Zidan, Z.
Lin, J. Study on the Interaction between Waves and Mud Bottom.
China Ocean Engineering, Jg. 3, Nr. 3, China Ocean Press, 1989, S. 321-328.

10.3 Schrifttum zu Kapitel 5

1. Engel, H. Über die Landgewinnung im Wattengebiet.
Dissertation.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover,
H. 22, Hannover, 1963, S. 1-93.
2. Gehrig, W. Über die Frage der natürlichen Nachbildung der Feststoffbe-
wegung in Modellen.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover,
H. 29, Hannover, 1967, S. 213-308.
3. Kobus, H. Wasserbauliches Versuchswesen.
DVWW, Mitteilungsheft Nr. 4, 1978.
4. Kohlhase, S. Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenplanung.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover,
H. 57, Hannover, 1983, S. 1-327.
5. Rudolph, E. Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean im Kü-
stenbereich.
GKSS-Bericht 93/E/57, 1993.

10.4 Schrifttum zu Kapitel 6

1. Alberts, H. et al. Dokumentation von Seegangsmessungen bei Ockholm/Nordfriesland (Tiden vom 14.12.1994, 29.12.1994 und 01.01.1995).
Berichte der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie zum KFKI-Forschungsvorhaben Optimierung von Küstensicherungsarbeiten, Nr. 1, 1995.
(unveröffentlicht)
2. Erchinger, H.F. et al. Erosionsfestigkeit von Hellern.
Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473, Norden, 1994.
(unveröffentlicht)
3. Houwing, E.J. et al. Salt Marshes and Sea Level Rise: Plant Dynamics in Relation to Accretion Enhancement Techniques.
Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht, IMAU-report R95-27, Utrecht, 1995.
4. Landesamt für Wasser- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch.
haushalt und Küsten Küstengebiet der Nord - und Ostsee, Abflußjahr 1988.
Schleswig-Holstein Kiel, 1994.
(Hrsg.)
5. Reimers, H.-C. et al. Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste.
Teilprojekt: Sedimentologie und Morphologie von Lahnungsfeldern.
1. Zwischenbericht.
Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ) Westküste der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Büsum, 1995.
(unveröffentlicht)
6. Wieland, P. Windstatistik Büsum 1969 - 1974.
Fladung, B. Wasser und Boden, H. 11, 1982, S. 510-514.

10.5 Schrifttum zu Kapitel 7

1. Erchinger, H.F. et al. Erosionsfestigkeit von Hellern.
Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473,
Norden, 1994.
(unveröffentlicht).
2. Grüne, J.
Kohlhase, S. Wellentransmission an Schlitzwänden.
Die Küste, H. 27, 1975, S. 74-82.
3. Hinrichs, W. Nordsee-Deiche, Küstenschutz und Landgewinnung.
Husum, 1931.
4. Mansard, E.P.D.
Funke, E.R. The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a
Least Squares Method.
Proc. 17th Intern. Conf. on Coastal Eng., Italien, 1980, S.
154-172.
5. Niemeyer, H.D. et al. Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen
Nordseeküste.
Berichte der Forschungsstelle Küste, Bd. 40, Norderney,
1995b, S. 145-186.
6. Pilarczyk, K.W.
Zeidler, R.B. Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control.
A.A. Belkema, Rotterdam, 1996.
7. Press, H.
Schröder, R.C.M. Hydromechanik im Wasserbau.
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 1966.
8. Schröder, R.C.M. Technische Hydraulik - Kompendium für den Wasserbau.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London,
Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 1994.
9. o.V. Küstenschutz an der ostfriesischen Festlandsküste.
Kostenanschlag des Staatlichen Amtes für Insel- und Küsten-
schutz Norden, Norden, 1993.
(unveröffentlicht)

10.6 Schrifttum zu Kapitel 8

1. Abbott, M.B. et al. Modelling Circulations in Depth-Integrated Flows.
Part 1: The Accumulation of the Evidence.
J. of Hydraulic Research, Jg. 23, H. 4, 1985.
2. Battjes, J.A.
Janssen, J.P.F.M. Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves.
Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, 1978,
S. 569-587.
3. Copeland, G.J.M. Practical Radiation Stress Calculations Connected with Equa-
tions of Wave Propagation.
Coastal Engineering, H. 9, 1985, S. 195-219.
4. Danish Hydraulic
Institute
(Hrsg./DHI) MIKE21: Coastal Hydraulics and Oceanography; Hydrody-
namic Module.
Release 2.6, User Guide and Reference Manual.
Horsholm, Dänemark, 1997a.
5. Danish Hydraulic
Institute
(Hrsg./DHI) MIKE21: Elliptic Mild-Slope Wave Module.
Release 2.6, User Guide and Reference Manual.
Horsholm, Dänemark, 1997b.
6. Danish Hydraulic
Institute
(Hrsg./DHI) MIKE21: Sediment Processes; Mud Transport Module:
Multi-Fraction, Mud Transport Module: Multi-Layer.
Release 2.6, User Guide and Reference Manual.
Horsholm, Dänemark, 1997c.
7. DVWK Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewäs-
sern. Workshop des DVWK-Ausschusses „Numerische und
Experimentelle Hydraulik“, 23.-24.09.1996, Hannover, 1996.
8. Ekebjerg, L.
Justesen, P. An Explicit Scheme for Advection-Diffusion Modelling in
Two Dimensions.
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,
Jg. 88, H.3, 1991.
9. Elder, J.W. The Dispersion of a Marked Fluid in a Turbulent Shear Flow.
J. Fluid Mech., H. 5, 1959, S. 544-560.
10. Engelund, F.
Fredsoe, J. A sediment transport model for straight alluvial channels.
Nordic Hydrology, Vol. 7, S. 293-306, 1976.
11. Erchinger, H.F. et al. Erosionsfestigkeit von Hellern.
Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473,
Norden, 1994.
(unveröffentlicht).

12. Launders, B.E.
Spalding, D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows.
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,
H. 3, 1974, S. 269-289.
13. Longuet-Higgins, M.S.
und R.W. Stewart Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves with
Application to Surf Beats.
J. Fluid Mech., H. 13, 1962, S. 481-504.
14. Madsen, P.A. Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber.
Coastal Engineering, H. 7, 1983, S. 381-396.
15. Madsen, P.A.
Larsen, J. An Efficient Finite-Difference Approach to the Mild-Slope
Equation.
Coastal Engineering, H. 11, 1987, S. 329-351.
16. Niemeyer, H.D. Wellenerzeugte Strömungen und Sedimenttransport.
Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Kü-
steningenieurwesen der Universität Hannover, H. 41, Hanno-
ver, 1974.
17. Smagorinsky, J. General Circulation Experiments with Primitive Equations.
Monthly Weather Review, H. 91, 1963, S. 91-164.
18. Swart, D.H. Offshore Sediment Transport and Equilibrium Beach Profiles.
Delft Hydr. Lab., Publ. 131, Delft, 1974.
19. Thackson, E.L. Longitudinal Mixing and Re-aeration in natural streams.
PhD Thesis, Vanderbilt University, Nashville, USA, 1966.
20. van Rijn, L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and
Coastal Seas.
Aqua Publications, Amsterdam, 1993.
21. Vieira, J.R. On the General Dispersive Coefficients used in Mathematical
Models of Flow Circulation and Transport.
Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book,
1992.
22. Warren, I.R. et al. Application of Short Wave Numerical Models to Harbour
Design and Future Development of the Model.
Int. Conf. on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and
Harbours, Birmingham, 1985.
23. Yalin, M.S. Mechanics of Sediment Transport.
Pergamon Press, Oxford, 1972.
24. Zanke, U. Grundlagen der Sedimentbewegung.
Springer Verlag, 1982.

10.8 Schrifttum zum Glossar

1. Augst, H.-J. Umsetzung der Esbjerg-Deklaration: Ziel noch nicht erreicht.
Wattenmeer International, Jg. 12, H. 1, 1994, S. 3.
2. Bantelmann, A. Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste dargestellt am Beispiel Nordfrieslands, eine Funktionschronik durch fünf Jahrtausende.
Die Küste, Jg. 14, H. 2, 1966.
3. Burghardt, W. Bodenökologie.
In: Kuttler, W. (Hrsg.): Handbuch zur Ökologie, 2. rev. Aufl., Analytica Verlag, Berlin, 1995, S. 92-98.
4. Coastal Engineering Research Center (CERC) Shore Protection Manual.
Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 4. Aufl., H. 1, Washington, 1984.
5. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) Historischer Küstenschutz.
Deichbau, Inselschutz und Binnenentwässerung an Nord- und Ostsee.
Bearbeitet von Kramer, J./Rohde, H., Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1992.
6. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) Fluß und Landschaft – Ökologische Entwicklungskonzepte.
DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 240, 1996.
7. Dieckmann, R. Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Hannover, H. 60, 1985, S. 133-361.
8. Dolder, W.
Dolder, U. Nordseeküste und Wattenmeer
Naturparadiese Europas 2.
Lingen Verlag, Köln, 1988.
9. Ehlers, J. Geomorphologie und Hydrologie des Wattenmeeres.
In: Lozán, J.L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 1994, S. 1-11.
10. Enemark, J.A. The Sixth Trilateral Governmental Conference on the Protection of the Wadden Sea.
Wadden Sea Newsletter, H. 1, 1992, S. 26-28.
11. Enemark, J.A. 7th Trilateral Governmental Wadden Sea Conference.
Wadden Sea Newsletter, H. 1, 1995, S. 24-27.

12. Erchinger, H.F. Salzwiesenbildung und -erhaltung – Lahnungsbau und Begrüpfung für den Küstenschutz.
In: Kempf, N. et al. (Red.): Salzwiesen, geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur?, 2. Aufl., Tagungsbericht 1, WWF-Deutschland, 1988, S. 279-308.
13. Erchinger, H.F. et al. Erosionsfestigkeit von Hellern.
Verbundbericht des KFKI-Forschungsvorhabens MTK 0473, Norden, 1994.
(unveröffentlicht).
14. Fiedler, R. „Nationalpark Hamburgisches Wattenmeer“: Hamburg Takes Initiative in Wadden Sea Protection.
Wadden Sea Newsletter, H. 1, 1991, S. 27-29.
15. Fiege, M.
Hagmeier, H. Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und Entwässerungssysteme.
Diplomarbeit am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Hannover, 1995.
(unveröffentlicht)
16. Friedrich, F.
Claussen, A. Grenzen mariner Qualitätsziele.
In: Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste (Hrsg.): Ökologische Qualitätsziele für das Meer, SDN-Kolloquium 1994, H. 2, Wilhelmshaven, 1994, S. 9-20.
17. Hinrichs, W. Nordsee-Deiche, Küstenschutz und Landgewinnung.
Husum, 1931.
18. Iwersen, J. Das Problem der Kultivierung eingedeichter Watten.
Die Küste, H. 2, 1953, S. 24-142.
19. Janke, K.
Kremer, B.P. Das Watt.
Kosmos Naturführer, Franckh-Kosmos-Verlag, Stuttgart, 1990.
20. de Jong, T. Lebensraum Watt - mal Land, mal Meer.
Ostfriesland Magazin, Soltau-Kurier-Norden, H. 8, 1994, S. 15-19.
21. Kambeck, W. Küstenschutz der Marschen in Nordfriesland.
Sonderdruck aus „Allgemeine Bauzeitung“, Ausgaben 37, 40 und 42, Patzer Verlag, Hannover, 1980.
22. Kramer, J. Sturmflut 1962 – Sturmfluten und Küstenschutz zwischen Ems und Weser.
Arbeitsgemeinschaft der Sparkassen Ostfrieslands und Oldenburg (Hrsg.), Norden, 1967.

