

Forschungsvorhaben

„Wirkungsweise von Einbauten in See“

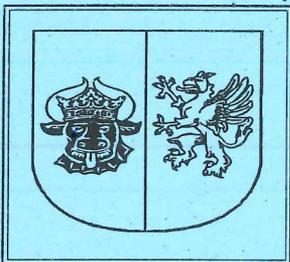
Bundesanstalt für Wasserbau ^{Do}
KFKI – Bibliothek ³⁸⁻²
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg

Eingang: 01.01.1998

Signatur: E 23 263 I +

Abschlußbericht

Arbeitsbereich: Morphologie



**Staatliches Amt
für Umwelt und Natur
Rostock**

ABTEILUNG KÜSTE

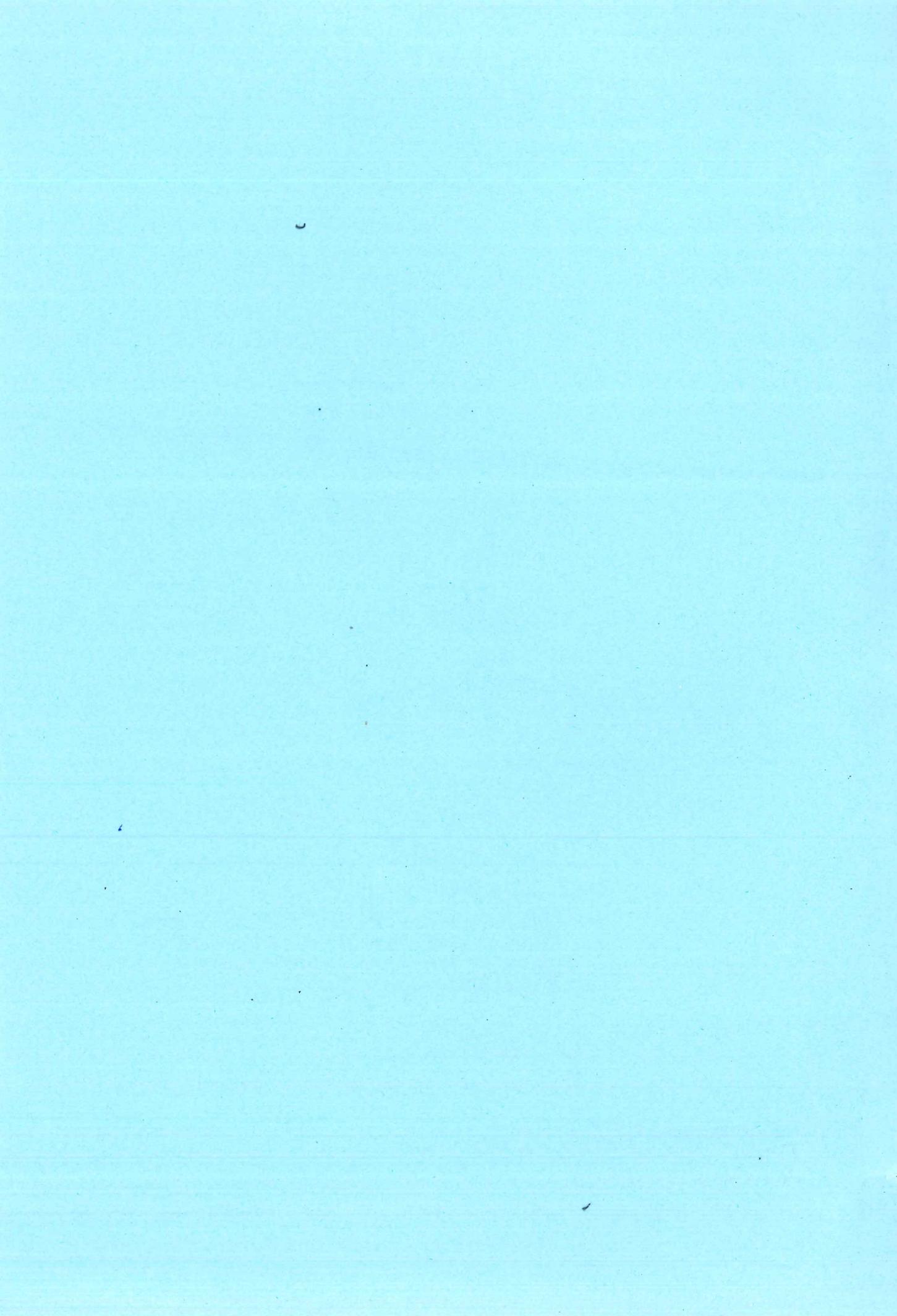
Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen MTK 0546 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Projektgruppenleiter: Dr.-Ing. D. Weiss

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Frank Göricke

Rostock

April 1998



Berichtsblatt

1. ISBN	2. Berichtsart <i>Abschlußbericht</i>	3.
4. Titel des Berichts <i>„Wirkungsweise von Einbauten in See“</i>		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) <i>Weiss, Dietrich Göricke, Frank</i>		6. Abschlußdatum des Vorhabens <i>31.12.1997</i>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <i>Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock Erich-Schlesinger-Str. 35 18059 Rostock</i>		7. Veröffentlichungsdatum
		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen <i>MTK 0546</i>
		11. Seitenzahl: <i>91</i>
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) <i>Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) Postfach 200240 53175 Bonn</i>		12. Literaturangaben <i>23</i>
		14. Tabellen <i>1</i>
		15. Abbildungen <i>42</i>
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung <i>siehe Kurzfassung auf gesondertem Blatt</i>		
19. Schlagwörter <i>Buhne; Durchlässigkeit von Buhnen; Hydrodynamik-, Sedimentdynamik, Morphodynamik</i>		
19. Verlag	21. Preis	

Kurzfassung

Im Rahmen des F/E-Vorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See“ führten das Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, das Geologisch-Paläontologische Institut der Christian-Albrechts-Universität Kiel und das Staatliche Amt für Umwelt und Natur Rostock von 1993 bis 1997 in interdisziplinärer Zusammenarbeit umfangreiche hydrologische, sedimentologische und morphologische Untersuchungen im Küstenabschnitt Warnemünde durch.

Wesentliches Ziel der Untersuchungen an einer tidefreien Küste war es, die Wechselwirkung von Bauwerkseinfluß einerseits und Küstenentwicklung andererseits, in Abhängigkeit der veränderlichen meteorologischen und hydrologischen Einwirkungen an sandigen Brandungsküsten zu erfassen. Hierbei sollte untersucht werden ob, wann und unter welchen Randbedingungen (Wasserstand und Seegang) sich ausgeglichene stabile Verhältnisse auf der Schorre einstellen und inwieweit durch Bauwerke (im speziellen Fall Buhnen) darauf gezielt Einfluß genommen werden kann.

Bei der Untersuchung von vier Verbauungsarten („ohne Buhne“, „durchlässige Buhne“, „halbdurchlässige Buhne“, „undurchlässige Buhne“) zeigen die Ergebnisse, daß „durchlässige Buhnen“ mit einer relativ hohen Durchlässigkeit über deren gesamte Länge allein bereits zu einer seewärtigen Verschiebung der Ufelinie führen können. Die weitere Verminderung der Durchlässigkeit und ein vergrößertes Segment, in dem die Buhnen zur Landseite undurchlässig angeordnet sind, bewirken zusätzlich zur Uferlinienverschiebung eine Erhöhung des Unterwasserprofils. Diese sog. Terrassenbildung in Verbindung mit den vorgenommenen Dünenaufschüttungen bewirkt im Falle einer Extremsturmflut eine auf rd. ein Drittel des Volumens reduzierte Sedimentumlagerungsmenge im Vergleich zum Ausgangszustand der Schorre vor dem Buhnenbau.

Besonders die Ereignisse mit Wellenhöhen (H_{m0}) > 0.6 m und Wellenanlauffrichtungen von -11.25° bis $+11.25^\circ$ zur Ufernormalen (in ca. 2.5 m Wassertiefe gemessen) führen zu einer Anhäufung von Sediment im Flachwasserbereich. Dies ist durch die Verlagerung von Strand- und Dünenmaterial dorthin zu erklären. Dieses Material wird aber aufgrund der Präsenz von insbesondere der „halbdurchlässigen Buhnen“ nicht vollständig wieder abgebaut. Besonders Wellenhöhen (H_{m0}) < 0.2 m aus allen, deutlich aber aus Anlauffrichtungen von -11.25° bis $+11.25^\circ$ zur Ufernormalen, bringen bei der „halbdurchlässigen Buhne“ zusätzlich positive Effekte durch Akkumulation von Sediment im ufernahen Flachwasserbereich. Diese Begünstigung des Flachwasserbereiches ist bei der „undurchlässigen Buhne“ nicht zu beobachten. Geringe Wellenhöhen wirken sich bei mittleren Wasserständen hier generell nachteilig auf den ufernahen Unterwasserbereich aus.

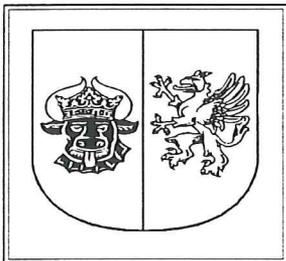
Diese Aussagen sind aufgrund des geringen Datenbesatzes in den höheren und niedrigeren Wasserstandsbereichen nur für Wasserstände von -0.25 m bis $+0.25$ m Normal-Mittelwasser gültig. Die Relevanz der Ergebnisse wird durch den erbrachten Nachweis, daß die Bandbreite der hydro- und meteorologischen Meßdaten des Untersuchungszeitraumes als repräsentativ für das längerfristige Geschehen vor Warnemünde angesehen werden können, erhöht.

Forschungsvorhaben

„Wirkungsweise von Einbauten in See“

Abschlußbericht

Bearbeitungsteil: Morphologie



**Staatliches Amt
für Umwelt und Natur
Rostock**

ABTEILUNG KÜSTE

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen MTK 0546 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Projektgruppenleiter: Dr.-Ing. D. Weiss

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Frank Göricke

Rostock

April 1998

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wird	3
1.4.1 Verwendete Fachliteratur	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2. Morphologie	6
2.1 Morphologische Strukturen	6
2.1.1 Mathematische Beschreibung	6
2.2 Zeitreihen von Querprofilzuständen	10
2.2.1 Bauwerk: „ohne Bühnen“	11
2.2.2 Bauwerk: „durchlässige Bühne“	11
2.2.3 Bauwerk: „halbdurchlässige/halbundurchlässige Bühne“	12
2.2.4 Bauwerk: „undurchlässige Bühne“	13
3. Hydrologie	19
3.1 Definition von allgemeingültigen hydrologischen Parametern	24
3.2 Herkunft der verwendeten meteorologischen und hydrologischen Daten	26
3.2.1 Zerlegen hydrologischer Parameter in Klassen	27
4. Abhängigkeit morphologischer Veränderungen von definierten Randbedingungen	29
4.1 Theoretische Grundlagen	29
4.1.1 Gleichgewichtsprofile nach SWART (1974)	29
4.1.2 Räumlicher Ausschnitt als abgeschlossenes morphodynamisches System ...	30
4.2 Methodik	36
4.2.1 Die Parameter „Lamellenvolumenänderung“ und „Profilgestaltänderung“ ..	36
4.2.2 Relative Volumenänderungen im abgeschlossenen System	37
4.2.3 Ermittlung klassentypischer Sedimentvolumenänderungen	40
4.2.4 Charakterisierung der Profilveränderungen durch Verlagerungsmomente ...	48
4.2.5 Typisierung von Profilveränderungen nach Hauptverlagerungsmomenten...	53
5. Effekte verschiedener Bühnentypen bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen auf die Morphologie	57
5.1 Allgemeines	57
5.2 Profilveränderungstypen und Bauwerksparameter	59
5.3 Bühnenlose Küste	60
5.4 Durchlässige Bühne	69
5.5 Halbdurchlässige Bühne	69
5.6 Undurchlässige Bühne	75
6. Zusammenfassung	81
7. Literatur	90

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See“ inclusive Verlängerungsphase.....	4
Abb. 2: Definitionsskizze, Einpassung eines Küstenquerprofiles in ein Bezugssystem.....	7
Abb. 3: Definition der Flächen der horizontalen Lamellen.....	9
Abb. 4: Westlicher Teil des Buhnensystems Warnemünde/West mit Angabe der Lage der gemessenen Profile im Küstenkilometermeßsystem.....	14
Abb. 5: Umformung des Meßbrückenprofiles im Untersuchungsgebiet Warnemünde/West zum neuen Gleichgewichtsprofil im Juni 1996 entsprechend der veränderten bauwerkseitigen und hydrologischen Randbedingungen nach Abdichtung der angrenzenden Buhnen 7 und 8 im November 1995.....	15
Abb. 6: Einhüllende ausgewählter morphologischer Aufnahmen des Meßbrückenprofiles unterschieden nach Bauwerksparametern.....	15
Abb. 7: Lageentwicklung von 1/2 m-Höhenbereichen verschiedener Profile differenziert nach Verbauungsart.....	16
Abb. 8: Lageentwicklung von 1/2 m-Höhenbereichen verschiedener Profile differenziert nach Verbauungsart.....	17
Abb. 9: Lageentwicklung von 1/2 m-Höhenbereichen verschiedener Profile differenziert nach Verbauungsart.....	18
Abb. 10: Definition der Wasserstandsparameter.....	24
Abb. 11: Definitionsskizze der Wellenanlaufrichtungen.....	26
Abb. 12: Einteilung der Klassen der Seeganganlaufrichtungen.....	28
Abb. 13: Annäherung der Morphologie eines Querprofiles unter definierten hydrologische Randbedingungen an den Gleichgewichtszustand (nach SWART 1974).....	29
Abb. 14: Schematische Darstellung des Bilanzsystems des küstennahen Sedi-menttransports in der Draufsicht.....	32
Abb. 15: Beispielgraphik zur Sedimentbegünstigung bzw. -benachteiligung von $k = 12$ Lamellen in einem abgeschlossenen System (Querprofil Kkm 145.059, Warnemünde/West) zwischen zwei Meßaufnahmen.....	34
Abb. 16: Relative Profilvertiefung im Bereich einer unveränderten Höhenlamelle.....	38
Abb. 17: Mittlere relative Sedimentvolumenänderungen (arithmetisches Mittel) und mittlerer Eintrag von außen je Meßzeitraum in einem 13-Lamellen-System zwischen 1988 und 1997 im Küstenquerprofil Kkm 145.059 Warnemünde/West.....	39
Abb. 18: Mittlere relative Sedimentvolumenänderungen (arithmetisches Mittel) und mittlerer Eintrag von außen je Meßzeitraum in einem 13-Lamellen-System im Küstenquerprofil Kkm 145.059 Warnemünde/West bei verschiedenen bauwerkseitigen Randbedingungen.....	39
Abb. 19: Durchschnittliche Verteilung (arithmetisches Mittel) von Wasserstands-Wellenhöhen-Klassenkombinationen zwischen einzelnen morphologischen Vermessungen von 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde/West für ufernormale Wellenanlaufrichtungen.....	42

<u>Abb. 20:</u> Durchschnittliche Verteilung (arithmetisches Mittel) von Wasserstands-Wellenhöhen-Klassenkombinationen zwischen einzelnen morphologischen Vermessungen von 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde/West für Wellenanlafrichtungen von links mit Blickrichtung „See“	42
<u>Abb. 21:</u> Durchschnittliche Verteilung (arithmetisches Mittel) von Wasserstands-Wellenhöhen-Klassenkombinationen zwischen einzelnen morphologischen Vermessungen von 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde/West für Wellenanlafrichtungen von rechts mit Blickrichtung „See“	43
<u>Abb. 22:</u> Mittlere und klassentypische Lamellenvolumenänderung für die Kombinationsklasse „sehr niedrige Wasserstände - schwacher Seegang von links“ in den Profilen Kkm 145.055 (links) und Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil) (rechts) bei halbdurchlässiger Buhne	46
<u>Abb. 23:</u> Teilmomente I und III in Richtung Düne; Beide Hauptmomente gleich null.....	49
<u>Abb. 24:</u> Alle Teilmomente in Richtung Düne; Beide Hauptmomente in Richtung Düne.....	49
<u>Abb. 25:</u> Beide Hauptmomente in Richtung Düne; Teilmomente der Systeme I und III gleich null Teilmoment des mittleren Systems in Richtung Düne.....	49
<u>Abb. 26:</u> Hauptmoment I in Richtung Düne; Hauptmoment II in Richtung See Alle Teilmomente gleich null.....	49
<u>Abb. 27:</u> Momente der Sedimentvolumenänderungen zwischen und innerhalb der Subsysteme (real gemessenes Beispiel einer Veränderung des Profiles Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil)).....	52
<u>Abb. 28:</u> Obere Hauptmomente H_1 für 45 Kombinationsklassen; Kkm 145.059 (Meßbrücken)-Profil bei halbdurchlässiger Buhne; z-Achse: Größe des Momentes [m]; WST: Wasserstandsklassen; H_{m0} : Wellenhöhenklassen	52
<u>Abb. 29:</u> Ableitung der sechs Profilveränderungstypen aus den Hauptmomenten	54
<u>Abb. 30:</u> Profilveränderungstypen +1 und -1 (Abflachung System I/II; Aufsteilung System II/III).....	55
<u>Abb. 31:</u> Profilveränderungstypen +2 und -2 (Aufsteilung System I/II; Abflachung System II/III).....	55
<u>Abb. 32:</u> Profilveränderungstyp +3 (Aufsteilung System I/II; Aufsteilung System II/III).....	55
<u>Abb. 33:</u> Profilveränderungstyp -3 (Abflachung System I/II; Abflachung System II/III).....	55
<u>Abb. 34:</u> Profilveränderungstypen für Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil) bei halbdurchlässiger Buhne	56
<u>Abb. 35:</u> Effekte hydrologischer Kombinationsklassen auf die Strand- und Schorremorphologie unter verschiedenen Verbauungsarten am Beispiel des Meßbrückenprofiles Warnemünde	64

<u>Abb. 36:</u> Effekte hydrologischer Kombinationsklassen auf die Strand- und Schorremorphologie unter verschiedenen Verbauungsarten am Beispiel des Meßbrückenprofiles Warnemünde	65
<u>Abb. 37:</u> Relative Sedimentvolumenänderungen im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps „ohne Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung (45° Einschlußwinkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung)	66
<u>Abb. 38:</u> Relative Sedimentvolumenänderungen im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps „ohne Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung (22.5° Einschlußwinkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung)	67
<u>Abb. 39:</u> Relative Sedimentvolumenänderungen im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps „halbdurchlässige Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung (45° Einschlußwinkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung)	73
<u>Abb. 40:</u> Relative Sedimentvolumenänderungen im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps „halbdurchlässige Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung (22.5° Einschlußwinkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung).....	74
<u>Abb. 41:</u> Relative Sedimentvolumenänderungen im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps „ohne Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung (45° Einschlußwinkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung)	78
<u>Abb. 42:</u> Relative Sedimentvolumenänderungen im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps „ohne Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung (22.5° Einschlußwinkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung)	79

Anlagenverzeichnis

Datenbasis der nach April 1997 aufgenommenen morphologischen Daten.....	I
Relative Sedimentvolumenänderungen waagerechter $\frac{1}{2}$ m-Lamellen in nach Buhmentyp ausgewählten Profilen.....	II bis XXVII
Hauptverlagerungsmomente und Profilveränderungstypen in Querpro- filen mit definierten Bauwerksparemtern.....	XVIII bis XXXIII
Mittlere Haupt- und Teilmomente (arithmetisches Mittel) der Morpholo- gie sowie die Sedimentvolumenbilanz eines abgeschlossenen Systems nach bestimmten Verbauungstypen ausgewählter Profile des Untersuchungsstandortes Warnemünde.....	XXXIV bis XL
Effekte hydrologischer Kombinationsklassen auf die Strand- und Schorremorphologie unter verschiedenen Verbauungsarten am Beispiel Warnemünde.....	XLI bis XLVII

Symbolverzeichnis

F/E-	=	Forschungs-/Entwicklungs-[im Zus.]
HN	=	Niveau laut langjährigem Mittelwasserstand von Kronstadt
Kkm	=	Küstenkilometer
MW	=	Mittelwasser
N-MW	=	Normal-Mittelwasser
α	=	Wellenanaufrichtung
ω	=	Sinkgeschwindigkeit
ε_0	=	Momentenaustauschkoeffizient für Sediment (analog der Wirbelviskosität ε)
ΔV	=	Volumenveränderung des betrachteten Gesamtsystems
ΔV_l	=	relative Volumenänderung einer Lamelle l
$\Delta V_{l,i}$	=	relative Volumenänderung einer Lamelle l im Zeitraum i
$\Delta V_{l,t,t+1}$	=	Volumendifferenz einer Lamelle l zwischen den Vermessungen zu den Zeitpunkten t und t+1
ΔV_t	=	Volumen des betrachteten Systems zum Zeitpunkt t
$\Delta V_{t,t+1}$	=	Volumendifferenz des betrachteten Gesamtsystems zwischen den Vermessungen zu den Zeitpunkten t und t+1
ΔV_{t+1}	=	Volumen des betrachteten Systems zum Zeitpunkt t+1
σ	=	Standardabweichung
a	=	Verfallsparameter (m^{-1})
A_0	=	Fläche der Lamelle im Vertikalschnitt senkrecht zur Uferlinie, die den Koordinatenursprung berührt
ABCD	=	Fläche
A_k	=	Fläche einer beliebigen Lamelle im Vertikalschnitt senkrecht zur Uferlinie
B	=	Bauwerksparameter
b	=	Lamellenhöhe
c	=	mittlere Konzentration
c_0	=	Referenzkonzentration an der Sohle ($z = 0$)
e	=	Eulersche Zahl
H_I	=	Hauptmoment I

H_{II}	=	Hauptmoment II
$H_{1/3}$	=	parametrisierte Wellenhöhe (bei Zeitbereichsauswertung Mittelwert der 33% höchsten Wellen)
$H_{K,i}$	=	prozentuale Zeitanteile jeder einzelnen Kombinationsklasse K in einem Meßzeitraum i zwischen zwei morphologischen Vermessungen
H_{m0}	=	signifikante Wellenhöhe (ca. vierfaches der Standardabweichung Sigma)
H_{rms}	=	Wellenhöhe, die die Wellenenergie ausdrückt ($H_s = \text{Wurzel}(2H_{rms})$)
H_s	=	signifikante Wellenhöhe
i	=	Meßzeitraum zwischen zwei morphologischen Vermessungen
k	=	Anzahl der Einzellamellen
K	=	Kombinationsklasse hydrologischer Parameter
l	=	über die Lamellenhöhe gemittelte Lamellenlänge in Land-See-Ausrichtung
n	=	Gesamtanzahl betrachteter Meßzeiträume
S_x	=	On-/Offshore-Sedimenttransport
S_y	=	Sedimenttransport parallel zur Uferlinie
t	=	Zeit
V_l	=	Volumen einer Einzellamelle
$V_{l,t}$	=	Volumen einer Einzellamelle zum Zeitpunkt t
$V_{l,t+1}$	=	Volumen einer Einzellamelle zum Zeitpunkt t+1
WST	=	Wasserstandsklasse
W	=	Wasserstand
W	=	Gleichgewichtszustand eines Querprofiles nach SWART
x	=	Achse eines rechtwinkligen dreidimensionalen Koordinatensystems
y	=	Achse eines rechtwinkligen dreidimensionalen Koordinatensystems
z	=	Achse eines rechtwinkligen dreidimensionalen Koordinatensystems; vertikale Höhe über der Sohle
z_0	=	Punkt auf der z-Achse (Koordinatenursprung)
z_k	=	Punkt auf der z-Achse

1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See“ wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen dem LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG (LWI), dem GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHEN INSTITUT der UNIVERSITÄT KIEL (GPI) und dem STAATLICHEN AMT FÜR UMWELT UND NATUR ROSTOCK (StAUN) hydrologische, sedimentologische und morphologische Untersuchungen im Küstenabschnitt vor Warnemünde durchgeführt. Das Forschungsvorhaben, das zunächst für einen Zeitraum von drei Jahren bewilligt war, wurde ab Mai 1996 für den Bereich Sedimentologie (GPI) um 12 Monate bis zum 31.04.1997, für den Bereich Hydrologie (LWI) um 18 Monate bis zum 31.10.1997 und für den Bereich Morphologie und Koordinierung (StAUN) um 20 Monate bis zum 31.12.1997 verlängert.

Wesentliches Ziel der Untersuchungen an einer tidefreien Küste war es, die Wechselwirkungen von Bauwerkseinfluß einerseits und Küstenentwicklung andererseits, in Abhängigkeit der veränderlichen meteorologischen und hydrologischen Einwirkungen an sandigen Brandungsküsten zu erfassen. Hierbei sollte untersucht werden, ob, wann und unter welchen Randbedingungen sich ausgeglichene stabile Verhältnisse auf der Schorre einstellen und inwieweit durch Bauwerke darauf gezielt Einfluß genommen werden kann.

Für den Verlängerungszeitraum 1996/1997 wurde unter räumlicher Ausdehnung der hydrologischen, morphologischen und sedimentologischen Messungen im Buhnsystem Warnemünde die Aufgabenstellung in folgenden Punkten konkretisiert bzw. ergänzt:

- Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes in drei Buhnenfeldern mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Buhnen und an einem buhnenlosen Küstenabschnitt in Abhängigkeit vom Seegang und Wasserstand.
- Erfassung der Änderung des Unterwasserprofils als Funktion des Seeganges, des Wasserstandes und des Buhnentyps.
- Messungen der Sedimentzusammensetzung und -verlagerung als Funktion des Buhnentyps und der meteorologischen sowie der hydrologischen Randbedingungen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im wesentlichen konnte das Vorhaben laut Plan durchgeführt werden. Einige Besonderheiten zwangen zu Korrekturen im Meßprogramm. So mußten aufgrund des durch die Bohrmuschel (*Teredo Navalis*) in Verbindung mit Eisgang teilweise zerstörten Buhnensystems einige Untersuchungen örtlich bzw. zeitlich verlegt oder modifiziert werden. Auf diese Weise konnte auf die ungewollte Veränderung der bauwerkseitigen Randbedingungen reagiert werden.

Der strenge Winter 1995/1996 in Verbindung mit Eisgang führte zu starken Beschädigungen an allen Sonden. Hieraus resultieren zum Teil lange Meßausfälle. Der überwiegende Teil der Sonden konnte jedoch relativ schnell im Frühjahr 1996 repariert werden. Nur die Station bei 305 m wurde durch den Eisgang vollends zerstört. Da hierfür kein Ersatz mehr zur Verfügung stand, mußte auf Messungen an dieser Station verzichtet werden. Die Strömungssonden fielen alle während der schweren Sturmflut am 03./04.11.1995 aus. Wegen des kalten Winters und des Eisganges konnten die Reparaturen der Strömungssonden bzw. der Austausch der Geräte nur verzögert vorgenommen werden.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Vorstranddynamik einer tidefreien Küste“ vor der Probstei (Ostsee) konnten nicht wie vorgesehen als Grundlage für die Arbeiten des laufenden F/E-Vorhabens genutzt werden, da diese bei Bearbeitungsschluß noch nicht in Form eines Abschlußberichtes vorlagen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wurde im wesentlichen laut Plan durchgeführt. Modifikationen der ursprünglichen Planung ergaben sich aus nicht vorhersehbaren Naturereignissen wie z. B. den Eiswinter oder den Bohrmuschelbefall und dem damit verbundenen Zerstörungsgrad der Bühnen. So wurden z. B. Meßphasen räumlich oder zeitlich verlegt oder in ihrem Inhalt korrigiert (vgl. Kap. 1.2).

Ab Mai 1996 wurde das Vorhaben mit einer Anschlußfinanzierung verlängert. Damit verschieben sich die Berichtszeiträume entsprechend den „Besonderen Nebenbestimmungen für Zuwendungen des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie zur Projektförderung auf Ausgabenbasis“ (1993). Planung und Ablauf des Vorhabens sind in Abbildung 1 graphisch dargestellt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wird

Der Stand der Wissenschaft und Technik ist im Erstantrag des F/E-Vorhabens ausführlich beschrieben und aufgelistet worden. Neuere Untersuchungen und Veröffentlichungen sind u. a. von FLEMMING (1990), FLEMMING et al. (1991), LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TU BRAUNSCHWEIG (1995), TRAMPENAU et al. (1996) und RAUDKIVI (1996) zu Wirkungen von Bühnen, von BASINSKI (1994) zu Bühnen an der polnischen Ostseeküste, bzw. von WEBB & WEGGEL (1995) zum Entwerfen von Bühnenfeldern erschienen. Die Kernaussagen der Quellen, die bis 1995 erschienen, sind bereits in den Verlängerungsantrag vom November 1995 eingeflossen.

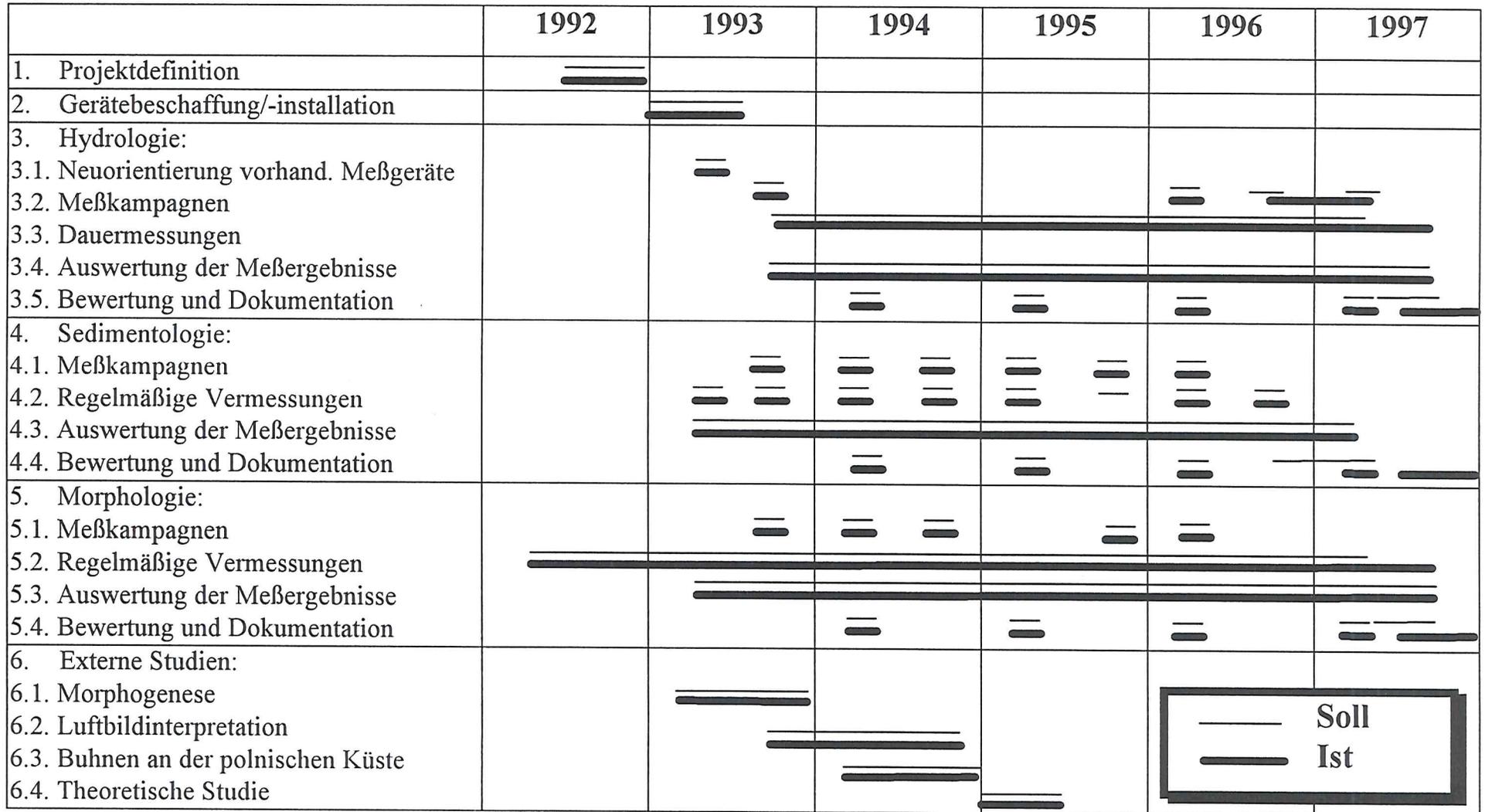


Abb. 1: Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See“ inclusive Verlängerungsphase

1.4.1 Verwendete Fachliteratur

- BASINSKI, T. (1995) Wirkungsweise und Konstruktion von Seebuhnen an der polnischen Ostseeküste, Monographie im Rahmen des KFKI-Themas MTK 0546, Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock,
- FLEMMING, C. A. (1990) Guide on the uses of groynes in the coastal engineering. In: CIRIA Report 119, London
- FLEMMING, C.A.; PRICE, W.A. & BRAMLEY, M.E. (1991) The principles and effectiveness of groynes. In: Proceeding of the COPEDEC III - Third International Conference on Coastal & Port Engineering in Development Countries in Mombasa (Kenia); Vol. I.; 273 - 287
- LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TU BRAUNSCHWEIG (1995) Forschungsvorhaben „Wirkungsweise von Einbauten in See“ . Bericht Nr. 788, „Zur Wirkungsweise der Buhnen als eine Küstenschutzmaßnahme“, Braunschweig, (unveröffentlicht).
- RAUDKIVI, A.J. (1996) Permeable Pile Groins, In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering; Vol. 122 No. 6, New Zealand
- TRAMPENAU, T.; GÖRICKE, F. & RAUDKIVI, A.J. (1996) Permeable Pile Groins. 25. International Conference on Coastal Engineering in Orlando (USA)
- WEBB, R. & WEGGEL, J.R. (1995) Design of groynes and groin fields: Dimensional considerations. In: Proceedings of the COPEDEC IV - Fourth International Conference on Coastal & Port Engineering in Development Countries in Rio de Janeiro (Brasil); Vol. I, 229 - 245

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung erfolgte zwischen den drei bearbeitenden Instituten (STAATLICHES AMT FÜR UMWELT UND NATUR ROSTOCK; GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT KIEL; LEICHTWEISS-INSTITUT TU BRAUNSCHWEIG).

