

# Wirkungsweise durchlässiger Pfahlbuhnen für den Küstenschutz

Von THOMAS TRAMPENAU u. HOCINE OUMERACI

## Zusammenfassung

Durchlässige Holzpfahlbuhnen werden besonders häufig im Bereich des Küstenschutzes an den gezeitenarmen Ostseeküsten eingesetzt. Obwohl sie bereits seit dem 18. Jh. gebaut werden, kann ihre Wirkungsweise bislang noch nicht vollständig erklärt werden. Aus diesem Grund wurde ein umfangreiches Forschungsprogramm am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig initiiert. Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, die hydraulische Wirkungsweise von durchlässigen und dichten Einzelbuhnen sowie von Buhnen-systemen gegenüberzustellen und aus den Ergebnissen neue Vorschläge für deren Entwurf zu entwickeln. Hierfür wurden systematische Laborexperimente in einem Wellenbecken mit fester Sohle und Naturuntersuchungen an einem Küstenabschnitt vor Warnemünde (Ostsee) durchgeführt. Die Laborexperimente beinhalten sowohl Versuche mit küstenparallelen Strömungen ohne Wellen (*Phase I*) als auch Versuche mit Brandungsströmung (*Phase II*). Durch sie werden die durch die Buhnen induzierten Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse in Abhängigkeit von der Buhndurchlässigkeit und anderen Charakteristiken der Bauwerke betrachtet. Durch die Naturuntersuchungen werden anschließend die morphologischen Veränderungen der Unterwassertopographie, die durch Buhnen verursacht werden, abgeschätzt und mit den Strömungsverhältnissen verknüpft. Sowohl die Ergebnisse aus den Labor- als auch aus den Naturuntersuchungen zeigen, dass sich die Wirkungsweise von durchlässigen und dichten Buhnen grundsätzlich voneinander unterscheidet. Verglichen mit den dichten Buhnen weisen durchlässige Buhnen generelle Vorteile hinsichtlich (i) der Wasserstandsverteilungen, (ii) der Beeinflussung der küstenparallelen Strömungen, (iii) der Ausbildung von Strömungswalzen und (iv) der Entstehung von Rippströmungen auf. Ferner wurde festgestellt, dass die Wasserstandsverhältnisse, die bislang kaum bei der funktionellen Wirkungsweise von Buhnen beachtet und untersucht wurden, eine maßgebliche Rolle spielen.

## Abstract

Permeable pile groins are particularly popular along the southern part of the Baltic Sea coast. Although in use since the 18<sup>th</sup> century, the knowledge available does not yet allow to provide a definite answer to their functioning. For this purpose, an extensive research program was initiated at the Leichtweiss-Institute in Braunschweig, Germany. The main objective of this paper is to present and discuss the underlying hydraulic processes of permeable groins as compared to their impermeable counterparts, and then to suggest tentative practical recommendations for the design of permeable pile groins. For this purpose, systematic fixed-bed model tests as well as field surveys along the Baltic Coast were carried out. The laboratory investigations include tests with single groins as well as with groin systems which are first subject to a uniform long-shore current without waves (Phase I) and then to oblique waves (Phase II). The laboratory experiments are used to investigate the flow and water level conditions induced by groins as a function of the permeability and other characteristics of the groins. The field surveys rather focus on observations of morphological profile changes induced by permeable groins. These morphological changes are linked with the current conditions recorded in the laboratory. Both laboratory results and the field surveys indicate that the hydraulic functioning of permeable and impermeable groins are fundamentally different. Permeable groins show clear advantages as compared with their impermeable counterparts with respect to (i) the water level conditions in the groin fields, (ii) the changes of velocity distribution induced by groins and groin systems, (iii) the generation of large-scale flow patterns and vortices and (iv) the formation of rip-currents.

1. Einleitung .....	236
2. Bühnen im Küstenschutz: Hydrodynamische Grundlagen .....	237
2.1 Begriffsbestimmungen und Definitionen .....	237
2.2 Küstennahe Prozesse und Strömungen: Überblick .....	238
2.3 Küstennahe Prozesse mit Bühnen .....	241
2.4 Wirkungsweise von dichten und durchlässigen Bühnen:	
Analyse des Wissensstandes .....	243
2.4.1 Naturuntersuchungen und praktische Erfahrungen .....	243
2.4.2 Modelluntersuchungen mit dichten und durchlässigen Bühnen .....	244
2.4.3 Schlussfolgerungen für weitere Untersuchungen .....	247
3. Modellexperimente mit durchlässigen und dichten Bühnen: Versuchsaufbau, Messtechnik und Versuchsprogramm .....	249
4. Schlüsselergebnisse der Modellexperimente .....	253
4.1 Strömungen ohne Seegang .....	253
4.2 Seegangsinduzierte Strömungen: Brandungsströmungsversuche .....	258
4.2.1 Vorbemerkung .....	258
4.2.2 Wasserstandsverhältnisse in Bühnenfeldern .....	258
4.2.3 Allgemeine Strömungsmuster .....	261
4.2.4 Beeinflussung von küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten .....	262
4.2.5 Ausbildung von Rippestömungen .....	265
4.2.6 Wirbelbildung an den Bühnenköpfen .....	265
4.3 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse .....	266
5. Naturuntersuchungen mit durchlässigen und dichten Bühnen .....	268
6. Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse .....	270
7. Zusammenfassung und Ausblick .....	273
8. Danksagung .....	274
9. Schriftenverzeichnis .....	274