23. Kramer, J. Sturmfluten.
Küstenschutz zwischen Ems und Weser.
6. überarb. Aufl., Verlag Soltau GmbH (Ostfriesischer Kurier), Norden, 1990.
24. Kunz, H. Coastal Protection Responses to Sea Level Rise and to Changing Social Needs - Case Study Ley Bay, Southern North Sea.
Proc. of MEDCOAST 93, Bd. 2, Antalya, Türkei, 1993, S. 1059-1073.
25. Kuttler, W. (Hrsg.) Handbuch zur Ökologie.
2. rev. Aufl., Analytica Verlag, Berlin, 1995.
26. Lafrenz, P. Seedeich- und Vorlandnutzung im Wandel der Zeit.
In: Zietz, W. (Hrsg.): Land aus dem Meer, 125 Jahre Wesselburener Koog / 100 Jahre Wesselburener Koog, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1963 / 1987, S. 84-90.
27. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer (Hrsg.) Nationalpark schleswig-holsteinisches Wattenmeer.
Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, Tönning, 1992.
28. Landeshauptstadt Hannover AGENDA-Büro (Hrsg.) AGENDA – Aktionen, Visionen, Leute, Termine, Infos.
H. 2, Hannover, 1997.
29. Lozán, J.L. et al. Warnsignale aus dem Wattenmeer.
Blackwell-Verlag, Berlin, 1994.
30. Lüders, K. Luck, G. Kleines Küstenlexikon.
Natur und Technik an der deutschen Nordseeküste.
3. Aufl., Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim, 1976.
31. Meyer, H.U. et al. Lebensraum Wattenmeer.
Biologische Arbeitsbücher, Nr. 47, Quelle & Meyer Verlag, Wiesbaden, 1994.
32. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Fischerei und Forsten (MELFF, Hrsg.) Prüfungsunterlagen für die verwaltungseigene Prüfung der Wasserbauarbeiterinnen/Wasserbauarbeiter an der Westküste Schleswig-Holsteins im Lehrberuf Wasserbauer.
Fragen- und Antwortkatalog, 1993.
33. Müller, C.D. Fauna und Sediment in der Leybucht.
Biologisch-bodenkundliche Wattuntersuchung mit Stellungnahme zur Landgewinnung.
Forschungsstelle Norderney der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung, Jahresbericht 1959, Bd. XI, 1960, S. 39-179.

34. Nationalparkverwaltung „Niedersächsisches Wattenmeer“ (Hrsg.) Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Broschüre, 4. Aufl., 1992.
35. Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung Landwirtschaftlicher Wasserbau – Begriffe, Erosionsschutz. DIN 4047-7, Januar 1993.
36. Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung Landwirtschaftlicher Wasserbau – Begriffe – Entwässerung, Dränung. DIN 4047-9, Januar 1986.
37. Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung Hydrologie – Grundbegriffe. DIN 4049-1, Dezember 1992.
38. Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung Hydrologie – Begriffe der Gewässerbeschaffenheit. DIN 4049-2, April 1990.
39. Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. DIN 4049-3, Oktober 1994.
40. Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (NMELF, Hrsg.) Dünen, Watt und Salzwiesen. Schutz und Erhaltung von Küste und Inseln, Tier- und Pflanzenwelt. Verlag Soltau-Kurier, Norden, 1985.
41. Probst, B. Überlegungen für einen Küstenschutz der Zukunft. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, H. 75, 1994.
42. Rachor, E. Begriffserklärungen. In: Lozán, J.L. et al.: Warnsignale aus dem Wattenmeer, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 1994, S. 349-357.
43. Reineck, H.-E. Die Watten der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 32, 1978, S. 66-83.
44. Richter, D. Allgemeine Geologie. 4. Aufl., Berlin, 1992.

45. Scheffer, F.
Schachtschabel, P. Lehrbuch der Bodenkunde.
2. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1989.
46. Schwarze, H.
Partenscky, H.-W. Wissenschaftliche Gutachten zu den hydrologischen und morphologischen Auswirkungen der geplanten Baumaßnahmen in der Nordstrander Bucht.
In: MELF (Hrsg.): Gutachten zur geplanten Vordeichung der Nordstrander Bucht, Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein, H. 12, Kiel, 1981, S. 11-34.
47. Siefert, W. Über den Seegang in Flachwassergebieten.
Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts, H. 40, 1974, S. 1-243.
48. Stadelmann, R. Meer - Deiche - Land.
Küstenschutz und Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste.
Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1981.
49. Stock, M. et al. Ökosystemforschung Wattenmeer - Synthesebericht: Grundlagen für einen Nationalparkplan.
Schriftenreihe des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, H. 8, 1996.
50. Streble, H. Was finde ich am Strande?
Pflanzen und Tiere der Strände, Deiche, Küstengewässer.
Kosmos Naturführer, Franckh-Kosmos-Verlag, Stuttgart, 1990.
51. Thorenz, F. Die geologische Entstehung der Nordsee und die Erosionsstabilität ihrer Wattsedimente gegen Strömungs- und Wellenangriff.
Sonderübung am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover, 1991.
(unveröffentlicht)
52. Umweltbehörde Hamburg, Naturschutzamt (Hrsg.) Nationalpark Hamburgisches Wattenmeer.
Freie und Hansestadt Hamburg, 1994.
53. van de Ven, G.P. Man-made Lowlands, History of Water Management and Land Reclamation in the Netherlands.
ICID u. Royal Institute of Engineers in the Netherlands, CIP-DATA Koninklijke Bibliotheek, Den Haag.
54. van der Wal, J. Wattenmeer - Bewahrt es!
WWF-Broschüre, 1992.
55. Wieland, P. Küstenfibel.
Ein Abc der Nordseeküste.
Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide, 1990

10.9 **Schrifttum zu den Anlagen**

1. Fiege, M. et al. Lahnungsbauwerke: Entwicklung, Ausführungsvarianten und Entwässerungssysteme.
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Hannover, H. 78, 1996, S. 209-353.
2. Probst, B. Deichvorlandbewirtschaftung im Wandel der Zeit.
Die Küste, H. 58, 1996, S. 47-60.
3. Stock, M. et al. Ökosystemforschung Wattenmeer - Synthesebericht: Grundlagen für einen Nationalparkplan.
Schriftenreihe des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer, H. 8, 1996.
4. Stadelmann, R. Meer - Deiche - Land.
Küstenschutz und Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste.
Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1981.
5. o.V. Küstenschutz an der ostfriesischen Festlandsküste.
Kostenanschlag des Staatlichen Amtes für Insel- und Küstenschutz Norden, Norden, 1993.
(unveröffentlicht)
6. o.V. Darstellung der im Frühjahr 1995 im Testgebiet „Ockholm“ durchgeführten Grüpparbeiten.
Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, 1997.
(unveröffentlicht)

Glossar

Abbau Anzeichen für einen Abbau des Ufers und → Watts
(HINRICHS, 1931, S. 11)

„Das im Abbruch liegende Ufer ist steil und vielfach zerklüftet, die Bodenschichtung tritt deutlich hervor. Die schwach widerstandsfähigen Schichten sind mehr oder weniger tief herausgewaschen, dadurch ist die Zerstörung der fetten Bodenschichten vorbereitet. Es liegen abgestürzte, noch durch Graswurzeln zusammengehaltene Erdklumpen vor der → Abbruchkante, die bald aufgelöst werden und an deren Stelle neue treten. Häufig ist in den unteren Schichten der Abbrucherde der alte Kleiboden in breiten Streifen und Terrassen freigelegt. Das im Abbruch liegende Vorland weist in der Regel am Ufer einen etwa 20 Meter breiten Streifen auf, der mit mehr oder weniger großen und tiefen Tümpeln (Schlaglöchern) durchsetzt ist, sowie mit einem breiten, stark sandigen, landeinwärts abfallenden, erhöhten Uferstrand von gleicher Breite. Letzterer ist aus der durch die Brandungswelle auf das Land geworfenen Erde entstanden. Auch die Tümpel hat die Brandungswelle geschaffen.

1. Durch die Brandungswelle und den Küstenstrom ist vor den der offenen Seen zugekehrten Ufern eine muldenförmige Vertiefung entstanden, aus der das Wasser bei Ebbe nicht vollkommen abfließen kann. Häufig nimmt diese Vertiefung eine prielartige Gestalt an. Dort, wo eine solche Mulde nicht vorhanden ist, findet man
2. öfter direkt vor der → Abbruchkante einen schmalen Streifen reines → Sandwatt, dessen Masse aus der Abbrucherde stammt und deren sonstige Bestandteile von der See fortgeführt wurden. Das Watt weiter seewärts hat eine rauhe, teilweise zerrissene Oberflächenform, aus der freigespülte Muscheln zum Vorschein kommen.
3. Auf höheren Watt, auf denen an sich die Vorbedingungen für guten Quellerwuchs gegeben sind, stehen nur vereinzelt spärliche Quellerpflanzen, die meistens schon frühzeitig, nämlich im Nachsommer, wieder verschwinden, weil durch den Verschleiß des Watts ihre Wurzeln freigelegt werden".

Abbruchkante

Die Abbruchkante ist eine steile, durch einen Landabbruch entstandene, stufenartige Uferkante der Marschküste am Vorland von etwa 0,20 m bis 1,00 m Höhe infolge Wellenschlags und Gezeitenströmungen während der Tidehochwasser, sowie vereinzelt durch Eisschollen im Winter hervorgerufen. An der Geestküste (sandige Küste) entstehen infolge → Sturmfluten bis zu etwa 20 m Höhe Abbruchkanten an den Randdünen, ebenso am Kliff (STADELMANN, 1981, S. 138 / WIELAND, 1990, S. 130).

abiotisch „ökologisch wirksame Einflußgrößen der unbelebten Umwelt bezeichnend (NAW im DIN: DIN 4049-2, 1990, S. 228); Gegenteil: → biotisch

Ableiter rechtwinklig zur → Hauptentwässerung in einem → Lahnungsfeld verlaufende Quergräben

Abrasion Abtragung von Bodenmaterialien o.ä. durch die Brandung

Abweiser kurzes, rechtwinklig zum eigentlichen Lahnungsdamm verlaufendes Lahnungsstück zur Abweisung von Längsströmungen, die für den Bestand → Lahnung gefährlich sind.

Acker → Beet; zwischen den Entwässerungsgräben (→ Grütpe) liegende Flächen in den Kögen und der → Marsch (STADELMANN, 1981, S. 138f).

AGENDA 21

Die AGENDA 21 ist ein Aktionsplan der 1992 von 179 Staaten auf der Umweltkonferenz von Rio de Janeiro verabschiedet wurde. Ziel der Agenda ist es, auf die dringlichsten Probleme der Weltgemeinschaft hinzuweisen und Lösungsvorschläge für die Zukunft zu erarbeiten. In Deutschland sind bisher 200 Städte am Agenda-Prozeß beteiligt, auf europäischer Ebene wirken 3.500 Kommunen an der Umsetzung der Agenda mit (LANDESHAUPTSTADT HANNOVER AGENDA-BÜRO, 1997, S. 12).

Ah-Horizont

→ Bodenhorizont

aktiver Küstenschutz

Im Mittelpunkt des aktiven Küstenschutzes steht die → Vorlandbildung (ERCHINGER, 1988, S. 279f). Sie bewirkt durch Bauanlagen eine seewärtige Verlagerung angreifender Kräfte (Brandung, Strömung) an gefährdeten Küstenstrecken (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 3).

Andel (*Puccinellia maritima*), Andelgras, Strandschwaden, Drückdahl, Twillandel, Kwendel

„Ausdauerndes Salzgras mit niederliegenden, verzweigten Ausläufern; Hauptausläuferbildner in der Übergangszone vom → Watt zum hohen Vorland“ (WIELAND, 1990, S. 130). „Er gedeiht ab MThw bis MThw + 0,50 m und verträgt eine gelegentliche Überflutung mit Salzwasser gut“ (STADELMANN, 1981, S. 138). Diese Charakterpflanze der → unteren Salzwiese kann bis zu 40 cm hoch werden und wird von Schafen und Gänsen gern gefressen, weil die Wurzeln der Pflanze kein Salz aufnehmen und sie daher süß schmeckt.

Anlandung, Anlanden, Auflandung, Auflanden

allmähliches Höherwerden des → Watts und des Vorlandes seewärts der → Uferlinie infolge der Ablagerung von Sinkstoffen (Sedimentation); das Emporwachsen der Wattfläche wird mitunter spezifisch als Anlandung bezeichnet. Anzeichen für ein An- und Auflanden des Ufers und Watts (HINRICHS, 1931, S. 11):

1. „Das Ufer geht allmählich von Vorland in Quellerfeld und pflanzenfreies Watt über. Alle → Abbruchkanten haben eine flache untere Böschung, die Abbrucherde bleibt in der Hauptsache vor ihr liegen.
2. Das Watt zeigt nach dem Zurücktreten des Flutwassers eine glatte, blanke Oberfläche. Nachdem der Wind, gegebenenfalls auch die Sonne, genügend darauf eingewirkt haben und eine genügende Entwässerung erfolgte, wird sie noch vor dem Eintreten der nächsten Flut stumpf aussehend und unter besonders günstigen Umständen so trocken, daß sie kleine Risse aufweist.
3. Besondere Oberflächenformen wie → Rippeln, sowie die regenwurmartigen Kotringeln des Wattwurms, Pier- oder Köderwurms (→ Sandpier) fehlen oder kommen selten vor.