Weiterhin erfolgte eine fachliche Zusammenarbeit mit den Nachauftragnehmern des F/E-Vorhabens (ILG Ingenieurbüro für Küstenstudien Greifswald, uve GmbH Berlin, Basinski Projekt & Consultation).

2. Morphologie

2.1 Morphologische Strukturen

Soll die Entwicklung morphologischer Strukturen verschiedener Standorte miteinander verglichen werden, ist zunächst sicherzustellen, daß die auszuwertenden Daten in ein System eingebettet werden, welches allen potentiell zu vergleichenden Standorten gemein ist. Dabei sollte man sich von der Auswertung linienhafter Strukturen (Höhenlinien) trennen, da der Komplex Strand-Schorre aus einer Kubatur besteht, die je nach Form und Gradienten schwer zu interpretierende Sprünge in der Lageänderung ausgewählter Linien sowie mehrfaches Vorkommen dieser zuläßt.

Vielfach wurde in bisherigen Untersuchungen dreidimensionaler Strukturen der Fehler unternommen, daß man sich dabei an Koordinaten beziehungsweise an linienhaften oder räumlichen morphologischen Gebilden des jeweiligen Untersuchungsstandortes orientierte. Die verwendete Systemgrundlage ließ sich nicht ohne weiteres als Untersuchungsbasis auf andere Standorte übertragen.

Aus diesem Grunde sollte zuerst eine allen Standorten gemeine Basis, die für Untersuchungen im uferliniennahen Raum in Frage kommt, festgelegt werden. Aus Sicht der Erforschung der Wechselwirkungen zu hydrologischen Parametern bietet das Normal-Mittelwasserniveau als Ebene im Raum die besten Voraussetzungen.

2.1.1 Mathematische Beschreibung

Es wird ein räumliches Koordinatensystem mit den Koordinaten x , y und z dergestalt in einen ufernahen Raum gelegt, daß die x -Achse parallel zur Normal-Mittelwasserebene sowie rechtwinklig zur auf diese Ebene projizierten Uferlinie positiv in Richtung See verläuft. Die y -Achse verläuft parallel zur Uferlinie bei Mittelwasser auf der Normal-Mittelwasserebene mit einem Abstand x von der Uferlinie. Die z -Achse verläuft senkrecht zur Normal-Mittelwasserebene und schneidet diese im Punkt $z = 0$. Z ist positiv oberhalb der Normal-Mittelwasserebene (vgl. Abb. 2).

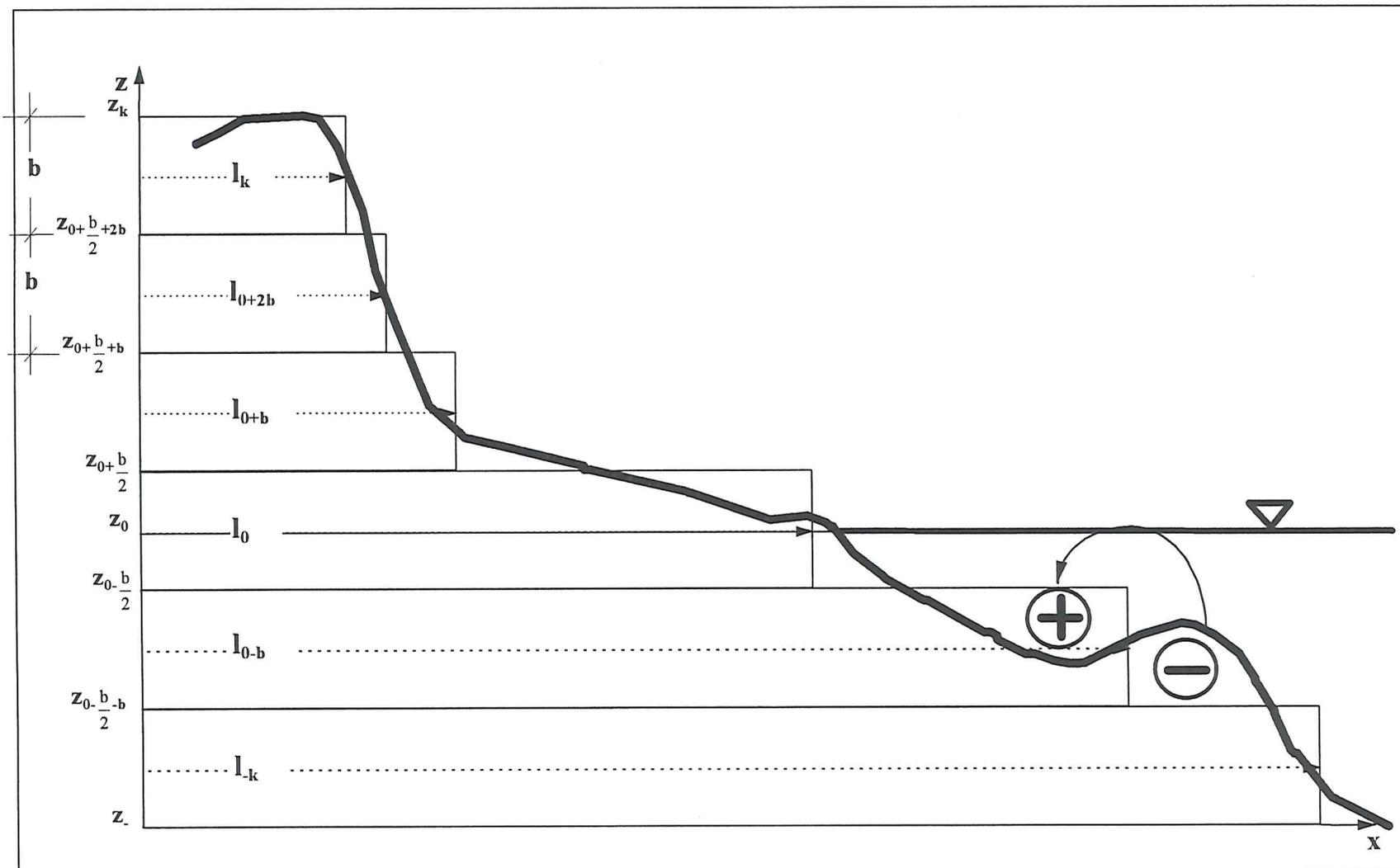


Abb. 2: Definitionsskizze, Einpassung eines Küstenquerprofils in ein Bezugssystem

Da Vermessungsdaten in der Regel in Form von Küstenquerprofilen, also zweidimensional vorliegen, bekommen diese bei Volumenbetrachtungen die Einheitsbreite von $y = 1$ m im räumlichen System zugewiesen. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich im Abstand von einem halben Meter von einem Querprofil entlang der y -Achse keine wesentlichen Änderungen der Morphologie ergeben.

Der Schnittpunkt von z - und x -Achse kann beliebig gewählt werden, sollte sich aber der Praktikabilität wegen möglichst landwärts in der Nähe der Dünenoberkante befinden.

Im folgenden Schritt werden waagerechte Lamellen mit der konstanten Höhe b gebildet, in der eine Lamelle ihre Unterkante bei $z_{0-\frac{b}{2}}$ hat, sowie die Mittelwasserebene sich in der Mitte dieser Lamelle befindet. Die Fläche dieser Lamelle im x - z -Koordinatensystem berechnet sich wie folgt (wenn von Volumina gesprochen wird, sind die Werte auf $y = 1$ m Breite bezogen) (vgl. Abb. 2):

$$A_0 = \left[\left(z_{0+\frac{b}{2}} \right) - \left(z_{0-\frac{b}{2}} \right) \right] \cdot l_0 = b \cdot l_0 \quad (1)$$

Da b konstant ist, errechnen sich die Flächen der fortlaufenden Lamellen analog

$$A_k = b \cdot l_k \quad (2)$$

Die Fläche des Rechteckes $\left[\left(z_{k+\frac{b}{2}} \right) - \left(z_{k-\frac{b}{2}} \right) \right] \cdot l_k$ entspricht der Fläche, bei der die Lamelle das morphologische Profil zur seewärtigen Begrenzung hat. D. h., mit der Lamellenhöhe $\left[\left(z_{k+\frac{b}{2}} \right) - \left(z_{k-\frac{b}{2}} \right) \right] = b = \text{konst.}$ entspricht die Fläche des Rechteckes $b \cdot l_k$ gleich der Fläche ABCD des Profilausschnittes (vgl. Abb. 3).

$$b \cdot l_k = AEGD = ABCD \quad (3)$$

Daraus ergibt sich ebenfalls eine Analogie der Flächen EBF und FGC.

$$EBF = FGC \quad (4)$$

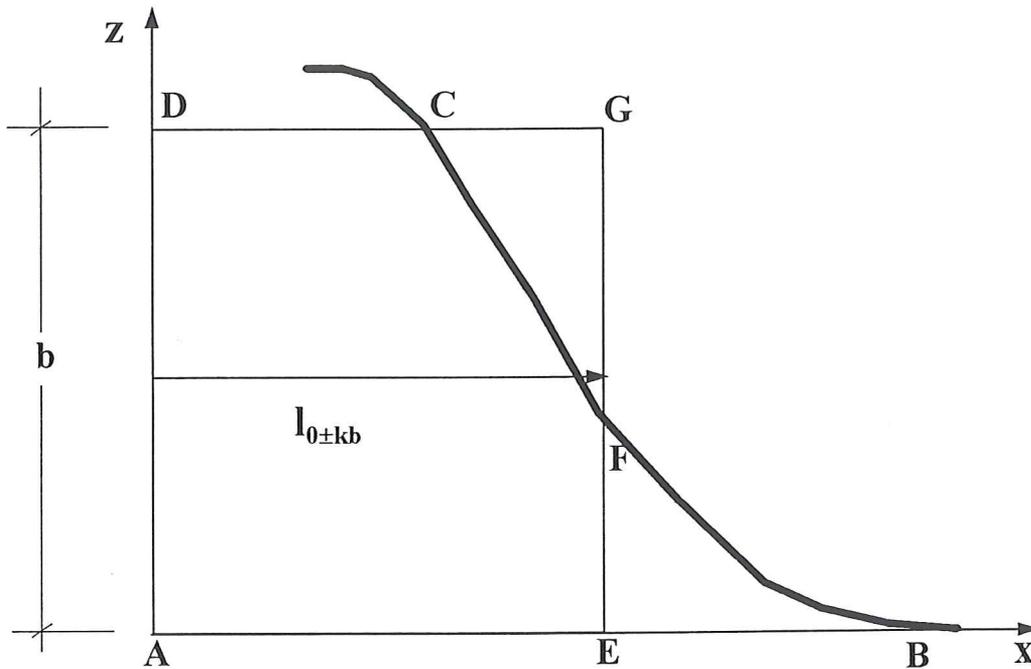


Abb. 3: Definition der Flächen der horizontalen Lamellen

Da Küstenquerprofile nicht zwangsläufig monoton fallend sind, können Sonderfälle (z. B. bei Existenz von Riffen) auftreten. Dabei ist so zu verfahren, daß die Fläche des Riffes innerhalb der betrachteten Lamelle der Fläche ABCD (vgl. Abb. 3) zugeschlagen wird, um A_k zu erhalten.

Läßt man b gegen 0 ($b \rightarrow 0$) gehen, so nähert sich l_k dem Abstand der Profilkurve von der z -Achse. Ist ein Riff in der Lamelle enthalten, so wird die Länge des Riffes entlang der x -Achse zum Abstand der Profilkurve von der z -Achse hinzuaddiert, um l_k zu erhalten.

2.2 Zeitreihen von Querprofilzuständen

Hat man für ein und dieselbe Profillage auf der y-Achse Vermessungsdaten vom Zeitpunkt t , $t+1$, ... und $t+n$, so kann innerhalb selbst festgelegter Lamellenhöhen b die Entwicklung des Profiles in den verschiedenen Lamellenlagen beschrieben werden. Der minimale Volumen- bzw. Flächenwert jeder einzelnen Lamelle im betrachteten Zeitraum sollte für den direkten Vergleich der einzelnen Lamellen gleich null gesetzt werden. Diese Betrachtungsweise beschreibt Zustandsgrößen eines Profilausschnittes als Zeitreihe. Sie läßt viele Interpretationsmöglichkeiten zum Beispiel für das Bewerten des Eingreifens mit Bauwerken in den Strand-/Schorrebereich zu. Die Abbildungen 7, 8 und 9 zeigen die Entwicklung der durchschnittlichen Länge von $\frac{1}{2}$ m-Lamellen in den Untersuchungsprofilen Warnemünde/West differenziert nach Verbauungsart.

Im vorliegenden Beispielfall ist die Lamellenhöhe b der einzelnen Profile = 0.5 m gesetzt. Es ist hier der für Küstenprozesse und somit für ein menschliches Eingreifen mit Bauwerken besonders sensible Bereich nahe der Uferlinie (+4.25 m bis -2.75 m über Normal-Mittelwasser) betrachtet worden. Sämtliche Lamellen des o. g. Profilausschnitts sind in ihrer durchschnittlichen Länge l_k über die Lamellenhöhe von 0.5 m von der Standlinie dargestellt (vgl. Abb 2, 7, 8 und 9). Das heißt, daß die errechneten Volumenwerte der $\frac{1}{2}$ m-Lamellen mit 2 multipliziert werden, um eine Einheitshöhe von 1 m zu erhalten, damit die Lamellen lediglich als Maß der Länge dargestellt werden können.

Verringerungen der Abstände einzelner Kurven untereinander bedeuten eine Erhöhung des Gradienten im entsprechenden Profilbereich, Vergrößerungen der Linienabstände eine Verringerung des Gradienten. Die oberen Lamellen (1.25 m bis 4.25 m) stellen den oberen Strand- bzw. den Dünenbereich dar (vgl. Abb. 7, 8 und 9). Plötzliche große Volumenerhöhungen in den Lamellen zeigen Dünenaufschüttungen. Plötzliche starke Volumenverminderungen stehen für Sturmereignisse mit teilweisen Ausräumungen der Düne (insbesondere Abb. 9).

Mit Hilfe dieser Betrachtungsweise erhält man Anhaltspunkte über die Entwicklung einzelner Profilbereiche in Abhängigkeit von der Bauwerkseinwirkung.

Lage und Zeitpunkte sämtlicher Profilaufnahmen im Untersuchungsgebiet Warnemünde/West sind der Abbildung 4 des vorliegenden Berichtes sowie der Abbildung 5.24 und den Tabellen 5.1 bis 5.3 des 4. Zwischenberichtes zu entnehmen. Nach April 1997 aufgenommene Profildaten sind im Anhang Ia und Ib Tabelle 1 bis 3 zusammengefaßt.

2.2.1 Bauwerk: „ohne Bühnen“

Verwendbares Datenmaterial: Referenzprofil (Kkm 144.340) 1990-1997
 Meßbrückenprofil (Kkm 145.059) 1988-1991
 (vgl. Abb. 4)

Im **Referenzprofil** (240 m westlich Bühne 1) zeigen sich über den gesamten Beobachtungszeitraum sehr **ausgeglichene Verhältnisse**. 1996 ist ein kurzzeitiges Anwachsen im Flachwasser zu verzeichnen. Der uferliniennahe Bereich (-0.25 m bis +1.25 m) verzeichnet seit 1991 geringe aber stetige Zuwächse von etwa 10 m bis 12 m in Richtung See (vgl. Abb. 7).

Im **Meßbrückenprofil** ist bis zum Bühnenbau ein **stetiger Rückgang** der Bereiche -2.25 m bis +0.25 m zu verzeichnen. Im Strand-/Dünenbereich wird dieser Rückgang durch eine Dünenaufschüttung im Frühjahr 1990 vorübergehend aufgehalten. In der Lamelle -2.75 m bis -2.25 m ist keine eindeutige Rückgangstendenz sichtbar (vgl. Abb. 9). Die typische Profilform des Meßbrückenprofils „ohne Bühnen“ ist in Abb. 6 dargestellt.

2.2.2 Bauwerk: „durchlässige Bühne“

Verwendbares Datenmaterial: Bühnenfeld 2/3 (Kkm 144.610) 1990-1997
 (vgl. Abb. 4)

Die oberen Lamellen bis -0.75 m über Normal-Mittelwasser sind eindeutig von stetigem Zuwachsverhalten seit dem Bau der Buhnen geprägt. Die Zuwachsraten liegen zwischen 20 m und 25 m. In der Lamelle -0.75 m bis -1.25 m über Normal-Mittelwasser läßt sich noch eine Zuwachstendenz erkennen. Die Lamellen darunter hingegen stagnieren in ihrer Entwicklung. Fazit: Bei den durchlässigen Buhnen reicht die Akkumulationsneigung nur bis ins sehr flache Wasser (ca. 1 m Wassertiefe). Die tiefer liegenden Lamellen lassen hingegen aber auch kein eindeutig erosives Verhalten erkennen, so daß gesagt werden kann, daß mit den durchlässigen Buhnen ein wirkungsvoller, aber nicht so starker Eingriff in die ufernahen Prozesse erfolgt ist, wie bei den weniger durchlässigen Buhnen.

2.2.3 Bauwerk: „halbdurchlässige/halbundurchlässige Buhne“

Verwendbares Datenmaterial:	Buhnenfeld 5/6 (Kkm 144.880)	1991-1997
	Buhnenfeld 6/7 (Kkm 144.970)	1992,
	(nicht dargestellt)	1995-1997
	westl. Buhne 7 (Kkm 145.010)	1992-1995
	östl. Buhne 7 (Kkm 145.020)	1992-1995
	Buhnenfeld 7/8 (Kkm 145.055)	1991-1995
	Meßbrückenprofil (Kkm 145.059)	1991-1995
	westl. Buhne 8 (Kkm 145.100)	1992-1995
	östl. Buhne 8 (Kkm 145.110)	1992-1995
	(vgl. Abb. 4)	

Das größte Gewicht liegt auf der Auswertung des Meßbrückenprofils, da dort die Daten mit der größten zeitlichen Dichte (ca. 14tägiger Meßrhythmus) und mit der größten Genauigkeit (Handlotung) vorliegen (vgl. Abb. 9). Der **Buhnentyp „halbdurchlässige/halbundurchlässige Buhne“** ist im allgemeinen durch **sehr starke Zuwächse** vom Strand bis in Wassertiefen von ca. 1.25 m bis 1.75 m gekennzeichnet (vgl. Abb. 7 bis 9). Einige Lamellen erreichen Zuwächse **von bis zu 40 m** in Richtung See. Besonders der Strand und der ufernahe Bereich profitieren von dem Zuwachs. Vom Profil Buhnenfeld 7/8 an in östliche Richtung besitzen die **Lamellen tiefer als 1.25 m Wassertiefe eine Rückgangstendenz**, nachdem sie, zum

Beispiel im Meßbrückenprofil gut sichtbar (vgl. Abb. 9), kurz nach Bühnenbau zunächst erhebliche Sedimentgewinne erzielen konnten.

Der **Strandzuwachs** stellt sich **allmählich** ein. Die Zuwächse im **Flachwasserbereich** erfolgen in **Schüben**, teilweise an Ereignisse gekoppelt. Die Hauptveränderungen erfolgen in einem sehr kurzen Zeitraum von Ende 1991 bis Anfang 1993. Ein Gleichgewichtszustand ist annähernd 1993 erreicht. Danach sind die Änderungen nur noch gering. Eine typische Profilform des Meßbrückenprofils ist ebenfalls in Abb. 6 dargestellt.

2.2.4 Bauwerk: „undurchlässige Bühne“

Verwendbares Datenmaterial:	westl. Bühne 7 (Kkm 145.010)	1995-1997
	östl. Bühne 7 (Kkm 145.020)	1995-1997
	Bühnenfeld 7/8 (Kkm 145.055)	1995-1997
	Meßbrückenprofil (Kkm 145.059)	1995-1997
	westl. Bühne 8 (Kkm 145.100)	1995-1997
	östl. Bühne 8 (Kkm 145.110)	1995-1997
	(vgl. Abb. 4)	

Generell ist festzustellen, daß der Bereich **bis 0.75 m Wassertiefe** weiteren **Zuwächsen** unterliegt (zwischen 5 m und 10 m). Im ufernahen Bereich stellt sich das **Profil** etwas **auf**. Die Lamelle -0.75 m bis -1.25 m über Normal-Mittelwasser ist rückläufig. Die Bereiche um 2 m Wassertiefe verschieben sich seewärts. Die zuvor vorhande Terrasse wird abgebaut. Das Profil strebt einem neuen Gleichgewichtszustand entgegen, der Anfang 1997 in etwa erreicht wurde (vgl. Abb. 5 bis 9).

Die kurzzackigen Ausschläge in negativer oder positiver Richtung sind bedingt durch die hydrodynamischen Einflüsse. Diese zu systematisieren ist das Hauptanliegen der folgenden Kapitel.

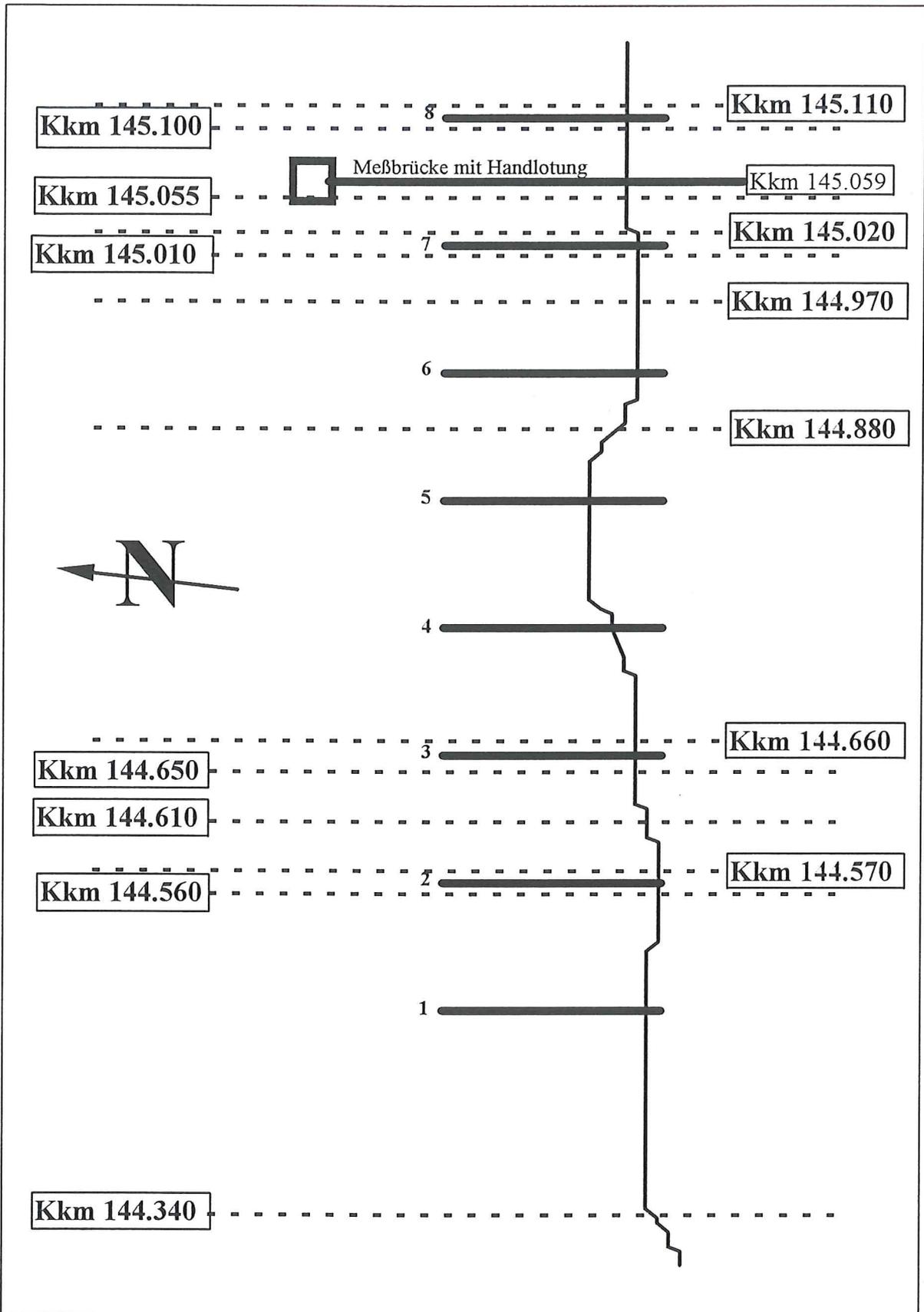


Abb. 4: Westlicher Teil des Buhnensystems Warnemünde/West mit Angabe der Lage der gemessenen Profile im Küstenkilometermeßsystem

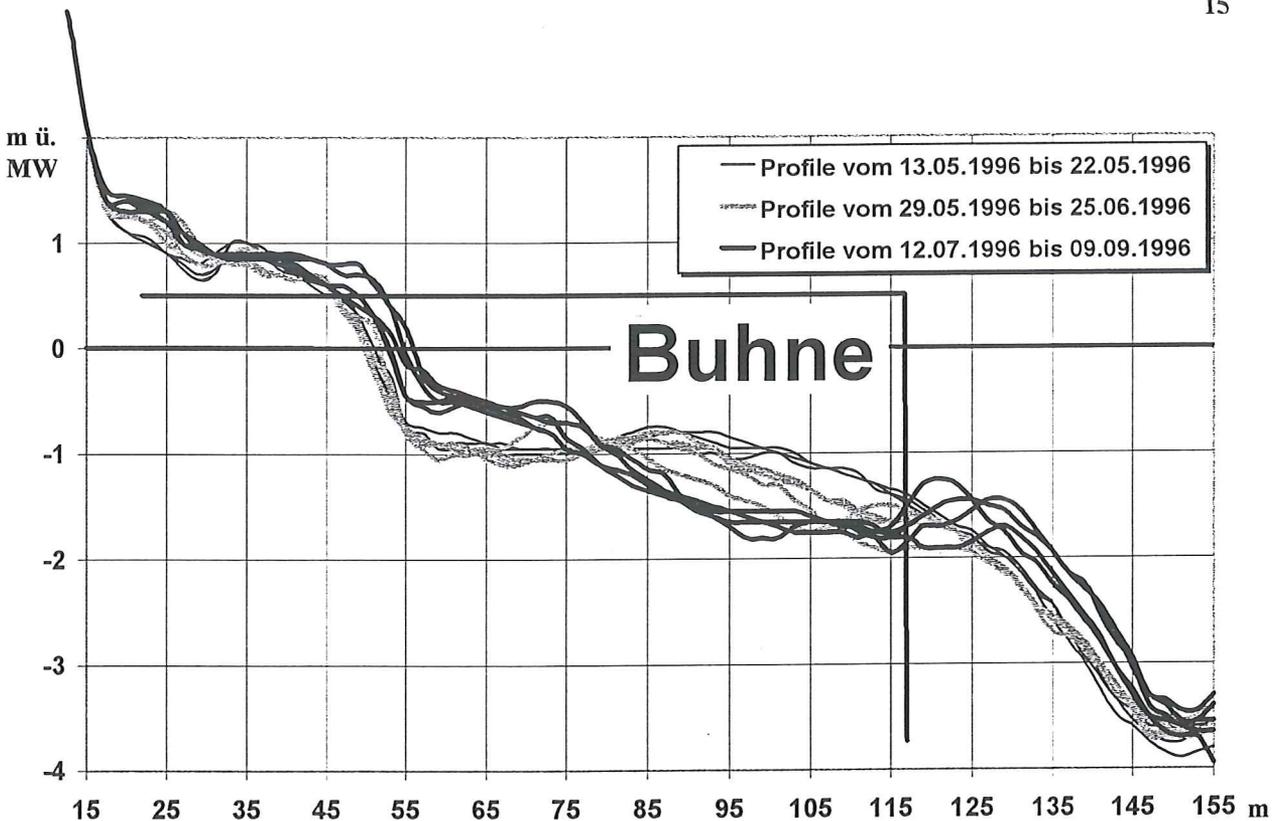


Abb. 5: Umformung des Meßbrückenprofils im Untersuchungsgebiet Warnemünde/West zum neuen Gleichgewichtsprofil im Juni 1996 entsprechend der veränderten bauwerkseitigen und hydrologischen Randbedingungen nach Abdichtung der angrenzenden Buhnen 7 und 8 im November 1995

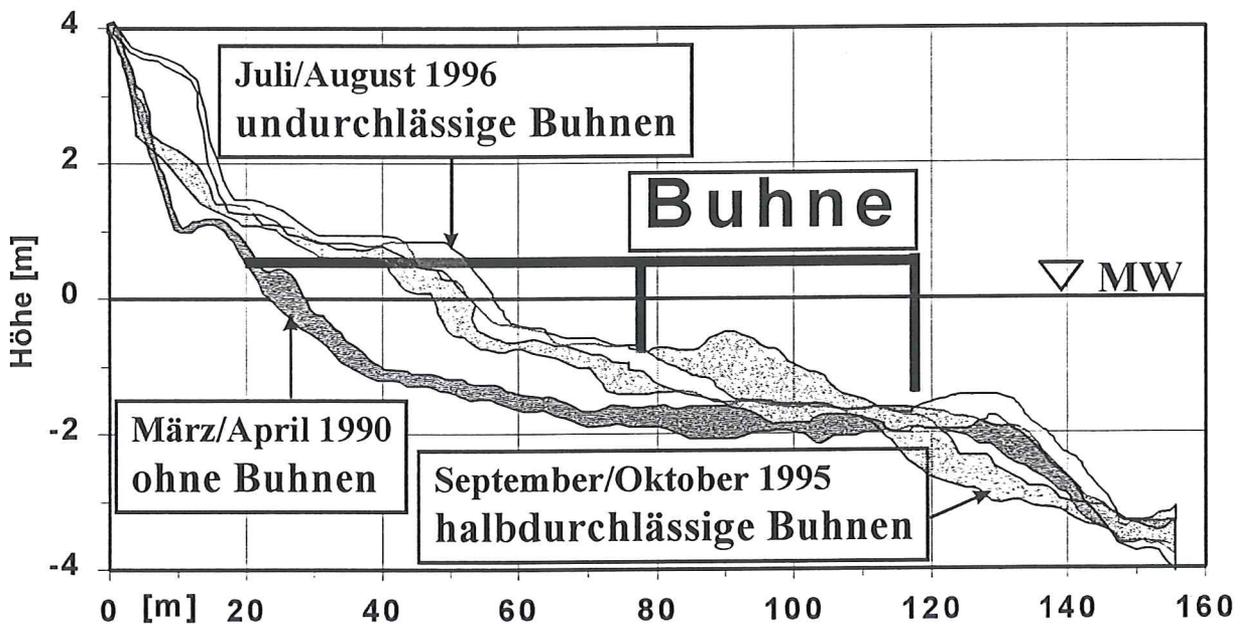


Abb. 6: Einhüllende ausgewählter morphologischer Aufnahmen des Meßbrückenprofils unterschieden nach Bauwerkparametern

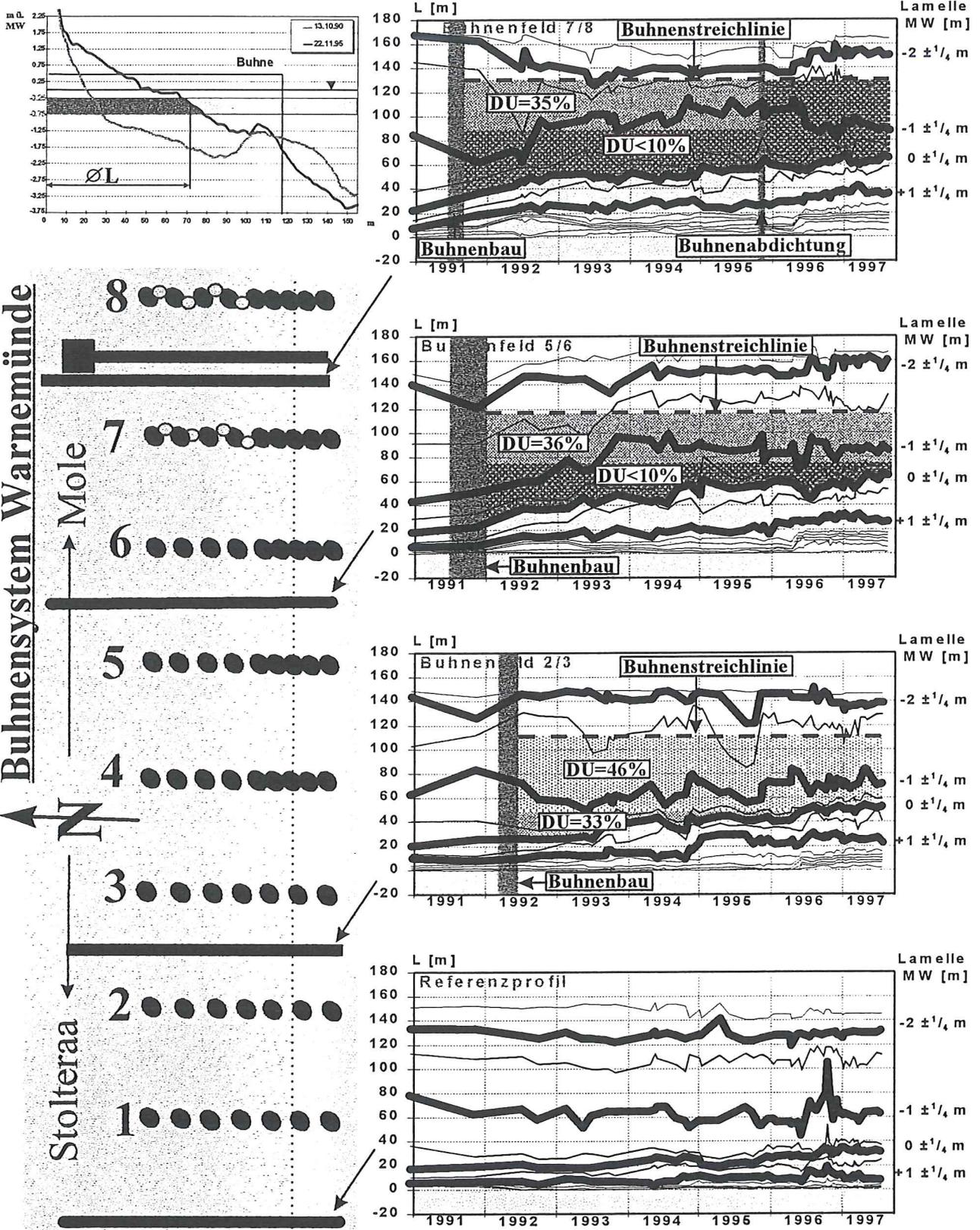


Abb. 7: Lageentwicklung von 1/2 m-Höhenbereichen verschiedener Profile differenziert nach Verbauungsart