## 1. Einleitung

Bühnen zählen weltweit zu den ältesten und dennoch sehr umstrittenen Küstenschutzbauwerken. Sie sind mit dem Ziel entwickelt worden, erosionsgefährdete Küstenabschnitte zu schützen. Sie sollen den Küstenlängstransport an sandigen Küsten verlangsamen, Sediment am Strand zurückhalten, unter günstigen Randbedingungen den Unterwasserstrand aufhohen und damit die Uferlinie seewärts verschieben.

Unter entwicklungspolitischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann Erosion nur in solchen Gebieten hingenommen werden, in denen das Land keiner direkten Nutzung unterliegt. In dicht besiedelten Küstenregionen versucht der Mensch daher Erosionserscheinungen zu steuern bzw. positiv zu beeinflussen. Die sich auf dem Vorstrand abspielenden Prozesse unterliegen zeitlichen und räumlichen Veränderungen. Sie sind äußerst komplex und eng miteinander verknüpft. Dies macht deutlich, warum deren Erforschung zu den schwierigsten Aufgaben des Küsteningenieurwesens zählt.

Folgende praxisrelevante Fragestellungen, die mit dem Bühnenbau an sandigen Brandungsküsten eng verknüpft sind, sind von Bedeutung: (i) *funktionale und konstruktive Planung von Bühnen*, (ii) *Beeinflussung der hydro- und morphodynamischen Wechselwirkungen an einem Küstenabschnitt mit Bühnen* und (iii) *wirtschaftliche Gesichtspunkte eines baulichen Eingriffs*.

Die Wirkungsweise von Bühnen sowie die komplexen hydro- und morphodynamischen Wechselwirkungen mit dem Bauwerk können nach dem derzeitigen Kenntnisstand noch nicht vollständig erklärt werden. Bis heute ist es nicht gelungen, zuverlässige physikalische

Grundlagen für einheitliche und allgemeingültige Bemessungsrichtlinien für die Planung und den Entwurf von Buhnen zu entwickeln.

Buhnen bzw. Buhnensysteme haben sich an vielen Küstenabschnitten gut bewährt. An anderen Stellen waren sie dagegen nur wenig wirksam bzw. verursachten sogar Schäden (z.B. durch Lee-Erosion). Das Hauptproblem bei der Buhnenanwendung liegt in der Unsicherheit der vorausschauenden Beurteilung ihrer Wirkung aufgrund der mangelnden Kenntnis der küstennahen Prozesse, in die die Buhnen eingreifen.

Allein an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns sind rd. 900 Buhnen installiert und stellen ein erhebliches Investitionsgut dar. Die Forderung, den Wirkmechanismus von Buhnen zu kennen und zu erforschen, ergibt sich aus der Notwendigkeit, neue Bauwerke zu planen sowie aus dem Sanierungsbedarf bereits bestehender Buhnensysteme.

Auf der Grundlage von hydraulischen Modellexperimenten mit fester Sohle, die die systematische und gezielte Untersuchung einzelner Einflussgrößen erlaubt, wird eine Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit der Bauwerke vorgenommen. Besondere Aufmerksamkeit wird der Beeinflussung der küstenparallelen Brandungsströmung land- und seewärts der Buhnenstreichlinie, der Ausbildung von Rippströmungen und der Lee-Erosion gewidmet. Die Laboruntersuchungen wurden bewusst eng an bestehende Naturverhältnisse gekoppelt, um die Übertragbarkeit der erzielten Modellergebnisse zu unterstützen und eine Abschätzung der morphologischen Reaktionen durch die Naturuntersuchungen zu ermöglichen.

Der nachfolgende Beitrag soll vor allem zum besseren Verständnis der funktionellen Wirkungsweise von dichten und durchlässigen Buhnen an Küsten mit geringem Gezeiten Einfluss beitragen. Neben den Strömungsverhältnissen und den dadurch induzierten morphologischen Wechselwirkungen in Buhnensystemen liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der ingenieurpraktischen Anwendbarkeit der Ergebnisse. Detaillierte Ergebnisse, die die Grundlage dieser Arbeit bilden, sind bei TRAMPENAU (2000) dokumentiert.

## 2. Buhnen im Küstenschutz: Hydrodynamische Grundlagen

### 2.1 Begriffsbestimmungen und Definitionen

Buhnen im Küsteningenieurwesen sind damm- oder wandartige Bauwerke, die i.d.R. normal zur Küstenlinie angeordnet sind und dem Schutz von Stränden, Vorländern, Längswerken und Fußsicherungen dienen. Bei der Untersuchung der funktionellen Wirkungsweise von Buhnen müssen grundsätzlich zwei Arten unterschieden werden: (i) *Strombuhnen* und (ii) *Strandbuhnen*.