4. Auf entsprechend hohen Watten treten gesunde kräftige Quellerpflanzen auf, denen sich, sobald der Boden MThw-Niveau erreicht, der → Andel zunächst in Büscheln zugesellt.
5. Die → Priele werden in ihren landseitigen Teilen flacher und kleiner, weil die tägliche Flutwassermenge geringer wird.
6. Im nicht völlig trockenfallenden Seegrasgebiet bilden sich Schlickerhöhen(→ Schlick). Bodenkieselalgen (→ Diatomeen) überziehen in einem bestimmten Reifezustand den Wattboden als Massenvegetation mit einem samtbraunen Filz“.

Neben o.g. Kennzeichen existieren weitere, die Schlüsse auf Abbauen (→ Abbau) und → Auflanden der Watten zulassen, die jedoch häufig durch Nebeneffekte überlagert werden.

anthropogen

durch menschliches Wirken hervorgerufen (DVWK, 1996, S. 281)

Anwachs Mit Anwachs werden neuentstehende, anwachsende Landflächen unmittelbar landwärts der → Uferlinie des Vorlandes bezeichnet. In der → Anwachszone gedeihen als erstes Salzgras der → Andel, und zwar zunächst in einzelnen → Bulten, die sich erst weiter landwärts zu einer dichten Rasendecke zusammenschließen. „Dieser junge, niedrig gelegene Teil des Vorlandes sollte in erster Linie als Wiese und, wenn überhaupt, nur als Schafweide genutzt werden. Weidevieh würde die noch sehr weiche Grasdecke zertreten und zerstören“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 9).

Anwurf Der sogenannte Anwurf besteht aus an die → Lahnung geworfenem abgeböschtem Bodenmaterial. Er dient zur Verstärkung der Lahnung und als Schutz vor Unterspülung und muß nach (STADELMANN, 1981, S. 138) etwa alle drei Jahre erneuert werden.

Anwurfgruppe (Bewurfgruppe)

Die Anwurfgruppe verläuft in einem Abstand von rd. 3,00 m zur → Buschlahnung und wird zur Entnahme des Anwurfmaterials angeordnet.

Auflandungszone, Anwachszone

Bei der Bildung von Land aus dem → Watt lassen sich bezüglich der Entwicklung von Pflanzengesellschaften, die mit der allmählichen Aufhöhung und der damit zusammenhängenden physikalisch-chemischen Umstrukturierung des Bodens und der Abnahme des Salzgehaltes parallel verläuft, vier sogenannte Auflandungszone (→ Auflandung) unterscheiden, die jeweils von einer Leitpflanze gekennzeichnet sind (STADELMANN, 1981, S. 138):

1. Queller-Schlickgras-Zone, ab etwa MThw - 0,50 m bis MThw + 0,25; hier gedeihen als Landpflanzen nur → Queller und → Schlickgras.
2. Andelzone (→ Andel), erste eigentliche Landpflanzenzone, noch im vollmarinen Bereich liegend, Salzpflanzengesellschaft, ab → Uferlinie bis etwa MThw + 0,35 m
3. Schwingelzone, ab etwa MThw + 0,35 m bis MThw + 1,30 m
4. Weißkleezone, ausgesüßter (glykischer) Bereich; nach traditioneller Auffassung war Vorland erst deichreif, wenn es „weißkleefähig“ war

Bäumchenröhrenwurm (*Lanice conchilega* Pall.)

Der 0,05 m lange Bäumchenröhrenwurm ist das Charaktertier für das → Sandwatt und lebt in einer aus einzelnen Sandkörnchen zusammengeklebten Wohnröhre. Für die Dauer der tidebedingten Trockenperiode verweilt der Wurm im tiefen, geschützten Bereich seiner Röhre (MÜLLER, 1960, S. 52).

Balje, Gat, Gatt, Tief

mittelgroße, verzweigte Rinne (→ Wattstrom), deren Einzugsgebiet im → Watt liegt und die auch zur Niedrigwasserzeit nicht trockenfällt; sie besitzt Bedeutung als Wasserstraße (STADELMANN, 1981, S. 148)

Beet, Medje

Beetartige Fläche im Vorland- und Anwachsgebiet (→ Anwachs) zwischen den → Gruppen. Die Struktur von Gruppen und Beete ist häufig noch im bedeckten Marschland zu erkennen (WIELAND, 1990, S. 131).

Begrüppung, Begrüppelung, Schlötung

„Herstellen eines Grabensystems in → Lahnungsfeldern für das verlangsamte und verteilte Ein- und Ausfließen des Tidewassers zur Förderung der Aufschlickung und des → Anwachs am Seedeichfuß. Auf hohen Grünlandflächen des Vorlandes wird mit kleineren Querschnittsabmessungen der → Gruppen eine sogenannte Bedarfsbegrüppung zur → Entwässerung durchgeführt. Die Gräben (Gruppen) werden nach Aufschlickung etwa jährlich neu ausgehoben. Der Boden wird auf die dazwischenliegenden → Beete geworfen, wodurch die Landbildung zusätzlich gefördert wird (WIELAND, 1990, S. 131). In Ostfriesland wird das Herstellen dieser Gräben mit „schlößen“, in Schleswig-Holstein mit „begrüppen“ oder „begrüppeln“ bezeichnet.

Beweidung

traditionelle Form der Vorland-, → Salzwiesen- und Deichbewirtschaftung (→ Vorlandmanagement) mit Schafen, Rindern, Pferden oder auch Gänsen und Schweinen (LAFRENTZ, 1963, S. 84). Die landwirtschaftliche Nutzung, vor allem die Schaf- und Rinderhaltung, lag im Interesse des Küstenschutzes, weil angenommen wurde, verstärkter Viehtritt erhöhe die Verfestigung des Bodens und damit die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung. Zudem wurde eine infolge Beweidung kurze Grasnarbe für den Erhalt von Vorlandflächen als geeignet betrachtet (ERCHINGER ET AL., 1994, S. 1). Vorlandflächen wurden bis zum Beginn der 90er Jahre intensiv beweidet. Je nach Art und Intensität der Beweidung und der damit verbundenen Pflege und Unterhaltung stellen sich Auswirkungen auf Vegetation, Boden und Bodenfauna ein, die den Vorländern einen unterschiedlichen, nicht ausschließlich natürlichen Charakter verleihen. Mit den sich verändernden Ansprüchen der Gesellschaft und der Forderung nach dauerhaft umweltgerechten Lösungen im Bereich des Küstenschutzes, wird die ursprüngliche Form der Bewirtschaftung der Vorländer, nämlich der Beweidung, in Frage gestellt (z.B. PROBST, 1994, S. 56).

Biomasse in einem Bestand von Lebewesen festgelegte (lebende) organische Substanz (RACHOR, 1994, S. 350); die Menge lebender Organismen in Masse pro Flächeneinheit (STOCK ET AL., 1996, S. 623)

biotisch „ökologisch wirksame Einflußgrößen der belebten Umwelt bezeichnend (NAW im DIN: DIN 4049-2, 1990, S. 228); Gegenteil: → abiotisch

Bioturbation

Verwühlung der Sedimente durch Organismen in Gewässern oder Watten (THIEL ET AL., 1984, S: 261)

Bodenhorizont

„Durch den Ablauf der verschiedenen bodenbildenden Prozesse wird das der Verwitterung unterliegende Ausgangsgestein verändert und in seine Zerfallsprodukte umgelagert. Auf diese Weise bildet sich ein bestimmtes Bodenprofil heraus, das mehrere, etwa horizontale Boden-Zonen (Bodenhorizonte) aufweist, die von oben nach unten mit A, B und C bezeichnet werden“ (RICHTER, 1992, S. ...). Unter A-Horizont wird (in hiesigem Klima) humushaltiger Oberboden, unter C-Horizont das unveränderte Ausgangsgestein bezeichnet, während die Zone zwischen A und C, der Unterboden, B-Horizont genannt wird. Subhorizonte innerhalb eines Horizontes werden durch Zahlenindizes oder Kleinbuchstaben als Zusätze zu A, B und C gekennzeichnet“. Der Kleinbuchstabe h steht für humushaltig.

Brackmarsch

Die Brackmarsch ist ein aus kalkigem bis kalkfreiem brackigem → Schlick (Salzgehalt bei der Sedimentation 0,5‰ bis 18 ‰) im Küstenbereich entstandener Boden mit dichtem Gefüge (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 30).

brandungsfreies → Watt

Relativ geschützt liegende Wattflächen mit einer → Wassertiefe $d < 5$ m (bei MThw) werden als brandungsfreies Watt bezeichnet. Die Wellen können über die → Wattströme oder das Randwatt in diese Bereiche vordringen. Brandung tritt auch bei starken Winden kaum auf (SIEBERT, 1974, in: THORENZ, 1991, S. 26).

Brechkriterium

Nach dem Brechkriterium ist die maximal mögliche → Wellenhöhe H_{\max} von der → Wassertiefe d abhängig ist: $H_{\max} / d = 0,78$; in der Praxis: $H_{\max} / d = 1,0$. Steigt die Höhe der Welle weiter an, bricht sie.

Buhne

„senkrecht zum Ufer in ein Gewässer vorgebautes Uferschutzwerk aus Busch, Holz, Stein, Stahlbeton oder Asphalt. Buhnen haben den Zweck, die Strömung des Wassers vom Ufer abzuweisen, auf die Wasserbewegung beruhigend zu wirken und das Absetzen der im Wasser befindlichen → Feststoffe (→ Schlick, Sand) zu fördern. Das in das Ufer eingebundene landseitige Ende der Buhne heißt Buhnenwurzel, der wasserseitige vordere Teil Buhnenkopf. Zwischen zwei benachbarten Buhnen liegende Strand- oder Wattflächen werden Buhnenfelder genannt“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 33)

Bult → Horst

Buschlahnung

mit Buschwerk (→ -faschinen) gefüllte → Lahnung

Byssusdrüse

an der Fußwurzel von → Miesmuscheln sitzende, eiweißreiche Fäden produzierende Drüse (JANKE/KREMER, 1990, S. 78)

Byssusfäden

fädige, hornartige Ausscheidungen der → Byssusdrüse (STREBLE, 1990, S. 90 / STOCK ET AL., 1996, S. 623). Sie dienen u.a. den → Miesmuscheln zur Anheftung (MEYER ET AL., 1994, S. 206).

- Damm** „Die als Dämme bezeichneten wallartigen Schutzwerke liegen im allgemeinen quer zur Wasserströmung. Sie sollen in tidebeeinflussten Gebieten das von höher gelegenen Flächen (Moore u. dgl.) oder aus benachbarten Bereichen nach den Niederungen abfließende Oberflächenwasser abfangen oder Binnenwasser stauen oder speichern (Binnendämme). Im → Deichvorland und im → Watt (Außendämme) haben sie die Aufgabe, Strömungen von → Deichen und Küstenschutzwerken fernzuhalten oder in → Landgewinnungsfeldern die Wellen zu dämpfen, damit → Schlick und Feinsand sich absetzen können. Mit → Hauptdeichen verbundene Dämme dienen in allen Fällen dem Schutz eines beschädigten → Deiches oder dessen Sicherung bei Bauarbeiten“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 41).
- Deich** wallartige Erdaufschüttungen mit befestigten Böschungen (Grasnarbe, Stroh, Stein, Asphalt). „Sie sichern die Niederungen entlang der Meeresküste und der Strom- und Flußmündungen vor Überflutung bei hohen Meeres- und Binnenwasserständen. Derartige Bauwerke werden im Küstengebiet der Nordsee Deiche genannt. Sie verlaufen in der Regel parallel zur → Uferlinie des Gewässers, d.h. sie sind der Wasserströmung ungefähr gleichgerichtet. Am Meeresufer folgen sie fast immer dem Küstenverlauf“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 40f).
- Deichfuß** „Grenzlinie bzw. Grenzbereich zwischen Deichböschung und Gelände, außenseitiger und binnenseitiger Deichfuß“ (STADELMANN, 1981, S. 140)
- deichreif** „Das → Vorland ist deichreif, wenn seine Höhenlage zu den Tidewasserständen nach der Eindeichung eine für die landwirtschaftliche Nutzung ausreichende Sielentwässerung (bei 40 cm bis 50 cm über MThw) ermöglicht und wenn die zu bedeichende Fläche so groß ist, daß die Deichbaukosten und die künftige Deichunterhaltung wirtschaftlich sind. Nach alter Erfahrung ist die Bedeichung mit einem → Hauptdeich erst lohnend, wenn auf 1 ha bedeicher Fläche nicht mehr als 10 m Deichlänge entfallen“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 44f). IWERSEN (1953, S. 29ff) nennt drei Kriterien der Deichreife, unabhängig von der Höhe der einzudeichenden Wattfläche. Niedrigliegende Flächen können bedeicht werden, wenn
- a) ein ausreichender Tongehalt der Wattsedimente oder eine auf dem → Sandwatt in ausreichender Stärke aufgelagerte Schlickschicht (→ Schlick) vorhanden ist,
 - b) die Möglichkeit einer optimalen Regelung des Wasserhaushaltes (d.h. der Gestaltung eines laufend günstigen Verhältnisses zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel) unter wirtschaftlich tragbaren Voraussetzungen besteht und
 - c) eine schnelle und nachhaltige Senkung der im Standort vorhandenen Salzwerte bis unter die physiologische Gefahrgrenze und Verhinderung eines jahreszeitlich wiederkehrenden kapillaren Salzaufstiegs möglich ist.
- Deichschau** traditionell in regelmäßigen Abständen (Frühjahr, Herbst) stattfindende Prüfung der Ordnungsmäßigkeit und Standfestigkeit der → Hauptdeiche und ihres Szubehörs durch die Deichschaukommission (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 45)
- Deichverband** „Selbsterwaltungskörperschaft mit der Aufgabe, durch Bau und Instandhaltung von → Deichen ihr Verbandsgebiet vor Hochwasser und Sturmtiden zu schützen. Die Deichverbände üben ihre Aufgabe unter allgemeiner Aufsicht der Landkreise und unter technischer Aufsicht der staatlichen Wasserwirtschaftsämter aus“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 46).