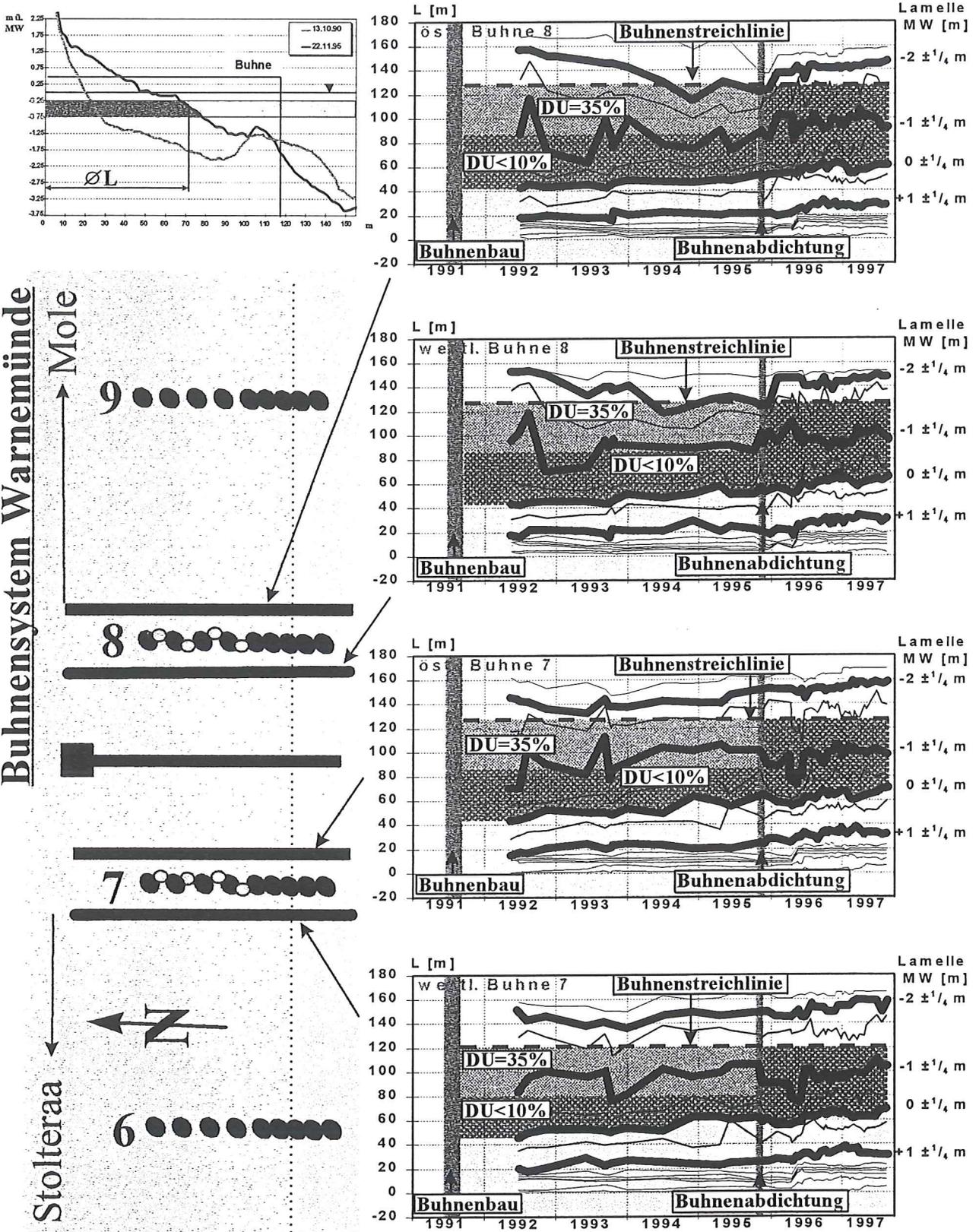


Abb. 8: Lageentwicklung von 1/2 m-Höhenbereichen verschiedener Profile differenziert nach Verbauungsart

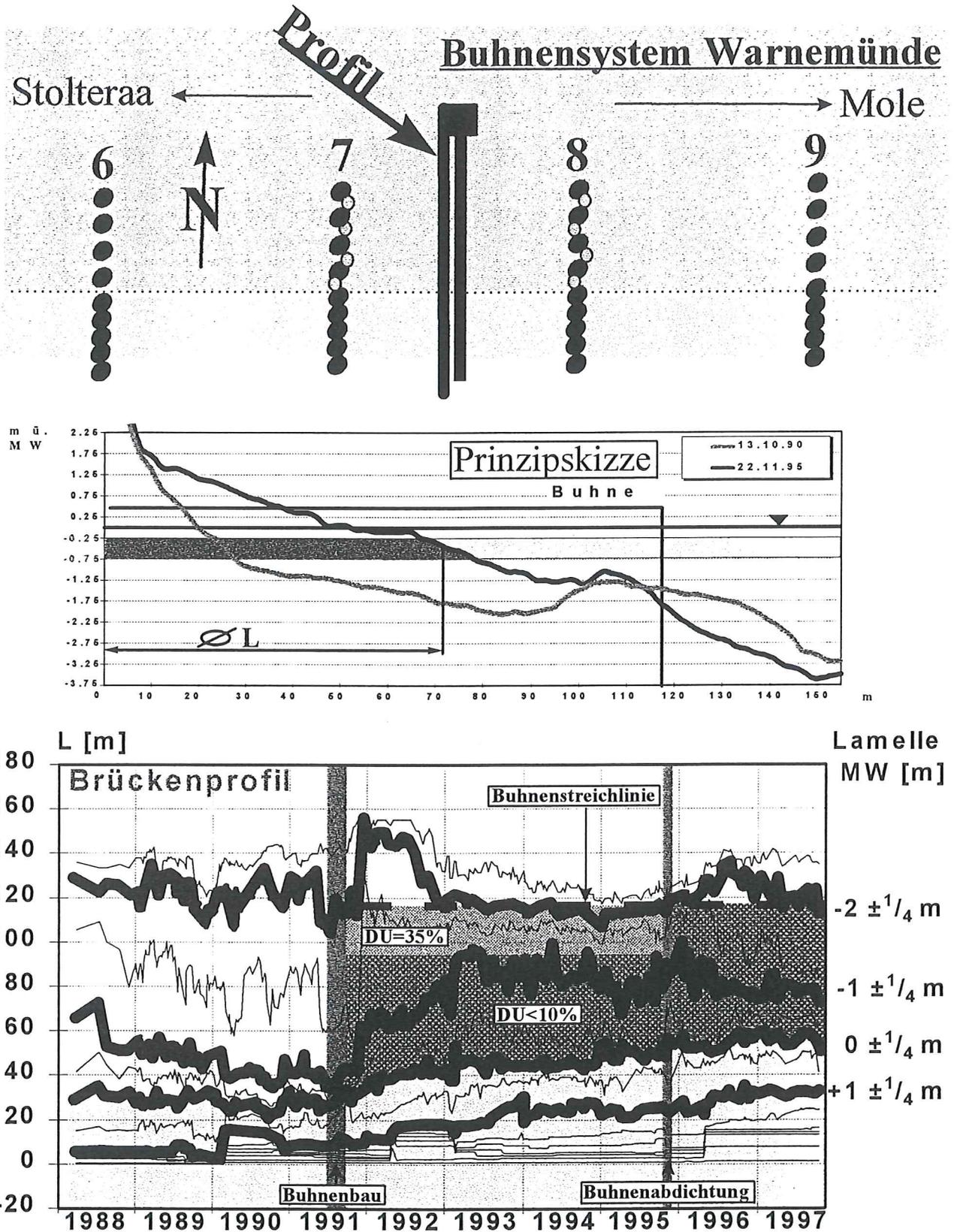


Abb. 9: Lageentwicklung von 1/2 m-Höhenbereichen des Meßbrückenprofils differenziert nach Verbauungsart

3. Hydrologie

Ausgehend vom Ziel, die morphologischen Veränderungen als funktionalen Zusammenhang in Abhängigkeit von den hydrologischen und bauwerkseitigen (hier: Pfahlbuhne) Randbedingungen zu beschreiben, ist zu klären, welche Parameter sich für eine Korrelation eignen.

Eine Pfahlbuhne wirkt wie ein Widerstand gegen die Küstenlängsströmung. Naturbeobachtungen (KOLP 1970) und Modellversuche (BAKKER et al. 1984) zeigen, daß Pfahlbuhnen die Geschwindigkeit der Küstenlängsströmung durch ein Bühnenfeld hindurch, verglichen mit denselben Bedingungen an einer buhnenlosen Küste, etwa halbieren. So bilden sie Rauigkeitselemente entlang der Küstenlinie. Sie verlangsamen die Strömung. Die Kontinuität wird aufrecht erhalten durch ein korrespondierendes Ansteigen der küstenparallelen Geschwindigkeit seawärts der Bühnen. Labordaten von BAKKER et al. (1984) zeigen ein etwa 15%iges Wachstum der küstenparallelen Geschwindigkeiten im seawärtigen Anschluß eines Bühnenfeldes verglichen mit einer buhnenlosen Küste. KOLP (1970) veröffentlichte Naturdaten, die er während nahezu küstenparallelen Winden (20°) von 5.2 m/s gewonnen hat. Die Messungen der Länge des Geschwindigkeitsvektors erwecken den Anschein, daß die Geschwindigkeit im Riff-Rinne-Bereich gegenüber der benachbarten buhnenlosen Küste um etwa 10% gestiegen ist.

Das Grundverständnis von einer durchlässigen Pfahlbuhne ist, daß sie als Widerstand gegen den küstenparallelen Fluß wirkt, diesen aber nicht wie eine undurchlässige Buhne blockiert. Daraus folgend ist das Anwachsen der Geschwindigkeiten seawärts des Bühnenfeldes kleiner als mit undurchlässigen Bühnen.

RAUDKIVI (1997) sieht die Bewegung des mobilisierten Sediments auf der Sohle als eine Funktion der Orbitalgeschwindigkeiten, der lokalen Intensität der Turbulenz, sowie der Korngröße und Beschaffenheit des Sediments. Die Turbulenzintensität bestimmt auch die vertikale Verteilung der Gelöst-Sedimentkonzentration. Bei geringer Turbulenzintensität sind nur kleine Beträge von Sediment gelöst. Dieses gelöste Material ist begrenzt auf eine Schicht von wenigen

Millimetern über der Sohle. Bei hohen Intensitäten kann die Konzentrationsverteilung nahezu einheitlich über die gesamte Tiefe sein, wie z. B. im Bereich von Sturzbrechern an einem sandigen Strand. Der Hauptanteil des Sedimenttransportes an sandigen Küsten findet in Suspension (Verteilung eines Sand-Wasser-Gemisches) statt.

In tidelosen Meeren wird die Brandungsströmung durch Wind und Wellen erzeugt. An einer buhlenlosen Küste zeigen die Intensitäten des Küstenlängs- und Küstenquertransports eine mehr oder weniger umgekehrte Beziehung. Starke welleninduzierte Küstenlängsströmungen (großer Einfallswinkel der Wellen) sind verbunden mit schwachen Küstenquerströmungen und dem Fehlen von Rippströmungen. Ufernormal einfallende Wellen führen zu ufernormalen Strömungen und keiner Nettoküstenlängsströmung. Unter diesen Bedingungen verlieren Buhnen jeglicher Art ihre Funktion.

Buhnen werden gebaut, um eine gewisse Menge von Sand (oder Kies) an der Uferlinie zu fangen oder zu halten. Ein Sandfangen bedeutet eine Verminderung des Brandungstransportes. Im Laufe der Zeit wird sich ein neues Gleichgewicht und eine neue Kontinuität des Längstransportes aufbauen, d. h. die Verschiebung der Uferlinie seewärts ist begrenzt. Die Langzeitleistung eines Buhnenfeldes ist dann beherrscht durch den Küstenquertransport und einige seewärtige Verluste von Sediment, wie an der ursprünglichen buhlenlosen Küste.

Da die Pfahlbuhnen keinen signifikanten Effekt auf die einlaufenden Wellen haben, müssen die Effekte der Pfahlbuhnen auf die Uferlinie (Sedimentbewegung) als Funktion der Geschwindigkeitseffekte (Strömungsgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsverteilung und Turbulenz) definierbar sein. Die Wechselwirkungen zwischen Wellen und Strömungen spielen eine große Rolle für den Betrag der scheinbaren Rauigkeit und somit der Turbulenz. VAN DOORN (1982) und VON NIELSEN (1992) lieferten entsprechende Zusammenhänge. Ein Anstieg der scheinbaren Rauigkeit führt zu einer steigenden Turbulenz an der Sohle. Die Rauigkeit nimmt mit größer werdendem Winkel zwischen den Richtungsvektoren der Orbitalgeschwindigkeiten der Welle und der Küstenlängsströmung zu. Eine Strömung, die in einem Winkel zu den Wellen läuft, verursacht einen resultierenden Geschwindigkeitsvektor an der Sohle, der sich mit

jedem Wechsel der Richtung der Orbitalgeschwindigkeit dreht. Obwohl es sehr schwer ist, die schnell variierende Turbulenzproduktion zu messen, zeigen visuelle Beobachtungen im Laborbecken ein deutliches Wachstum der suspendierten Feinsandwolke bei jeder Umkehr der Orbitalbewegung, wenn die überlagerte Geschwindigkeit im Winkel zur Orbitalgeschwindigkeit steht gegenüber gleichgerichteten Bedingungen. Die Verringerung der Längsströmungsgeschwindigkeit durch die Pfahlbuhnen reduziert also die Ausdehnung der Rotation des resultierenden Geschwindigkeitsvektors. Es kann deshalb erwartet werden, daß eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit zu einer reduzierten Produktion von Turbulenz an der Sohle führen wird. Die Suspension an der Sohle kann in erster Näherung als

$$c(z) = c_0 e^{-az} \quad (5)$$

beschrieben werden, wobei z = vertikale Höhe über der Sohle, c = mittlere Konzentration in der Höhe z , c_0 = Referenzkonzentration an der Sohle ($z = 0$) und a = ein Verfallsparameter (m^{-1}) ist. Aus der Lösung der Diffusionsgleichung

$$c / c_0 = \exp[-(\omega / \varepsilon_0)z] \quad (6)$$

ist zu sehen, daß a eine Funktion der turbulenten Durchmischung repräsentiert durch den Momentenaustauschkoeffizienten ε_0 für Sediment (analog der Wirbelviskosität ε) ist. Eine Verringerung der Turbulenz erhöht den Wert a und reduziert c_0 . Das führt infolge der exponentiellen Abhängigkeit sowohl zu einer schnellen Verringerung von $c(z)$ und der Dicke der Schicht von suspendiertem Sediment, als auch des Totalbetrages von suspendiertem Sediment. Da die Transportgeschwindigkeiten mit dem Abstand von der Sohle wachsen, reduziert eine Verringerung der Dicke der Schicht auch den Totalbetrag des transportierten Sedimentes durch überlagerte Strömungen. Diese Wechsel in den Suspensionscharakteristika sind es anscheinend, die bedeutsam sind für die Form und die Bedingungen des Unterwasserprofils im Pfahlbuhnenfeld. Beobachtungen zeigen, daß das Gleichgewicht zwischen Erosions- und Zuwachsbedingungen sehr

empfindlich ist, und daß eine geringe Reduzierung des seewärtigen Transportes zu einem deutlichen Anwachseffekt führen kann. Ein seewärtiger Transport von suspendiertem Sediment wurde klar durch Tracerversuche des GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHEN INSTITUTS DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT KIEL (1996) im Untersuchungsfeld gezeigt. Diese wurden am seewärtigen Rand der Terrasse und in der Wellenauflaufzone ausgebracht. Winde von 9 m/s bis 12 m/s in einem Angriffswinkel von 20° bis 40° zur Ufernormalen verteilten die Tracersande vom seewärtigen Rand der Terrasse in windabgewandte Richtung entlang des Hanges von der Terrasse bis zur Rinne. Nur ein kleinerer Betrag des gröberen Tracermaterials wurde als Sohlfracht auf die Terrasse transportiert. Die Tracer in der Wellenauflaufzone, mittig zwischen den Bühnen, spaltete sich in zwei Komponenten. Die gröberen Fraktionen bewegten sich entlang der Uferlinie in der Wellenauflaufzone in windabgewandte Richtung und die feineren in einem 10 m bis 15 m breiten Band seewärts normal zur Uferlinie.

Zuwachsbedingungen an der Uferlinie infolge von reduziertem seewärtigen Transport dauern an bis ein Gleichgewicht zwischen seewärtigem und landwärtigem Transport wiederhergestellt ist. RAUDKIVI (1997) nimmt an, daß die Pfahlbuhnen einen relativ kleinen Effekt auf die strandaufbauenden Bedingungen haben, weil dann die Wellen mehr oder weniger rechtwinklig auf den Strand laufen (keine welleninduzierte Brandungsströmung) und die Turbulenzintensität im allgemeinen niedrig ist. Daher hängt die Effektivität von Pfahlbuhnen an einem vorgegebenen Strandabschnitt von den Zeitverhältnissen zwischen aufbauenden und erodierenden Wellenbedingungen ab. An Küsten an denen seewärtige Transportbedingungen vorherrschen, können die Pfahlbuhnen lediglich die jährliche Strandverlustrate durch den reduzierten seewärtigen Transport herabsetzen, ihn aber nicht stoppen. Das bedeutet, daß es keine Gleichgewichtsbedingungen gibt. Der Zuwachs und die Erhaltung der Gleichgewichtsbedingungen werden unterstützt durch die reduzierten Rippströmungen und die reduzierte Zirkulation in den Pfahlbuhnenfeldern.

Der Ansatzpunkt für die Beurteilung der Effizienz eines Buhnensystems ist demzufolge die Küstenlängsströmung und deren Geschwindigkeitsverteilung im Wasserkörper. Diese sind so zu optimieren, daß sich ein Gleichgewicht zwischen Anlandung und Abtrag nach einem anfänglichen Zuwachs des Volumenkörpers in der Umgebung der Uferlinie einstellen kann. Es besteht ein funktionaler

Zusammenhang zwischen den Küstenlängsströmungen mit den entsprechenden Geschwindigkeitsverteilungen im Wasserkörper und dem Seegangsregime sowie den wechselnden Wasserständen. Dieser Zusammenhang wurde und wird derzeit unter wechselnden bauwerkseitigen Randbedingungen vom LEICHTWEISS-INSTITUT DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG (1997) untersucht. Das heißt, im Ergebnis werden Strömungsmuster in Abhängigkeit von Seegangs-, Wasserstands- und Bauwerksparametern ermittelt. Die Strömungsmuster, die sich angenommenermaßen optimal auf gewünschte morphologische Zuwachseffekte und Gleichgewichtsbedingungen auswirken, lassen sich dann auf die Haupteinflußgrößen Seegang, Wasserstand und Bauwerk zurückführen.

Entsprechend umfangreiche Naturversuche zur Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren im Wasserkörper, sowie Modellversuche mit beweglicher Sohle waren im Zusammenhang mit dem vorliegenden F/E-Vorhaben aus Aufwandsgründen nicht durchführbar.

Die Verifizierung der morphologischen Zuwachs- bzw. Abtragsbedingungen erfolgt aus den im vorliegenden F/E-Vorhaben gewonnenen Naturdaten. Mit Hilfe der oben beschriebenen Auswertelgorithmen werden die relativen Änderungen einer Lamelle k (Parameter für Morphologie) als funktionaler Zusammenhang

$$\Delta V_1 = f(W, H_{m0}, \alpha, B) \quad (7)$$

beschrieben, wobei

ΔV_1	=	relative Volumenänderung einer Lamelle l	
W	=	Wasserstand	
H_{m0}	=	signifikante Wellenhöhe (ca. vierfaches der Standardabweichung Sigma)	
α	=	Wellenanlaufrichtung	
B	=	Bauwerksparameter	ist.

3.1 Definition von allgemeingültigen hydrologischen Parametern

Die Wasserstände werden alle auf Normal-Mittelwasser bezogen. Der Normal-Mittelwasserstand ist ein generalisierter Mittelwasserstand der Küstenpegel (vgl. Abb. 10). Er entspricht 500 cm am Pegel, ist also ein definierter fester Wasserstandswert. Der Normal-Mittelwasserstand war bis 31. Oktober 1985 mit NN (festgelegt aus dem langjährigen Amsterdamer Mittelwasserstand) identisch, seit dem ersten November 1985 ist er für die gesamte Küste von Mecklenburg-Vorpommern neu festgelegt mit konstant 14 cm unter dem HN - Niveau, welches aus dem langjährigen Mittelwasserstand von Kronstadt bei St. Petersburg ermittelt wurde.

Der Mittelwasserstand ist das arithmetische Mittel aus zeitlich gleichabständigen Wasserstandswerten eines Pegels, bezogen auf einen festgelegten Zeitraum. Der Mittelwasserstand ist ein geringfügig variabler Mittelwert, er hängt ab vom Pegelstandort und vom Kollektiv der verwendeten Wasserstandsmeßwerte. Der Mittelwasserstand eines Küstenpegels liegt in einem geringen Schwankungsbereich um den fest definierten Normal-Mittelwasserstand 500 cm.

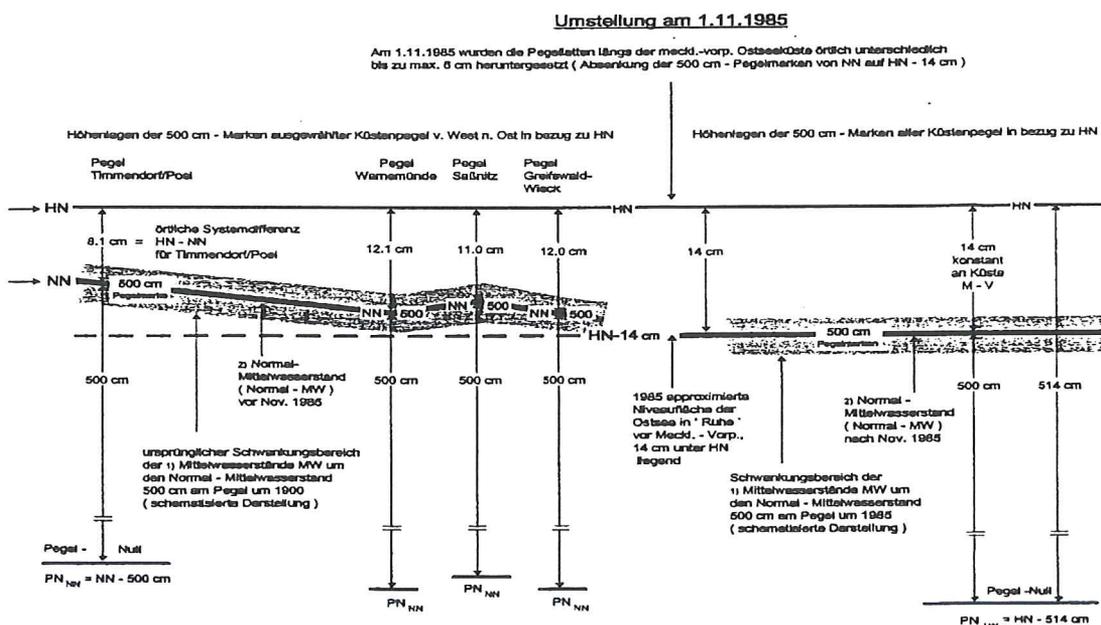


Abb. 10: Definition der Wasserstandsparameter

Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von Seegangparametern verschiedener Standorte und Zeitebenen ist die Transformation auf Größen, die allen räumlichen und zeitlichen Ebenen gemein ist. Dies sollten Parameter sein, die im wesentlichen vom großräumigen Habitus der Küste und von der Morphologie unbeeinflusst sind. Dazu eignen sich sehr gut die Tiefwasserwellenparameter (z. B. Wellenhöhe und Wellenanlaufrichtung), welche, wenn sie nicht gemessen wurden, sich aus Winddaten in guter Näherung errechnen lassen.

Das Spektrum der Windwellen läßt sich am einfachsten durch die signifikante Wellenhöhe (H_s) beschreiben. Die signifikante Wellenhöhe H_s entspricht der parametrisierten Wellenhöhe $H_{1/3}$, die bei der Zeitbereichsauswertung den Mittelwert der 33% der höchsten Wellen im Seegang darstellt. $H_{1/3}$ ist ein statistischer Kennwert. Ein auf der Wellenenergie beruhender Kennwert ist die H_{m0} -Wellenhöhe, die etwa dem vierfachen der Standardabweichung (σ) der Wellenhöhen entspricht ($H_{m0} = 4\sigma$). Im Tiefwasser sind die H_s und H_{m0} -Werte effektiv gleich, allerdings werden die H_s -Werte im Flachwasser bis zu 30% größer. Die Wellenenergie wird durch die H_{rms} -Wellenhöhe ausgedrückt, die mit H_s über die Beziehung $H_s = \text{Wurzel}(2H_{rms})$ verbunden ist.

Gemessene Tiefwasserwellenparameter liegen aus dem vorliegenden. F/E-Vorhaben nicht vor. Für die nachfolgenden Korrelationen mit der Morphologie kann auf unmittelbar seewärts eines Bühnenfeldes (ca 2.5 m Wassertiefe) ermittelte Wellenhöhen (H_{m0}) und -anlaufrichtungen (α) zurückgegriffen werden. Diese sind zwar durch Flachwassereffekte beeinflusst, die Verwendung dieser Daten für die Korrelation macht aber insofern Sinn, daß für die vorliegende Zielstellung auf diese Weise die Bedingungen in der Nähe eines Bühnenfeldes am besten widergegeben werden. Die genaue Herkunft aller verwendeten meteorologischen und hydrologischen Daten ist im folgenden Kapitel 3.2 beschrieben.

Zur Vergleichbarkeit der Wellenanlaufrichtungen für verschiedene Küstenabschnitte, werden diese in bezug zur Orthogonalen der Uferlinienausrichtung gesetzt. Dabei entspricht die Orthogonale zur Uferlinie in Richtung Land gleich 0° . Von beiden Seiten im rechten Winkel dem untersuchten

Querprofil angenähert entspricht bei Blickrichtung See eine Annäherung von links gleich -90° und von rechts gleich $+90^\circ$ (vgl. Abb. 11).

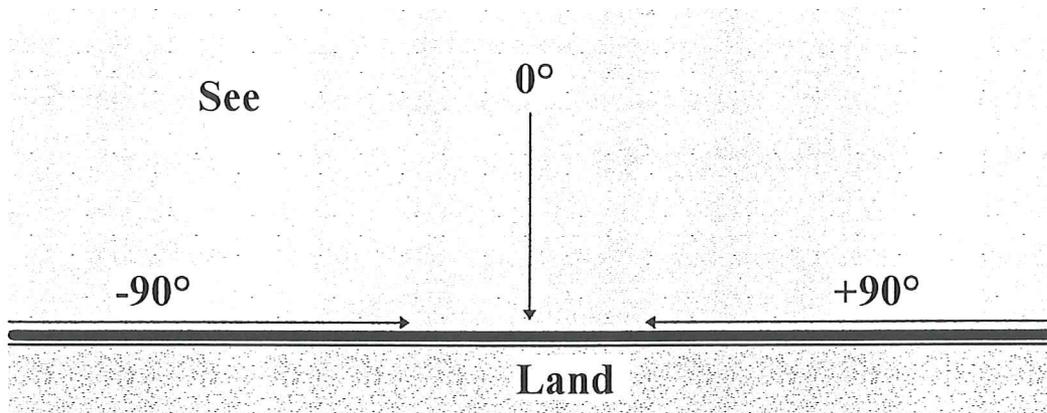


Abb. 11: Definitionsskizze der Wellenanlaufrichtungen

3.2 Herkunft der verwendeten meteorologischen und hydrologischen Daten

Die Herkunft der, für die Berechnungen des Zusammenhanges zwischen hydrologischen und morphologischen Parametern verwendeten hydrologischen und meteorologischen Daten setzt sich wie folgt zusammen:

Datenart	Zeitraum	Herkunft
Wasserstand	1/87-9/93	Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie
	10/93-9/97	LWI Braunschweig/StAUN Rostock
Wind	1/87-9/93	Deutscher Wetterdienst
	10/93-9/97	LWI Braunschweig/StAUN Rostock
Seegang	1/87-9/93	Wind-Wellen-Korrelation der Datenbasis
	(berechnet)	10/93-9/97 *
	10/93-9/97	LWI Braunschweig/StAUN Rostock

* Die Wind-Wellen-Korrelation wurde für die Richtungen mit einem Polynom 3. Grades und für die Windgeschwindigkeiten mit einem Polynom 2. Grades durchgeführt. Dabei ist eine Phasenverschiebung zwischen Wind und dem sich aufbauenden Seegang von 4 Stunden berücksichtigt. Die Wellenparameter wurden

für 10°-Sektoren des Windes und Klassen der Windgeschwindigkeit mit einer Klassenbreite von 5 m/s einzeln berechnet. Der mittlere Korrelationskoeffizient r für die Richtungen liegt bei Windgeschwindigkeiten größer 5 m/s bei 0.88. Für die Wind-Wellen-Korrelation aus den Windgeschwindigkeiten liegt dieser bei auflandigen Winden bei 0.89.

3.2.1 Zerlegen hydrologischer Parameter in Klassen

Der funktionale Zusammenhang zur Morphologie soll in Abhängigkeit von Wasserstand und Seegang beschrieben werden. Dazu erweist sich eine Zerlegung der einzelnen hydrologischen Parameter in Klassen als sinnvoll. Die Klassenbreiten werden sehr groß gewählt, da anderenfalls unter Einbeziehung von Bauwerksparemtern und drei hydrologischen Parametern die vielen Kombinationsmöglichkeiten nicht durch morphologische Daten abgedeckt werden können. Bei Auffüllen der morphologischen Datenkollektive können diese Klassenabstufungen in späteren Untersuchungen noch verfeinert werden.

Die Wasserstände W werden in folgende Klassen untergliedert:

Klasse 1:	<-0.75 m über Normal-Mittelwasser
Klasse 2:	-0.75 m bis <-0.25 m über Normal-Mittelwasser
Klasse 3:	-0.25 m bis <+0.25 m über Normal-Mittelwasser
Klasse 4:	+0.25 m bis <+0.75 m über Normal-Mittelwasser
Klasse 5:	≥+0.75 m über Normal-Mittelwasser

Im laufenden F/E-Vorhaben wurden ausreichende Datenkollektive an Wellenhöhen innerhalb und außerhalb eines Bühnenfeldes gewonnen. Für die Interpretation der morphologischen Veränderungen im Bühnensystem Warnemünde wird dieser günstige Umstand berücksichtigt und die durch Flachwassereffekte beeinflussten Wellen kurz vor Einlaufen in das Bühnenfeld zur Korrelation genutzt. Der Ursprung dieser Daten ist dem Kapitel 3.2 zu entnehmen.