*Strombuhnen* sollen Uferabschnitte mit oder ohne Verbindung zu Längswerken gegen Erosion durch starke Strömungen schützen. Sie werden auch an Tideküsten zum Schutz von Inselköpfen eingesetzt und sind als undurchlässige Bauwerke ausgeführt. Die Wirkungsweise von *Strandbuhnen* besteht darin, dass sie bei schrägem Wellenangriff ein Hindernis für die küstenparallele Strömung und damit auch für den küstenparallelen Sedimenttransport darstellen. Strandbuhnen haben die Aufgabe, einen möglichst breiten und hohen Strand zu akkumulieren bzw. ihn zu erhalten. Auf diese Weise sollen die einlaufenden Wellen, als Folge der geringen Wassertiefen des Vorstrandes, frühzeitig brechen, wodurch die mitgeführte Wellenenergie möglichst weit entfernt von der Uferlinie dissipiert wird.

Im Allgemeinen werden Pfahlbuhnen aus einzelnen, senkrecht zur Küstenlinie, in den Seegrund gerammten Holzpfählen hergestellt. Durch einen zuvor bestimmten Abstand die-

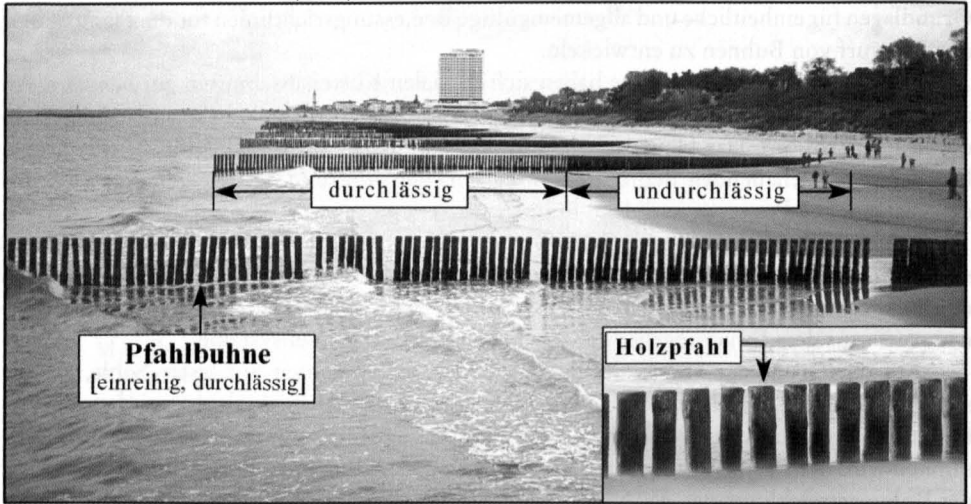


Abb. 1: Durchlässiges Bühnensystem im Untersuchungsgebiet Warnemünde/West (Ostsee) bei Niedrigwasser hervorgerufen durch ablandigen Wind

ser Pfähle untereinander kann die Bühnendurchlässigkeit angepasst werden, so dass sie als dichte bzw. durchlässige oder sogar als eine Kombination beider Durchlässigkeiten vorkommen können (Abb. 1).

Die wichtigsten Bühnenparameter und Bezeichnungen, die im Folgenden verwendet werden, sind in Abb. 2 dargestellt.

## 2.2 Küstennahe Prozesse und Strömungen: Überblick

Die Vorgänge auf dem Vorstrand sind nur unter Einbeziehung der hydrodynamischen, sedimentologischen und morphodynamischen Einflussgrößen vollständig zu erfassen. Auch wenn es gelingt, einzelne Einflussfaktoren positiv im Sinne des Küstenschutzes zu beeinflussen, so ist in der Natur niemals eine Einflussgröße allein für die Sedimenttransportprozesse verantwortlich. Erst die Gesamtheit der Einflussfaktoren und deren komplexe Wechselbeziehungen prägen die Morphologie einer Küste. Die morphologischen Umlagerungen stellen somit einen reaktiven Summenparameter verschiedenster Einflussgrößen dar (Abb. 3).