Deichvorland

Das Deichvorland (früher oft als Maifeld bezeichnet) ist als natürliches Schutzwerk für den → Hauptdeich bedeutungsvoll. „Wenn es ausreichend breit ist (etwa 150 m bis 200 m), dämpft es merkbar den bei Sturmtiden am → Deich auftretenden Wellenschlag und Wellenaufbau. Es verhindert, daß nach einem Deichbruch die täglichen Tiden durch die Bruchstelle in das Binnenland eindringen. Auch für die laufende Deichunterhaltung ist es von großem Nutzen, indem der für die ständig notwendigen Ausbesserungsarbeiten am Deich benötigte Kleiboden aus dem → Vorland in unmittelbarer Deichnähe gewonnen werden kann. Eine landwirtschaftliche Nutzung des begrüneten Deichvorlandes ist wegen seiner geringen Höhe über dem mittleren Tidehochwasser (MThw) nur begrenzt möglich. Es kann zwar im Sommer als Grünland (Wiese, Weide) genutzt werden, aber selbst in ruhigen Sommermonaten kommt es nicht selten vor, daß bei einer etwas erhöhten Tide, die das Vorland überflutet, das dort weidende Vieh gefährdet oder das gemähte Andelgras (→ Andel) fortgeschwemmt wird. Um sich gegen diese sog. Heufluten zu schützen, wird, wenn es die örtlichen Verhältnisse zulassen, das Vorland mit einem → Sommerdeich umgeben. Die im Herbst und im Winter auftretenden Sturm- und Orkanfluten überfluten aber den Sommerdeich und setzen auch den sommerbedeichten → Groden oder Polder (Sommergroden oder -polder) unter Wasser. Um das Deichvorland in gutem Zustand zu erhalten, muß es ausreichend entwässert werden. Diesem Zweck dienen die zahlreichen, parallel zueinander verlaufenden Gräben (→ Grüppe). In ihnen strömt bei normalen Tiden das Seewasser ein und aus. Der sich in den Grüppen absetzende → Schlick wird von Zeit zu Zeit ausgegraben und auf die Mitte der → Beete geworfen. Auf diese Weise erhalten sie eine gewölbte Form und damit ein gutes Quergefälle nach den seitlichen Entwässerungsgräben (→ Entwässerung). Außerdem wird das Land durch den aufgeworfenen Schlickboden allmählich erhöht. Die Grüppen werden meist senkrecht zur Deichlinie angelegt“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 47).

Diatomeen (*Coscinodiscus radiatus*)

Als Diatomeen werden Kieselalgen, die im Salz- und Süßwasser vorkommenden „mikroskopisch kleinen (0,08 mm Durchmesser), einzelligen Pflanzen, die Kieselsäureschalen mit einer Pektinmembran besitzen bezeichnet. „Die Diatomeen werden von der Biologie und Geologie als Leitformen zur Beurteilung von Wattsedimenten herangezogen“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 50).

Energie des → Seegangs

Nach der linearen Wellentheorie kleiner Amplituden setzt sich die Energie E_{ges} einer Welle aus einem potentiellen (E_{pot}) und einem kinetischen Energieanteil ($E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$) zusammen: $E_{\text{ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = 1/8 \cdot \rho \cdot g \cdot H^2$

Energieverlustkoeffizient k_v

→ Reflexionskoeffizient

Entwässerung

im Landwirtschaftlichen Wasserbau: Ableitung von überschüssigem Bodenwasser und/oder oberirdischen Wasser mit Dränen und Vorflutern (NAW im DIN: DIN 4047-9, 1986, S. 2); analoge Übertragung ist auf den Küstenbereich möglich; hier ist eine Entwässerung im Sinne einer positiven → Anlandung erforderlich (siehe → Quergraben, → Grüppe)

Epilitoral

höchster Wattbereich oberhalb rd. MThw + 1,50 m, episodisch (nur bei Extremwasserständen) überfluteter Landbereich, ist jedoch durch salzhaltiges Grundwasser und durch vom Wind herangezogenen Wasserstaub noch maritimen Einflüssen unterworfen (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 8 / DOLDER/DOLDER, 1988, S. 20ff / JANKE/KREMER, 1990, S. 28f / WIELAND, 1990, S. 73f / STOCK ET AL., 1996, S. 624)

Erosion „alle Vorgänge, die auf der Erdoberfläche zu Massenverlagerungen von Böden, Lockergesteinen und Festgesteinen führen, durch in Bewegung befindliche Medien (Wasser, Eis, Schnee) oder Wind“ (NAW im DIN: DIN 4047-7, 1993, S. 3)

ESBJERG-Deklaration

Seit 1978 findet etwa alle drei Jahre eine „Trilaterale Regierungskonferenz zum Schutz des → Wattenmeeres“ (TRK) mit Beteiligung der Umweltminister der Niederlande, Dänemarks und Deutschlands statt; z.B. 6. TRK in Esbjerg, 1991 oder 7. TRK in Leeuwarden, 1994 (ENEMARK, 1992, S. 27f / ENEMARK, 1995, S. 25ff). Am 13. November 1991 wurde anlässlich der 6. TRK eine Ministererklärung zum Schutz des Wattenmeeres gemäß dem „Vermeidungs-Prinzip“ für einen ungestörten Ablauf natürlicher Prozesse unterzeichnet. „Sie bildet ein fast gesetzegleiches Regelungswerk mit Präambel, gemeinsamen Grundsätzen, gemeinsamen Zielen und 84 detaillierten Vereinbarungen. Außerdem enthält sie ausführliche Vorschriften für ein Betreuungs- und Aufsichtssystem, einen Seehund-Schutzplan sowie ein Memorandum zur Zusammenarbeit zwischen England und den Wattenmeer-Staaten“. Sie wird als sogenannte ESBJERG-Deklaration bezeichnet (AUGST, 1994, S. 3).

Eulitoral Der Küsten-Lebensraum „Eulitoral“ liegt im Bereich zwischen Meer und Land, der regelmäßig bei Hochwasser überflutet wird und bei Niedrigwasser trockenfällt. An der Nordseeküste sind dies vor allem das im Gezeitenrhythmus trockenfallende → Watt und der Gezeitengürtel an Stränden (REINECK, 1978, S. 72 / EHLERS, 1994, S. 8 / RACHOR, 1994, S. 352).

euryök weite Toleranz gegenüber Schwankungen von Umweltfaktoren (MEYER ET AL., 1994, S. 207), Gegenteil: stenök

Faschine, Schine

Das 3,0 m bis 6,0 m Meter lange, 0,15 m bis 0,30 m dicke, mit Weidenruten oder Bindedraht gebundenes Bündel aus Nadelholz- oder Laubholzreisig, das für den Bau von → Lahnungen oder Windfangzäunen eingesetzt wird, wird als Faschine (ehemals Schine bezeichnet); Faschinen von 0,10 m bis 0,15 m Durchmesser und mehreren Metern Länge als Faschinenwürste. Senkfaschinen sind bis zu 1,00 m stark und mit Steinen gefüllt (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 61). Faschinen werden zum Bau von → Lahnungen verwendet sowie in 1,00 m bis 1,50 m Länge aufrecht nebeneinander in den Sand gesetzt, als Sandfangzäune, zudem werden sie zum Schutz unter Wasser liegender Bauwerksteile gegen Unterspülung eingesetzt.

Feststoff „Feststoffe sind feste, organische oder anorganische Stoffe, die vom Wasser transportiert bzw. abgelagert werden“ (STADELMANN, 1981, S. 141). Sie werden unterschieden in:

- Schwimmstoffe, die leichter als Wasser sind und an der Oberfläche treiben;
- Schwebstoffe, die mit dem Wasser im Gleichgewicht stehen oder durch Turbulenz in Schwebe gehalten werden (Feinsand, Ton, organische Stoffe) und

- Sinkstoffe; dieser Begriff beinhaltet diejenigen Schwebstoffe, die sich bei ruhigem Wasser auf dem Boden absetzen.

Flachwasserbereich

Im Flachwasserbereich eines Gewässers ist die Wellenlänge L mindestens 20 mal größer als die \rightarrow Wassertiefe d ($d / L < 0,05$).

freiliegendes \rightarrow Watt

Nach MÜLLER (1960, S. 94) bildet die Linie entlang der tiefstmöglichen Quellerbesiedlung (\rightarrow Queller) die obere Grenze des freiliegenden Watts.

Grassode Soden werden gestochen oder maschinell geschnitten. Maschinell geschnittene Sodenbahnen werden als „Rollsoden“ bezeichnet und sind 0,25 m bis 0,30 m breit, rd. 0,03 m dick, 1,00 m bis 2,00 m lang und werden zum Transport aufgerollt. Für die von Hand geschnittenen \rightarrow Rasensoden (0,05 m bis 0,18 m stark) wird die Grasnarbe des Vorlands mit dem Rasenschneider schachbrettartig in 0,30 m x 0,30 m große Quadrate geschnitten. Die Besodungsarbeiten sollten möglichst bis Ende Mai abgeschlossen sein, damit bis zum Herbst eine gute Verwurzelung der Soden mit dem Untergrund entstehen kann. Die frisch gewonnenen Grassoden werden auf einem reichlich feuchten, mit der Harke aufgerauhten Planum verlegt und anschließend mit Erde bestreut. Grassoden werden im Wasserbau zur Abdeckung von Erdlahnungen, Deichböschungen oder Deichbermen verwendet und benötigen zum Heranwachsen mindestens 12 bis 15 oder noch mehr Jahre.

Groden Das \rightarrow Vorland wird im Oldenburger Land als (Außen-)Groden bezeichnet. (NMELF, 1985, S.38)

Grüppe, Beetgraben, Medjeschlot, Wattgrüppe

„Als Grüppen werden die flachen Gräben im \rightarrow Landgewinnungsfeld, \rightarrow Vorland oder bedeckten Marschgebiet (\rightarrow Marsch) bezeichnet. In der \rightarrow Anwachszone (\rightarrow Anwachs) der \rightarrow Lahnungsfelder und im \rightarrow Vorland sorgen sie als Teil eines Grabensystems (Grüppenfeld) für eine Beruhigung der Tideströmungen und Förderung der \rightarrow Auflandung“ (WIELAND, 1990, S.137), während sie im eingedeichten Marschgebiet nur für die \rightarrow Entwässerung benötigt werden. In der Regel verlaufen die Grüppen senkrecht zur Küste (Deichlinie), sind 2,00 m breit, nur 0,20 m tief und teilen das Landgewinnungsfeld in etwa 10 m breite \rightarrow Beete ein.

Halophyten, Salzpflanzen, Salzgräser

Als Halophyten werden Pflanzen, die den Salzgehalt des Meerwassers vertragen und eine gewisse Salzmenge in ihrem Gewebe aufnehmen, z.B. der \rightarrow Queller (*Salicornia europaea* Linné) und das \rightarrow Schlickgras (*Spartina townsendii*) bezeichnet, Pflanzen auf den ausgesüßten Böden der \rightarrow oberen Salzwiesen als Glykophyten (JANKE/KREMER, 1990, S. 26 / RACHOR, 1994, S. 352).