Die signifikante Wellenhöhe H_{m0} am Meßbrückenkopf Warnemünde (vgl. Abb. 2.1, 4. Zwischenbericht) wird in die folgenden 3 Klassen zerlegt:

Klasse 1:	<0.20 m	schwacher Seegang
Klasse 2:	≥0.20 m bis <0.60 m	mittlerer Seegang
Klasse 3:	≥0.60 m	starker Seegang

Die Wellenanlaufrichtungen werden in die Klassen unterteilt, die erwartungsgemäß küstenparallele Strömungen von links bzw. von rechts (mit Blickrichtung See) oder vorwiegend Küstenquerströmungen hervorrufen (vgl. Abb. 12). Dabei wird die ufernormale Anlaufrichtung durch eine Klassenbreite von 45° (für das Meßbrückenprofil auch 22.5°) repräsentiert, wobei die Ufernormale die Klassenmitte dieser Klasse bildet. Die beiden weiteren Klassen sind jeweils von der ufernormalen Anlaufrichtungsrichtung und der Uferlinie eingeschlossen und besitzen beide eine Klassenbreite von 67.5° (bzw. 78.75°). Für die Uferexposition Warnemünde bedeutet dies im einzelnen folgende auf die Nordrichtung ($=0^\circ$) bezogene Klasseneinteilung:

Klasse 1:	262.0° bis 329.5°	→Anlauf von -90° bis -22.5°
Klasse 2:	329.5° bis 14.5°	→ufernormaler Anlauf
Klasse 3:	14.5° bis 82.0°	→Anlauf von 22.5° bis 90°

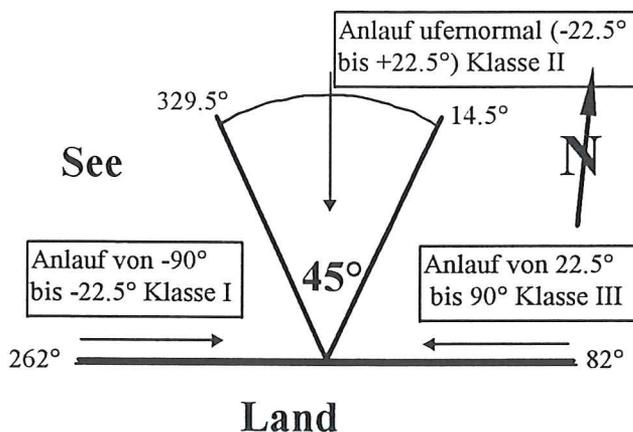


Abb. 12: Einteilung der Klassen der Seegangsaufrichtungen

4. Abhängigkeit morphologischer Veränderungen von definierten Randbedingungen

4.1 Theoretische Grundlagen

4.1.1 Gleichgewichtsprofile nach SWART (1974)

Soll der Prozeß auf dem Strand-/Schorrebereich nach dem Kausalitätsprinzip beschrieben werden, so sind die Veränderungen im Querprofil ein Ergebnis, das durch verschiedene Randbedingungen verursacht wird. Diese Abhängigkeiten werden im folgenden untersucht, wobei die Rückwirkungen der Morphologie auf z. B. den Komplex der hydrologischen Faktoren oder ein Bauwerk hier unberücksichtigt bleiben sollen.

Dabei wird zugrunde gelegt, daß für definiert konstante hydrologische Randbedingungen ein entsprechendes Gleichgewichtsprofil existiert. Dieses Profil wird theoretisch erst dann erreicht, wenn die Zeit t des Einwirkens dieser definierten Randbedingungen unendlich ist. SWART (1974) führt einen morphologischen Parameter W ein, der den Gleichgewichtszustand eines Querprofils beschreibt. Anhand von Modellversuchen belegt er, daß die Annäherung an das Gleichgewichtsprofil degressiv asymptotisch erfolgt (vgl. Abb. 13).

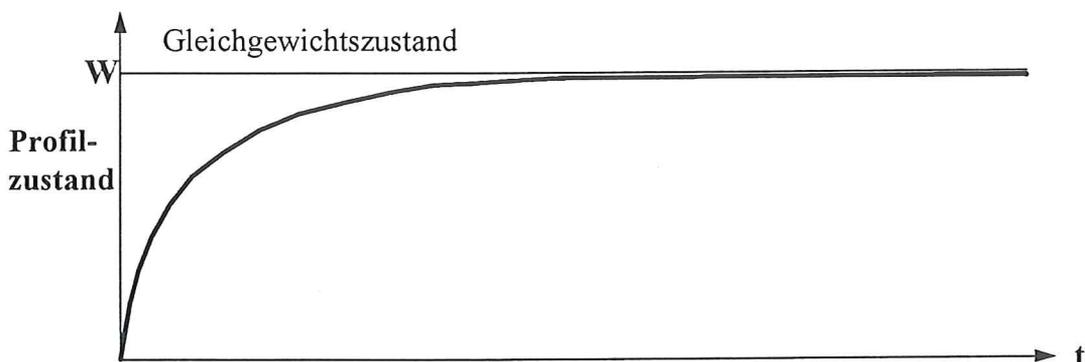


Abb. 13: Annäherung der Morphologie eines Querprofils unter definierten hydrologische Randbedingungen an den Gleichgewichtszustand (nach SWART 1974)

In der Natur finden wir ein komplexes Gebilde der Überlagerung verschiedener Einflußfaktoren auf die Morphologie. Die einzelnen Einflußfaktoren wechseln permanent in Größe und Richtung, so daß sich praktisch nie ein Gleichgewichtszustand im Strand-/Schorresystem unter natürlichen Bedingungen voll ausbilden kann. Die Morphologie ist ständig bestrebt, sich den momentanen hydrologischen Randbedingungen anzupassen. Angewendet auf die SWART'schen Gleichgewichtsprofiluntersuchungen, befindet sich der natürliche Profilizustand (vgl. Abb. 13) in der Regel noch weit von W (dem Gleichgewichtsprofil) entfernt, bis die hydrologischen Randbedingungen erneut wechseln.

In der vorliegenden Arbeit sind die Zusammenhänge zwischen den morphologischen Veränderungen und ausgewählten Wasserstands- und Seegangparametern unter natürlichen Bedingungen einerseits, sowie unter dem Einfluß von Bauwerken im unmittelbaren Uferbereich andererseits dargestellt. Die sedimentologischen Parameter des Testgebietes werden im Untersuchungszeitraum als konstant angenommen.

Voraussetzung für die Untersuchung dieser Zusammenhänge ist die Neutralisierung der Ein- und Austräge eines zu betrachtenden Profilbereichs. Dies wurde durch die Bildung eines **abgeschlossenen morphodynamischen Systems** gelöst.

4.1.2 Räumlicher Ausschnitt als abgeschlossenes morphodynamisches System

Der Sedimenttransport ist ein Prozess, der im dreidimensionalen Raum stattfindet. Für wissenschaftliche Betrachtungen wird er im wesentlichen in die Komponenten Küstenquer- und Küstenlängstransport zerlegt. Mit Hilfe von einzelnen Küstenquerprofilen von denen zu den Zeitpunkten t , $t+1$, ... und $t+n$ Profilaufnahmen existieren, sind Sedimenttransportprozesse nicht beschreibbar. Besonders die Vorgänge, die küstenparallel ablaufen, lassen sich nicht mit vereinzelt Querprofilen erfassen.

Bei Vorhandensein von Küstenquerprofilaufnahmen von den Zeitpunkten t , $t+1$, ... und $t+n$, lassen sich ein Teil der zwischen den Profilaufnahmen vielfach überlagerten Sedimenttransportvorgänge in einer Nettobilanz ausdrücken, indem der Sedimenteintrag bzw. -austrag in ein oder aus einem festen Querprofilausschnitt zwischen t und $t+1$ ermittelt wird. Über die Auswertung morphologischer Zustandsgrößen von Querprofilausschnitten zu verschiedenen Zeitschnitten t , $t+1$, ... und $t+n$ wird der Nettosedimentquertransport und die Querprofilformänderung innerhalb dieser Zeitschnitte in Abhängigkeit von den verursachenden hydrologischen Parametern untersucht.

Dabei wird davon ausgegangen, daß die Küstenmorphologie gegenüber dem angreifenden Seegang und den schwankenden Wasserständen in küstennormaler Richtung einem gewissen Gleichgewichtszustand zustrebt. Es wird also angenommen, daß eine Abhängigkeit zwischen diesen hydrologischen Parametern und der morphologischen Veränderung zwischen t und $t+1$ besteht, die aber nicht eineindeutig durch eine Funktionsgleichung beschrieben werden kann. Bei Vorhandensein von statistisch gesichertem Datenmaterial kann der Einfluß der Kombination von Wasserstand, Seegang und Bauwerk auf die Größe und Richtung der Profilparameter in guter Näherung isoliert und ein funktionaler Zusammenhang ermittelt werden.

Dazu ist zunächst die Schaffung eines abgeschlossenen morphodynamischen Systems notwendig. Das heißt, es sind die Grenzen des zu betrachtenden räumlichen Ausschnitts festzulegen und die Wechselbeziehungen zu den Nachbarabschnitten zu definieren.

Aufgrund meßtechnischer Voraussetzungen sind derzeit keine morphologischen Vermessungen bis in eine Wassertiefe seewärts der Grenze, hinter der kein Sedimenttransport mehr stattfindet, mit hinreichender Genauigkeit für das vorliegende Verfahren durchführbar. Schematisch in der x - y -Ebene dargestellt (vgl. Abb. 14), findet ein Austausch des betrachteten Profilausschnittes nach drei Seiten statt. Der Sedimentaustausch über die landwärtige Grenze des vorliegenden Systems im äolischen Transport wird als so gering angenommen, daß er vernachlässigt werden kann. Demzufolge ergibt sich die Volumenveränderung des

betrachteten Gesamtsystems (ΔV) zwischen zwei morphologischen Aufnahmen (t und t+1) zu:

$$\Delta V_{t,t+1} = \Sigma S_{y1} - \Sigma S_{y2} - \Sigma S_x \quad (8)$$

wobei der Sedimenttransport jeweils in Pfeilrichtung (vgl. Abb. 14) positiv ist.

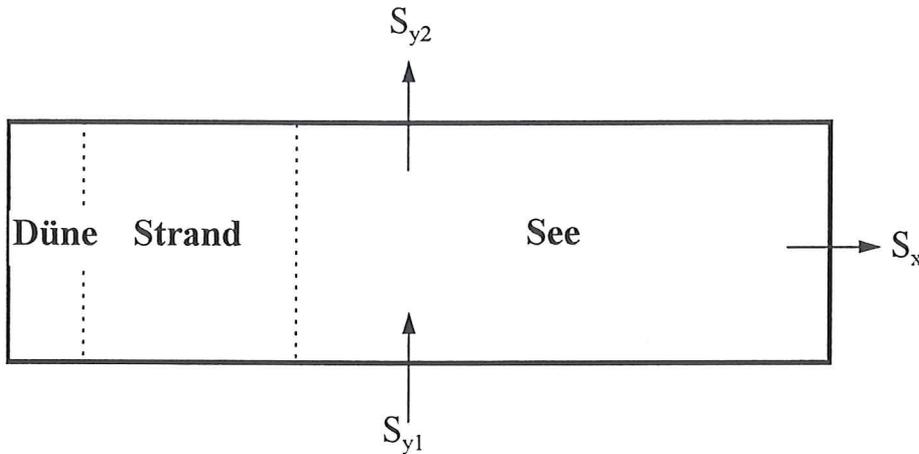


Abb. 14: Schematische Darstellung des Bilanzsystems des küstennahen Sedimenttransports in der Draufsicht

Das System kann als abgeschlossenes System betrachtet werden, wenn der Sedimenttausch über die Systemgrenzen hinweg null wird. Das heißt:

$$\Delta V_{t,t+1} = V_{t+1} - V_t = \Sigma S_{y1} - \Sigma S_{y2} - \Sigma S_x = 0 \quad (9)$$

In einem natürlichen Querprofil mit einem Meter Breite, welches keine abgeschlossenen Systemgrenzen besitzt, wird die Volumenbilanz zwischen zwei morphologischen Aufnahmen in der Regel einen Betrag $\Delta V_{t,t+1}$ aufweisen, der ungleich null ist. Um das System zu einem abgeschlossenen System zu machen, müssen die Volumeneinträge von außen in dieses System subtrahiert werden. Aus dem ersten Teil der Gleichung (9) folgt dann:

$$V_{t+1} - V_t - \Delta V_{t,t+1} = 0 \quad (10)$$

Teilt man das System entsprechend Abb. 2 in k Lamellen, so ist die Summe der Volumenänderungen aller Einzellamellen im System null zu setzen, um das System zu einem abgeschlossenen System zu machen. Das heißt, der Volumenüberschuß im Gesamtsystem ist auf k Lamellen aufzuteilen und von diesen zu subtrahieren. In einem abgeschlossenen System gilt also für eine beliebige Einzellamelle 1:

$$\Delta V_{1,t,t+1} = V_{1,t+1} - V_{1,t} - (\Delta V_{t,t+1}/k) \quad (11)$$

d. h. für das Gesamtsystem mit k Lamellen ergibt sich bei $b \rightarrow 0$:

$$\int_{-k}^{+k} \Delta V_{1,t,t+1} dz = 0 \quad (12)$$

In dem Fall kann korrekterweise nicht von Volumenzuwachs bzw. -abtrag in den einzelnen Lamellen gesprochen werden, sondern von einer Sedimentbegünstigung oder -benachteiligung einzelner Lamellen oder Bereiche innerhalb des betrachteten Systems, da $\Delta V_{1,t,t+1}$ nicht der tatsächlich gemessene Zuwachs bzw. Abtrag ist. Es wird also die reine Änderung der Form bzw. Gestalt des Querprofilausschnitts bei der Betrachtung von k Lamellen erfaßt (vgl. Abb. 15).

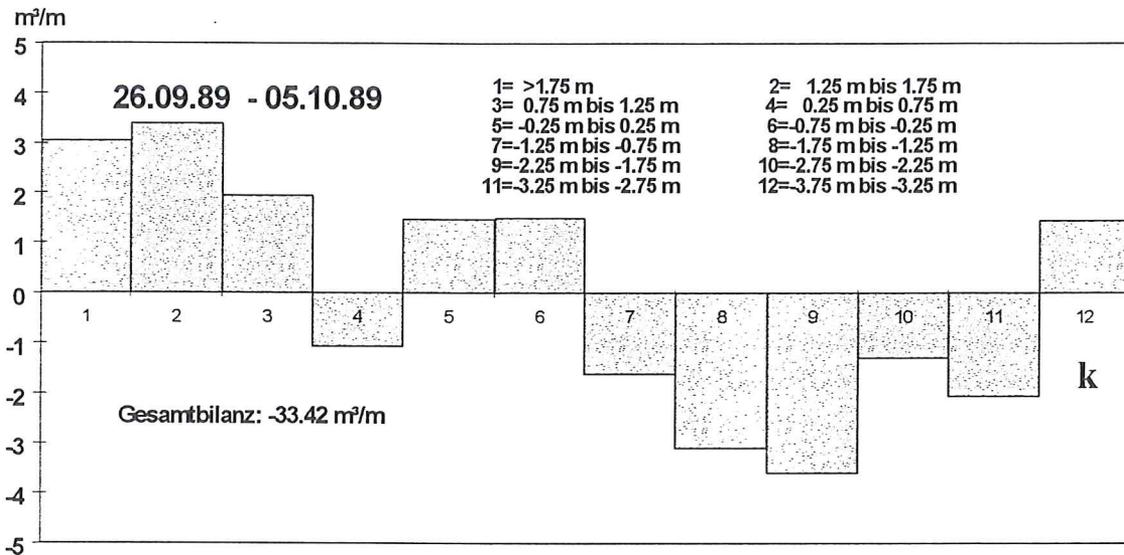


Abb. 15: Beispielgraphik zur Sedimentbegünstigung bzw. -benachteiligung von $k = 12$ Lamellen in einem abgeschlossenen System (Querprofil Kkm 145.059, Warnemünde/West) zwischen zwei Meßaufnahmen

In der Beispielgraphik (vgl. Abb. 15) ist das abgeschlossene System in $k = 12$ Lamellen mit der Lamellenstärke 0.5 m unterteilt. Die Lamelle über 1.75 m über Normal-Mittelwasser kann breiter als 0.5 m werden, da hier das Sedimentvolumen bis zur Dünenoberkante (obere Systemgrenze, über die landwärts kein Sedimenttransport erfolgt) erfaßt wird. Diese wird aber hier gleichrangig behandelt. Auf diese Weise wird berücksichtigt, was bereits BAKKER (1968) darstellte, und zwar daß Profilveränderungen im wesentlichen nur in solchen Bereichen stattfinden können, in welchen normale Wellenbewegung Sedimenttransport (entweder Küstenlängstransport oder Küstenquertransport) verursachen kann. Es wird damit erreicht, daß die höheren Lamellen, die fast ausschließlich durch äolischen Transport oder menschliche Eingriffe (Dünenaufschüttung) und nicht durch hydrologische Einwirkungen Veränderung erfahren, in der Aufteilung der Systeme in- bzw. -austräge nicht überbewertet werden.

Zwischen dem 26.09.1989 und dem 05.10.1989 hat sich zwischen den Höhenlinien +5.25 m und -3.75 m (abgeschlossenes System) ein Volumenabtrag von 33.42 m³ im $y = 1$ m Meter breiten Querprofil (Kkm 145.059) ergeben (vgl. Abb. 15). Dieser

Abtrag wird gleichmäßig auf die absoluten Volumenänderungen in den $k = 12$ Lamellen aufgeteilt und zu diesen addiert. Das Ergebnis sind **relative Volumenänderungen** in den 12 Lamellen, dessen Summe null ist. Somit ergibt sich eine Aussage darüber, welche Lamellen oder Bereiche innerhalb des betrachteten Querprofilausschnitts in der Verformung des Querprofils begünstigt bzw. benachteiligt sind. Es werden also Formänderungsparameter des Querprofils erfaßt, welche mit Formänderungen räumlich und zeitlich verschiedener Querprofilaufnahmen vergleichbar sind.

4.2 Methodik

Die Untersuchung des Zusammenspiels von Morphologie und hydrologischen Randbedingungen erfordert zunächst einen Ansatz für die statistische Auswertung und Interpretation der morphologischen und hydrologischen Naturdaten. Für die Auswahl geeigneter Parameter und zu untersuchender Zusammenhänge sind die Meßdichte und Meßgenauigkeit des vorliegenden Datenmaterials zu berücksichtigen.

Als theoretische Grundlage für einen derartigen Ansatz dienen die beiden folgenden Annahmen (siehe Kap. 4.1):

- Unter definierten hydrologischen Randbedingungen erfolgt eine degressiv mit der Zeit wachsende Annäherung an ein für diese Bedingungen typisches Gleichgewichtsprofil.
- Der räumliche Ausschnitt, innerhalb dessen Naturdaten aufgenommen wurden, wird als abgeschlossenes morphologisches System betrachtet.

4.2.1 Die Parameter „Lamellenvolumenänderung“ und „Profilgestaltänderung“

Das Gleichgewichtsprofil nach SWART ist in der Realität nicht zu beobachten. Statistische Parameter, die ein einzelnes, real gemessenes Profil beschreiben (etwa die durchschnittliche Neigung, Lamellenvolumina oder Kurvenradien dieses Profils), dürften nur bei hinreichender Dauer der definierten Randbedingungen mit diesen in Zusammenhang gebracht werden. Eine bestimmte Kombinationsklasse von Wasserstand und Seegang aber herrscht meist nur kurze Zeit vor.

Aus der Theorie des Gleichgewichtsprofils folgt, daß gerade kurz nach einem Wechsel der Randbedingungen die stärkste Veränderungstendenz (max. Steigung des Graphen) in Richtung eines für die neuen Bedingungen typischen Gleichgewichtsprofils besteht. Es liegt also nahe, einen Zusammenhang zwischen einerseits

dem hydrologischen Regime (bzw. einer bestimmten Kombination aus Wellenaufrichtung, Wellenhöhe und Wasserstand) und andererseits der Profilgestaltänderung in einem bestimmten Zeitraum zu suchen.

Die Veränderungstendenz des Profils soll der morphologische Parameter sein, dessen Abhängigkeit von hydrologischen Parametern im folgenden untersucht wird.

Die Gestaltänderung des Profils zwischen zwei Meßzeiträumen wird am differenziertesten durch die Lamellenmethode erfaßt. Sie ermöglicht es, bei $b \rightarrow 0$ theoretisch den gesamten Informationsgehalt der Einzelmessungen zu bewahren (im Gegensatz z. B. zur Betrachtung von Kurvenradien oder einem durchschnittlichen Gefälle).

4.2.2 Relative Volumenänderungen im abgeschlossenen System

Die Sedimenttransporte in das oder aus dem betrachteten System haben nicht notwendig eine Veränderung der Profilgestalt zur Folge. Sedimentieren z. B. im Idealfall die Einträge über den gesamten Profilausschnitt als eine zusammenhängende Schicht einheitlicher Dicke, so bleibt die Form der Profilkurve davon unberührt.

Relevant für die Profilgestaltänderung ist vielmehr die relativ zum Gesamteintrag erfolgende Veränderung in den Einzellamellen. Bleibt beispielsweise nur in einer Lamelle des Systems das Volumen konstant, während in allen anderen Lamellen eine Volumenzunahme erfolgt, so kann von einer relativen Benachteiligung dieser einen zugunsten aller anderen Lamellen gesprochen werden (vgl. Kap. 4.1.2). Die relative Benachteiligung beschreibt dann eine „Vertiefung“ der Profilgestalt im Bereich der - absolut betrachtet - unverändert gebliebenen Lamelle.

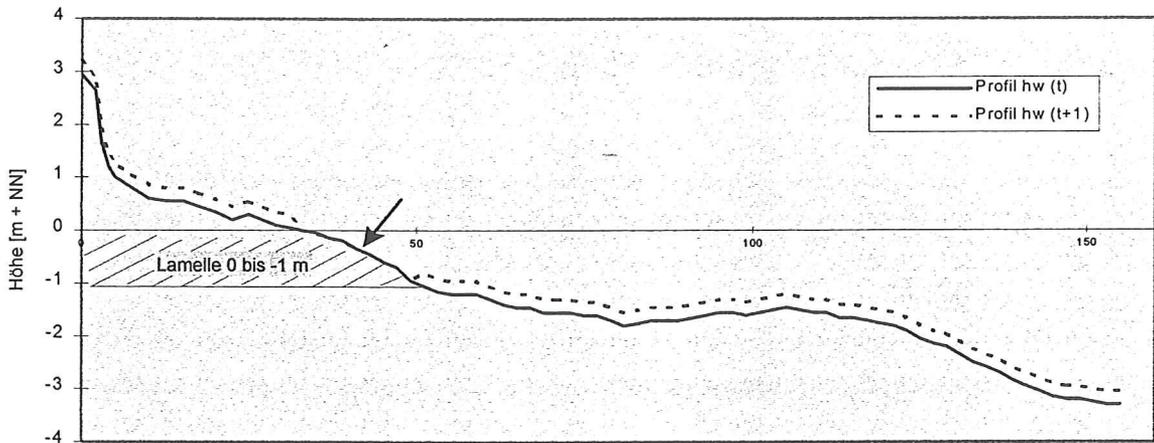


Abb. 16: Relative Profilvertiefung im Bereich einer unveränderten Höhenlamelle

Durch den Ansatz des abgeschlossenen Systems (siehe Kap.4.1.2) werden die relativen Volumenänderungen in den Einzellamellen ermittelt, die für die weiter unten beschriebene Momentenmethode zur Charakterisierung der Profilgestaltänderung heranzuziehen sind.

Als Besonderheit für den Standort Warnemünde, sind die Änderungen der Randbedingungen durch den Bau von Buhnen im Jahr 1991 zu nennen. Diese führten zu einer Änderung der Gleichgewichtsbedingungen und somit zu einer dauerhaften Umformung des Querprofils. Das arithmetische Mittel der relativen Volumenänderungen je Meßzeitraum von 1988 bis 1997 deutet bereits an, in welche Richtung die Umformung des Profils durch den Einfluß der 1991 gebauten Buhnen erfolgte. Bei einem deutlichen Volumeneintrag von außen in ein 13-Lamellen-System hat sich das Profil zudem stark zugunsten der oberen Lamellen bis 1.25 m Wassertiefe umgeformt. Die unteren Lamellen haben gegenüber den oberen relativ an Volumen verloren. Bedenkt man den Eintrag von außen in dieses System, stellt sich heraus, daß die realen Volumenverluste dort klein sind (vgl. Abb. 17).

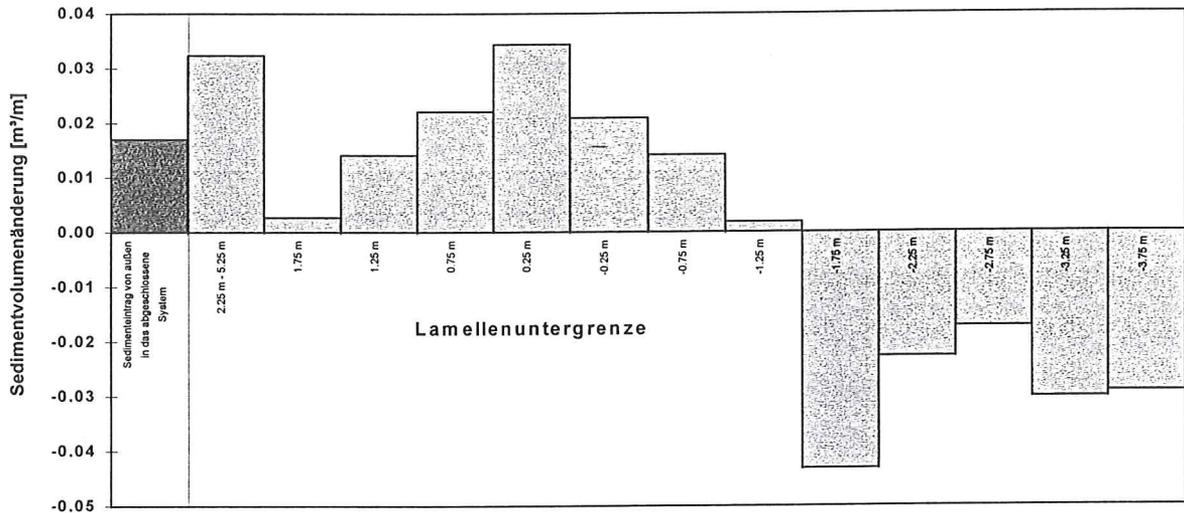


Abb. 17: Mittlere relative Sedimentvolumenänderungen (arithmetisches Mittel) und mittlerer Eintrag von außen je Meßzeitraum in einem 13-Lamellen-System zwischen 1988 und 1997 im Küstenquerprofil Kkm 145.059 Warnemünde/West

Nach Verbauungsart unterschieden gestalten sich für konkrete Zeiträume die mittleren relativen Sedimentvolumenänderungen im Meßbrückenprofil Warnemünde entsprechend Abb. 18.

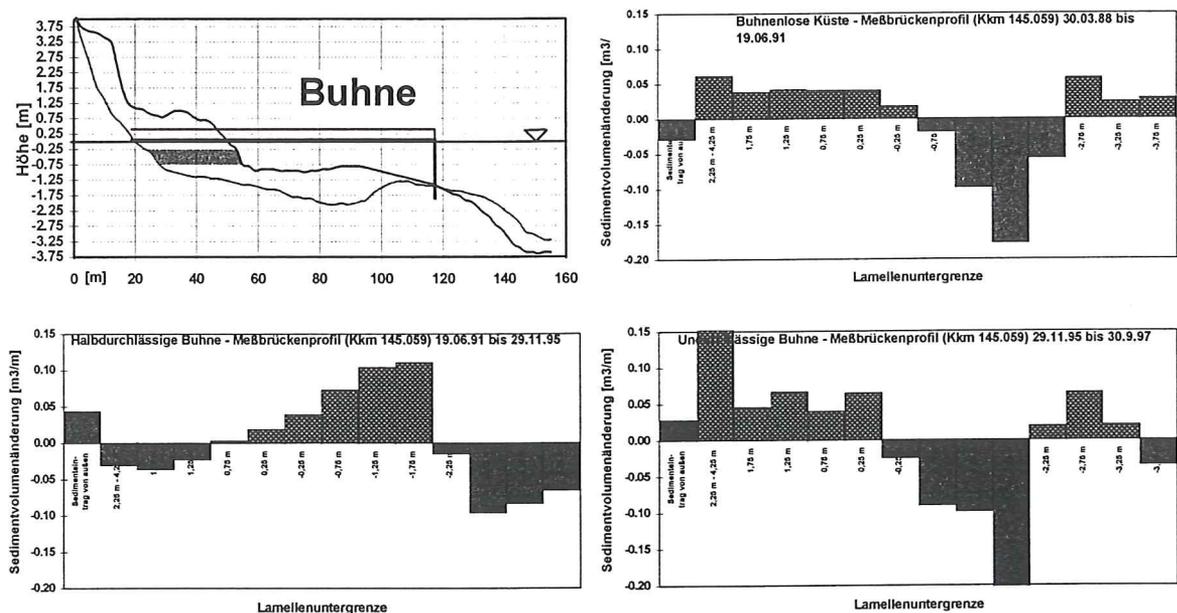


Abb. 18: Mittlere relative Sedimentvolumenänderungen (arithmetisches Mittel) und mittlerer Eintrag von außen je Meßzeitraum in einem 13-Lamellen-System im Küstenquerprofil Kkm 145.059 Warnemünde/West bei verschiedenen bauwerkseitigen Randbedingungen

Die Graphiken in Abb. 18 verstehen sich folgendermaßen: Unbedingt ist der Gesamteintrag in das System zu beachten. Negative relative Sedimentvolumenänderungen können positive absolute Sedimentvolumenänderungen und umgekehrt darstellen. Diese Angaben sind über den Gesamteintrag in das abgeschlossene System ermittelbar. Die relativen Volumenänderungen sind ein Indiz für die Änderung der Profilform. Die Profilform der buhlenlosen Küste am Kkm 145.059 Warnemünde erfährt eine ähnliche Entwicklungstendenz wie die Küste mit undurchlässigen Buhnen verbaut. Es erfolgt eine Versteilung vom Strand zum Flachwasserbereich. Der Gesamteintrag ist dagegen bei undurchlässigen Buhnen positiv, während er sich an der buhlenlosen Küste negativ zeigt (vgl. Abb. 18 rechts). Die halbdurchlässige Buhne bewirkt eine Abflachung vom Strand zum Flachwasserbereich und eine Aufsteilung zu den tieferen Lamellen unter deutlich positivem Gesamteintrag (vgl. Abb. 18 unten links).

4.2.3 Ermittlung klassentypischer Sedimentvolumenänderungen

Die hydrologischen Kombinationsklassen aus Wasserstand, Wellenanlauffrichtung und Wellenhöhe wurden bereits in Kap. 3.3 beschrieben. Geht man von obigen Überlegungen zur Entwicklung eines Gleichgewichtsprofils aus, so müßten für die Untersuchung des Zusammenhanges von Hydrologie und Morphologie idealerweise Zeiträume herangezogen werden, in denen zu 100% eine bestimmte Kombinationsklasse geherrscht hat. Bei der vorliegenden Meßdichte der Profilaufnahmen ist das nicht möglich. Es liegt überhaupt nur ein einziger Meßzeitraum vor, in dem eine Klasse allein vertreten ist (Kkm 145.059 [Meßbrückenprofil] 06.11.1991 - 14.11.1991, schwacher Seegang ufernormal bei mittleren Wasserständen).

Volumenänderungen zwischen zwei Profilaufnahmen müssen also zumeist auf mehrere hydrologische Klassen (sowie auch auf das Ausgangsprofil) zurückgeführt werden, deren jeweiliger Einfluß sich in dem betreffenden Zeitraum zu einem komplexen morphodynamischen Geschehen überlagert. Gemessen wird aber nur das Resultat dieser Überlagerung. Ein kausaler Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Rahmenbedingungen und der resultierenden Profilveränderung läßt sich aus einzelnen Meßzeiträumen nicht begründen. Bei einer Vielzahl von Profi-

laufnahmen und den ihnen zugewiesenen Klassenverteilungen können aber statistische Zusammenhänge untersucht werden. Als Resultat der statistischen Analyse wird die Charakterisierung klassentypischer Lamellenvolumenänderungen angestrebt.

Dazu werden zunächst die hydrologischen Daten nach Meßzeiträumen zwischen den einzelnen morphologischen Vermessungen in einem Querprofil geordnet. Die prozentualen Zeitanteile $H_{K,i}$ jeder einzelnen Kombinationsklasse K in einem Meßzeitraum i zwischen zwei morphologischen Vermessungen werden berechnet.

Die Dauer der Meßintervalle wird als nicht relevant für die statistische Analyse angesehen. Die Volumenänderungen unterschiedlich langer Meßzeiträume werden gleichwertig berücksichtigt. Dies begründet sich wie folgt:

- Je länger ein Zeitintervall, desto bedeutsamer wird der Ausgleich von absoluten Volumenänderungen durch entgegengerichtete Einflüsse.
- Nach SWART besteht der profilverändernde Einfluß definierter Randbedingungen in der degressiven Annäherung an ein Gleichgewichtsprofil. Herrscht eine einzelne Klasse über einen langen Zeitraum vor, so nimmt ihr profilgestaltender Einfluß mit der Zeit ab.
- Da ein abgeschlossenes System betrachtet wird, kann von den absoluten Beträgen der Lamellenvolumenänderungen abstrahiert werden. Finden über einen längeren Zeitraum betragsmäßig größere Veränderungen statt, interessiert in dem hier behandelten Zusammenhang nur die Relation dieser Veränderungen zueinander. Als das eine Profilveränderung charakterisierende Merkmal soll allein die relative Begünstigung bzw. Benachteiligung von Teilbereichen dienen (siehe oben, vgl. Abb. 16).

Die einzelnen Kombinationsklassen sind prozentual mehr oder weniger stark in den Zeiträumen zwischen zwei Profilaufnahmen vertreten. Die durchschnittliche Verteilung der Wellenhöhen[H_{m0}]-Wasserstands[W]-Kombinationsklassen für drei Hauptwellenanlafrichtungen[α] zwischen den einzelnen morphologischen Vermessungen ist für den Zeitraum 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde in den Abbildungen 18 bis 20 dargestellt.