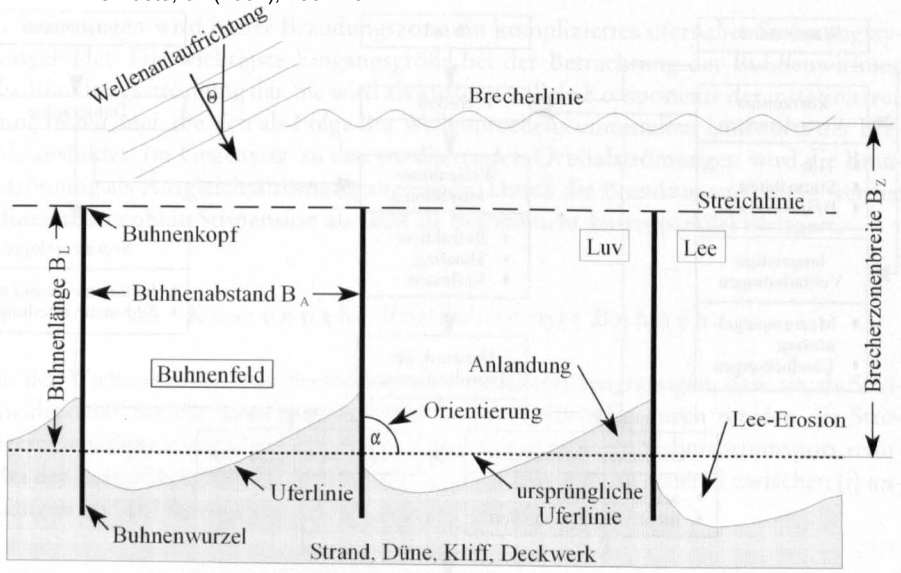
Die sich fortlaufend ändernden hydrodynamischen Randbedingungen, wie z.B. Tide und Seegang, bewirken Veränderungen der lokalen Morphologie. Dabei stehen die einwirkenden Kräfte und die morphologischen Prozesse in komplexen Wechselbeziehungen und bilden bei annähernd konstanten Verhältnissen ein dynamisches Gleichgewicht.

Die küstennahen Strömungen stellen eine wichtige Eingangsgröße bei der Ermittlung des Sedimenthaushaltes eines Küstenabschnittes dar. Sie können, je nach deren Ursache und Wirkung, in zwei Gruppen eingeteilt werden:

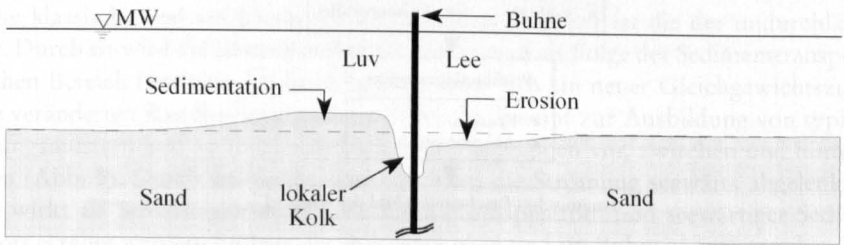
- (i) *seegangsinduzierte Strömungen* und
- (ii) *nicht seegangsinduzierte Strömungen* (Abb. 4).

Die nicht seegangsinduzierten Strömungen spielen, aufgrund der vergleichsweise geringen Strömungsgeschwindigkeiten, nur eine untergeordnete Rolle. Durch die seegangsindu-

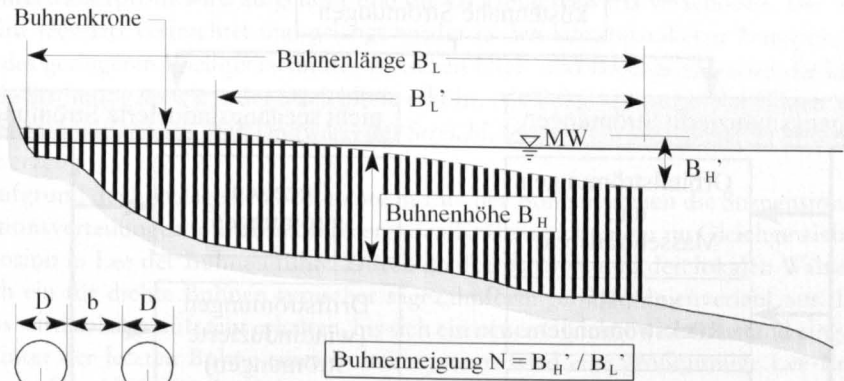




**a Grundriß**



**b Querschnitt**



**c Längsschnitt**

Durchlässigkeit (P)

$$P = b / e = b / (D + b)$$

Abb. 2: Bezeichnungen und Definitionen im Bühnensystem (schematisch)