Hauptdeich

„Seedeich, Schaudeich, Winterdeich, Landesschutzdeich u. a., Schutzwerke zur Sicherung der Küsten- und Inselgebiete gegen die Strumtiden der Nordsee. Als öffentliche Schutzwehre sind sie der staatlichen Aufsicht unterstellt. Ihre Erhaltung in wehrfähigem Zustand (d.h. bauliche Unterhaltung, Instandsetzung, Wiederherstellung) ist nach nach deichgesetzlichen Bestimmungen geregelt, die in den Ländern Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen in den Landeswassergesetzen, in Niedersachsen in einem Sondergesetz für \rightarrow Deiche enthalten sind. In der Regel obliegt die Deicherhaltung den \rightarrow Deichverbänden, die ihre verantwortungsvolle Aufgabe mit staatlicher Unterstützung ausführen. Zweimal im Jahr (Frühjahr und Herbst)

werden die Hauptdeiche mit ihren Anlagen (Siele, Schutz- und Sicherungswerke) auf ihren ordnungsgemäßen Zustand geprüft (→ Deichschau). ... Nach ihrer örtlichen Lage und damit ihrer Beanspruchung durch → Wasserstand, Wellen, Strömung und Eis werden die Hauptdeiche in See-, Strom- und Flußdeiche eingeteilt“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 82)

Hauptentwässerung

(meistens rechtwinklig) vom → Deich mittig durch das → Lahnungsfeld (→ Lahnung) bzw. die → Lahnungsöffnung führender Graben; sog. Hauptentwässerungsgraben, durch den das Wasser einströmen kann und eine gezielte → Entwässerung des → Lahnungsfeldes erlangt wird

Hauptlahnung

(meistens rechtwinklig) vom → Deich in das → Vorland führende → Lahnung

Heller Das → Deichvorland bzw. die → Salzwiese wird in Ostfriesland als Heller bezeichnet (NMELF 1985, S.38 / ERCHINGER ET AL., 1994, S. 1).

Herzmuschel (*Cerastoderma edule* Linné)

Die Herzmuschel ist eine herzförmige, bauchige, bis zu 0,05 m breite Muschel, die unmittelbar unter der Wattoberfläche, vorwiegend im sandigen Sediment mit schlickigen Beimengungen siedelt. Pro Quadratmeter können bis zu 2.000 Exemplare auftreten (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 86).

Höft, Höfter, Hoft, Haupt

1. „ins Wasser vorgebauter, breiter → Damm mit senkrechten Wänden zum Anlegen von Schiffen für Lös- und Ladegeschäfte (Kaizunge),
2. vorspringender Teil eines → Deiches, eines Dammes oder einer Mole vor einer Hafeneinfahrt. Das Höft hat hier den Zweck, die Breite der Hafeneinfahrt soweit einzuengen, daß das Hafenbecken vor Wellen, → Seegang, Strömung oder Treibeis möglichst gut geschützt ist. Der hafenseitige Teil eines Höftes wird meist als Schiffsanlegestelle hergerichtet.
3. mancherorts werden auch kurze → Buhnen mit Höft bezeichnet“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 87f).

hohes Watt

Bereich unterhalb Mthw - 0,60 m (HOFSTEDTE, 1996, S. 56)

Horst, Bult

dichter, fleckenhafter Pflanzenbestand im Grenzbereich Außengroden/→ Watt, der wie eine Insel über den Wattboden herausragt (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 9)

Hydrologie

„Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter der Landoberfläche sowie in den Küstengewässern“ (NAW im DIN: DIN 4049-1, 1992, S. 3); Adjektiv: hydrologisch

Klei

schwerer, zäher, mergelhaltiger, steinfreier, toniger Schwemmboden, der durch jahrzehntelange Verdichtung aus → Schlick entsteht (HINRICHS, 1931, S. 111) bzw. aus Sinkstoffen des Meeres entstandener alluvialer Marschboden (DIECKMANN, 1985, S. 139)

Koog

In Schleswig-Holstein und Dänemark wird eingedeichtes Marschland gebräuchlicherweise als Koog bezeichnet. In Ostfriesland werden diese Flächen Binnengroden, Binnendeichsland oder Polder genannt.

Kotpillenwurm (*Heteromastus filiformis* Clap.)

Der Kotpillenwurm ist ein roter, fadendünnere Wurm, der sedimenttypisch für den → Schlick ist. Im weichen Schlick der Prielränder (→ Priel) bildet er größere Siedlungen, die durch schwärzliche Kothäufchen an der Oberfläche gekennzeichnet sind (JANKE/KREMER, 1990, S.59).

Küstenlinie

„in der Topographie z.B. durch außenseitigen Deich-, Dünen- oder Kliffuß oder durch Küstenschutzbauwerke kenntliche Linie oberhalb der → Uferlinie an der Küste des Festlandes, der Inseln im Meer sowie in den Mündungsstrecke der ins Meer mündenden Flüsse, die in der Regel nur bei Wasserständen über mehrjährigem MHW oder MHTW überflutet wird“ (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 34)

Küstenschutzmanagement, Küstengebietsmanagement, Coastal Zone Management (CZM)

Strategien, basierend auf dem geschichtlich gewachsenen Grundverständnis, den ständig von Überflutungen bedrohten Küstenraum in gemeinschaftlicher Anstrengung zu erhalten und in ihm zu überleben (KUNZ, 1993, S. 1064). Wesentliche Merkmale sind die Schaffung leistungsfähiger administrativer Strukturen, die Fortentwicklung und Nutzung der Technik, der Gesellschaftliche Konsens über die Priorität des Küstenschutzes sowie der damit verbundenen Gebietsentwässerung (s. hierzu z.B. BANTELMANN, 1966 / DVWK, 1992 / VAN DE VEN, 1993).

Lahnung, Buschdamm, Schlenge, Schlickdiene, → Schlickfänger

vergleichbar einem buhnenartigen (→ Buhne) → Damm vor Seedeichen; in der Regel aus zwei Pfahlreihen bestehend, zwischen denen Reisigbündel (→ Faschinen) fest eingepackt und verschnürt sind; regional sind auch andere, massivere Konstruktionen zu finden. Sie beruhigen die Meereswasserströmung und fördern die Schlickablagerung (→ Schlick) an der Küste (WIELAND, 1990, S. 139).

Lahnungsfeld, Landgewinnungsfeld

von Lahnungen eingefasste, in der Regel begrüpte, seedeichnahe Anwachsfläche (→ Anwachs) im → Watt (WIELAND, 1990, S.139)

Lahnungskopf

Bereich vor der seeseitigen → Querlahnung zwischen benachbarten → Lahnungsöffnungen

Lahnungsöffnung, Lahnungstor, Durchlaß, → Stöpe

in → Querlahnungen befindliche, ca. 15 m bis ca. 30 m breite Öffnung durch die der Hauptentwässerungsgraben (→ Hauptentwässerung) geführt wird (STADELMANN, 1981, S. 53)

Lahnungswerk, Werk

Ein Lahnungswerk besteht aus → Hauptlahnung und → Querlahnung sowie den dazugehörigen → Abweisern, sofern vorhanden.

Landgewinnung

Der Begriff Landgewinnung bezeichnet die Förderung der Entstehung von neuem → Deichvorland mit Hilfe von → Landgewinnungswerken in Verbindung mit → Begrüppungen und früher auch biologischen Arbeiten (Quelleransaat, Anpflanzung von → Andel oder → Schlickgras) als Maßnahme im Rahmen des aktiven Küstenschutzes. „Nach dem Zweck unterscheidet man → Vorlandgewinnung

und → Neulandgewinnung. Die Vorlandgewinnung dient dem → aktiven Küstenschutz. Sie bezweckt die Schaffung oder Sicherung eines für den Deichschutz ausreichend breiten (d.h. 150 m bis 200 m) → Außengroden (→ Hellers) vor dem → Hauptdeich. Ein solches → Vorland ist nicht nur der beste und sicherste Deichschutz, es ist auch bedeutungsvoll bei der → Grassoden-Gewinnung und für die Kleiboden-Entnahme für Deicharbeiten oder für eine landwirtschaftliche Nutzung. Das im Rahmen des aktiven Küstenschutzes gewonnene Vorland wird nur in Ausnahmefällen bedeiht. Bei der Neulandgewinnung wird ein möglichst breiter Außengroden (500 m und mehr) erstrebt mit dem Ziel, später dieses neue Land zu bedeichen, zu besiedeln und landwirtschaftlich zu nutzen“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 106). Heute wird anstelle von Landgewinnung i.d.R. von → Vorlandbildung gesprochen.

Landgewinnungswerk

Als Landgewinnungswerke wird das System von → Dämmen (Lahnungen, → Bühnen) und Gräben (→ Grüppe) im → Watt vor der → Uferlinie zum Zweck der Volandgewinnung bezeichnet. In den durch die Dämme gebildeten, 100 m x 100 m bis 400 m x 400 m großen Feldern „kommt das bei Flut eingeströmte Seewasser zur Ruhe und setzt seine mitgeführten → Feststoffe (Feinsand, → Schlick) auf den Wattflächen (→ Beeten), vor allem aber in den Grüppen, ab. Sind diese im Laufe der Zeit mit Schlick angefüllt, werden sie wieder freigegraben. Der ausgehobene Schlick wird auf die Beete geworfen, die dadurch erhöht und allmählich zu neuem Land werden“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 107).

Leitbild an Wertvorstellungen orientierte Zielvorgaben für individuelles und gesellschaftliches Handeln (DVWK, 1996, S. 283)

Lineare Wellentheorie kleiner Amplituden (AIRY-LAPLACESche Wellentheorie)

Die lineare Wellentheorie geht von folgenden Voraussetzungen aus (SPM, 1984, S. 2-2):

1. Sinusförmige Oberfläche, d.h. symmetrisches Wellenprofil
2. Kleine Amplituden, d.h. Wellenhöhe $H \ll$ Wellenlänge L bzw. $H \ll$ → Wassertiefe d
3. Ebener Untergrund
4. Ideale Flüssigkeit, d.h. reibungsfrei, inkompressibel, homogen
5. Kein Einfluß der Luftbewegung auf die Wellenbewegung

In der Praxis können viele Probleme mit guter Genauigkeit auf der Grundlage der linearen Wellentheorie behandelt werden.

Marsch Als Marsch wird ein alluvialer Schwemmlandboden bezeichnet, der aus Ablagerungen des Meeres oder der Tideflüsse (→ Brackmarsch) entstanden ist und eine Pflanzendecke trägt (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 116).

maximale Wellenhöhe (H_{\max})

höchste → Wellenhöhe der → Wellen einer Beobachtungszeitspanne

Miesmuschel (*Mytilus edulis* Linné)

Im Gegensatz zu anderen Muscheln leben Miesmuscheln nicht eingegraben, sondern auf dem Boden. Sie bevorzugen das relativ feste → Sandwatt, das durch gröbere Sandkörnchen gebildet wird und ernähren sich im stark strömenden Wasser besonders gut. Mit Hilfe von körpereigenem Sekret, den → Byssusfäden, heften sie sich zu großen Verbänden (Muschelbänken) aneinander und können so nicht einfach fortgespült werden (STREBLE, 1990, S. 90).

Mischwatt, Schlick-Sand-Watt

Das Mischwatt ist eine Übergangszone zwischen reinem Sand- und reinem → Schlickwatt. Es besteht aus Feinsand von 0,063 mm bis 0,5 mm Korndurchmesser, unterschiedlichen Schluffanteilen (0,005 mm bis 0,063 mm Korndurchmesser), Ton und organischen Stoffen. → Rippeln sind hier weniger ausgeprägt als im → Sandwatt. Das von allen Wattarten mit Tieren und Pflanzen am dichtesten besiedelte Mischwatt ist von großer Bedeutung, weil hier die größten → Biomassen im Vergleich zu anderen großflächigen Lebensräumen produziert werden. Dafür sorgen insbesondere die Sandklaff- und → Herzmuscheln, die relativ alt werden können, so daß die ständige Neubildung von Biomasse hier zwar niedriger als im Schlickwatt, aber höher als im Sandwatt ist (FIEGE/HAGMEIER, 1995, S. 176).