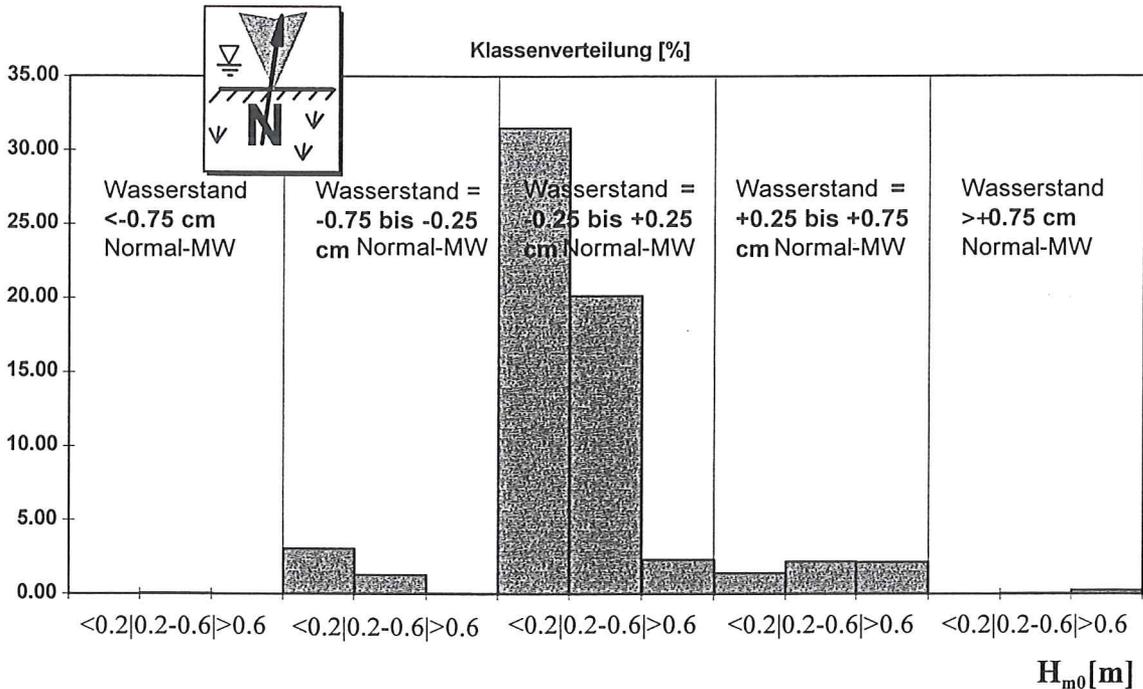


Abb. 19: Durchschnittliche Verteilung (arithmetisches Mittel) von Wasserstands-Wellenhöhen-Klassenkombinationen zwischen einzelnen morphologischen Vermessungen von 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde/West für ufernormale Wellenanlauffrichtungen

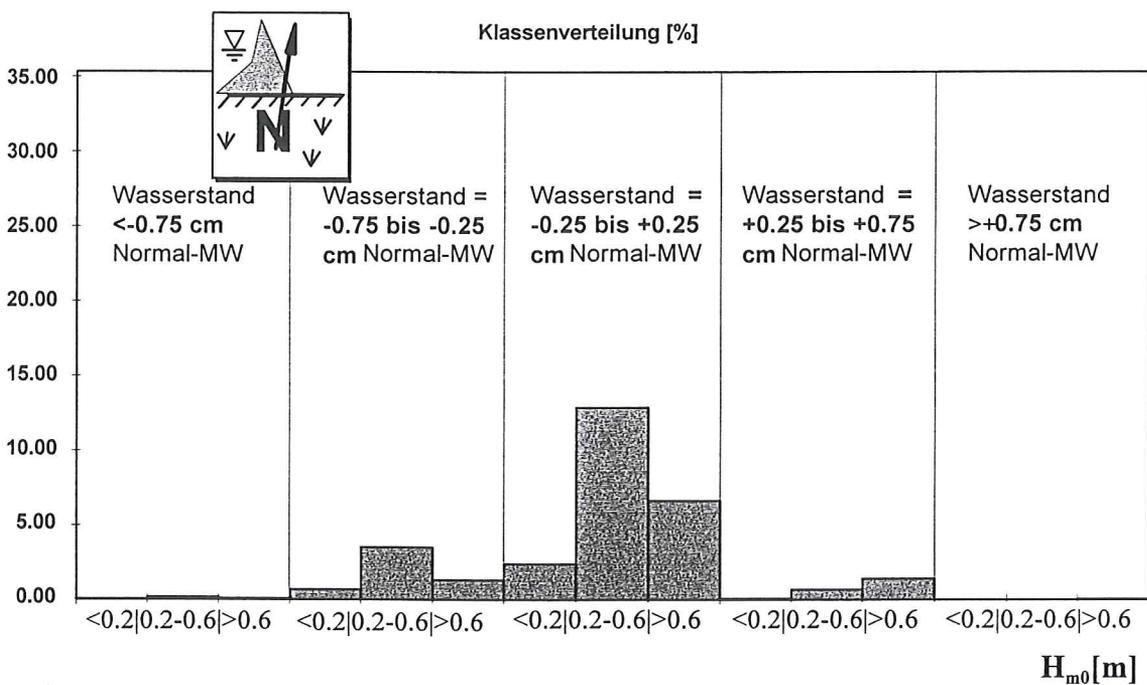


Abb. 20: Durchschnittliche Verteilung (arithmetisches Mittel) von Wasserstands-Wellenhöhen-Klassenkombinationen zwischen einzelnen morphologischen Vermessungen von 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde/West für Wellenanlauffrichtungen von links mit Blickrichtung „See“

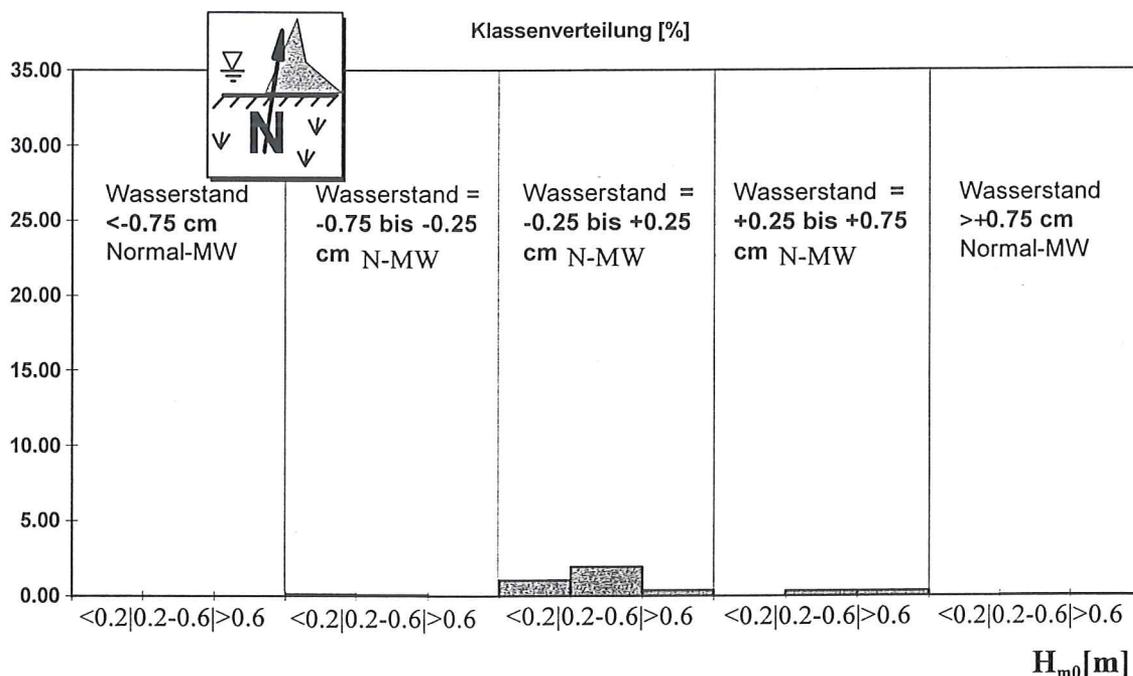


Abb. 21: Durchschnittliche Verteilung (arithmetisches Mittel) von Wasserstands-Wellenhöhen-Klassenkombinationen zwischen einzelnen morphologischen Vermessungen von 1988 bis 1997 im Gebiet Warnemünde/West für Wellenanlauffrichtungen von rechts mit Blickrichtung „See“

Aus Abb. 19 wird ersichtlich, daß die Klassen mittlerer Wasserstand kombiniert mit schwachem bzw. mittlerem Seegang aus ufernormalen Anlauffrichtungen mit zusammen etwa 50% am stärksten am hydrodynamischen Gesamtgeschehen beteiligt sind. Mittlere Wasserstände sind innerhalb aller Wellenanlauffrichtungen am häufigsten, Extremwasserstände generell sehr selten. Schwaches Seegangsgeschehen ist am stärksten an ufernormale Wellenanlauffrichtungen gekoppelt. Die Anlauffrichtungen von der Seite sind stärker mit mittleren bis schweren Seegängen als mit geringen Seegängen verbunden.

Die Klassenverteilungen sind als Grundlage zur Variation neuer Klassengrenzen nutzbar. So können andere Klassenaufteilungen (z. B. das noch enger (z. B. 22.5°) fassen der ufernormalen Wellenanlauffrichtung) nach der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Parameter gebildet werden. Weitere Berechnungen diesbezüglich sind beim Autor erfragbar.

Aus den unterschiedlich hohen Prozentanteilen, die eine Klasse an den verschiedenen Meßzeiträumen innehat, können nun durch gewichtete Mittelwertbildung die für die jeweilige Klasse typischen Sedimentvolumenänderungen bestimmt werden. Die Grundüberlegung dazu wird im folgenden anhand eines Beispiels demonstriert.

Tritt zum Beispiel eine Klasse in einem Zeitraum A gar nicht auf, in einem Zeitraum B mit der Häufigkeit 20% und in einem Zeitraum C mit der Häufigkeit 40%, so wird die Volumenänderung im Zeitraum C als die für diese Klasse typischste anzusehen sein. Die Veränderung im Zeitraum A hingegen sollte für die Ermittlung klassenspezifischer Veränderungen gar nicht herangezogen werden. Die prozentuale Häufigkeit kann so als Wichtungsfaktor für die Relevanz dienen, die eine einzelne Volumenänderung für die Klasse besitzt. Eine gewichtete Mittelwertbildung charakterisiert schließlich die für eine Mehrzahl von Meßzeiträumen typische Volumenänderung für diese Klasse. Für obiges Beispiel gilt also:

$$\Delta V_{\text{Klasse}}(A, B, C) = \frac{0 \cdot \Delta V_A + 20 \cdot \Delta V_B + 40 \cdot \Delta V_C}{0 + 20 + 40} = \frac{2}{3} \cdot \Delta V_C + \frac{1}{3} \cdot \Delta V_B$$

(13)

Allgemein gefaßt lautet Gleichung (13):

$$\Delta V_{K,l}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{K,i} \cdot \Delta V_{l,i})}{\sum_{i=1}^n H_{K,i}}$$

(14)

für eine Kombinationsklasse K mit den Häufigkeiten $H_{K,i}$ und den relativen Volumenänderungen $\Delta V_{l,i}$ für eine beliebige Lamelle l in den Zeiträumen $i = 1, \dots, n$.

In einem abgeschlossenen System von k Lamellen gilt für einen beliebigen Zeitraum i:

$$\sum_{l=1}^k \Delta V_{l,i} = 0 \quad (15)$$

Die Summe der klassentypischen Lamellenvolumenänderungen folgt aus (14) und (15):

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^k \Delta V_{l,K} &= \sum_{l=1}^k \frac{\sum_{i=1}^n (H_{K,i} \cdot \Delta V_{l,i})}{\sum_{i=1}^n H_{K,i}} = \frac{\sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n (H_{K,i} \cdot \Delta V_{l,i})}{\sum_{i=1}^n H_{K,i}} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k (H_{K,i} \cdot \Delta V_{l,i})}{\sum_{i=1}^n H_{K,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{K,i} \cdot \sum_{l=1}^k \Delta V_{l,i}}{\sum_{i=1}^n H_{K,i}} = \frac{1}{1} \cdot 0 = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Die klassentypischen Lamellenvolumenänderungen beziehen sich also ebenfalls auf ein abgeschlossenes System, in dem die Gesamtänderung null beträgt. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Typisierung der charakteristischen Profilveränderungen für bestimmte hydrologische Bedingungen.

Abb. 22 dient dem Vergleich der benachbarten Profile Kkm 145.055 und Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil) bei gleichem Buhnentyp. Hier werden die arithmetischen Mittel (= Summe der relativen Volumenänderungen im Gesamtzeitraum / Anzahl der Meßzeiträume) der typischen Volumenänderungen für die Klasse 1_1_1 [Seegang von links_Wellenhöhen < 0.2 m_Wasserstände < -0.75 m] gegenübergestellt. Die oberste Lamelle des hier verwendeten 13-Lamellensystems erfaßt den Bereich 2.25 m - 5.25 m +N-MW, um das System nach oben abzuschließen. Alle anderen Lamellen besitzen eine Höhe von 0.5 Metern. Die x-Achsenwerte bezeichnen die Untergrenzen der Lamellen. In der Titelüberschrift sind die Anzahl der Meßzeiträume mit $H_{K,i} > 0\%$ (hier: 3) und die Gesamtanzahl (30 Zeiträume bei Kkm 145.055, 169 bei Kkm 145.059 [Meßbrückenprofil]) angegeben. Die Säule am lin-

ken Rand bezeichnet den durchschnittlichen Eintrag (+) / Austrag (-) pro Lamelle in das System (= Gesamtbilanz / 13).

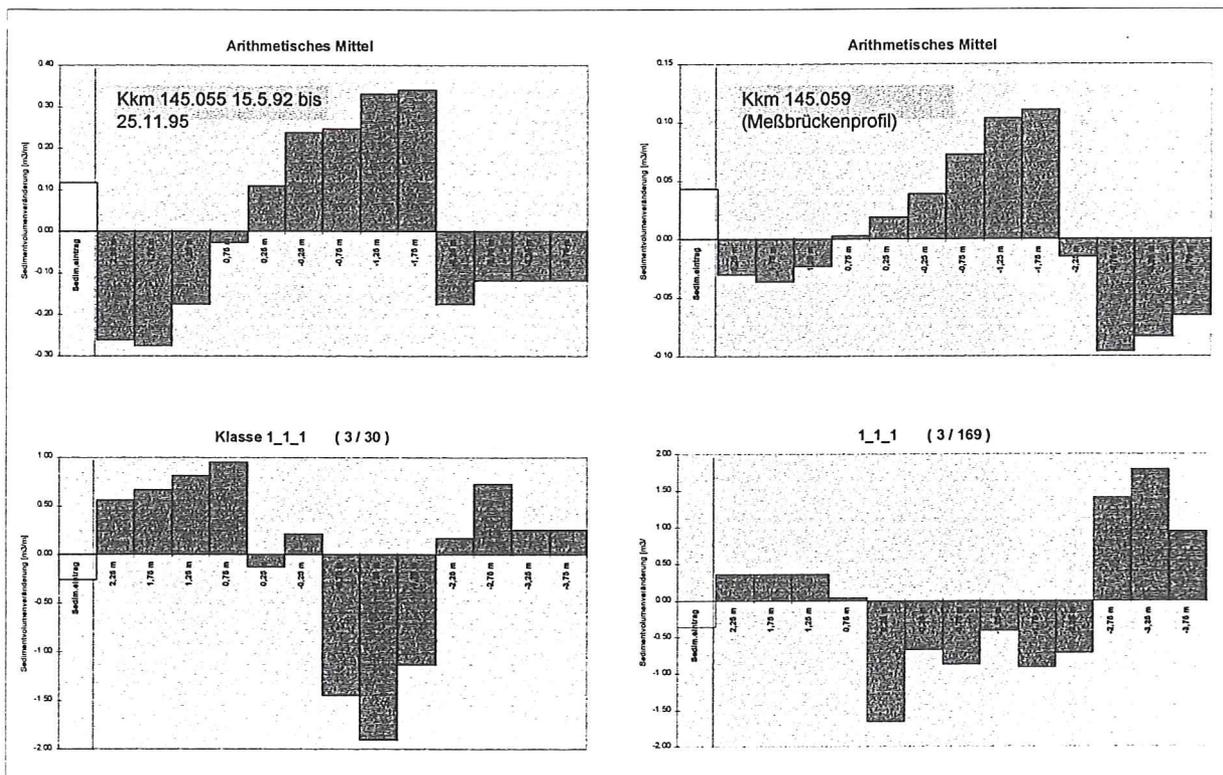


Abb. 22: Mittlere und klassentypische Lamellenvolumenänderung für die Kombinationsklasse „sehr niedrige Wasserstände - schwacher Seegang von links“ in den Profilen Kkm 145.055 (links) und Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil) (rechts) bei halbdurchlässiger Buhne

Die Größen der klassentypischen relativen Sedimentvolumenänderungen ergeben sich aus der gewichteten Mittelwertbildung (vgl. Abb. 22 unten die y-Achsen / Gleichung 14). Man erkennt z. B. in Abb. 22 besonders beim Meßbrückenprofil, daß die Größenordnung der Volumenänderungen für die Extremklasse 1_1_1 weit über der des arithmetischen Mittels liegt. Wie in den Diagrammen (Anhang IIa bis XVIIc) ersichtlich wird, liegen in den weniger häufig vorkommenden Kombinationsklassen oftmals höhere Größenordnungen als in den häufiger vorkommenden Klassen vor. Dies kann aber zumindest nicht eindeutig so interpretiert werden, daß das morphodynamische Geschehen bei den außergewöhnlichen hydrologischen Rahmenbedingungen der seltenen Klassen stets intensiver sei. Die Unterschiedlichkeit der Größenordnungen ergibt sich bereits rechentechnisch, da für die gewichtete Mittelwertbildung bei den weniger häufig vorkommenden Klassen nur wenige Meßzeiträume

berücksichtigt werden. Die jeweiligen morphologischen Veränderungen gewinnen mit abnehmender Zahl der in die Betrachtung einfließenden Meßzeiträume an Gewicht in der Mittelwertbildung. Setzt sich wie im obigen Fall der Klasse 1_1_1 das Mittel aus nur drei Summanden zusammen, so erfolgt in der Mittelwertbildung ein geringerer Ausgleich von positiven und negativen Werten als bei einer Klasse, die z. B. in fast allen Meßzeiträumen stark vertreten ist.

Die Mittelwertbildung bei sehr häufig auftretenden Klassen unterliegt einem gewissen Ausgleich von entgegengesetzt gerichteten morphologischen Veränderungen, welche teilweise auf die jeweilige Ausgangsmorphologie zurückzuführen sein werden. Die Mittelwertbildung über z. B. drei von 169 Zeiträumen hingegen umfaßt nur einzelne Zeitfenster. Das Einzelereignis geht in die Berechnung des Mittelwertes mit abnehmender Zahl von Meßwerten als zunehmend unabhängig von den morphologischen Veränderungen zeitlich aufeinanderfolgender Ereignisse ein. Also mit anderen Worten: je mehr Zeiträume in die Berechnung einfließen, desto stärker findet die Abhängigkeit zur Ausgangsmorphologie Berücksichtigung und kann eliminiert werden.

Eine vergleichende Interpretation der Größenordnungen für durchschnittliche Veränderungen des relativen Sedimentvolumens bei verschiedenen hydrologischen Kombinationsklassen wird aus den genannten Gründen nicht vorgenommen. Die Konsequenz daraus ist, im folgenden von der Größenordnung der erhaltenen Rechenwerte zu abstrahieren, indem für die klassentypischen Veränderungen die Summe der positiven wie die Summe der negativen Einzelveränderungen über alle Lamellen auf einen Einheitswert reduziert werden. Dies liegt im Einklang mit der eingangs erläuterten Zielsetzung, nur die qualitativen Veränderungstendenzen, nicht aber die quantitativen Absolutveränderungen als repräsentativ für die profilgestaltenden Prozesse anzusehen. Im Anhang IIa bis XVIIc wurde die Skalierung der Volumenänderungen nach den Rechenergebnissen der gewichteten Mittelwertbildung beibehalten, um die Nachvollziehbarkeit der Berechnungen zu gewährleisten.

4.2.4 Charakterisierung der Profilveränderungen durch Verlagerungsmomente

Aus den relativen Lamellenvolumenänderungen sollen im folgenden repräsentative Parameter für die Kennzeichnung typischer Profilveränderungen im abgeschlossenen System gefunden werden.

Der Ansatz des abgeschlossenen Lamellensystems wurde weiter oben damit gerechtfertigt, daß für die Charakterisierung der Profilveränderungen die Veränderungen der Einzellamellen nur im Verhältnis zur Veränderung der anderen Lamellen betrachtet werden sollen. Diese Betrachtung erlaubt die bereits erwähnte Vereinfachung: Die Summe aller relativen Änderungen positiven Betrages wird gleich 1, die Summe aller negativen Änderungen gleich -1 gesetzt. Es gilt dann:

$\sum_{i=1}^k |\Delta V_i| = 1 + 1 = 2$. Das innerhalb des Systems mobilisierte Sedimentvolumen wird somit auf ein Einheitsvolumen nivelliert, ohne daß dies die Relation der Einzelveränderungen zueinander berührt.

Mit Hilfe der Abbildungen 23 bis 26 werden nun einige Überlegungen ausgeführt, die zur Bestimmung von Subsystemen, Teil(sub)systemen und der zwischen diesen existierenden Verlagerungsmomente, als den für eine Typisierung von Profilveränderungen geeigneten Parametern, führen werden. Es wird im folgenden ein System mit 12 Lamellen der Höhe 0.5 m verwendet.

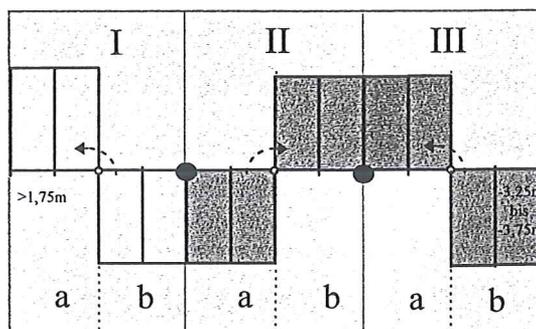


Abb. 23: Teilmomente I und III in Richtung Düne
Beide Hauptmomente gleich null

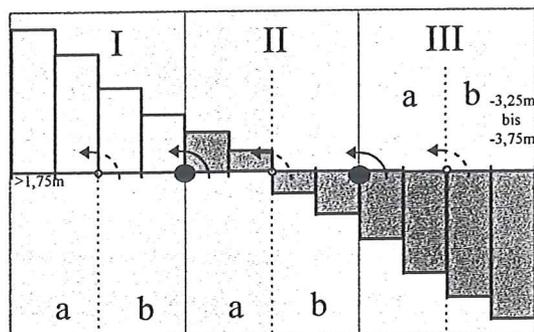


Abb. 24: Alle Teilmomente in Richtung Düne
Beide Hauptmomente in Richtung Düne

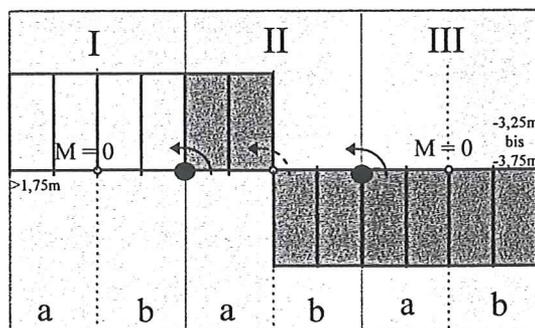


Abb. 25: Beide Hauptmomente in Richtung Düne
Teilmomente der Systeme I und III gleich null
Teilmoment des mittleren Systems in Richtung Düne

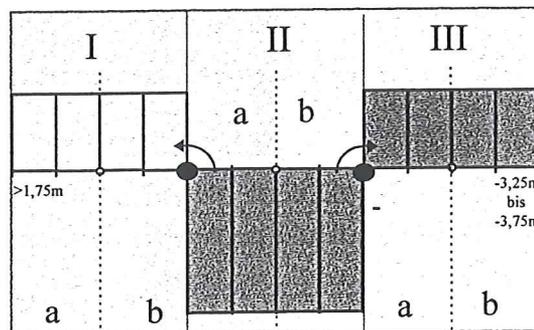


Abb. 26: Hauptmoment I in Richtung Düne
Hauptmoment II in Richtung See
Alle Teilmomente gleich null

1. Besitzt das Veränderungsprofil eine zur Grenze zweier Subsysteme achsensymmetrische Geometrie, so wird die Summe der Veränderungen in beiden Subsystemen jeweils null. Erfolgt nun eine Benachteiligung in der Mitte des Gesamtsystems, von der sowohl die höheren als auch die tieferen Lagen profitieren, kann dies durch zwei Subsysteme nicht erfaßt werden (Abb. 26). Um das Geschehen im mittleren Bereich (hier: Flachwasser, System II) charakterisieren zu können, werden drei Subsysteme ausgegrenzt (in den Abb. 23 - 25 werden sie mit I, II, III bezeichnet). Die Systeme sollen gleiche Höhenbereiche eingrenzen. Der Profilausschnitt von 1.75 m bis 5.25 m wird in der Lamelle „>1.75 m“ zusammengefaßt. In dieser Lamelle werden also auch alle durch Dünenaufschüttungen verursachten Einträge im Bereich oberhalb von 1.75 m erfaßt. Der Einfluß dieser Einträge auf den Verlagerungsprozeß im Gesamtprofil betrifft nur einzelne Meßzeiträume und besitzt bei der statistischen Analyse einer Vielzahl von Meßwerten nur geringe Bedeutung. Bei vergleichenden Rechnungen, in denen jeweils einmal die starken Zuwächse im Meßzeitraum einer Dünenaufschüttung ignoriert, ein anderes Mal miteinbezogen wurden, ergaben sich nur geringfügige Unterschiede für die Charakterisierung der klassentypischen Profilveränderungen. Da der hy-

drologische Einfluß auf die Morphologie oberhalb 2.25 m +N-MW als sehr gering angesehen werden kann, wird die oberste Lamelle für die weitere Betrachtung als den 0.5 m-Lamellen gleichwertig angesehen.

2. Die Begünstigung oder Benachteiligung der einzelnen Lamellen wird bei bloßem Aufsummieren unabhängig von ihrer Lage gleich gewertet. In Abb. 24 werden die höchstliegenden Lamellen am stärksten begünstigt, die tiefstliegenden am stärksten benachteiligt. Die Summen der Veränderungen in der oberen und der unteren Hälfte sind aber gleich groß. Die Begünstigung oberer Bereiche sollte hier stärker bewertet werden als für die in Abb. 25 dargestellte Situation. Der Abstand einer einzelnen Lamelle zur Subsystemgrenze muß darum neben ihrer Begünstigung oder Benachteiligung als ein weiteres Kriterium für die Beurteilung der Profilveränderung zwischen diesen Subsystemen angesehen werden. Dies kann dadurch geschehen, daß die Volumenänderung mit dem Abstand Lamelle-Systemgrenze multipliziert wird. Es werden quasi Drehmomente um die Subsystemgrenze gebildet. Als positiv werden die Drehmomente in Richtung Düne gesetzt. Sie charakterisieren sowohl innerhalb als auch zwischen den Subsystemen eine aufwärts gerichtete Verlagerung des „morphologischen Gewichts“ (Formveränderung des Querprofils). Gleichermaßen wird für die Teilsysteme verfahren, so daß z.B. die Veränderungstendenz innerhalb des Teilsystems I durch ein Drehmoment um die Teilsystemgrenze I a / I b charakterisiert werden kann.

3. Wird Sediment innerhalb des Gesamtsystems nur über kurze Strecken verlagert, so könnte eine eventuell einheitliche Transportrichtung bei bloßer Betrachtung des Geschehens zwischen den Subsystemen nicht erfaßt werden. In Abb. 23 z. B. sind sowohl die Veränderungssummen in den einzelnen Subsystemen als auch die Momente um die Subsystemgrenzen gleich null, obwohl auch hier klar eine Begünstigung bzw. Benachteiligung bestimmter Höhenzonen zu erkennen sind. Eine Charakterisierung der Veränderungen innerhalb der Subsysteme ist nun dadurch zu ermöglichen, daß innerhalb ihrer nochmals eine Unterteilung stattfindet. In den Abbildungen sind diese Teil-Subsysteme (im folgenden: Teilsysteme) mit „a“ und „b“ gekennzeichnet. Die um die Grenzen zwischen a und b zu bildenden Momente werden im folgenden als „Teilmomente“ bezeichnet. In Abb. 23 beschreiben die positiven Teilmomente innerhalb von I und III eine Aufsteilung und

das negative Teilmoment in II eine Abflachung des Profils innerhalb des jeweiligen Subsystems.

Die Momente innerhalb der Subsysteme I („Strand“; 2.25 m bis 0.25 m +N-MW), II („Flachwasser“; 0.25 m bis -1.75 m) und III („Tiefwasser“; -1.75 m bis -3.75 m) werden aus den Veränderungen in den jeweiligen Teilsystemen a und b um deren gemeinsame Systemgrenze gebildet und im folgenden als Teilmomente T_I , T_{II} und T_{III} bezeichnet. Das Moment zwischen den Subsystemen I und II wird aus den Veränderungen im Strand und Flachwasserbereich um die Grenze der Systeme Strand und Flachwasser (+0.25 m ü. Normal-MW) bestimmt und als H_I oder oberes Hauptmoment bezeichnet. Das untere Hauptmoment H_{II} wird entsprechend aus den Veränderungen in Flach- und Tiefwasserbereich um die Systemgrenze II-III gebildet.

Es wird nun am Beispiel einer einzelnen Veränderung des Profils Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil) demonstriert, daß mit Hilfe der Teil- und Hauptmomente eine hinreichende Charakterisierung auch komplizierter Verlagerungssituationen gelingt. Die Charakterisierung durch fünf Parameter stellt dabei eine erhebliche Komplexitätsreduktion gegenüber der Einzelbetrachtung von zwölf Systemelementen dar. Gegeben seien folgende Aussagen:

1. Hauptmoment I ist vergleichsweise klein.
2. Hauptmoment II ist positiv (zur Düne gerichtet)
3. Teilmoment I ist negativ
4. Teilmoment II ist positiv
5. Teilmoment III ist positiv

Auch ohne das konkrete Beispieldiagramm (Abb. 27) zu betrachten, lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen: Aus 3. und 4. folgt, daß um die obere Subsystemgrenze herum eine Begünstigung erfolgt. Aus 2. und 4. folgt, daß der Hauptanteil der zuvor genannten Begünstigung aus den unteren Lamellen stammen muß. Aus 3., 4. und 5. folgt, daß nur innerhalb des oberen Bereiches ein Verlagerungsverhalten des morphologischen Gewichts gegen den (aus Hauptmomenten zu ersehenden) Gesamttrend zu verzeichnen ist.

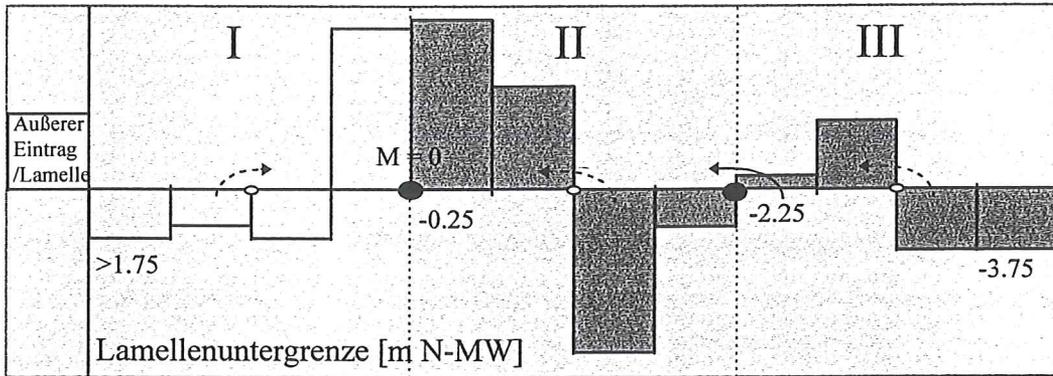


Abb. 27: Momente der Sedimentvolumenänderungen zwischen und innerhalb der Subsysteme (real gemessenes Beispiel einer Veränderung des Profiles Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil))

In Abb. 28 sind die oberen Hauptmomente für alle 45 Klassen des Kkm 145.059 (Meßbrücken)-Profils bei halbdurchlässiger Buhne (19.06.1991 - 29.11.1995) beispielhaft dargestellt. Das linke Bild zeigt die 5 Wasserstands- (WST I-V) und 3 Wellenhöhenklassen (H_{m0} I-III) für Seegang von links, entsprechend die beiden anderen Bilder den ufernormal und von rechts einfallenden Seegang bei einer Öffnung der ufernormalen Wellenanlaufrihtung von 45° .