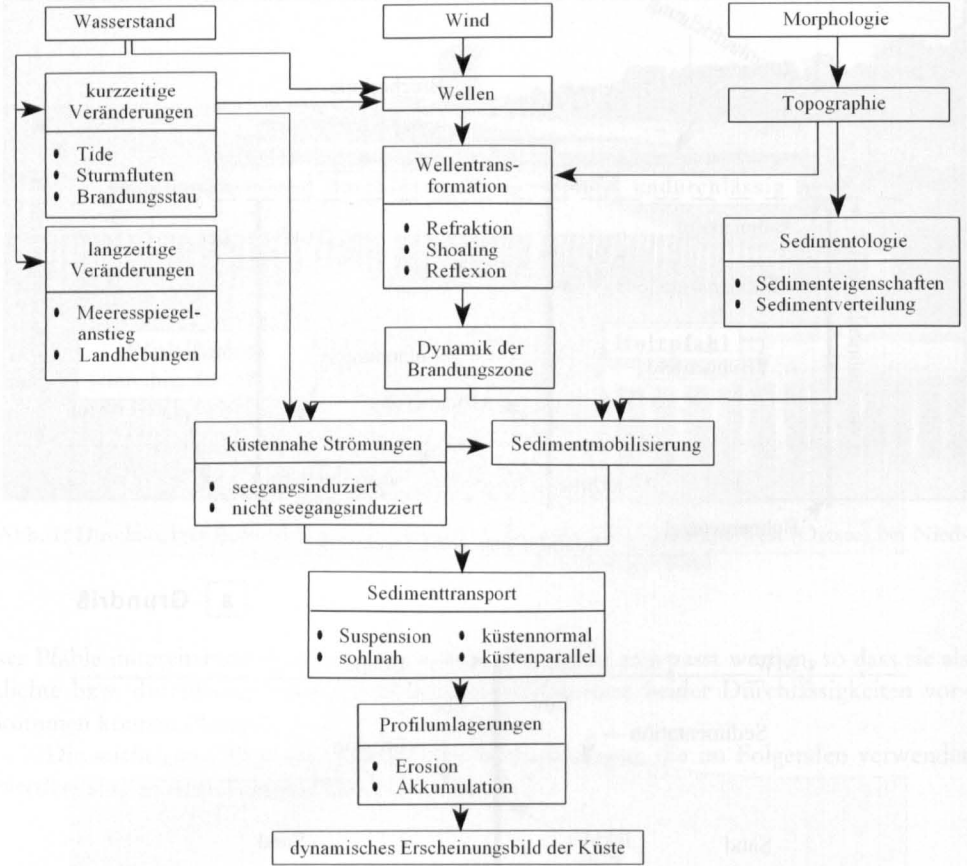


Abb. 3: Einflussfaktoren und deren Wechselbeziehungen bei der Küstenentwicklung

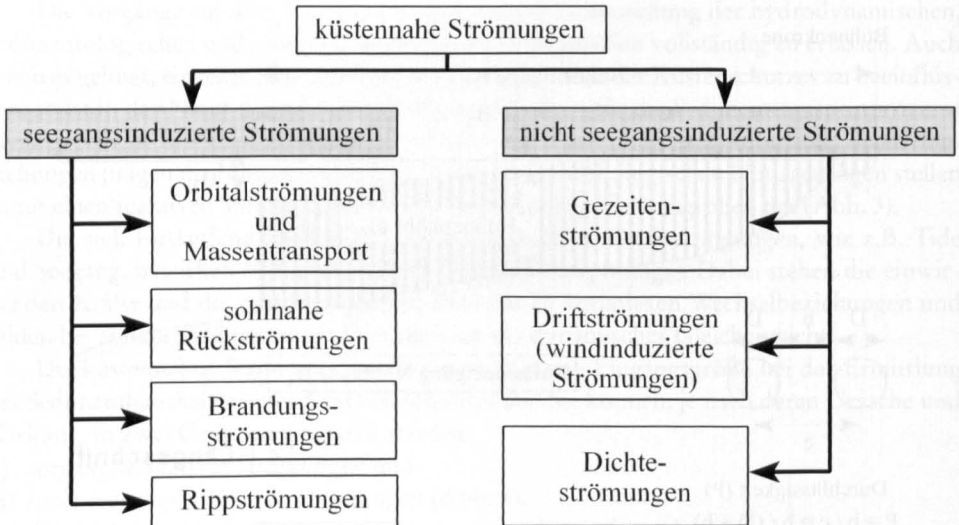


Abb. 4: Einteilung von küstennahen Strömungen nach deren Ursache

zierten Strömungen wird in der Brandungszone ein kompliziertes ufernahes Strömungssystem ausgebildet. Die wichtigste Eingangsgröße bei der Betrachtung der Bühnenwirkung stellt die Brandungsströmung dar. Sie wird als küstenparallele Komponente der instationären Strömung bezeichnet, die sich als Folge des Wellenbrechens unmittelbar landwärts der Brecherlinie ausbildet. Im Gegensatz zu den oszillierenden Orbitalströmungen wird die Brandungsströmung als Ausgleichsströmung angesehen. Durch die Brandungsströmung werden die Sedimente sowohl in Suspension als auch als Bodenfracht küstenparallel verlagert.

### 2.3 Küstennahe Prozesse mit Bühnen

Bei der Wirkungsweise von Strandbühnen wird davon ausgegangen, dass sie als Strömungswiderstand für die küstenparallele Strömung dienen. Hierdurch werden die Strömungsgeschwindigkeit und dementsprechend der küstenparallele Sedimenttransport reduziert. Bei der Betrachtung der Wirkungsweise dieser Bühnen muss generell zwischen (i) *undurchlässigen* und (ii) *durchlässigen Bühnen* unterschieden werden.

#### (i) undurchlässige Bühnen

Die klassische und am häufigsten angewendete Bauweise ist die der undurchlässigen Bühne. Durch sie wird die küstenparallele Strömung und als Folge der Sedimenttransport im ufernahen Bereich blockiert. Dadurch bedingt muss sich ein neuer Gleichgewichtszustand für die veränderten Randbedingungen einstellen. Es kommt zur Ausbildung von typischen Strömungsmustern und zu morphologischen Umlagerungen vor, zwischen und hinter den Bühnen (Abb. 5). Durch das dichte Bauwerk wird die Strömung seewärts abgelenkt. Die Bühne wirkt als Strömungsleitwand, wodurch ein Rippstrom und seewärtiger Sedimenttransport erzeugt werden. Entlang der Bühnenflanken und am Bühnenkopf entstehen lokale Kolke.