Morphodynamik

zeitlich und räumliche Prozesse, die zur Veränderung der Oberfläche der Erde führen (DVWK, 1996, S. 283 / STOCK ET AL., 1996, S. 626); Adjektiv: morphodynamisch

Morphologie

Wissenschaft von den Oberflächenformen (STOCK ET AL., 1996, S. 626); Adjektiv: morphologisch

Nationalpark

großräumiges Gebiet zum Schutz der Natur mit dem höchsten gesetzlichen Schutzstatus (→ Schutzzone / MEYER ET AL., 1994, S. 207)

Neulandgewinnung

ursprünglich Gewinnung möglichst breiter Vorländer (≥ 500 m) mit dem Ziel, dieses Land zu bedeichen, zu besiedeln und landwirtschaftlich zu nutzen (LÜDERS/LUCK, 1976, S.106)

nicht-kohäsiv

Gegenteil: → kohäsiv

normative Vorgaben

Gesetze, Verordnungen und internationale Übereinkünfte

obere Salzwiese

→ Zonierung

passiver Küstenschutz

Im Mittelpunkt des passiven Küstenschutzes steht die Vorlanderhaltung. Sie beinhaltet die Sicherung von im Abbruch liegenden Küstenstrecken mit Hilfe von Schutzwerken, deren Aufgabe darin besteht, die unmittelbar an Schadensstellen auftretenden Angriffskräfte des Wassers (Brandung, Strömung, Eis) aufzufangen und unschädlich zu machen, wie z.B. bei der Sicherung des → Deichfußes durch ein massives Deckwerk. Hierbei bleiben im Gegensatz zum aktiven Küstenschutz die Angriffskräfte unverändert und werden nicht von den Schadensstellen abgewiesen (LÜDERS/LUCK, 1976, S.141).

Pedogenese, Bodengenese

bodenbildende Prozesse, wie z.B. die Oxidation, die Entsalzung, die Umladung der Sorbenten, die Sackung oder die Gefügeausbildung (BURGHARDT, 1995, S. 92)

Pegelnullpunkt

Höhenlage des Nullpunktes der Pegellatte bezogen auf eine amtlich festgelgte Ausgangs- und Bezugsfläche für Höhenmessungen (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 30)

Priel, Au, Piep, Ritt, Seegat (→ Gat)

Als Priele werden Wasserrinnen im → Watt, die auch zur Tideniedrigwasserzeit noch mit natürlichem Gefälle Wasser führen, bezeichnet. „Priele werden durch das bei Ebbe aus ihren Wateinzugsgebieten ablaufende Wasser gestaltet; sie münden in → Baljen oder → Wattströme. Das bei Flut von See kommende Wasser benutzt bei seinem Vordringen in das Wattgebiet zunächst die Prielbetten. Im weiteren Verlauf der Flut ufert es aus und überströmt dann die Wattflächen. Die der Watschiffahrt dienenden Priele sind in der Überflutungszeit nur noch an den an ihren Rändern aufgestellten Pricken zu erkennen. Diese müssen jedes Jahr neu gesetzt werden, weil sich die Lage der Prielbetten ständig verändert“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 148).

Pygospio-Wurm (Pygospio elegans Clap.), Rasen-Ringelwurm

Der Pygospio-Wurm ist ein kleiner, äußerst dünner Wurm, der in schmalen (rd. 2,00 mm breiten), aus Sand und Schlicketeilchen (→ Schlick) gekitteten Röhren lebt, die normalerweise bis 0,10 m senkrecht in den Boden reichen. Seine Verbreitung ist nicht unbedingt vom Sediment abhängig (MÜLLER, 1960, S. 52 / JANKE/KREMER, 1990, S. 62).

Queller (Salicornia europaea Linné), Glaskraut, Glasschmalz, Krickfuß (Ostfriesland), Krückfuß, Quendel, Seekrappe, Soltje, Meerkraut, Salzkraut

Die bis 0,20 m hohe Quellerpflanze tritt zahlreich als einjährige Salzwasserpflanze im hochliegenden → Watt auf. Diese Pionierpflanze gedeiht bis etwa 25 cm unter mittlerem Tidehochwasser (MThw). „Für die → Landgewinnung an der Meeresküste ist der Queller nützlich, weil eine mit diesen Pflanzen dicht bestandene Wattfläche die Wasserbewegung beruhigt, wodurch das Absetzen des → Schlicks gefördert wird. Außerdem befestigen die Wurzeln des Quellers den Wattboden.“ Früher wurde die Pflanze als Nahrungsmittel genutzt, indem sie wie Spinat, Salat oder Gurke zubereitet wurde. Vom Vieh wird der Queller nicht gefressen (LÜDERS/LUCK, 1976, S.151). In Ostfriesland wird unter Queller die zuerst auftretende Grasart, der → Andel verstanden. Der Queller selbst wird dort als Krickfuß bezeichnet, als Quellergras die Gesamtheit der Vorlandgräser (HINRICHS, 1931, S. 111f).

Quergraben

→ Ableiter

Querlahnung

rechtwinklig zu den → Hauptlahnungen verlaufende → Lahnungen

Rasensode → Grassode

Reduktionshorizont

Als Reduktionshorizont wird die Bodenschicht (bzw. -horizont) bezeichnet, in der „infolge Sauerstoffmangels, verursacht durch O₂ verbrauchende Organismen und begünstigt durch eine Wassersättigung, chemische Reduktionsprozesse ablaufen. Mit Eintreten der Wassersättigung – infolge Stauwassereinfluß, Grundwasseranstieg oder Überflutung – wird die → Sauerstoffdiffusion aus der Atmosphäre fast vollständig unterbunden, der noch verbleibende Sauerstoff wird von aeroben Bak-

terien für den → Abbau organischer Substanzen verbraucht. Ständig sauerstofffreie → Bodenhorizonte sind durch Eisensulfide (vor allem FeS) oft schwarz gefärbt“ (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1989, S. 391). In der Bodenkunde werden die → Mineralhorizonte im Grundwasserbereich, die → redoximorphe Merkmale aufweisen, mit einem G bezeichnet.

Reflexion Form der Wellenführung, nachdem diese auf ein Hindernis stoßen; Total- oder Teilreflexion ist möglich (SPM, 1984, S. 2-112ff)

Reflexionskoeffizient k_R

Verhältnis der Höhe der reflektierten Welle H_R vor dem Bauwerk zur Ausgangswellenhöhe H_i ; ist zusammen mit dem → Transmissionskoeffizienten k_T und dem → Energieverlustkoeffizienten k_v Bestandteil der allgemeinen Energiegleichung $k_T^2 + k_R^2 + k_v^2 = 1$; Beeinflussung durch die Konstruktion des Bauwerkes sowie Wellensteilheit und -angriffswinkel (SPM, 1984, S. 2-116)

Rhizomteile

Pflanzenteile

Rippel, Riffel

„wellenförmige Oberfläche des Sand- oder Wattbodens, die durch strömendes Wasser (Strömungsrippel), durch Wellen (Orbitalrippel) oder – im Bereich trockener Strände – durch Wind (Windrippel) hervorgerufen wird“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 155)

Rote Liste Zusammenstellung von gefährdeten Tier- und Pflanzenpopulationen; „regional ausgestorbene, verschollene, vom Aussterben bedrohte und anders gefährdete Arten, z.B. durch Bestandsrückgang, Biotopeinengungen, -verluste“ (RACHOR, 1994, S. 355)

Ruhewasserstand, Ruhewasserspiegel

→ Wasserstand, der sich beim Ausgleich von → Wellenberg und → Wellental ergibt (NAW im DIN: DIN 4049-3, S. 41)

18-Ruten-Graben (1 Rute = 5,02 m)

traditionell in einem Abstand von 90,4 Meter vom → Deichfuß entfernter Graben im Vorlandbereich; ab 1971 Verringerung der Entfernung auf 70,4 Meter (RACHOR, 1994, S. 628)

Salzweide Vorländer, die durch ständiges Beweiden eine auf wenige Arten beschränkte Flora aufweisen, die vorwiegend aus → Andel und Salzrotschwengel besteht (STADELMANN, 1981, S. 145)

Salzwiese Salzwiesen sind die über der Hochwasserlinie gelegenen Flächen, die nur noch selten, insbesondere im Winterhalbjahr bei Wind- und → Sturmfluten, von Salzwasser bedeckt werden. Die Salzwiesen bilden die Zone, in der Meeres- und Landfauna aufeinandertreffen und sich vermischen. Im Gegensatz zum → Wattenmeer befindet sich hier eine geschlossene Pflanzendecke, die zumeist aus Salzpflanzen besteht, z.B. Andelgras (→ Andel), Rotschwengel und Strandflieder (NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 23ff) und gegenüber den → Salzweiden eine „artenreichere Pflanzengesellschaft aufweist, weil die Salzwiesen nicht oder nicht regelmäßig beweidet werden“ (STADELMANN, 1981, S. 145). Die Benennung dieses Lebensraumes ist regional unterschiedlich, in Schleswig-Holstein wird er als → Vorland bezeichnet.

Sandklaffmuschel (*Mya arenaria* Linné)

„Die Sandklaffmuscheln siedeln (adult) in einer Tiefe von 0,20 m bis 0,25 m vorwiegend in schlicksandigen Gebieten und stehen nur durch den Siphon in Verbindung mit der Wattoberfläche“ (MÜLLER, 1960, S. 53).

Sandpier (*Arenicola marina* Linné), Köderwurm, Pierwurm

Der Pierwurm ernährt sich in seinem 0,25 m tiefen Wohnbau von den im Sand enthaltenen Nahrungspartikeln. Die jungen Pierwürmer leben im → Schlickwatt, während die erwachsenen, rd. 20 m bis 30 m langen Würmer im → Sandwatt und den dazwischen liegenden Übergängen des → Mischwatts leben (MÜLLER, 1960, S. 51).

Sandwatt „Der größte Teil der Flächen des → Wattenmeeres besteht aus Sandwatt, welches aus schwerem Grobsand der Minerale Quarz, Feldspat und Glimmer mit mehr als 0,50 mm Korngröße aufgebaut ist. Die → Priele des Sandwattes sind flach und breit, im Gegensatz zu den tief eingeschnittenen Prielen im → Schlickwatt“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 163). Die oben liegende sauerstoffreiche Schicht hat eine Stärke von 0,50 m bis 0,10 m, die darunter befindliche dunkle Schicht enthält keinen Sauerstoff. Äußerlich ist das Sandwatt von der gerippten (→ Rippel) Oberfläche geprägt, die durch die von Wind, Wellen und Tiden erzeugten Strömungen entstanden ist. Diese welligen Verformungen der Sandoberfläche treten mit sehr verschiedenen Abständen von Kamm zu Kamm auf und werden danach in Kleinrippel (kürzer als 0,50 m), Großrippel (bis 20 m) und Riesenrippel (mehr als 20 m Abstand) unterschieden. Die Artenvielfalt und Neubildung von → Biomasse ist in diesem → Watt, das reich an wirbellosen Tieren ist, zwar klein, aber dafür bewirken die hier typischen Tiere (Köderwürmer, *Arenicola marina* Linné) erstaunliche Sedimentumlagerungen (FIEGE/HAG-MEIER, 1995, S. 178).

Schleng → Lahnung

Schlick Schlick ist das aus schluffig-tonigen, kalkhaltigen oder kalkfreien, organische Stoffe enthaltenden, breiignassen Ablagerungen im Salz- und Brackwasserbereich bestehende Sediment. Charakteristische Korngrößenzusammensetzungen bestehen zu über 50% aus Schluff und Ton (unter 0,063 mm), unter 50% sehr feinem Sand (0,063 mm bis 0,125 mm), und sehr wenig Sand über 0,125 mm (WIELAND, 1990, S. 144). Aus dem Schlick ist der fruchtbare → Kleiboden der → Marschen entstanden. Frisch sedimentierter Schlick hat meist eine schwarze Farbe, die von seinem hohen Gehalt an Schwefeleisen herrührt. An der Luft nimmt die Oberfläche des Wattenschlicks durch Reaktion des FeS zu Fe₂O₃ eine graubraune Färbung an (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 167).

Schlickfänger

Schlickfänger ist eine Sammelbezeichnung für → Lahnungen, → Schlengen und → Buhnen, die zur → Vorlandgewinnung mit dem Ziel der Sedimentansammlung eingesetzt wird (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 167).

Schlickfall Mit Schlickfall wird der Absetzungsvorgang im Seewasser schwebender Schlickteilchen (→ Schlick) bezeichnet (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 167).