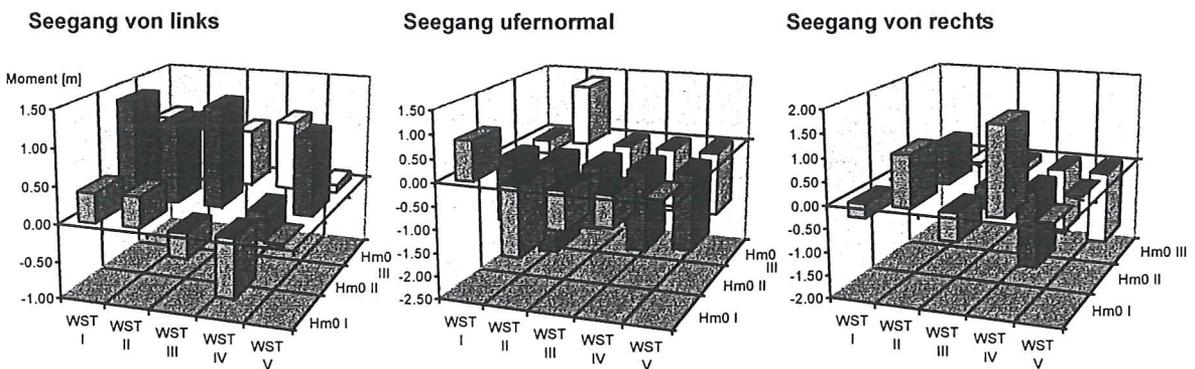


Abb. 28: Obere Hauptmomente H_I für 45 Kombinationsklassen; Kkm 145.059 (Meßbrücken)-Profil bei halbdurchlässiger Buhne; z-Achse: Größe des Momentes [m]; WST: Wasserstandsklassen; H_{m0} : Wellenhöhenklassen

Deutlich erkennbar ist der Unterschied für die mittleren und starken Seegänge aus den verschiedenen Richtungen. Bei Seegängen von links herrschen über fast alle Wasserstandsklassen positive Momente vor, das heißt es ergibt sich eine Aufsteilung vom Flachwasser- zum Strandbereich. Bei ufernormal oder von rechts einfallenden Seegängen zeigt sich ein gerade entgegengesetzter Zusammenhang: außer

für wenige Ausnahmen negative Momente, d. h. Abflachung vom Strand zum Flachwasserbereich.

4.2.5 Typisierung von Profilveränderungen nach Hauptverlagerungsmomenten

Sollen für die typischen Profilveränderungen nun Ähnlichkeiten und Unähnlichkeiten unter verschiedenen Rahmenbedingungen festgestellt werden, so muß für einen Vergleich von 45 hydrologischen Kombinationsklassen bei 4 Buhnentypen eine einfache Typisierung der Veränderungen erfolgen.

Das in Abb. 27 dargestellte Beispiel hätte grob auch ohne die Teilmomente, allein mit Hilfe der beiden Hauptmomente beschrieben werden können. Der Gedankengang, durch den aus der Kenntnis von Richtung und Beträgen der Hauptmomente eine ungefähre Anschauung von der Art der Profilveränderung gewonnen werden kann, läßt sich wie folgt verdeutlichen:

- Das untere Hauptmoment ist eindeutig in Richtung Düne gerichtet.
- Das obere Hauptmoment ist schwach positiv oder schwach negativ.
- Somit ist der Betrag des unteren Hauptmomentes in jedem Falle größer als der Betrag des oberen Hauptmomentes.
- Die positive Richtung des unteren Drehmomentes signalisiert eine Aufsteilung von unteren zu mittleren oder hohen Lagen.
- Die entsprechend begünstigten Lagen können weder nur im System II noch nur im System I liegen, da im ersten Fall ein deutlich positives, im zweiten Fall ein deutlich negatives oberes Hauptmoment beobachtet werden müßte.
- Möglich wäre, daß sich die begünstigten Bereiche in mehrere Gruppen aufteilen, deren Momente um die Systemgrenze I-II sich gegenseitig aufheben. Für den einfachsten anzunehmenden Fall aber gruppieren sich die begünstigten Lamellen im Bereich der Systemgrenze I-II.

Letzteres trifft für die Beispielsituation (vgl. Abb. 27) zu. Ausschlaggebend für die obige Einschätzung waren Richtung und Betrag der beiden Hauptmomente. Positive Hauptmomente signalisieren jeweils eine Aufsteilung vom niederen zum höheren,

negative eine Abflachung vom höheren zum niederen Bereich der zwei jeweiligen Systeme. Findet nun wie in Abb. 26 dargestellt eine im Betrag gleichgroße Aufsteilung vom System II zum System I und Abflachung vom System II zum System III statt, könnte die Benachteiligung des Systems II mittels der Differenz $H_{II} - H_I$ beschrieben werden. Im Fall der Abbildung ergibt sich für $H_{II} - H_I = 2 \cdot H_{II} = -2 \cdot H_I$, womit die doppelte Benachteiligung des Systems II zu gleichen Gunsten der Systeme I und III anschaulich erfaßt wird.

Im folgenden werden drei einfache Kriterien für die Ausgrenzung von Profilveränderungstypen festgelegt.

1. H_I positiv oder negativ \Rightarrow Aufsteilung oder Abflachung zwischen System I und II/III
2. H_{II} positiv oder negativ \Rightarrow Aufsteilung oder Abflachung zwischen System III und I/II
3. $|H_I| < |H_{II}|$ oder $|H_I| > |H_{II}| \Rightarrow$ Festlegung der überwiegenden Veränderung und der Reichweite einer Aufsteilung oder Abflachung.

Aus den drei zweiwertigen Kriterien ergeben sich theoretisch acht mögliche Veränderungstypen. Da für gleich gerichtete Momente H_I und H_{II} jeweils unabhängig vom Kriterium Nr. 3 gleiche Typen festgelegt werden (beide pos.: Aufsteilung von III nach I; beide neg.: Abflachung von I nach III), werden insgesamt sechs Typen erhalten (vgl Abb 28).

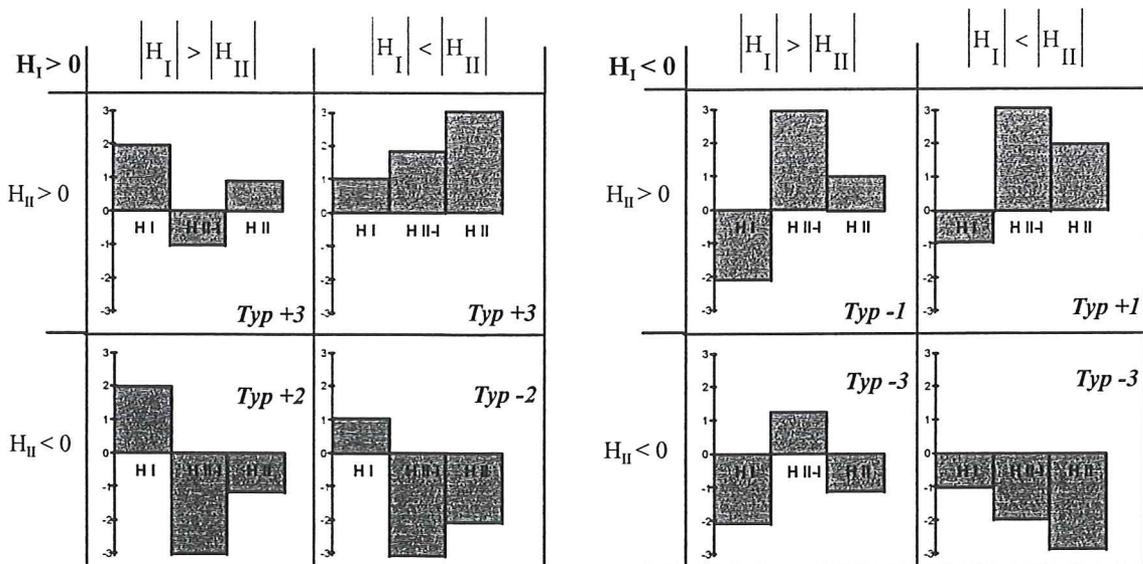


Abb. 29: Ableitung der sechs Profilveränderungstypen aus den Hauptmomenten

Die einzelnen Typen überwiegender Profilveränderungen lauten:

- +3: Aufsteilung vom Tiefwasserbereich (III) bis zum Strand (I)
- +2: Aufsteilung vom Flachwasserbereich(II) zum Strand (I)
- +1: Aufsteilung vom Tiefwasserbereich (III) zum Flachwasserbereich (II)

(0: keine Meßwerte für die hydrolog. Klasse vorhanden)

- 1: Abflachung vom Strand (I) zum Flachwasserbereich(II)
- 2: Abflachung vom Flachwasserbereich(II) zum Tiefwasser (III)
- 3: Abflachung vom Strand (I) bis zum Tiefwasserbereich (III)

Stark generalisiert bedeuten die Profiltypen +1 und -1 eine Formänderung des Profils laut Abb. 30; +2 und -2 eine Formänderung laut Abb. 31; +3 eine Formänderung laut Abb. 32 und -3 eine Formänderung laut Abb. 33. Hierbei werden 2 Drehmomenten in das Profil gedacht, wobei sich das seewärtige Drehmoment etwa in Höhe des seewärtigen Bühnenendes befindet.

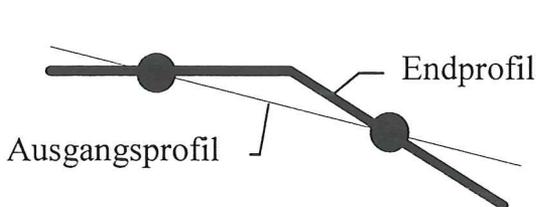


Abb. 30: Profilveränderungstypen +1 und -1
(Abflachung System I/II; Aufsteilung System II/III)

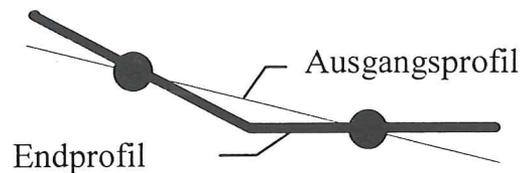


Abb. 31: Profilveränderungstypen +2 und -2
(Aufsteilung System I/II; Abflachung System II/III)

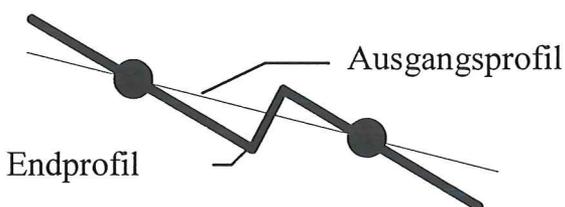


Abb. 32: Profilveränderungstyp +3
(Aufsteilung System I/II; Aufsteilung System II/III)

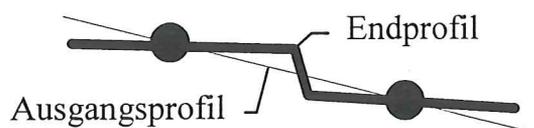


Abb. 33: Profilveränderungstyp -3
(Abflachung System I/II; Abflachung System II/III)

Für das Beispiel aus Abb. 28 ergäbe sich folgende Darstellung für die verschiedenen Profilveränderungstypen:

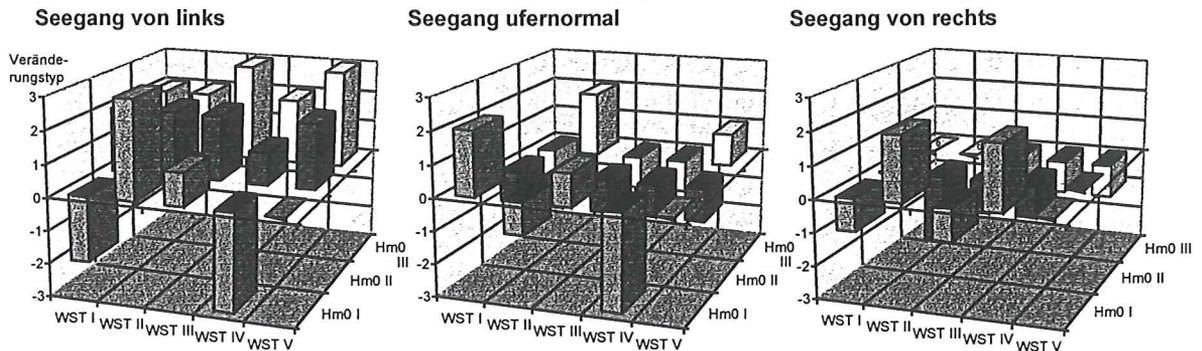


Abb. 34: Profilveränderungstypen für Kkm 145.059 (Meßbrückenprofil) bei halbdurchlässiger Buhne

Die Momentendarstellung (vgl. Abb. 28) und die Darstellung des Veränderungstypus (vgl. Abb. 30) besitzen einen übereinstimmenden Informationsgehalt. Bei ufernormalem Seegang tritt der Typ -1 besonders häufig auf. Die Abflachungen im System I kommen also vorrangig dem System II zugute. Für Seegang von links läßt sich feststellen, daß die Aufsteilungen nach I vorrangig von II aus erfolgen.

5. Effekte verschiedener Buhnentypen bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen auf die Morphologie

5.1 Allgemeines

Buhnen haben je nach den vorherrschenden hydrologischen Bedingungen unterschiedliche Effekte auf die Strand- und Schorremorphologie. Bauwerkparameter und hydrologische Parameter sind in ihrer Wirkung auf die Morphologie eng miteinander verknüpft. Die Zusammenhänge diesbezüglich sind noch weitgehend unbekannt. Bisher fanden Buhnensysteme im wesentlichen an Küstenabschnitten Anwendung, an denen Küstenlängstransport (Wellenanlauf in einem schrägen Winkel zur Uferlinie) dominiert.

Nach zuvor beschriebenem Modus wurden Küstenquerprofile in der Nähe folgender Bauwerkstypen des Buhnensystems Warnemünde/West untersucht:

Buhnlose Küste

Durchlässige Buhne

Halbdurchlässige Buhne

Undurchlässige Buhne

(vgl. Abb. 4)

Ziel der Untersuchungen war die Bewertung morphologischer Veränderungen aufgrund der jeweiligen Verbauung als Funktion des Seeganges und des Wasserstandes.

Es galt herauszufinden, welche hydrologischen Parameter vor dem Buhnenbau besonders stark Abtragsbedingungen für den uferliniennahen Bereich hervorriefen und wie sich der Einfluß dieser Parameter nach dem Buhnenbau geändert hat. Weiterhin war zu klären, welche hydrologischen Randbedingungen positive bzw. negative Effekte nach dem Buhnenbau für Schorre und Strand bringen. Außerdem klärungsbedürftig war die Frage, ob die Buhnen bei positiver Wirkung Material aus dem Küstenlängstransport akkumulieren oder eher den Austrag von im Quertransport akkumuliertem Material vermindern.

Dazu mußte zunächst Klarheit über die Zielfunktion derartiger Wasserbauwerke geschaffen werden, d. h. festzustellen, welche Effekte positiv (vom Menschen gewünscht) oder negativ (vom Menschen nicht gewünscht) sind.

Im Interesse des Hochwasserschutzes und der Minimierung der Ausräumung der Düne bei Sturmfluten sind ein breiter und hoher Strand- und Vorstrandbereich von Vorteil (vgl. Kap. 5.9.1 3. Zwischenbericht). Das entspricht Profilbegünstigungen mit einhergehendem Sedimentzuwachs bis in etwa 1.75 m Wassertiefe (Begünstigungen des Strand- (I) und Flachwasserbereiches (II) laut Kap. 4.2.4).

Die morphologischen Veränderungen bei unterschiedlichen bauwerkseitigen und hydrologischen Randbedingungen sind nach der Lamellenmethode entsprechend Kap. 4.2.3 in den Anhängen IIa bis XVIIc dargestellt. Den Abbildungen ist der Einfluß hydrologischer Klassen unter vorgegebenen bauwerkseitigen Randbedingungen auf die Profilgestalt zu entnehmen. Die Graphiken des Meßbrückenprofiles (Kkm 145.059) liefern die größte Aussagesicherheit, da dort die Daten mit der höchsten Genauigkeit und zeitlichen Meßdichte vorliegen. Alle Graphiken zeigen in der Regel ein harmonisches Bild, was die ermittelten Abhängigkeiten plausibel erscheinen läßt.

Für eine Systematisierung dieser Abhängigkeiten war eine Komplexitätsreduktion erforderlich, wobei die Informationsverluste gering gehalten werden sollten. Dies wurde mit der im Kap. 4.2.5 vorgenommenen Typisierung der Verlagerungsmomente erreicht. Im Anhang XVIIIa bis XXXIIIc sind die verschiedenen Profilveränderungstypen bzw. Haupt- und Teilmomente der morphologischen Änderungen in Abhängigkeit der bauwerkseitigen und hydrologischen Randbedingungen dargestellt.

Die positiven (gewünschten) Effekte, die mit dem Bau von Buhnen erzielt werden sollen, bestehen zum einen in der Formänderung des Querprofils. Dies soll derart erfolgen, daß der Seegang im Sturmflutfall eine höchstmögliche Energiereduktion bis zum Erreichen der Düne erfährt (vgl. Kap. 5.9.1 3. Zwischenbericht). Zum anderen soll Material aus dem Längstransport gebunden, bzw. der Abtransport im Längstransport verhindert bzw. verzögert werden.

Das mit den halbdurchlässigen Buhnen des zentralen Meßfeldes Warnemünde im Beobachtungszeitraum erzielte durchschnittliche Querprofil bietet der Düne einen ca. doppelt so hohen Schutz (50% weniger Austrag) im schweren Sturmflutfall gegenüber dem Ausgangsprofil von vor dem Buhnenbau (vgl. Kap. 5.9.1 3. Zwischenbericht). Dies ist auf die Energiereduktion des Seeganges durch sowohl die neue Profilform, als auch die neue Strand- und Flachwasserbreite zurückzuführen. Im Anhang XXXIV bis XL sind die durchschnittlichen Momente der untersuchten Profile sowie die durchschnittlichen Einträge in das betrachtete System untergliedert nach Verbauungsarten dargestellt.

5.2 Profilveränderungstypen und Bauwerksparameter

Der **Profilveränderungstyp 1 bzw. -1** mit positivem Hauptmoment II und negativem Hauptmoment I bei gleichzeitigem Sedimenteintrag in das System tritt vorwiegend im Zusammenhang mit **halbdurchlässigen Buhnen** auf und ist positiv zu bewerten. Es dominiert der relative Zuwachs im Subsystem II aus Subsystem III und Subsystem I (vgl. Abb. 30 und Anhang XXXV bis XXXVII). Einzige Ausnahme bilden die beiden Profile im Abstand von 5 m zur Buhne 8. Beide sind vom Profilveränderungstyp 3 und verzeichnen einen Sedimentaustrag in betragsmäßig nahezu gleicher Höhe. Die Annahme, daß diese Abweichung von den anderen Profilentwicklungen mit der sehr starken Beschädigung der Buhne 8 infolge des Bohrmuschelbefalls zusammenhängt, ist wahrscheinlich.

Ebenfalls positiv zu bewerten ist, bei gleichzeitigem Sedimenteintrag in das System, der **Profilveränderungstyp 3**, weil die Flachwasser- und Strandbereiche in jedem Fall von den tieferen Lamellen profitieren. Bei vorliegendem Datenmaterial ist dieser Typus in Buhnenfeldmitte der **durchlässigen Buhnen**, in **5 m Abstand von den undurchlässigen Buhnen** und an der buhnenlosen Küste westlich des Buhnensystems zu finden, wobei an der buhnenlosen Küste die Sedimenteinträge deutlich geringer sind als in den anderen Untersuchungsbereichen. Dieser Typus steht für eine Aufsteilung von den tieferen Schichten zum Strand (beide Hauptmomente sind positiv; vgl. Abb. 32 und Anhang XXXIV, XXXIX bis XL).

Die Änderungen der Profilgestalt der **buhnenlosen Küste** zeitlich vor dem Bühnenbau und **Bühnenfeldmitte der undurchlässigen Bühnen** weisen Ähnlichkeiten auf und sind in Typ 2 einzuordnen, wobei die Gesamtbilanz bei der buhnenlosen Küste hier negativ und bei der undurchlässigen Bühne positiv ist. Hier war wesentliches Merkmal eine Aufsteilung vom Flachwasserbereich zum Strand (positives Hauptmoment 1 und negatives Hauptmoment 2; vgl. Abb. 31 und Anhang XXXIV und XXXVIII). An der buhnenlosen Küste ist demzufolge im Flachwasser Material ausgeräumt worden und in Bühnenfeldmitte der undurchlässigen Bühnen Material am Strand angelagert worden. Im Abstand von 5 m von den Bühnen tritt beim undurchlässigen Bauwerkstyp ausschließlich der Typ 3 auf.

Am negativsten ist demnach eine Umformung des Profils nach Typ +2 und -2 mit gleichzeitigem Sedimentaustrag zu bewerten. Das entspricht einer Verlagerung von Sediment aus dem Flachwasser in tiefere Bereiche sowie einer Aufsteilung vom Flachwasserbereich zum Strand. Beim Typ -3 wird über das gesamte Profil seewärts verlagert, was bei Kopplung mit Sedimentaustrag ebenfalls als negativ zu bewerten ist.

Es sind also zwei Kriterien in die Betrachtungen einzubeziehen:

- Profilform
- Sedimentbilanz

Im Anhang XLI bis XLVII sind die Profilveränderungstypen entsprechend Kap. 4.2.5 in Abhängigkeit der hydrologischen Kombinationsklassen sowie eine Zuordnung der Sedimentbilanzgrößenordnungen des Systems nach außen geordnet nach Bauwerkstyp tabellarisch zusammengestellt.

5.3 Bühnenlose Küste

Kkm 144.340:

Folgende Informationen liefern die Auswertungen der Daten des Profils Kkm 144.340 „buhnenlose Küste“ (140 m westlich des Bühnensystems) (vgl. Anhang

XXXIV und XLI): In den Jahren 1992 bis 1997 ist ein leichtes „Plus“ in der Sedimentbilanz des ufernahen Bereiches zu verzeichnen. Die gemessenen Erosionen resultieren nicht, wie aufgrund der zu erwartenden Leewirkung des Buhnensystems anzunehmen wäre, aus dem Küstenlängstransport aus östlicher Richtung, sondern gehen im wesentlichen auf den ufernormalen Seegang zurück. Die größten Sedimentausträge sind bei starken Seegängen aus ufernormaler Richtung sowie bei sehr niedrigen Wasserständen in Verbindung mit geringen bis mittleren Wellenhöhen aus allen Anlaufrichtungen zu verzeichnen. Seegang von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen wirkt sich am positivsten sowohl auf die Änderung der Profilform als auch auf die Sedimentbilanz aus. Der Seegang von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen wirkt sich mit steigendem Wasserstand und größer werdenden Wellenhöhen zunehmend positiv auf das Profil aus. Bei geringeren Wasserständen wird die Profilform dort überwiegend negativ beeinflusst.

Es ist denkbar, daß der Bereich 140 m westlich des Buhnensystems bei Wellenanlauf von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen unter dem positiven Einfluß des Buhnensystems steht, da dieses Profil ein deutlich anderes Verhalten als das Meßbrückenprofil vor Buhnenbau zeigt. Eventuell kann sich noch keine gebündelte Küstenlängsströmung, die zu Sedimentaustrag führen könnte, wieder aufbauen. Ein Einfluß des Buhnensystems ließe sich ebenfalls aus dem durchschnittlichen Profilveränderungstyp 3 im Beobachtungszeitraum verbunden mit geringfügigem Sedimenteintrag vermuten. Ähnliche Verhältnisse mit höherem Sedimenteintrag sind am westlichen Rand des Buhnensystems zwischen durchlässigen Buhnen zu beobachten.

Meßbrückenprofil(Kkm 145.059):

Abb. 35 zeigt die Typenzusammenstellung einschließlich Sedimentbilanz des abgeschlossenen Systems bei einem eingeschlossenen Winkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung von 45° für die verschiedenen Verbauungsarten des Meßbrückenprofiles (Kkm 145.059). Von diesem Profil liegen die Meßdaten mit der größten Meßdichte und -genauigkeit vor. Zukünftige Untersuchungen dieser Art sollten darauf abzielen, möglichst häufig Profilaufnahmen von einem Profilstandort durchzuführen. Auf diese Weise kann die statistische Sicherheit der Daten bedeutend erhöht werden. Aus diesem Grund werden die Kernaussagen des vorliegenden Berichts der Interpretation der Meßbrückenprofildaten entlehnt. Die

vollständige Typenzusammenstellung für alle Profile erfolgt im Anhang XLI bis XLVII.

Abb. 36 stellt denselben Sachverhalt wie die Abb. 35 dar, nur ist der eingeschlossene Winkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung 22.5° groß. Diese zusätzliche Untersuchung wurde vorgenommen, da die Wellen am Meßpunkt bereits stark refraktionsbeeinflusst sind und somit die Häufigkeitsverteilung nicht mehr so stark auf der ufernormalen Wellenanlaufrichtungs-klasse lastet.

Die Abbildungen 37, 39 und 41 illustrieren die morphologische Veränderungstendenz als Massenüberschußlinien in Abhängigkeit vom Buhnentyp, Wellenanlaufrichtung (45° Einschlußwinkel für die ufernormale Anlaufrichtung) und Wellenhöhe berechnet aus gemessenen Daten. In dieser Art der detaillierten Darstellung wurden nur Wasserstände von -0.25 m bis $+0.25$ m über Normal-Mittelwasser berücksichtigt. Dies begründet sich wie folgt: Durchschnittlich 80% der Zeit befindet sich der Wasserstand im o. g. Bereich (vgl. Abb. 4.3 Endbericht Bearbeitungsteil Hydrologie). D. h. den größten Zeitanteil steht das Profil unter dem Einfluß normaler Wasserstände. Zwangsläufig wurde für diese Wasserstandsklasse der größte Datenfundus im Untersuchungszeitraum geschaffen, so daß die diesbezüglich getroffenen Aussagen der größten statistischen Sicherheit im Vergleich zu den anderen hydrologischen Klassen unterliegen.

Die Abbildungen 38, 40 und 42 zeigen denselben Sachverhalt wie die Abbildungen 37, 39 und 41 nur unter einem eingeschlossenen Winkel für die ufernormale Wellenanlaufrichtung von 22.5° . Die Abbildungen 35 bis 42 bilden das Kernstück des vorliegenden Berichtes.

Es wird deutlich, daß die Reaktion der Morphologie generell einer sehr starken Abhängigkeit von der Wellenanlaufrichtung unterliegt (vgl. Abb. 35 und 36).

Bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° und auch von -90° bis -11.25° zur Ufernormalen (vgl. Abb. 11) entwickelt sich das Profil mit höher werdendem Wasserstand und höheren Wellen zunehmend in Richtung Profilveränderungstyp 2 verbunden mit Sedimentaustrag aus dem System. Niedrige Wasserstände verbunden mit geringen Wellenhöhen fördern im wesentlichen den Sedimenteintrag in das

System. Sie beeinflussen die Profilform nur gering und hauptsächlich bei Wellenanlaufrichtungen von -90° bis -11.25° .

Ufernormaler Wellenanlauf und Anlauf von 22.5° (11.25°) bis 90° zur Ufernormalen rufen mit zunehmenden Wasserständen und zunehmender Seegangsaktivität eine Profilformveränderung nach Typ 1 bzw. Typ 3 aber mit überwiegendem Sedimentaustrag hervor. Niedrige Wasserstände und geringe Seegänge sind auch hier mit einem überwiegenden Sedimenteintrag verbunden.

Beim Wellenanlauf von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen sind die nachteiligen Profilformänderungen nach Typ -2 vorwiegend an niedrige bis normale Wasserstände mit kleinen Wellenhöhen gekoppelt. Diese fallen bei einer Erweiterung der Wellenanlaufrichtungsklasse auf 11.25° bis 90° fast komplett weg. Hier ist der Formveränderungstyp -2 nur in der Klasse Wasserstand -0.25 m bis -0.75 m über N-MW und Wellenhöhen 0.20 m bis 0.60 m vertreten. Normale Wasserstände bei Wellenanlauf von 11.25° bis 90° bringen im unverbauten Zustand ausschließlich positive Effekte (positive Sedimentbilanz, positive Formänderung) für die Schorremorphologie.

Beim ufernormalen Wellenanlauf (-22.5° bis 22.5° und -11.25° bis 11.25°) sind Typ 2 und -2 sehr wenig und kaum gebündelt vertreten.

Die für die buhlenlose Küste (Kkm 145.059) typische Veränderung ist sehr deutlich im wesentlichen auf mittlere bis hohe Wellen in Verbindung mit normalen bis sehr hohen Wasserständen zurückzuführen, wobei die nachteilige Formänderung vorrangig auf Wellenanlaufrichtungen von -90° bis -22.5° (-11.25°) zur Ufernormalen zurückgeht (vgl. Abb. 35 und 36 oben). Sedimentausträge sind in allen Anlaufrichtungsklassen vertreten, wobei diese dort an mittlere bis hohe Wasserstände mit Seegangsaktivität gebunden sind.

Das Verhältnis von Sedimenteintrag und -austrag in das oder aus dem abgeschlossenen System würde die Theorie von KRAUS (1991) stützen, wonach lange flache Wellen (Dünung) zum Aufbau des Strandes beitragen, weil sie größere Orbitalgeschwindigkeiten in landwärtige Richtung erzeugen. Hohe Wellen würden demnach mehr den Sedimentaustrag fördern.

Kkm 145.059 „buhnenlose Küste“ (Ø Typ 2; -41.7 m³/m Sedimentbilanz)

Seegang von -90° bis -22.5° z.Ufernorm.(UN)

Seegang ufernormal (0°±22.5° z.UN)

Seegang von 22.5° bis 90° z.UN

	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III
W I	↗↗	↗↗↗	↘	↗↗	↗↗	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten
W II	↗	↗	↗	↘↘	↗	↘↘	↗	↗	keine Daten
W III	↗		↘↘		↘	↘↘	↘	↘	↘↘
W IV		↘	↘↘	↘↘	↘	↗	keine Daten	↘	↘
W V	keine Daten			↘	↗	↘	keine Daten	↘	↘

Kkm 145.059 „halbdurchlässige Buhne“ (Ø Typ 1; +94.9 m³/m Sedimentbilanz)

Seegang von -90° bis -22.5° z.Ufernorm.(UN)

Seegang ufernormal (0°±22.5° z.UN)

Seegang von 22.5° bis 90° z.UN

	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III
W I	↘↘	↘↘	↘↘	↘	↗↗	↗↗	↗↗	keine Daten	keine Daten
W II	↘	↘	↘	↗	↗	↘	↘		keine Daten
W III		↘	↘	↗	↗	↗↗	↗	↗	
W IV		↘	↘↘	↗		↗		↗	↗
W V	keine Daten			keine Daten		↗	keine Daten	keine Daten	↗

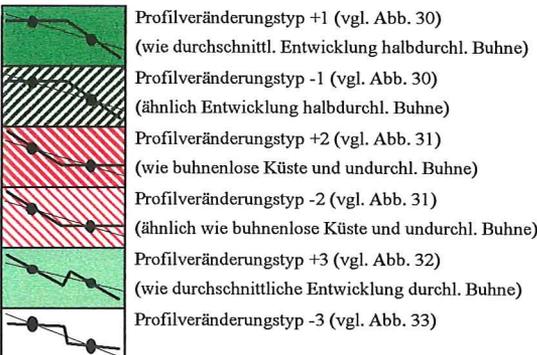
Kkm 145.059 „undurchlässige Buhne“ (Ø Typ 2; +21.5 m³/m Sedimentbilanz)

Seegang von -90° bis -22.5° z.Ufernorm.(UN)

Seegang ufernormal (0°±22.5° z.UN)

Seegang von 22.5° bis 90° z.UN

	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III
W I	↘↘	↘	↘	↘↘	↘	↗↗	keine Daten	keine Daten	keine Daten
W II	↗	↗	↘↘	↗↗	↗	↗	↗	↗↗	keine Daten
W III	↗	↗	↘	↗	↗	↘	↘	↗	↗
W IV			↘	↘	↗	↘↘	keine Daten	↘	
W V	keine Daten	keine Daten	keine Daten	↘	↘		↘	↘	↘



↗	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System >0.01 m³/m; <0.5 m³/m (Typ -3)
↗↗ [↗↗]	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System >0.5 m³/m [>0.2 m³/m; <0.5 m³/m] (Typ -3)
↘	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System <0.01 m³/m; > 0.5 m³/m (Typ -3)
↘↘ [↘↘]	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System <0.5 m³/m [<0.2 m³/m; >0.5 m³/m] (Typ -3)
keine Daten	Kombinationsklasse nicht mit Daten besetzt

Abb. 35: Effekte hydrologischer Kombinationsklassen auf die Strand- und Schorremorphologie unter verschiedenen Verbauungsarten am Beispiel des Meßbrückenprofils Warnemünde

Kkm 145.059 „buhnenlose Küste“ (Ø Typ 2; -41.7 m³/m Sedimentbilanz)

Seegang von -90° bis -11.25°z.Ufernorm.(UN) Seegang ufernormal(0°±11.25°z.UN) Seegang von 11.25°bis 90°z.UN

	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III
W I	↗	↗↗	↘	↗↗	↗↗	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten
W II	↗	↗	↘	↘	↗↗	↘↘	↘	↗	↗↗
W III	↘	↘	↘↘	↘	↘	↘↘	↘	↗	↘
W IV	↘	↗	↘↘	↘	↘	↘↘	↘↘	↘	↘
W V	keine Daten	↘	↘	keine Daten	↘	↘	↘	↘	↘

Kkm 145.059 „halbdurchlässige Buhne“ (Ø Typ 1; +94.9 m³/m Sedimentbilanz)

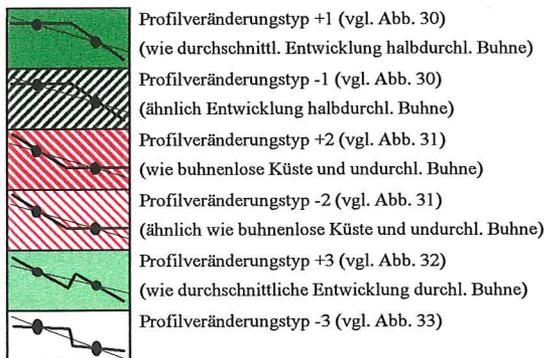
Seegang von -90° bis -11.25°z.Ufernorm.(UN) Seegang ufernormal(0°±11.25°z.UN) Seegang von 11.25°bis 90°z.UN