Ein Teil der in Suspension befindlichen Sedimente wird auf der Luv-Seite abgelagert. Das Unterwasserprofil wird aufgehöhht und die Uferlinie seewärts verschoben. Der andere Teil wird seewärts verfrachtet und gelangt wieder in den küstenparallelen Transport. Aufgrund des geringeren Fließquerschnittes zwischen Ufer- und Brecherlinie wird die küstenparallele Strömung seewärts der Streichlinie erhöht. Als Folge der ungleichmäßigen Verteilung der Strömungen see- und landwärts der Streichlinie wird ein kompliziertes Strömungsmuster erzeugt.

Aufgrund der abgelagerten Sedimente in Luv der Bühnen stehen die Suspensionskonzentrationsverteilungen und die mobilisierenden Kräften nicht mehr im Gleichgewicht, was zur Erosion in Lee der Bühnen führt. Durch die Rippströme und den lokalen Walzen bildet sich ein für dichte Bühnen typischer sägezahnförmiger Uferlinienverlauf aus. Dieser Prozess wird solange aufrecht erhalten, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Hinter der letzten Bühne eines Bühnensystems wird eine großräumige Lee-Erosion hervorgerufen. Allein hierdurch können sich die positiven Wirkungen eines Bühnensystems aufheben.

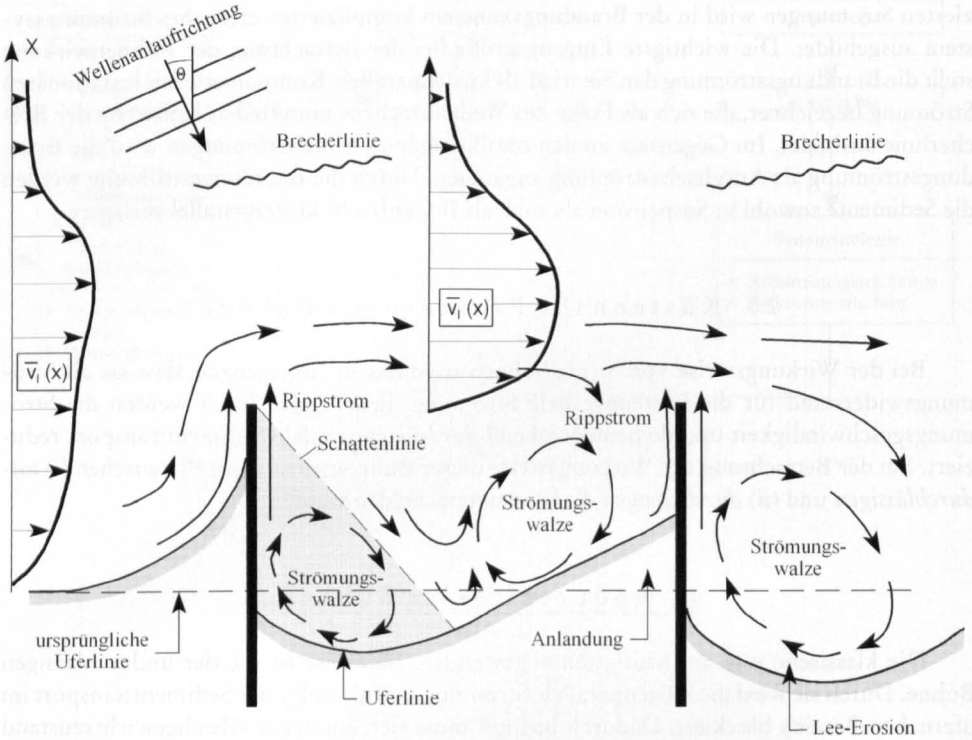


Abb. 5: Strömungsverhältnisse und Uferlinienverlauf in einem Buhnenfeld mit undurchlässigen Buhnen (schematisch)

### (ii) durchlässige Buhnen

Im Gegensatz dazu versprechen durchlässige Buhnen erhebliche Vorteile (Abb. 6):