Schlickgras (*Spartina townsendii*, *S. anglica*), Reisgras

Das Schlickgras gehört zu den 40 bisher im → Wattenmeer nachgewiesenen, nicht heimischen Pflanzenarten. Schlickgras ist ein im → Watt bis zur Höhe des mittleren Tidehochwassers (MThw) in → Horsten wachsendes, maximal 1,00 m hohes, schilfähnliches Gras, das vom Vieh nicht gefressen wird. „Das Schlickgras leistet

beim Küstenschutz und bei der → Landgewinnung wertvolle Dienste, weil es durch seine dichten Halmbüschel wasserberuhigende Zonen schafft und mit seinem Wurzelwerk den Wattboden durchzieht“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 168), befestigt und so die Aufschlickung beschleunigt. Das Schlickgras ist, wie der → Queller, eine Pionierpflanze. „In natürlicher Vegetationsfolge wird es beim Höherwerden des Geländes vom → Andel abgelöst und verschwindet so allmählich in der Hellerflora gänzlich. An der Schleswig-Holsteinischen Westküste sind die Erfahrungen mit dem Schlickgras nicht so günstig, wie an der niedersächsischen Küste, weil sich dort das Schlickgras offenbar nicht in die natürliche Vegetationsfolge einpaßt und das Gras nach Erfüllung seines Zweckes nicht wieder verschwindet, sondern auf den Hellerwiesen (→ Heller) weitergedeiht“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 168).

Schlickkrebs (*Corophium volutator* Linné)

Der Schlickkrebs ist ein Wattenbewohner mit einer Durchschnittsgröße von rund 0,01 m, der eine rd. 0,05 m tiefe, u-förmige Röhre bewohnt und bevorzugt in schlickigen Bereichen lebt (MÜLLER, 1960, S. 53).

Schlickpegel

Diese Meßplatte zur Feststellung des Fortschrittes der Aufschlickung in → Landgewinnungsfeldern wurde z.B. Ende der 50er Jahre in Ostfriesland verwendet. Die Meßplatte wurde so in der Mitte eines → Beetes aufgestellt, daß sie vom Ufer aus abgelesen werden konnte. Auf einem an der Latte befestigten Schreibstreifen wurden in bestimmten Zeitabständen die beobachteten Aufschlickungshöhen vermerkt, um den Fortschritt der Aufschlickung verfolgen zu können“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 168).

Schlickwatt

Schlickwattflächen liegen in Küstennähe oder in ruhigen Bereichen wie → Lahnungsfeldern und Buchten. Sie sind schwarzgrau, glänzend und riechen stark. Der aus feinkörnigem Schluff (unter 0,063 mm Korngröße) und Ton bestehende → Schlick ist reich an organischen Substanzen (lebende und abgestorbene Pflanzen- und Tierreste, Zerreibsel, Algenpanzer, Schill). Das Schlickwatt ist sehr nährstoffreich und enthält viele Kieselalgen. Dennoch herrschen in diesem → Watt extreme Bedingungen: Die Flora und Fauna des Meeres muß hier lange Trockenliegezeiten, einen geringen Sauerstoffgehalt im dunkelgrauen Boden und große Temperaturschwankungen ertragen. Da nur die wenige Millimeter dicke obere Zone des Schlickbodens Sauerstoff enthält, können die hier lebenden Tiere ihre Nahrung nur in unmittelbarer Oberflächennähe suchen. Wegen der vielen extremen Umweltfaktoren existieren hier zumeist kleine Arten, wie → Schlickkrebs (*Corophium volutator* Linné) und → Wattschnecke (*Hydrobia ulvae* Penn.), die mögliche Verluste durch eine hohe Fortpflanzungsrate schnell wieder ausgleichen können. Diese vielen kleinen Lebewesen erreichen eine hohe → Biomasse und auch eine sehr hohe Neubildung von Biomasse, die deutlich größer ist als diejenige des → Mischwatts. Das ökologisch wertvolle Schlickwatt ist selten und daher besonders schützenswert. Die → Priele sind tief in den Boden eingeschnitten (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 169).

Schute

Die im Lahnungsbau verwendeten Schuten sind kleine Lastkähne (Schleppkähne) mit geringem Tiefgang, die keinen eigenen Antrieb besitzen. (Im Laderaum der im Zuständigkeitsbereich des ALW Husum verwendeten Schuten können rd. 220 m³ → Faschinen aufgeschichtet werden.)

Schutzzone

Um den Naturraum → Wattenmeer zu schützen und zu erhalten, existieren heute - gemäß BNatSchG – auf bundesdeutscher Ebene drei → Nationalparke. Seit 1985 bzw. 1986 haben die Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen ihre Wattenmeergebiete als Nationalparke ausgewiesen. 1990 wurde der rd. 11.700 ha (UMWELTBEHÖRDE HAMBURG, 1994, S. 1) große Nationalpark Hamburg gegründet (DE JONG, 1994, S. 17 / FIEDLER, 1991, S. 27). Der schleswig-holsteinische Nationalpark umfaßt rd. 285.000 ha (LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 2), der niedersächsische rd. 240.000 ha (NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 42, 44). Die Naturschutzform in Form eines Parks wird in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich ausgestaltet. Gemeinsam ist allen drei Nationalparken die Aufteilung in verschiedenen Schutz- und Nutzungszonen. Die am strengsten geschützte Ruhezone beträgt in Schleswig-Holstein 30%, in Niedersachsen 54% und im Hamburger Nationalpark 80% der jeweiligen Gesamtfläche aus (VAN DER WAL, 1992, S. 22).

Die Schutzzone I des Nationalparks Wattenmeer dient als Ruhezone, sie enthält besonders wertvolle und empfindliche Bereiche, die ganzjährig nur auf den zugelassenen und gekennzeichneten Wegen betreten bzw. befahren werden dürfen (NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 42 / UMWELTBEHÖRDE HAMBURG, 1994, S. 27f / LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 26).

Die Schutzzone II (Zwischenzone) bildet eine Pufferzone für die Zone I und ist weniger streng geschützt. Sämtliche Handlungen, die den Charakter des Wattenmeeres einschließlich der Inseln (Landschaftsbild, Naturgenuß) verändern, sind jedoch untersagt. In der Zeit vom 1. April bis 31. Juli, der Brut- und Aufzuchtzeit der Vögel, dürfen die → Salzwiesen außerhalb der gekennzeichneten Wege nicht betreten werden und Wasserfahrzeuge auf dem Watt nicht trockenfallen (DE JONG, 1994, S. 18). Die Schutzzone II umfaßt unter anderem Salzwiesen, die nicht in der Zone I liegen und auf denen naturverträgliche Nutzungen zugelassen sind (NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 44 / LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 26).

Die Schutzzone III umfaßt alle übrigen Flächen. Sie ist als Erholungszone konzipiert und kann als Badestrand oder Kureinrichtung genutzt werden (NATIONALPARKVERWALTUNG „NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER“, 1992, S. 44f / LANDESAMT FÜR DEN NATIONALPARK SCHLESWIG-HOLSTEINISCHES WATTENMEER, 1992, S. 26).

Schwebstoff

→ Feststoff

Sedimentation

„Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen; ... → Auflandung, → Verlandung und Akkumulation sind als Synonyme gebräuchlich“ (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 46)

Seegang Wellenbewegung der Meeresoberfläche im Zusammenwirken von Windsee und Dünung, deren Größe von der Stärke des Windes, seiner Wirkdauer und Streichlänge (Wirkweg) bestimmt wird. Mit Windsee wird die durch Windeinfluß und sofort einsetzende Bewegung der Wasseroberfläche bezeichnet (vornehmlich

erzwungene Schwingungen). Dünung ist die durch langanhaltenden Windeinfluß auf große Seeräume entstehende Bewegung der Wasseroberfläche (vornemlich freie Schwingungen). Die Zusammensetzung der beiden Bewegungen Windsee und Dünung wird als Seegang bezeichnet (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 174).

sessil, Sessilität

Lebensweise im Wasser; sesshaft, festsitzend auf einem Substrat (RACHOR, 1994, S. 356 / STOCK ET AL., 1996, S. 628)

signifikante Wellenhöhe, kennzeichnende Wellenhöhe (H_s , $H_{1/3}$)

arithmetisches Mittel der → Wellenhöhen von demjenigen Drittel der → Wellen einer Beobachtungszeitspanne, die innerhalb dieser die größten Wellenhöhen haben (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 42)

Sode → Grassode

Sommerdeich, Außendeich, Vordeich, Überlaufdeich, Poggendeich

„niedriger → Deich auf dem begrüntem → Vorland (Außen- → Groden, → Heller) vor dem → Hauptdeich. Er dient in erster Linie dem Schutz landwirtschaftlich genutzter Flächen gegen die leichten Sturmtiden in den Sommermonaten (Windfluten) oder gegen Sommerhochwasser der Flüsse. Zudem bildet der Sommerdeich auch einen Schutz für den Hauptdeich gegen Wellenangriffe. Da der Sommerdeich bei höheren Sturmtiden überströmt wird, müssen seine Böschungen sehr flach geneigt sein, damit sie beim Überströmen nicht beschädigt oder zerstört werden“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S., 188).

Sommergroden, Sommerkoog, Sommerpolder

„durch einen → Sommerdeich geschützter Außengroden (→ Koog, → Heller). Bei Sturmtiden wird der Sommerdeich in der Regel überströmt, und das bedeckte Grodenland (→ Groden) kommt unter Wasser. Deshalb kann ein Sommergroden meist nur als Grünland (nicht als Ackerland) genutzt werden“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 188).

Sommerkoog

→ Sommergroden, Sommerpolder

Sommerpolder

→ Sommergroden, Sommerkoog

Spreitlage, Spreutlage

„Böschungs- oder Uferschutz aus Weidenruten. Die 0,10 m bis 0,20 m starke Ruten-schicht wird durch Flechtzäune oder quergelegte Faschinenwürste (→ Faschine) und → Stackpfähle im Boden befestigt“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 191).

Stack Buschwerk mit Steinbelastung (HINRICHS, 1931, S. 112)

Stackpfähle

„Holzpfähle für die Herstellung von Buschbauwerken (Stackwerken), z.B. → Buhnen, → Lahnungen, → Schlengen, → Spreitlagen“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 193).

stenök nicht sehr anpassungsfähig, Gegenteil: → euryök

Stöpe Als Stöpe wird in Schleswig-Holstein die → Lahnungsöffnung für den Hauptentwässerungsgraben (→ Hauptentwässerung) in der deichparallelen → Lahnung bezeichnet (MELFF, 1993, S. I-3, II-5).

Sturmflut vorwiegend durch Windeinfluß erzeugte hohe Wasserstände (Windstau) an der Küste und in den Flußmündungen, deren Höchstwerte einen bestimmten → Wasserstand überschreiten (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 36).

Sturmflutklassifizierung:

1. *an Tidewasserständen orientiert* (BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (ehemals: DHI (Deutsches Hydrographisches Institut)), in: WIELAND, 1990, S. 58):

1,5 m bis 2,5 über lokalem mittleren Tidehochwasserstand = Sturmflut

2,5 m bis 3,5 über lokalem mittleren Tidehochwasserstand = schwere Sturmflut

ab 3,5 m über lokalem mittleren Tidehochwasserstand = sehr schwere Sturmflut

2. *an der Eintrittswahrscheinlichkeit des Scheitelwasserstandes (hier der Nordseeküste) orientiert* (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 36):

Tidehochwasserstände der mittleren jährlichen

Überschreitungszahl von 10 bis 0,5 = leichte Sturmflut (Windflut, Kantenfut)

Tidehochwasserstände der mittleren jährlichen

Überschreitungszahl unter 0,5 bis 0,05 = schwere Sturmflut (Sturmflut)

Tidehochwasserstände der mittleren jährlichen

Überschreitungszahl unter 0,05 = sehr schwere Sturmflut (Orkanflut)

Sturmflutklassifizierung → Sturmflut

Sturmflutschichtung

Als Sturmflutschichtung wird die über dem mittleren Tidehochwasserstand abgelagerte Wechschichtung von Kleiboden und Muschelschalen (Schill) in den Bodenprofilen des → Deichvorlandes bezeichnet. „Die Schillschichten sind bei Tiden mit starker Brandungswirkung entstanden, die dazwischenliegenden, meist dickeren Kleischichten haben sich bei ruhigerem Wasser abgesetzt“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 203).

Sublitoral Als Sublitoral wird der dauernd wasserbedeckte Lebensraum der flachen Gewässer (Schelfmeere), z.B. die ständig wasserführenden → Priele und Ströme im → Wattenmeer bezeichnet. Oberhalb des Sublitorals schließt das → Eulitoral an (REINECK, 1978, S. 72 / RACHOR, 1994, S. 356f).

Sukzession zeitliche Aufeinanderfolge von Lebensgemeinschaften am gleichen Ort (MEYER ET AL., 1994, S. 209)

Supralitoral

Als Supralitoral wird der Lebensraum, der nur bei hoch auflaufenden Tiden vom Salzwasser überschwemmt wird, bezeichnet. Hierzu gehören die unbedeckten, von dichter Vegetation (→ Halophyten) bedeckten Salzmarschen der Inseln und der Festlandsküste. Oberhalb des Supralitorals schließt sich das → Epilitoral an; unterhalb das → Eulitoral (KAMBECK, 1980, S. 3).