	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III
W I	↘↘	↗	↘↘	keine Daten	↘↘	keine Daten	↗↗	keine Daten	keine Daten
W II	↘↘	↗	↘↘	↗	↘	keine Daten	↗	↘	keine Daten
W III	↘↘	↗	↘↘	↗	↗	↘↘	↗	↗	↘
W IV	↘↘	↘↘	↘↘	↗	↘↘	↘↘	↗	↘↘	↘↘
W V	keine Daten	↘↘	↗	keine Daten	keine Daten	↗	keine Daten	↘↘	↘↘

Kkm 145.059 „undurchlässige Buhne“ (Ø Typ 2; +21.5 m³/m Sedimentbilanz)

Seegang von -90° bis -11.25°z.Ufernorm.(UN) Seegang ufernormal(0°±11.25°z.UN) Seegang von 11.25°bis 90°z.UN

	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III	H _{m0} I	H _{m0} II	H _{m0} III
W I	↘↘	↘	↘	↘↘	↗	↗	keine Daten	keine Daten	keine Daten
W II	↗	↗	↘↘	↗↗	↗	↗	↘↘	↗	keine Daten
W III	↘	↗	↘	↗	↗	↘	↘	↗	↘
W IV	↘↘	↘↘	↘↘	↘	↘↘	↘↘	↘	↘↘	↘↘
W V	keine Daten	keine Daten	↘	keine Daten	keine Daten	keine Daten	↘	↘	↘



↗	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System >0.01 m³/m; <0.5 m³/m (Typ -3)
↗↗ [↗↗]	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System >0.5 m³/m [>0.2 m³/m; <0.5 m³/m] (Typ -3)
↘	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System <-0.01 m³/m; >-0.5 m³/m (Typ -3)
↘↘ [↘↘]	gewichtetes Mittel des Gesamteintrags in das System <-0.5 m³/m [<0.2 m³/m; >0.5 m³/m] (Typ -3)
keine Daten	Kombinationsklasse nicht mit Daten besetzt

Abb. 36: Effekte hydrologischer Kombinationsklassen auf die Strand- und Schorremorphologie unter verschiedenen Verbauungsarten am Beispiel des Meßbrückenprofils Warnemünde

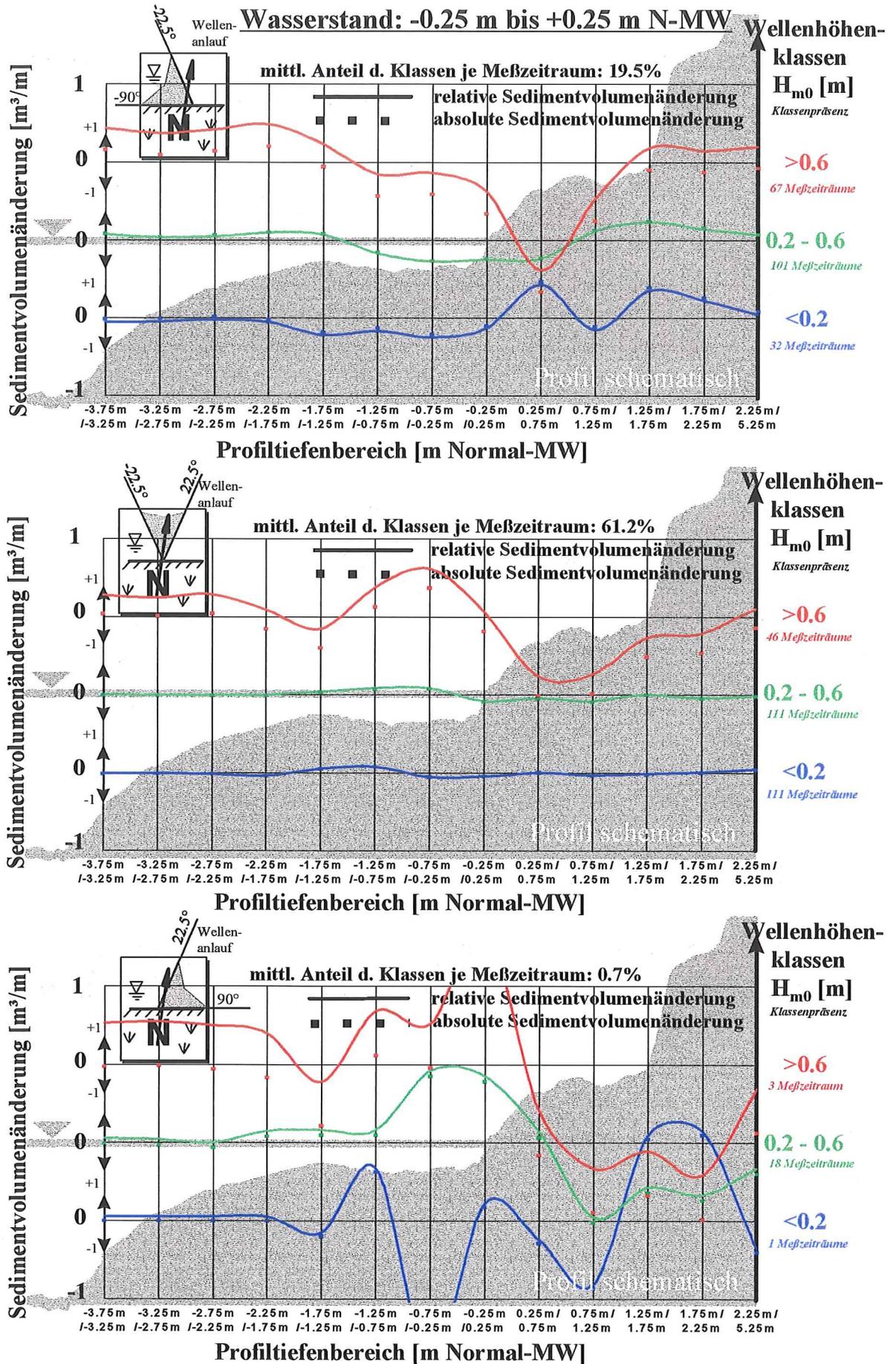


Abb.37: **Relative Sedimentvolumenänderungen** (Σ positiver Änderungen = Σ negativer Änderungen) im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps **“ohne Buhne”** (112 Meßzeiträume) in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung

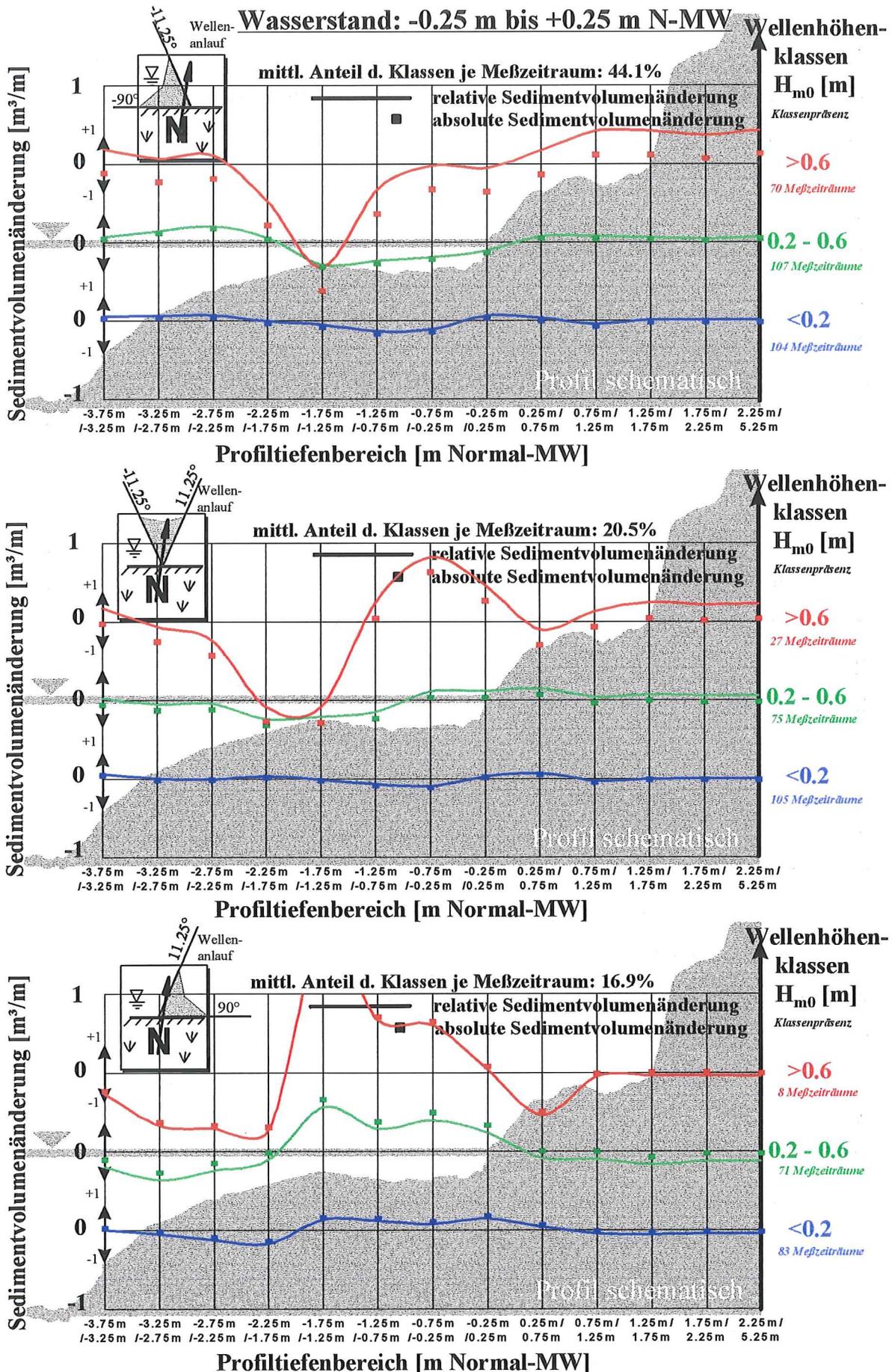


Abb.38: Relative Sedimentvolumenänderungen (Σ positiver Änderungen = Σ negativer Änderungen) im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps "ohne Buhne" (112 Meßzeiträume) in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufriichtung

Fazit:

- Sedimenteintrag bei niedrigen Wasserständen verbunden mit geringen Wellenhöhen
- Sedimentaustrag bei mittleren bis hohen Wasserständen verbunden mit mittleren bis hohen Wellen
- nachteilige Profilformänderung vorwiegend beim Wellenanlauf von -90° bis -22.5° (-11.25°) zur Ufernormalen verbunden mit mittleren bis hohen Wasserständen und mittleren bis hohen Wellen
- positive Profilformänderung bei ufernormalem Wellenanlauf und Anlauf von 22.5° (11.25°) bis 90° zur Ufernormalen verbunden mit mittleren bis hohen Wasserständen und mittleren bis hohen Wellen

In den Abbildungen 37 und 38 wird deutlich, welche Profilbereiche bei normalen Wasserständen von -0.25 m bis $+0.25$ m ü. N-MW im unverbauten Zustand in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Wellenanlaufrichtung begünstigt bzw. benachteiligt werden.

- Die Beträge der morphologischen Veränderungen nehmen mit zunehmenden Wellenhöhen zu.
- Die Extremwerte der Veränderungen verschieben sich mit der Wellenanlaufrichtung von -90° bis $+90^\circ$ in Richtung Land.
- Die Sedimer. volumenbilanz ist bei Wellenanlaufrichtungen von 11.25° bis 90° ausschließlich positiv, bei allen anderen Wellenanlaufrichtungen ausschließlich negativ (für 22.5° Einschlußwinkel der Ufernormalen).
- Die östlichen Anlaufrichtungen (11.25° bis 90°) wirken sich in allen Wellenhöhenklassen akkumulationsfördernd auf den Flachwasserbereich und den uferliniennahen Strandbereich (-1.25 m bis $+0.75$ m ü. N-MW) aus, wobei höher liegende Bereiche (>0.75 m ü. N-MW) oft Abträgen unterliegen.
- Bei westlichen Wellenanlaufrichtungen (-90° bis -11.25°) unterliegen die höheren Strandbereiche (>1.25 m ü. N-MW) nicht diesen Erosionserscheinungen. Abträge sind aber von ca. 1.25 m ü. N-MW bis -0.75 m ü. N-MW zu verzeichnen, also fast ein umgekehrtes Verhalten zu den östlichen Wellenanlaufrichtungen (11.25° bis 90°).

- Die tieferen Bereiche (<1.75 m ü. N-MW) werden bei Wellen >0.6 m generell begünstigt
- Die absoluten Sedimentvolumenänderungen des Strandes sind bei Wellen >0.6 m generell negativ.

5.4 Durchlässige Buhne

Kkm 144.610:

Die Sedimenteinträge sind fast gleichmäßig über alle Kombinationsklassen verteilt. Drei von den vier Klassen, in denen Sedimentaustrag vorkommt, sind bei niedrigen bzw. sehr niedrigen Wasserständen anzutreffen. Sedimentaustrag ist generell mit dem Profilveränderungstyp +2 oder -2 verbunden. Der für die durchlässige Buhne mittlere Profilveränderungstyp 3 ist vorwiegend bei den ufernormalen Anlaufriechungen und den Anlaufriechungen von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen anzutreffen.

5.5 Halbdurchlässige Buhne

Kkm 144.880, Kkm 145.055, Kkm 145.059:

Die vergleichende Auswertung der verschiedenen Profilstandorte mit dem Buhnentyp „halbdurchlässige Buhne“ belegen deutlich höhere Sedimenteinträge für das Meßbrückenprofil gegenüber dem unmittelbar angrenzenden Profil mittig Buhne 7/8 (vgl. Anhang XXXV und XLII). Das hängt mit dem späten Aufzeichnungsbeginn Mai 1992 im letzteren Profil zusammen. Zu diesem Zeitpunkt war der erste große Sedimentzuwachs bereits abgeschlossen. Daraus resultierende Unterschiede in den Effekten der einzelnen hydrologischen Kombinationsklassen auf die Morphologie sind ebenfalls teilweise auf diesen Grund zurückzuführen.

Beim Buhnentyp „halbdurchlässige Buhne“ sind 2 Profile nahezu von unmittelbar nach dem Buhnenbau regelmäßig vermessen worden (Kkm 145.059 und Kkm 144.880). Sie weisen sehr hohe Sedimenteinträge für den ufernahen Bereich auf.

Beide zeigen die positivsten Entwicklungen beim Seegang aus ufernormaler Richtung, währenddessen die Sedimentausträge besonders aus Anlaufrihtungen von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen ausbleiben. Das wäre ein Indiz dafür, daß Sediment vorwiegend im Küstenquertransport angelagert werden könnte und deutlich lagestabiler ist, das heißt nicht mehr so schnell ausgeräumt werden kann, wie vor dem Bühnenbau. Besonders die Wellenanlaufrihtungen von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen in Verbindung mit Seegang liefern nun auch Zuwachsbedingungen nachdem an der buhnenlosen Küste im Meßbrückenprofil dort vorwiegend Abtrag herrschte (vgl. Abb. 35). Der Profilveränderungstyp 2 ist meistens mit einer negativen Sedimentbilanz verbunden.

Meßbrückenprofil(Kkm 145.059):

Der Verbauungszustand „halbdurchlässige Bühne“ erhält seine Sedimenteinträge ausschließlich aus den ufernormalen Wellenanlaufrihtungen und den Anlaufrihtungen von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen. Wellenanlaufrihtungen von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen sind generell mit Sedimentaustträgen aus dem System verbunden. Die Sedimentation beim Wellenanlauf von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen und ufernormal erstreckt sich über fast alle Wasserstands- und Seegangsklassen (vgl. Abb. 35).

Die deutlichste positive Entwicklung der Profilform ist bei den ufernormalen Anlaufrihtungen zu erkennen. Diese erstreckt sich dort über fast alle Klassenkombinationen von Wasserstand und Seegang.

Wenn nachteilige Profilformentwicklungen stattfinden, sind diese häufiger bei den niedrigeren Wasserständen zu finden, positive Profilformentwicklungen bei den mittleren bis höheren Wasserständen.

Sämtliche Profilformänderungen zum Typ +2 oder -2 hin sind mit einer negativen bzw. ausgeglichenen Sedimentbilanz im System verbunden. Die Profilformänderungen zum Typ +1 oder -1 hin sind fast ausschließlich mit einer positiven oder ausgeglichenen Sedimentbilanz verbunden.

Wasserstände unter -0.25 m ü. N-MW verbunden mit Wellenhöhen über 0.20 m bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen wirken sich deutlich negativ auf

das Profil unter dem Einfluß der halbdurchlässigen Bühnen aus. Deutlich positiv wirken sich die Wasserstände über -0.25 m N-MW verbunden mit Wellenhöhen >0.20 bei ufernormalen Anlaufrichtungen und Anlaufrichtungen von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen aus.

Die stärkste Abhängigkeit der morphologischen Veränderungen besteht offensichtlich zu den Wellenanlaufrichtungen. Innerhalb der verschiedenen Wellenanlaufrichtungsklassen gibt es einzelne Kombinationsklassen von Wasserstand und Seegang, die sich entgegen dem Trend der Wellenanlaufrichtungsklasse bewegen. Diese sind der Abb. 35 Mitte zu entnehmen.

Bei der Einengung des Winkels der ufernormalen Wellenanlaufrichtung auf 22.5° zeigt sich ein leicht verändertes Bild. Die westlichen Anlaufrichtungen zeigen nicht mehr ausschließlich negative Sedimentbilanzen. Die Profilveränderungstypen 2 und -2 sind nur noch sehr selten vertreten (vgl. Abb. 36). Das bedeutet das sich der Wellenanlaufrichtungsbereich von -22.5° bis -11.25° deutlich positiv auf die Sedimentbilanz und die Profilform bei halbdurchlässigen Bühnen auswirkt.

Bei östlichen Anlaufrichtungen (11.25° bis 90°) zeigt diese Klassenbreite ebenfalls positivere Effekte als bei der Klassenbreite 22.5° bis 90° . Die Profilformänderung und die Sedimentbilanz sind fast ausschließlich positiv.

Höhere Wasserstände in Verbindung mit starkem Seegang führen nur noch bei Wasserständen von 0.25 m bis 0.75 m ü. N-MW in Verbindung mit Wellenhöhen >0.6 m zu einer negativen Sedimentbilanz.

Fazit:

- vorwiegend Sedimenteintrag bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen und Anlauf von 22.5° (11.25°) bis 90° zur Ufernormalen
- ausschließlich Sedimentaustrag bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen
- nachteilige Profilformänderung vorwiegend beim Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen verbunden mit allen Wasserstandsklassen und mittleren bis hohen Wellen

- positive Profilformänderung bei ufernormalem Wellenanlauf und Anlauf von $22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90° zur Ufernormalen verbunden vorwiegend mit mittleren bis hohen Wasserständen, aber auch in den anderen Klassen vertreten

In den Abbildungen 39 und 40 wird ersichtlich, welche Profilbereiche bei normalen Wasserständen von -0.25 m bis $+0.25$ m ü. N-MW im Verbauungszustand „halbdurchlässige Bühne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Wellenanlaufrichtung begünstigt bzw. benachteiligt werden.

- Die Beträge der morphologischen Veränderungen nehmen nicht mehr in dieser Deutlichkeit wie bei der „buhnenlosen Küste“ mit zunehmenden Wellenhöhen zu.
- Einzig deutlich negative Sedimentvolumenbilanz ist bei Wellenanlaufrichtungen von -90° bis $-22.5^\circ(11.25^\circ)$ bei Wellenhöhen >0.6 m zu verzeichnen. Alle anderen Kombinationsklassen sind durch positive bzw. nahe bei null liegende Sedimentbilanzen gekennzeichnet.
- Die östlichen Anlaufrichtungen ($22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90°) wirken sich in allen Wellenhöhenklassen akkumulationsfördernd auf den uferliniennahen Bereich (-0.25 m bis $+0.25$ m ü. N-MW) aus.
- Deutlich begünstigt wird der Bereich -0.25 m bis 1.25 m ü. N-MW bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen, insbesondere bei Wellenhöhen >0.6 m
- Die stärksten Profilbenachteiligungen sind bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen ($-22.5^\circ(-11.25^\circ)$ bis $22.5^\circ(11.25^\circ)$) bei Wellen >0.6 m in den Profilbereichen -3.75 m bis -0.75 m und 1.25 m bis 2.25 m ü. N-MW zu verzeichnen.

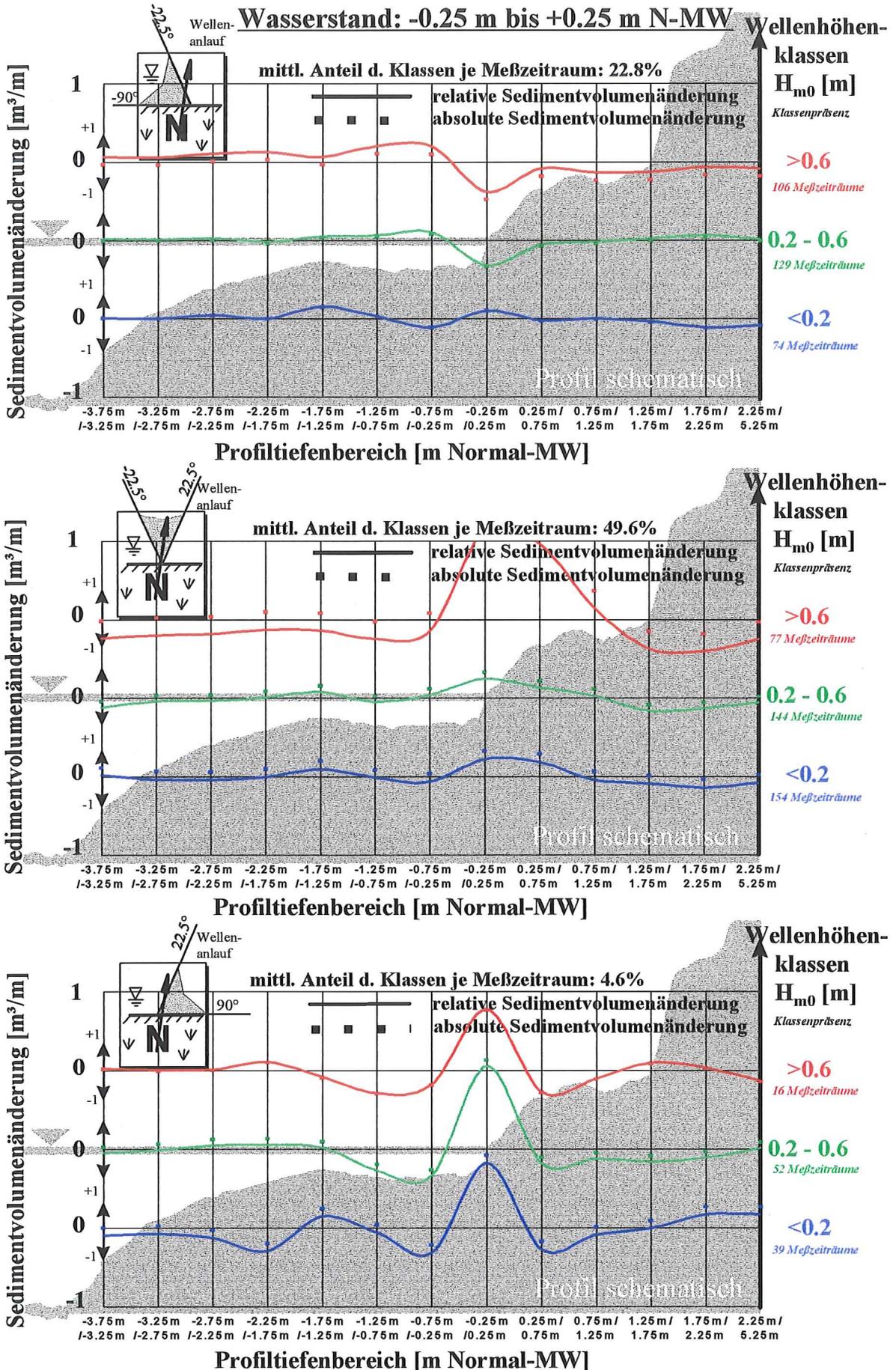


Abb.39: Relative Sedimentvolumenänderungen (Σ positiver Änderungen= Σ negativer Änderungen) im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps “**halbdurchlässige Buhne**” (169 Meßzeiträume) in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung

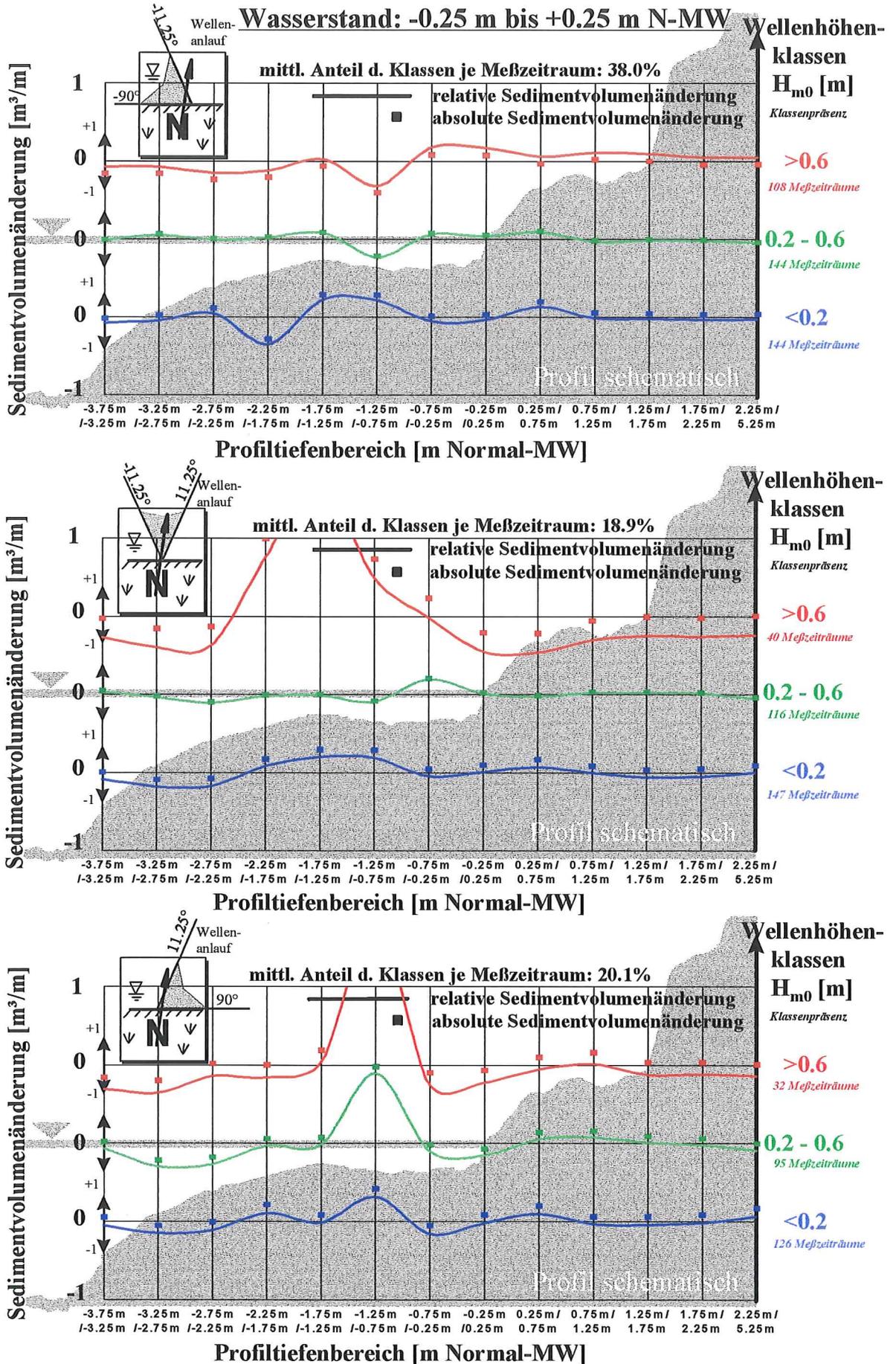


Abb.40: Relative Sedimentvolumenänderungen (Σ positiver Änderungen = Σ negativer Änderungen) im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps "halbdurchlässige Buhne" (169 Meßzeiträume) in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung

Kkm 145.010; Kkm 145.020; Kkm 145.100; Kkm 145.110 (5 m von der halbdurchlässigen Buhne):

Der Vergleich der Profilveränderungen in geringem Abstand von den Buhnen liefert bei der „halbdurchlässigen Buhne“ zwischen der Buhne 7 und 8 keine deutlichen Gemeinsamkeiten. Dies dürfte mit der stark beschädigten Buhne 8 in diesem Zeitraum zusammenhängen, da nach der Buhnenreparatur und -abdichtung beim Typ „undurchlässige Buhne“ deutliche Gemeinsamkeiten in der Entwicklung erkennbar sind (vgl. Anhang XLIII bis XLIV und XLVI bis XLVII).

Die größten Zuwächse bei den buhnenahen Profilen des Buhnentyps „halbdurchlässige Buhne“ werden 5 m östlich der Buhne 7 erzielt (+65 m³/m; vgl. Anhang XXXVI). Ebenfalls einen Zuwachs gibt es westlich der Buhne 7 (+18 m³/m). An der Buhne 8 ist die Bilanz negativ (38 m³/m bzw. 40 m³/m). An der Buhne 7 sind die positiven Effekte in allen Wellenanlaufrichtungsklassen zu beobachten (beim Seegang von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen ohne Ausnahme). Teilweise negative Effekte sind in der ufernormalen Wellenanlaufrichtung besonders bei hohem Wasserstand in Verbindung mit kleinen und mittleren Wellenhöhen vertreten. Das könnte mit gebündelten Strömungen Richtung „See“ mit der Buhne als Leitwerk zu erklären sein.

5.6 Undurchlässige Buhne

Kkm 145.055, Kkm 145.059:

Der Buhnentyp „undurchlässige Buhne“ mittig im Buhnenfeld 7/8 zeigt ähnliche Abhängigkeiten von der Hydrologie wie das Meßbrückenprofil beim selben Bauwerkstyp (vgl. Anhang XLV). Die Sedimentbilanzen sind in etwa gleich groß (Meßbrückenprofil: 21 m³/m und Buhne 7/8 Mitte: 29 m³/m; vgl. Anhang XXXVIII).

Meßbrückenprofil(Kkm 145.059):

Es ist ebenfalls wie bereits bei der „buhnenlosen Küste“ und der „halbdurchlässigen Buhne“ eine deutliche Gliederung nach den Wellenanlaufrichtungen erkennbar. Die Wellenanlaufrichtungen von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen zeigen deutlich

negativere Auswirkungen auf das Profil, als die ufernormalen und die von 22.5° bis 90° zur Ufernormalen (vgl. Abb. 35).

Bei den Wellenanlaufrichtungen von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen rufen die sehr niedrigen Wasserstände sowie die starken Seegänge generell negative Effekte hervor (vgl. Abb. 35). Dasselbe Bild zeigt sich von der Sedimentbilanz her bei der Erweiterung der Wellenanlaufrichtungen auf -90° bis -11.25° . Bei starken Seegängen ist dort aber der Veränderungstyp +3 vorherrschend (vgl. Abb. 36).

Die größten positiven Effekte werden mit den undurchlässigen Buhnen bei ufernormalem Wellenanlauf und Anlauf von $22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90° zur Ufernormalen erzielt. Niedrige Wasserstände wirken sich hier in allen Wellenhöhenklassen positiv aus. Es scheint eine positive Tendenz in Richtung sehr niedrige Wasserstände in Verbindung mit starken Seegängen zu existieren. Sehr hohe Wasserstände wirken sich hier ausnahmslos negativ aus. Die Profilentwicklung wird mit steigenden Wasserständen und geringer werdenden Wellenhöhen zunehmend negativ (vgl. Abb. 35 und Abb. 36).

Fazit:

- vorwiegend negative Profilformentwicklung bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen
- ausschließlich Sedimentausträge bei sehr hohen Wasserständen
- ausschließlich Sedimentausträge bei Wellenanlauf von -90° bis $-22.5^\circ(-11.25^\circ)$ zur Ufernormalen mit starkem Seegang
- negative Tendenz der Profilform und Sedimentbilanz Richtung sehr hohe Wasserstände verbunden mit geringen Wellenhöhen bei ufernormalem und von $22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90° zur Ufernormalen einfallendem Seegang

Eine interessante Feststellung ist, daß die undurchlässigen Buhnen gerade bei sehr hohen Wasserständen im Gegensatz zu den anderen Verbauungsarten negative Effekte hervorrufen. Sie bieten also im Sturmflutfall nicht den Schutz wie die halbdurchlässigen Buhnen (vgl. auch Anlage XLII und XLV). Sie fördern aber dennoch insgesamt die Sedimentakkumulation besonders zu gunsten des Strandes (vgl. Anlage XXXVIII bis XL).

Die Abbildungen 41 und 42 zeigen, welche Profilbereiche bei normalen Wasserständen von -0.25 m bis +0.25 m ü. N-MW im Verbauungszustand „undurchlässige Buhne“ in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Wellenanlaufrichtung begünstigt bzw. benachteiligt werden.