- (i) Aufgrund der Durchlässigkeit wird ein gewisser Anteil an küstenparalleler Strömung und damit Sedimenttransport zugelassen. Hierdurch wird das Verhältnis zwischen der Suspensionskonzentrationsverteilung und den erosiven Kräften in Lee der Buhnen wesentlich verbessert.
- (ii) Als Folge der küstenparallelen Strömung im Buhnenfeld können Strömungswalzen und Rippströme vermieden werden.
- (iii) Wasserspiegelunterschiede bzw. Gefälleströmungen im Buhnenfeld werden reduziert.
- (iv) Die Strömungsgeschwindigkeiten seewärts der Streichlinie werden sich nicht in dem Maße erhöhen wie bei dichten Buhnen.
- (v) Kolke an den Buhnenflanken und im Bereich der Buhnenköpfe werden reduziert.
- (vi) Reflexions- und Diffraktionseffekte am Bauwerk werden erheblich reduziert.
- (vii) Aufgrund der günstigeren Strömungsverhältnisse im Buhnenfeld wird das Unterwasserprofil aufgebaut; die Wellen brechen frühzeitiger, und die Wellenenergie wird weiter seewärts von der Uferlinie dissipiert.
- (viii) Die Uferlinie wird sich linear zwischen den Buhnen ausbilden, wodurch das Landschaftsbild in seiner ursprünglichen Form erhalten bleibt.
- (ix) Durchlässige Buhnen sind kostengünstiger in ihrer Herstellung verglichen mit dichten Buhnen.

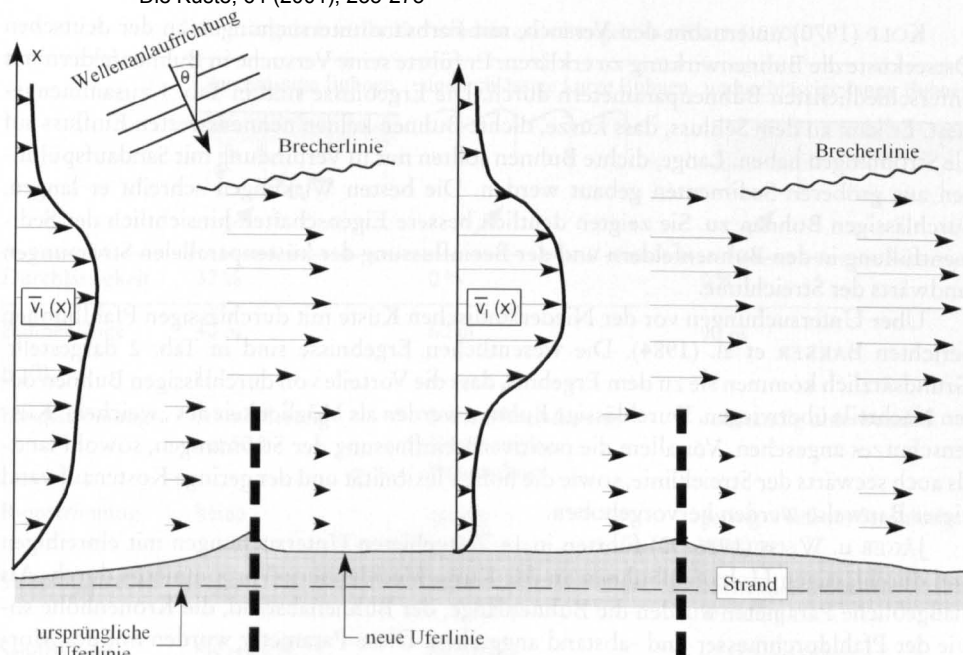


Abb. 6: Strömungsverhältnisse und Uferlinienverlauf in einem Bühnenfeld mit durchlässigen Bühnen (schematisch)

## 2.4 Wirkungsweise von dichten und durchlässigen Bühnen: Analyse des Wissensstandes

### 2.4.1 Naturuntersuchungen und praktische Erfahrungen

Bühnen wurden als erstes im Flussbau zur Stromregulierung mit guten Erfolgen eingesetzt. Ihr Wirkungsmechanismus wurde ohne entsprechende Anpassungen auf Küstengebiete übertragen. Aufgrund der erheblich komplexeren hydrodynamischen Verhältnisse im küstennahen Bereich führte diese Vorgehensweise jedoch nicht zum gewünschten Erfolg. Bis zur Jahrhundertwende wurde versucht, allein durch Naturbeobachtungen die Ursachen und Wirkungen der Küstenveränderungen durch Bühnen zu erklären. Zu Beginn des 20. Jh. wurde dazu übergegangen, sich systematischer mit Bühnen auseinander zu setzen. Grundlegende Probleme, wie die Sandverfügbarkeit, die Sedimenttransportprozesse, der Einfluss von Wellen, Sturmfluten und von Bauwerksparametern, wurden erkannt und formuliert. Der Erfolg von Bühnen wurde im Wesentlichen aus deren Standsicherheit und Lebensdauer abgeleitet.

Durch eine sich vergrößernde Anzahl von Untersuchungen über die Küstenmorphologie nach 1940 wuchs das Verständnis für die sich auf dem Vorstrand abspielenden Prozesse erheblich. Der größte Mangel bei der Anwendung von Bühnen lag allerdings in der Übertragung der Wirkungsweise auf andere Küstenabschnitte und dem Versuch der Entwicklung eines universellen Küstenschutzbauwerkes, mit dem es möglich sein sollte, an jeder Küste gleich gute Ergebnisse zu erzielen. Aus den Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte wurde immer deutlicher, dass die Bühnenproblematik nicht als ein abgeschlossenes Teilgebiet der Küstenforschung betrachtet werden durfte.