Teek → Treibsel

Teekgrenze, Treibselgrenze, Treibselkante, Geschwemmsellinie, Spülsaum

„Ablagerungen von Treibgut und Wasserinhaltsstoffen, die die obere Grenze der Benetzung nach hohen Wasserständen anzeigen“ (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 23)

Testgebiete

ausgewählte Bereiche entlang der schleswig-holsteinischen Nordseeküste, in denen im Rahmen des KFKI-/BMBF-Forschungsvorhabens MTK 0564 „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“ insgesamt sieben → Lahnungsfelder mit Abmessungen von jeweils ca. 200 m x 200 m angelegt wurden. In den Testgebieten wurden Naturmessungen durchgeführt.

Tideschichtung, Gezeitenschichtung

Die Tideschichtung ist eine „Bezeichnung der dünnblättrigen Wechsellagerung von Sand- und Schlickschichten im Aufbau eines Wattbodens. Im Gegensatz zur → Sturmflutschichtung entsteht die → Tideschichtung unterhalb der Tidehochwasserlinie“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 211).

Tiefwasserbereich

Für den → Seegang ist der Tiefwasserbereich eines Gewässers durch das Verhältnis der → Wassertiefe d zur Wellenlänge L ($d/L > 0,5$) gekennzeichnet (SPM, 1984, S. 2-9).

Transmission

neben → Reflexion Form der Energieführung durch und über teildurchlässige Bauwerke, z.B. Wellenbrecher, Unterwasserwellenbrecher, Schlitzwände, Lahnungen; Beeinflussung durch die Konstruktion des Bauwerkes sowie Wellensteilheit und -angriffswinkel (SPM, 1984, S. 2-26)

Transmissionskoeffizient k_R

Der Transmissionskoeffizient k_T ist definiert als das Verhältnis von Wellenhöhe H_T im Transmissionsbereich (also hinter einem Bauwerk) zur Ausgangswellenhöhe H_i vor dem Bauwerk (SPM, 1984, S. 2-112)

Treibsel, Treibzeug, Driffels, Teek, Deek, Deeken, Feek

Als Treibsel wird das auf der Meeresoberfläche schwimmendes Treibzeug (z.B. Holz, Busch, Gras, Schilf, Tang, Stroh, Abfälle) bezeichnet. „Es wird durch Wellen und auflandigen Wind an die Insel- und Festlandsküsten getrieben und dort als Auswurf des Meeres mitunter in großen Mengen am Fuß der Stranddünen und an den → Deichen abgesetzt. An der Marschenküste angeschwemmtes Treibsel ist für die Grasnarbe des Deiches sehr nachteilig, weil diese unter der Treibseldecke erstickt und dann durch Unkräuter ersetzt wird. Außerdem können tierische Schädlinge, vor allem Mäuse, dort Unterschlupf finden“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 215f). Daher muß das Treibsel unverzüglich beseitigt werden (Kompostierung, Deponierung oder Verbrennung). Treibselwirksame erhöhte Tiden treten ab einem → Wasserstand von rd. 0,50 m über MThw auf.

Übergangsbereich

Der Übergangsbereich für die Seegangausbildung (→ Seegang) wird durch die Bedingung $0,05 < \rightarrow$ Wassertiefe d / Wellenlänge $L < 0,5$ eingegrenzt (SPM, 1984, S. 2-9).

Uferlinie „Die Uferlinie ist die Grenzlinie zwischen → Watt und begrünem → Vorland, wird durch die MThw-Linie bestimmt und ist eine scharfe Grenze für den Landpflanzenbewuchs“; ausgenommen → Queller und → Schlickgras (STADELMANN, 1981, S. 147).

untere Salzwiese

→ Zonierung

Verlandung

Das „Absetzen von Sinkstoffen eines fließenden Gewässers an stromschwachen und vor Wellenbewegung geschützten Stellen, z.B. in Altarmen eines Flusses, in → Buhnen und Landgewinnungsanlagen“ (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 220), wird als Verlandung bezeichnet.

Verlandungszone

MÜLLER (1960, S. 95) definiert die Verlandungszone als denjenigen Bereich, der zwischen der unteren Grenze der Quellerbesiedlung (→ Queller) und der MThw-Linie liegt.

Verlustkoeffizient k_v

→ Energieverlustkoeffizient

Vorland, → Heller, → Groden, Außengroden, Außendeichsland

Die auf natürliche Weise oder durch technische Maßnahmen unterstützt entstandene Grünlandfläche zwischen Küsten, (Seedeichfuß) und → Uferlinie (MThw-Linie), mit einer über MThw gelegenen Oberfläche; Vorland ist als Weideland geeignet (STADELMANN, 1981, S. 147).

Vorlandbildung

→ Landgewinnung

Vorlandgewinnung

planmäßige Schaffung neuen Vorlandes als schützende Zone vor → Hauptdeichen, die schar liegen oder deren Vorland im Abbruch liegt (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 222). Das neue Vorland sollte nach empirischen Erkenntnissen zum Zweck des Deichschutzes 150 m bis 200 m breit sein (KRAMER, 1967, in: KRAMER, 1990, S. 52).

Vorlandmanagement

Nutzung und Unterhaltungsmethoden und -strategien on Vorlandbereichen, z.B. → Beweidung, Mahd, → Begrüppung

Vorsorgeprinzip

In der 6. trilateralen Ministererklärung in Esbjerg wurde das sog. Vorsorgeprinzip (Emissionsminderung nach Stand der Technik) vereinbart, nach dem Einflüsse menschlichen Handelns auch dann reduziert oder unterbunden werden müssen, wenn eine negative Wirkung zwar bislang nicht nachgewiesen, aber wahrscheinlich ist (FRIEDRICH/CLAUSSEN, 1994, S. 11 / STOCK ET AL., 1996, S. I-3).

Wasserstand

Lotrechter Abstand eines Punktes des Wasserspiegels (→ Ruhewasserspiegel) über oder unter einem Bezugshorizont, z.B. durch einen → Pegelnullpunkt festgelegt (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 23)

Wassertiefe

Lotrechter Abstand des Wasserspiegels (→ Ruhewasserspiegel) vom Gewässerbett (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 23)

Watt, Wattenmeer

Das Watt ist ein ausgedehntes, flaches, von Rinnen und → Prielen durchzogenes, mit Sand oder → Schlick bedecktes Übergangsgebiet zwischen Festland und Meer an einer Gezeitenküste, das im Wechsel der Gezeiten von Wasser bedeckt wird und wieder trockenfällt, von Prielen durchzogen und auf ihren Rücken vereinzelt Inseln

und Außensände tragend. Bei Niedrigwasser ähnelt es einem Flußsystem auf dem Festland. Das Bodenmaterial ist tonig-feinsandig und fest bis schlickig und weich“ (WIELAND, 1990, S. 149). „Das Watt wird durch den → Wasserstand bei MThw und MTnw begrenzt“ (STADELMANN, 1981, S. 147).

Wattringelwurm (*Nereis diversicolor* Müll.)

Der schwimmfähige Wattringelwurm besiedelt vorzugsweise rein schlickige Gebiete und ist in der Lage, auch unter extremen Verhältnissen wie z.B. in schlecht durchlüfteten Böden und stark schwefelwasserstoffhaltigen Biotopen zu überleben (JANKE/KREMER, 1990, S. 58).

Gemeine Wattschnecke (*Hydrobia ulvae*)

Die Wattschnecke ernährt sich von den auf dem Wattboden siedelnden Algen und Bakterien. Sie lebt vorzugsweise im → Schlickwatt, wird rd. 6 mm groß und kann gelegentlich mit über 100.000 Tieren pro Quadratmeter vorkommen (JANKE/KREMER 1990, S. 50)

Wattstrom, Au, → Balje, Piep, Ritt, Seegat (→ Gat)

Als Wattstrom wird ein breiter und tiefer Wasserlauf im Wattgebiet bezeichnet. Die mitunter 2 km und mehr breiten → Wattströme haben streckenweise → Wassertiefen von 20 m bis 50 m (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 229).

Wattwasserscheide, Wattrücken, Wattenhoch, Hoogen, das „Hohe“ vom Watt

Als Wattwasserscheide wird die Grenzlinie benachbarter → Priel- oder Baljensysteme (→ Balje), von welchen das Wasser bei Ebbstrom in unterschiedlicher Richtung, der Geländeneigung folgend, abfließt, bezeichnet. Wattwasserscheiden fallen daher bei ablaufendem Wasser zeitlich zuerst trocken. Die topographische Wattwasserscheide hat sich aufgrund eines hydrologisch-morphologischen Gleichgewichts der Prielsysteme gebildet. Sie ist die Verbindungslinie der höchsten Geländepunkte zwischen zwei Prielen oder Baljen. Da diese Linie vom Wasser bei Starkwinden nach der einen oder anderen Seite überströmt wird, ist die topographische Wattwasserscheide mit der hydrologischen nicht immer übereinstimmend. Aufgrund besonderer hydrologischer Verhältnisse werden Wattbereiche über ein Prielsystem geflutet und über ein benachbartes Prielsystem entwässert, so daß sich die Lage der hydrologischen Wattwasserscheide (hier: im Nordfriesischen Wattenmeer) im Verlauf einer Tide verändert. Die Wattwasserscheiden hinter den Inseln (Primärscheiden) reichen quer über das → Watt, sind bei Tideniedrigwasser begehbar und wurden früher zum Teil verkehrsmäßig genutzt, z.B. von Postkutschen. Künstliche Wattwasserscheiden können durch Dammbauwerke (→ Damm) geschaffen werden; z.B. Nordstrander Damm, Hindenburgdamm (LÜDERS/LUCK, 1976, S. 229 / SCHWARZE/PARTENSCKY, 1981, S. 15ff).

Wattwiese → Zonierung

Wellenberg

Erhebung über dem → Ruhewasserspiegel (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 42)

Wellenhöhe (H)

Lotrechter Abstand zwischen dem tiefsten Punkt eines → Wellentals und dem höchsten Punkt des folgenden → Wellenbergs (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 42)

Wellental Absenkung unter dem → Ruhewasserspiegel (NAW im DIN: DIN 4049-3, 1994, S. 42)

Werk Kurzbezeichnung für → Lahnungswerk

Zonierung Räumliche Aufeinanderfolge der Pflanzengesellschaften:

Als obere Salzwiese werden die höchsten Flächen in Deichnähe bezeichnet, die bis 1,00 m über dem mittleren Tidehochwasser liegen und nur von hohen → Sturmfluten erreicht werden. In diesem Bereich gedeihen Rotschwengel (*Festuca rubra*), Strandwegerich (*Plantago maritima* Linné), Strandnelke (*Armeria maritima* Mill.), Strandwermut (Strandbeifuß, *Artemisia maritima* Linné), Strandaster (*Aster tripolium* Linné) sowie Strandflieder (*Limonium vulgare* Mill.). Die obere Rotschwengelwiese, die rd. 0,50 m über MThw liegt, wird an etwa 50 Tagen (100 Tiden) im Jahr vom Salzwasser überspült. Die untere Salzwiese liegt 0,40 m über bis 0,40 m unter MThw und wird jährlich rd. 300 mal überflutet. Hier wachsen → Queller (*Salicornia europaea* Linné), → Schlickgras (*Spartina townsendii* H. et I. Groves), → Andel (*Puccinellia maritima* Huds.), Keilmelde (Strandsalzmelde, *Halimione portulacoides* (L.) Aellen), Stranddreizack (*Triglochin maritimum* Linné), Milkraut (*Glaux maritima* Linné), Salzschuppenmiere (*Spergularia salina* J. et C. Presl.) und Strandsode (*Suaeda maritima* Linné). Die in diesen Bereich gehörende, rd. 0,30 m über MThw liegende obere Andelwiese wird durchschnittlich an etwa 75 Tagen (150 Tiden) im Jahr überflutet. Die zwischen dem freien → Watt und der unteren Salzwiese liegende Wattwiese wird sehr häufig überflutet (rd. 630 mal pro Jahr). Auf ihr wachsen Queller, Schlickgras, Zwergsee gras (*Zostera nana* Roth), Großes See gras (Echtes See gras, *Zostera marina* Linné), Gemeiner Blasentang (*Fucus vesiculosus* Linné), Knotentang (*Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol.), Meersaite (*Chorda tomentosa* Lyngb.), Meersalat (*Ulva lactuca* Linné), Darmtang (*Enteromorpha linza* J. Ag.) und Borstenhaar (FIEGE/HAGMEIER, 1995, S. 182).