- Die Beträge der morphologischen Veränderungen nehmen mit zunehmenden Wellenhöhen zu.
- Die Sedimentvolumenbilanz ist nur bei Wellenanlaufrichtungen von -90° bis -22.5° und -22.5° bis 22.5° bei Wellenhöhen >0.6 m bzw. bei -90° bis -11.25° und 11.25° bis 90° für Wellenhöhen >0.6 m negativ. Alle anderen Kombinationsklassen sind durch positive bzw. nahe bei null liegende Sedimentbilanzen gekennzeichnet.
- Hohe Wellen (>0.6 m) bei westlichen Anlaufrichtungen (-90° bis -22.5° (-11.25°)) wirken sich auf den Strandbereich (-0.25 m bis 1.25 m ü. N-MW) erosionsfördernd aus
- Hohe Wellen (>0.6 m) bei östlichen Anlaufrichtungen (22.5° bis 90°) wirken sich auf den Strandbereich (-0.25 m bis 1.25 m ü. N-MW) akkumulationsfördernd aus
- Akkumulationsfördernd im Buhnenbereich (-0.25 m bis -1.25 m ü. N-MW) wirken hauptsächlich hohe Wellen (>0.6 m) bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen (-22.5° (-11.25°) bis 22.5° (11.25°)), wobei dieses Material hauptsächlich aus den Verlusten in höher liegenden Bereichen stammen wird.

Kkm 145.010; Kkm 145.020; Kkm 145.100; Kkm 145.110 (5 m von der undurchlässigen Buhne):

Bei den undurchlässigen Buhnen wird in den buhnenahen Profilen ausnahmslos Zuwachs erzielt. Der größte Zuwachs erfolgte 5 m westlich von Buhne 7 mit $64 \text{ m}^3/\text{m}$. Östlich Buhne 7 sind es $44 \text{ m}^3/\text{m}$ (Buhne 8: $40 \text{ m}^3/\text{m}$ und $42 \text{ m}^3/\text{m}$) (vgl. Anhang XXXIX und XL). Die Veränderungen in Abhängigkeit von den hydrologischen Parametern weisen jeweils bei den auf der gleichen Seite der Buhne liegenden Profilen deutliche Gemeinsamkeiten auf.

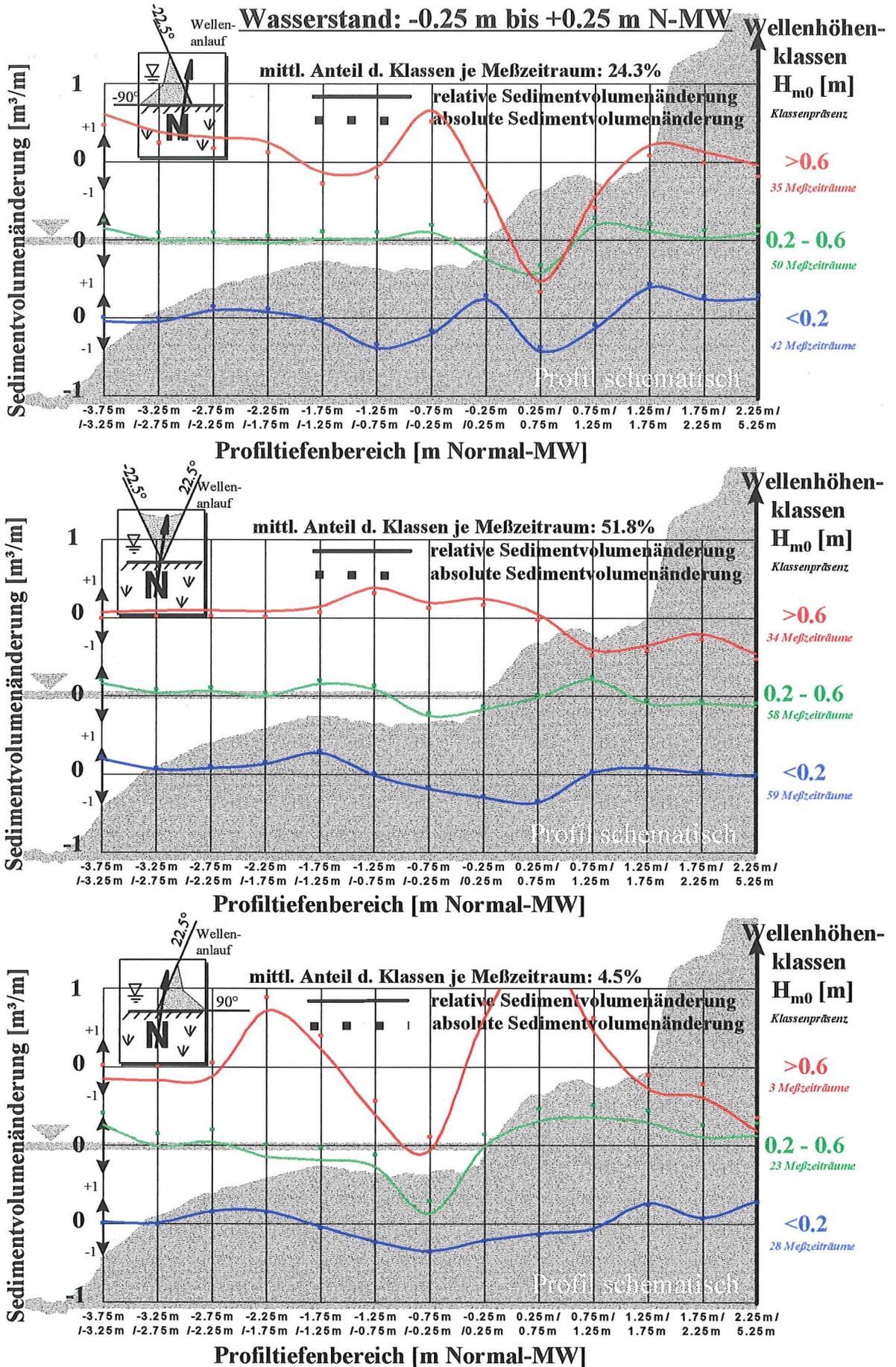


Abb.41: Relative Sedimentvolumenänderungen (Σ positiver Änderungen = Σ negativer Änderungen) im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps **“undurchlässige Buhne”** (60 Meßzeiträume) in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung

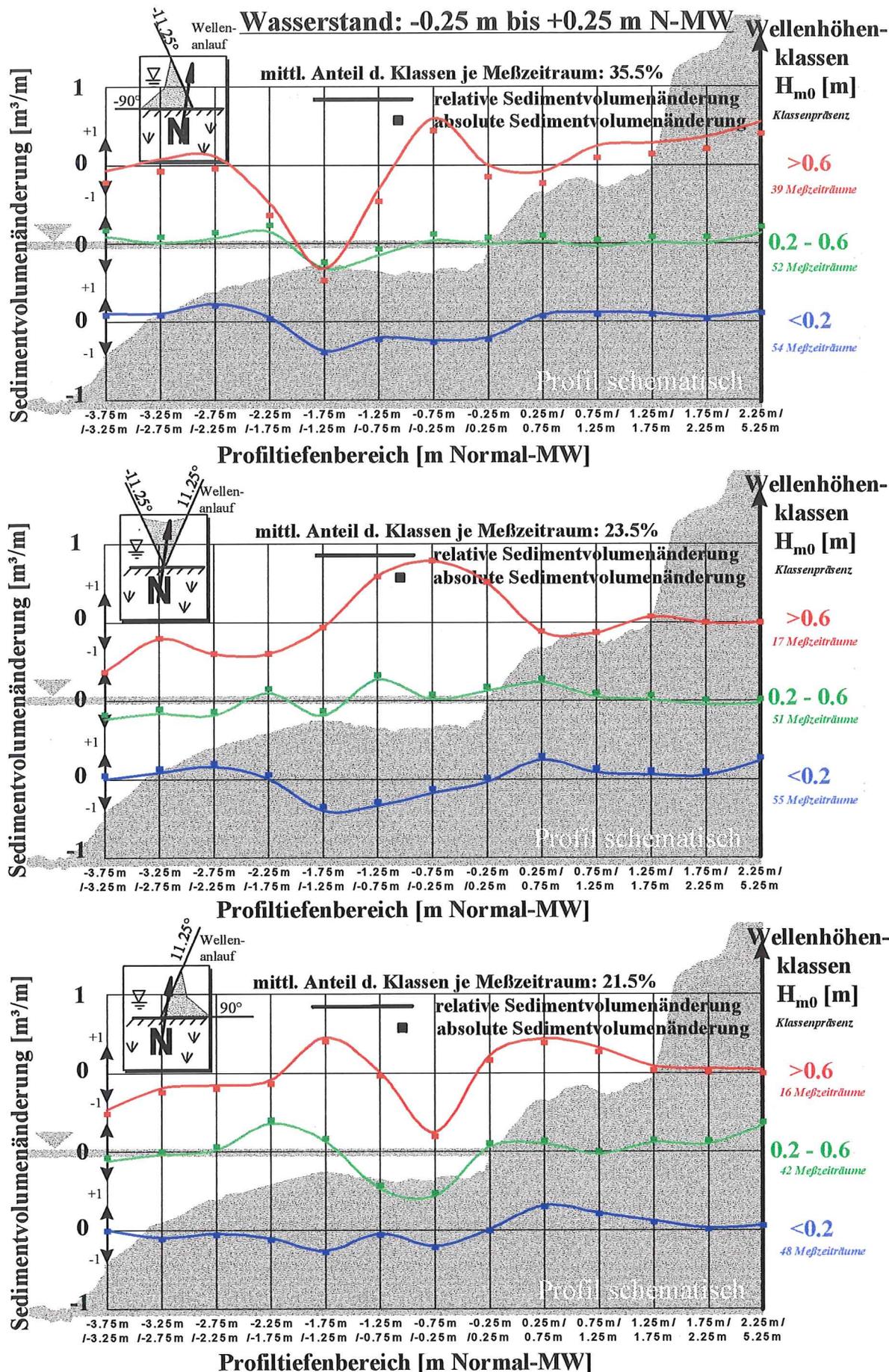


Abb.42: Relative Sedimentvolumenänderungen (Σ positiver Änderungen = Σ negativer Änderungen) im abgeschlossenen morphodynamischen System des Bauwerktyps "undurchlässige Buhne" (60 Meßzeiträume) in Abhängigkeit von Wellenhöhe und -anlaufrichtung

Westlich der beiden Bühnen 7 und 8 herrschen bei ufernormaler Wellenanaufrichtung und niedrigen bis sehr niedrigen Wasserständen negative Effekte auf die Morphologie vor. Bei den normalen bis sehr hohen Wasserständen in dieser Wellenanaufrichtungs-kategorie sind die Effekte auf Profilform und Sedimentbilanz positiv. Die schrägen Wellenanaufrichtungen wirken sich überwiegend positiv auf das Profil aus.

Östlich der Bühnen 7 und 8 sind die negativsten Effekte ebenfalls beim ufernormalen Wellenanlauf zu finden. Besonders die starken Seegänge rufen dort negative Effekte hervor. Die schrägen Wellenanaufrichtungen wirken sich ebenfalls überwiegend positiv auf das Profil aus.

Bei allen drei Verbauungsarten des Meßbrückenprofils bringt der Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen die deutlich negativsten Effekte. Hier wirken sich besonders die Ereignisse mit sehr niedrigen Wasserständen (außer buhlenlose Küste) sowie die Ereignisse mit sehr starken Seegängen negativ aus.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen des F/E-Vorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See“ führten das Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, das Geologisch-Paläontologische Institut der Christian-Albrechts-Universität Kiel und das Staatliche Amt für Umwelt und Natur Rostock“ in interdisziplinärer Zusammenarbeit umfangreiche hydrologische, sedimentologische und morphologische Untersuchungen im Küstenabschnitt Warnemünde durch. Das F/E-Vorhaben wurde im Mai 1993 begonnen und im Mai 1996 erst bis Oktober 1997 und später bis Dezember 1997 verlängert. Es wurden von 1994 bis 1997 vier Zwischenberichte mit dem jeweiligen Bearbeitungsstand und Teilergebnissen erstellt. Die Endberichte werden von jedem beteiligten Institut einzeln in Form eines Teilendberichtes vorgelegt.

Weitere im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben entstandene Teilberichte sind:

- JANKE, W., LAMPE, R. (1994) Bericht zur holozänen Küstenentwicklung sowie zur subrezentem und rezenten Küstendynamik des Abschnittes Jägerbach - Rosenort, ILG für Küstenstudien, Greifswald (unveröffentlicht)
- SCHMIDT, D; RICHTER, K. (1994/1995) Multitemporale Luftbilddauswertung zur Erfassung und Bewertung langfristiger morphologischer Veränderungen eines Küstenabschnittes der Ostsee bei Warnemünde, uve GmbH, Berlin-Potsdam (unveröffentlicht)
- BASINSKI, T. (1995) Wirkungsweise und Konstruktion von Seebuhnen an der polnischen Ostseeküste, Monographie im Rahmen des KFKI-Themas MTK 0546, Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock.
- LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TU BRAUNSCHWEIG (1995) Forschungsvorhaben „Wirkungsweise von Einbauten in See“ . Bericht Nr. 788, „Zur Wirkungsweise der Buhnen als eine Küstenschutzmaßnahme“, Braunschweig, (unveröffentlicht).

Wesentliches Ziel der Untersuchungen an einer tidefreien Küste war es, die Wechselwirkung von Bauwerkseinfluß einerseits und Küstenentwicklung andererseits, in Abhängigkeit der veränderlichen meteorologischen und hydrologischen Einwirkungen an sandigen Brandungsküsten zu erfassen. Hierbei

sollte untersucht werden ob, wann und unter welchen Randbedingungen sich ausgeglichene stabile Verhältnisse auf der Schorre einstellen und inwieweit durch Bauwerke (im speziellen Fall Bühnen) darauf gezielt Einfluß genommen werden kann.

Der Ansatzpunkt für die Beurteilung der Effizienz eines Bühnensystems ist die Küstenlängsströmung und deren Geschwindigkeitsverteilung im Wasserkörper (LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TU BRAUNSCHWEIG, 1995). Diese sind so zu optimieren, daß sich ein Gleichgewicht zwischen Anlandung und Abtrag nach einem anfänglichen Zuwachs des Volumenkörpers in der Umgebung der Uferlinie einstellen kann. Es besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Küstenlängsströmungen mit den entsprechenden Geschwindigkeitsverteilungen im Wasserkörper und dem Seegangsregime sowie den wechselnden Wasserständen. Dieser Zusammenhang wurde und wird derzeit unter wechselnden bauwerkseitigen Randbedingungen vom LEICHTWEISS-INSTITUT DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG untersucht. Das heißt, im Ergebnis werden Strömungsmuster in Abhängigkeit von Seegangs-, Wasserstands- und Bauwerksparemtern ermittelt. Die Strömungsmuster, die sich angenommenermaßen optimal auf gewünschte morphologische Zuwachseffekte und Gleichgewichtsbedingungen auswirken, lassen sich dann auf die Haupteinflußgrößen Seegang, Wasserstand und Bauwerk zurückführen.

Die Verifizierung der morphologischen Zuwachs- bzw. Abtragsbedingungen erfolgt aus den im vorliegenden F/E-Vorhaben gewonnenen Naturdaten. Das Hauptziel des Bearbeitungsteiles „Morphologie“ des o. g. F/E-Projektes konkretisierte sich während der Projektlaufzeit zur Interpretation der Änderungen des Unterwasserprofiles verschiedener Bühnentypstandorte in Abhängigkeit vom Wasserstand und angreifendem Seegang. Unter Hinweis auf die zur Verfügung stehende Datendichte konnte dieses Ziel erreicht werden.

Es wurde ein statistisches Verfahren zur Auswertung von Küstenquerprofiländerungen in Abhängigkeit von hydrologischen Randbedingungen entwickelt. Hierbei wurde besondere Aufmerksamkeit darauf gerichtet, daß die Eingangs- und Ausgangsgrößen Allgemeingültigkeit besitzen und somit auf andere Küstenabschnitte übertragbar sind.

Als geeignete Bezugsbasis der in einem speziellen System aus waagerechten Lamellen eingebetteten morphologischen Eingangsgrößen wurde das allen Küstenstandorten gemeinsame Normal-Mittelwasserniveau als Ebene im Raum verwendet. Von dieser Bezugsbasis ausgehend werden waagerechte Lamellen mit einer konstanten, gegen null gehenden Höhe und der Einheitsbreite von einem Meter gebildet. Die festgelegte Lamellenhöhe muß sich außerhalb des Meßfehlerbereiches befinden. Die Begrenzung des festzulegenden abgeschlossenen Systems nach oben und nach unten hängt von den morphologischen Gegebenheiten (z. B. Dünenoberkante, seewärtige Grenze des Sedimenttransports) und/oder der Verfügbarkeit an gemessenen Daten ab. Die Sedimentvolumenänderungen dieser Lamellen bilden die Grundlage für die Korrelationen mit hydrologischen Parametern.

Diese Sedimentvolumenänderungen in definierten Profilausschnitten werden den prozentualen Zeitanteilen wählbarer hydrologischer Parameter zwischen den einzelnen Vermessungen zugeordnet. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Küstenabschnitte zu gewährleisten, sind Parameter zu wählen, die Allgemeingültigkeit besitzen: z. B. Wasserstand; Wellenhöhe, Wellenlänge, ... der Tiefwasserwelle, Wellenanlaufrichtung der Tiefwasserwelle bezogen auf die Ufernormale, und/oder andere.

Im vorliegenden F/E-Vorhaben wurden die zu korrelierenden hydrologischen Parameter entsprechend der Zielstellung, den Einfluß von Buhnenbauwerken auf die Morphologie in Abhängigkeit von hydrologischen Randbedingungen zu bestimmen, unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit festgelegt. Die drei ermittelten Haupteinflußgrößen sind der Wasserstand, die Wellenhöhe und die Wellenanlaufrichtung. Die verwendeten Wellenparameter entstammen nicht dem Tiefwasserbereich, sondern dem Meßbrückenkopf Warnemünde mit einer durchschnittlichen Wassertiefe von -2.5 m ü. N-MW. Sie sind somit bereits refraktionsbeeinflusst. Für die vorgegebene Zielstellung erwiesen sich die Daten als geeignet.

Um die Komplexität der so gewonnenen Aussagen zu reduzieren, wurde eine Methode unter Bildung von Momenten eingeführt, die das Profil in drei Hauptbereiche unterteilt. Ergebnis dieser Momentenmethode sind 6

Profilveränderungstypen, die die Änderung der Profilform charakterisieren. Das zweite wesentliche Charakteristikum wurde in der Sedimentbilanz des abgeschlossenen Systems gefunden. Eine wichtige Voraussetzung zur sinnvollen Anwendung dieses statistischen Verfahrens ist ein umfangreicher Datenfundus von den jeweils untersuchten Profilen (morphologische Vermessungen in möglichst kurzen zeitlich konstanten Abständen etwa täglich bis maximal vierzehntägig), um den Einfluß aller auftretenden Randbedingungen (z. B. bauwerkseitige und/oder hydrologische) hinreichend beurteilen zu können.

Mit Hilfe dieser Methode sind nach Auswertung umfangreicher und gezielt aufgenommener Naturdaten generell Prognosen für die Entwicklung von Küstenquerprofilen beim Einsatz von Küstenwasserbauwerken aus der Kenntnis der hydrologischen Randbedingungen und einer morphologisch-sedimentologischen Momentaufnahme für andere Küstenabschnitte möglich. Das heißt, ist wie im vorliegenden Beispiel ein Küstenabschnitt in Warnemünde mit einem Bauwerk (z. B. halbdurchlässige einreihige Holzpfahlbuhnen) versehen worden und es liegen lange Profilaufnahmereihen von vor und nach dem Buhnenbau von einem definierten Ort innerhalb des entstandenen Buhnensystems in regelmäßigen, sehr kurzen Abständen aufgenommen, sowie die korrespondierenden hydrologischen Daten vor, so sind die morphologischen Veränderungen des Profils den hydrologischen und bauwerkseitigen Randbedingungen zuordbar. Ist später z. B. ein Abschnitt in Zingst auf eine Buhnenbaumaßnahme hin zu untersuchen und es liegen ähnliche Ausgangsbedingungen (Strand-/ Schorreineigung, Sedimenttransportkapazität, Korngrößenverteilung) vor, so sind bei Kenntnis der mittleren Verteilung der hydrologischen Parameter Prognosen für die Strand- und Schorreentwicklung ableitbar.

Dieses Verfahren kam zur Bewertung von Buhnen mit verschiedenen Bauwerksparemtern zur Anwendung. Ausgehend von der Gesamtzielstellung des Vorhabens wurden die Bauwerkstypen

- Buhnenlose Küste
 - Durchlässige Buhne
 - Halbdurchlässige Buhne
 - Undurchlässige Buhne
- untersucht.

Die Daten mit der größten zeitlichen Dichte liegen vom Meßbrückenprofil vor, welches in zeitlicher Aufeinanderfolge alle untersuchten Bauwerkstypen bis auf die „durchlässige Buhne“ repräsentierte. Die Aussagen zu Bauwerkstyp „durchlässige Buhne“ (Buhnenfeld 2/3) sind unter Vorbehalt zu werten, da durch Bohrmuschelbefall das untersuchte Buhnenfeld einen erheblichen Zerstörungsgrad aufwies, aber auch die Datendichte des Handlotungsprofils der Meßbrücke nicht annähernd erreicht werden konnte.

Die Methode liefert folgende Grunderkenntnisse:

Allgemeines:

Die Reaktion der Morphologie zeigt bei einem Einschlußwinkel der Ufernormalen von 45° unabhängig vom Buhnentyp eine Abhängigkeit von der Wellenanlaufrichtung.

Der Profilveränderungstyp 2, der für eine Aufsteilung des „Strand-/Flachwasserbereiches“ und eine Abflachung des „Flachwasser-/Tiefwasserbereiches“ steht (nachteilige Profilformentwicklung), ist häufig mit Sedimentaustrag aus dem abgeschlossenen System im ufernahen Bereich verbunden.

Buhnenlose Küste:

Die buhnenlose Küste westlich des Buhnensystems steht bei Wellenanlaufrichtungen von rechts (22.5° bis 90°) wahrscheinlich unter dem Einfluß des Buhnensystems, da diese sich ausnahmslos und entgegen den Veränderungen des buhnenlosen Meßbrückenprofils positiv entwickelt.

- Sedimenteintrag bei niedrigen Wasserständen verbunden mit geringen Wellenhöhen
- Sedimentaustrag bei mittleren bis hohen Wasserständen verbunden mit mittleren bis hohen Wellen
- nachteilige Profilformänderung vorwiegend beim Wellenanlauf von -90° bis -22.5° (-11.25°) zur Ufernormalen verbunden mit mittleren bis hohen Wasserständen und mittleren bis hohen Wellen

- positive Profilformänderung bei ufernormalem Wellenanlauf und Anlauf von 22.5° (11.25°) bis 90° zur Ufernormalen verbunden mit mittleren bis hohen Wasserständen und mittleren bis hohen Wellen

Bei normalen Wasserständen (-0.25 m bis +0.25 m ü. N-MW, 80% Zeitanteil) ergibt sich für diesen Buhentyp folgende Profilentwicklung:

- Die Beträge der morphologischen Veränderungen nehmen mit zunehmenden Wellenhöhen zu.
- Die Extremwerte der Veränderungen verschieben sich mit der Wellenanlaufrichtung von -90° bis $+90^\circ$ in Richtung Land.
- Die Sedimentvolumenbilanz ist bei Wellenanlaufrichtungen von 11.25° bis 90° ausschließlich positiv, bei allen anderen Wellenanlaufrichtungen ausschließlich negativ (für 22.5° Einschlußwinkel der Ufernormalen).
- Die östlichen Anlaufrichtungen (11.25° bis 90°) wirken sich in allen Wellenhöhenklassen akkumulationsfördernd auf den Flachwasserbereich und den uferliniennahen Strandbereich (-1.25 m bis +0.75 m ü. N-MW) aus, wobei höher liegende Bereiche (>0.75 m ü. N-MW) oft Abträgen unterliegen.
- Bei westlichen Wellenanlaufrichtungen (-90° bis -11.25°) unterliegen die höheren Strandbereiche (>1.25 m ü. N-MW) nicht diesen Erosionserscheinungen. Abträge sind aber von ca. 1.25 m ü. N-MW bis -0.75 m ü. N-MW zu verzeichnen, also fast ein umgekehrtes Verhalten zu den östlichen Wellenanlaufrichtungen (11.25° bis 90°).
- Die tieferen Bereiche (<1.75 m ü. N-MW) werden bei Wellen >0.6 m generell begünstigt
- Die absoluten Sedimentvolumenänderungen des Strandes sind bei Wellen >0.6 m generell negativ.

Durchlässige Buhne:

Die Sedimenteinträge sind fast gleichmäßig über alle Kombinationsklassen verteilt. Drei von den vier Klassen, in denen Sedimentaustrag vorkommt, sind bei niedrigen bzw. sehr niedrigen Wasserständen anzutreffen. Sedimentaustrag ist generell mit dem Profilveränderungstyp +2 oder -2 verbunden. Der für die durchlässige Buhne mittlere Profilveränderungstyp 3 ist vorwiegend bei den ufernormalen

Anlaufrichtungen und den Anlaufrichtungen von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen anzutreffen.

Halbdurchlässige Buhne:

- vorwiegend Sedimenteintrag bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen und Anlauf von $22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90° zur Ufernormalen
- ausschließlich Sedimentaustrag bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen
- nachteilige Profilformänderung vorwiegend beim Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen verbunden mit allen Wasserstandsklassen und mittleren bis hohen Wellen
- positive Profilformänderung bei ufernormalem Wellenanlauf und Anlauf von $22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90° zur Ufernormalen verbunden vorwiegend mit mittleren bis hohen Wasserständen, aber auch in den anderen Klassen vertreten

Bei normalen Wasserständen (-0.25 m bis $+0.25$ m ü. N-MW, 80% Zeitanteil) ergibt sich für diesen Buhnentyp folgende Profilentwicklung:

- Die Beträge der morphologischen Veränderungen nehmen nicht mehr in dieser Deutlichkeit wie bei der „buhnenlosen Küste“ mit zunehmenden Wellenhöhen zu.
- Einzig deutlich negative Sedimentvolumenbilanz ist bei Wellenanlaufrichtungen von -90° bis $-22.5^\circ(11.25^\circ)$ bei Wellenhöhen >0.6 m zu verzeichnen. Alle anderen Kombinationsklassen sind durch positive bzw. nahe bei null liegende Sedimentbilanzen gekennzeichnet.
- Die östlichen Anlaufrichtungen ($22.5^\circ(11.25^\circ)$ bis 90°) wirken sich in allen Wellenhöhenklassen akkumulationsfördernd auf den uferliniennahen Bereich (-0.25 m bis $+0.25$ m ü. N-MW) aus.
- Deutlich begünstigt wird der Bereich -0.25 m bis 1.25 m ü. N-MW bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen, insbesondere bei Wellenhöhen >0.6 m
- Die stärksten Profilbenachteiligungen sind bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen ($-22.5^\circ(-11.25^\circ)$ bis $22.5^\circ(11.25^\circ)$) bei Wellen >0.6 m in den Profilmereichen -3.75 m bis -0.75 m und 1.25 m bis 2.25 m ü. N-MW zu verzeichnen.

Die Beschädigung der Buhne 8 aufgrund des Bohrmuschelbefalls ist anhand der Profilveränderungsdaten beiderseits in der Nähe der Buhne (5 m Abstand) ziemlich eindeutig nachvollziehbar.

Teilweise negative Effekte sind auf die buhnenahen Profile in den ufernormalen (-22.5° bis 22.5° ; 0° =Ufersenkrechte) Wellenanlaufrichtungen besonders bei hohen Wasserständen in Verbindung mit kleinen und mittleren Wellenhöhen zu verzeichnen. Dies könnte mit gebündelten Strömungen in Richtung „See“ mit der Buhne als Leitwerk zu erklären sein.

Undurchlässige Buhne:

- vorwiegend negative Profilformentwicklung bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° zur Ufernormalen
- ausschließlich Sedimentausträge bei sehr hohen Wasserständen
- ausschließlich Sedimentausträge bei Wellenanlauf von -90° bis -22.5° (-11.25°) zur Ufernormalen mit starkem Seegang
- negative Tendenz der Profilform und Sedimentbilanz Richtung sehr hohe Wasserstände verbunden mit geringen Wellenhöhen bei ufernormalem und von 22.5° (11.25°) bis 90° zur Ufernormalen einfallendem Seegang

Die undurchlässigen Buhnen rufen bei sehr hohen Wasserständen im Gegensatz zu den anderen Verbauungsarten negative Effekte hervor. Sie bieten also im Sturmflutfall nicht den Schutz wie die halbdurchlässigen Buhnen. Sie fördern aber dennoch insgesamt die Sedimentakkumulation besonders zu Gunsten des Strandes.

Bei normalen Wasserständen (-0.25 m bis $+0.25$ m ü. N-MW, 80% Zeitanteil) ergibt sich für diesen Buhnentyp folgende Profilentwicklung:

- Die Beträge der morphologischen Veränderungen nehmen mit zunehmenden Wellenhöhen zu.
- Die Sedimentvolumenbilanz ist nur bei Wellenanlaufrichtungen von -90° bis -22.5° und -22.5° bis 22.5° bei Wellenhöhen >0.6 m bzw. bei -90° bis -11.25° und 11.25° bis 90° für Wellenhöhen >0.6 m negativ. Alle anderen Kombinationsklassen sind durch positive bzw. nahe bei null liegende Sedimentbilanzen gekennzeichnet.

- Hohe Wellen (>0.6 m) bei westlichen Anlaufrichtungen (-90° bis -22.5° (-11.25°)) wirken sich auf den Strandbereich (-0.25 m bis 1.25 m ü. N-MW) erosionsfördernd aus
- Hohe Wellen (>0.6 m) bei östlichen Anlaufrichtungen (22.5° bis 90°) wirken sich auf den Strandbereich (-0.25 m bis 1.25 m ü. N-MW) akkumulationsfördernd aus
- Akkumulationsfördernd im Bühnenbereich (-0.25 m bis -1.25 m ü. N-MW) wirken hauptsächlich hohe Wellen (>0.6 m) bei ufernormalen Wellenanlaufrichtungen (-22.5° bis 22.5° und -11.25° bis 11.25°), wobei dieses Material hauptsächlich aus den Verlusten in höher liegenden Bereichen stammen dürfte.

7. Literatur

- BAKKER, W.T. (1968) The dynamics of a coast with a groyne system; Proceedings; 11th Conference on Coastal Engineering, London Chapter 31, 492-517
- BAKKER, W.T.; HULSBERGEN, C.H.; ROELSE, P.; DE SMIT, C.; SVASEK, J.N. (1984) Permeable groynes: Experiments and practice in the Netherlands; Proc. 19th Coast. Engineering Conf., ASCE, New York Vol. II, 2026 - 2041
- BASINSKI, T. (1995) Wirkungsweise und Konstruktion von Seebuhnen an der polnischen Ostseeküste, Monographie im Rahmen des KFKI-Themas MTK 0546, Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock,
- BIJKER, E. W. (1967) Some considerations about scales for coastal models with movable bed; Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 50, 142 pp., November,
- CERC: Shore Protection Manual, U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg
- Kolp, O. (1970) Farbsandversuche mit lumineszenten Sanden in Bühnenfeldern. Ein Beitrag zur Hydrographie der ufernahen Meereszone; Petermanns Geographische Mitteilungen, 114(2), Leipzig
- KRAUS, N.C.; LARSON, M.; KRIEBEL, D.L. (1991) Evaluation of Beach Erosion and Accretion Predictors, ASCE Coastal Sediments'91, Vol. 1, 572-587,
- LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU DER TU BRAUNSCHWEIG (1995) Forschungsvorhaben „Wirkungsweise von Einbauten in See“ . Bericht Nr. 788, „Zur Wirkungsweise der Bühnen als eine Küstenschutzmaßnahme“, Braunschweig, (unveröffentlicht).
- MINISTERIUM FÜR BAU, LANDESENTWICKLUNG UND UMWELT DES LANDES MECKLENBURG-VORPOMMERN (1996) Dokumentation der Sturmflut vom 3. und 4. November 1995 an den Küsten Mecklenburgs und Vorpommerns; Redieck & Schade, Rostock
- NIELSEN, P. (1992) Coastal bottom boundary layers and sediment transport; Advanced Ser. On Oc. Engineering, Vol. 4, World Scientific, Singapur
- RAUDKIVI, A.J. (1996) Permeable Pile Groins, In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering; Vol. 122 No. 6, New Zealand
- STAATLICHES AMT FÜR UMWELT UND NATUR ROSTOCK; GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT KIEL; LEICHTWEISS-INSTITUT TU BRAUNSCHWEIG (1995) Forschungsvorhaben „Wirkungsweise von Einbauten in See“. 2. Zwischenbericht, Rostock, (unveröffentlicht).
- STAATLICHES AMT FÜR UMWELT UND NATUR ROSTOCK; GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT

KIEL; LEICHTWEISS-INSTITUT TU BRAUNSCHWEIG (1996) Forschungsvorhaben „Wirkungsweise von Einbauten in See“. 3. Zwischenbericht, Rostock, (unveröffentlicht).

STAATLICHES AMT FÜR UMWELT UND NATUR ROSTOCK; GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT KIEL; LEICHTWEISS-INSTITUT TU BRAUNSCHWEIG (1997) Forschungsvorhaben „Wirkungsweise von Einbauten in See“. 4. Zwischenbericht, Rostock, (unveröffentlicht).

SWART, D. H. (1974) Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Hydraulics Laboratory, December,

VAN DOORN, T. (1982) Experimenteel onderzoek naar het snelheidsveld in de turbulente bodengrenslaag in een oscillerende stroming in een golftunnel; TOW-Rep. MI562-1a, Delft Hydr. Lab., Delft, Nederland