KOLP (1970) unternahm den Versuch, mit Farbsanduntersuchungen an der deutschen Ostseeküste die Bühnenwirkung zu erklären. Er führte seine Versuche in Bühnenfeldern mit unterschiedlichsten Bühnenparametern durch. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Er kam zu dem Schluss, dass kurze, dichte Bühnen keinen nennenswerten Einfluss auf die Strömungen haben. Lange, dichte Bühnen sollten nur in Verbindung mit Sandaufspülungen aus größeren Sedimenten gebaut werden. Die besten Wirkungen schreibt er langen, durchlässigen Bühnen zu. Sie zeigten deutlich bessere Eigenschaften hinsichtlich der Sedimentfüllung in den Bühnenfeldern und der Beeinflussung der küstenparallelen Strömungen landwärts der Streichlinie.

Über Untersuchungen vor der Niederländischen Küste mit durchlässigen Pfahlbühnen berichten BAKKER et al. (1984). Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tab. 2 dargestellt. Grundsätzlich kommen sie zu dem Ergebnis, dass die Vorteile von durchlässigen Bühnen deren Nachteile überwiegen. Durchlässige Bühnen werden als Möglichkeit des „weichen“ Küstenschutzes angesehen. Vor allem die positive Beeinflussung der Strömungen, sowohl land- als auch seewärts der Streichlinie, sowie die hohe Flexibilität und der geringe Kostenaufwand dieser Bauweise werden hervorgehoben.

JÄGER u. WEISS (1986/90) führten in 14 Testgebieten Untersuchungen mit einreihigen und durchlässigen Holzpfahlbühnen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns durch. Als maßgebliche Parameter wurden die Bühnenlänge, der Bühnenabstand, die Kronenhöhe sowie der Pfahldurchmesser und -abstand angesehen. Diese Parameter wurden mit der Morphologie und der Wellenbelastung in Beziehung gesetzt. Aus den Ergebnissen entwickelte WEISS (1991) Empfehlungen für den Entwurf dieses Bühnentyps, die auch heute noch als Bemessungsgrundlage dienen (EAK, 1993).

Sie kommen zu dem Ergebnis, dass Bühnen den Rückgang der Küste nicht dauerhaft verhindern können, wohl aber an Küsten mit durchschnittlich negativer Sandbilanz Erfolge in der Uferlinienstabilität nachweisbar sind. Danach besteht ein Bühnensystem aus einem relativ dichten Zentrum und aus den im Einfluss schrittweise zurücktretenden Abschlüssen an den Rändern. Es wird vorgeschlagen, eine gestaffelte Durchlässigkeitserweiterung der Bühnen bzw. eine Erhöhung der Bühnenabstände an den Rändern vorzusehen, wodurch die Lee-Erosion vermieden werden soll.

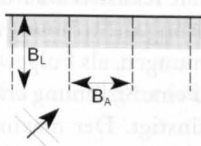
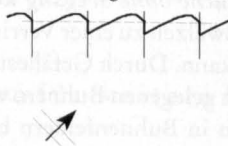
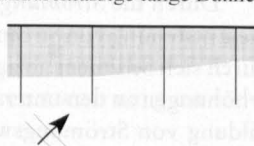
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass noch erhebliche Unsicherheiten bei der Beurteilung der Bühnenwirkung, wie z.B. die große Variation von Konstruktionsparametern (Bühnenlänge, Bühnenabstand, Kronenhöhe und Durchlässigkeit) herrschen. Die Naturuntersuchungen lassen aber erkennen, dass durchlässige Bühnen generelle Vorteile hinsichtlich der Strömungsbbeeinflussung, der Kolkbildung und der Lee-Erosion aufweisen. Es zeigt sich, dass die Schwierigkeiten bei der Planung von Bühnen eindeutig im funktionellen und weniger im konstruktiven Bereich liegen.

#### 2.4.2 Modelluntersuchungen mit dichten und durchlässigen Bühnen

Mit der Erforschung der Wirkungsweise von Bühnen durch Laborexperimente wurde Anfang des 20. Jh. begonnen. Der Schwerpunkt lag vor allem auf der Untersuchung von dichten Bühnen.

Obwohl die Grundlagenuntersuchungen von KRESSNER (1928) mit beweglicher Sohle durchgeführt wurden und deshalb vielen Vereinfachungen unterliegen, zeichnen sich seine Ergebnisse durch ein erstaunliches Verständnis für die küstennahen Prozesse aus. Insbeson-

Tab. 1: Ergebnisse der Farbsanduntersuchungen von KOLP (1970)

	durchlässige Buhnen	undurchlässige kurze Buhnen	undurchlässige lange Buhnen
			
Durchlässigkeit	37 %	0 %	0 %
Buhnenlänge	40 m	60 m	90 m
$B_A/B_L$	1	2	1
Längsströmung	Abminderung auf 50 %	keine Abminderung Erhöhung vor Buhnenkopf	vollständig unterbunden
Rippströmung	keine	gering	gering – Teil des Strömungssystems
Strömungszellen	keine	keine	vorhanden – positive Wirkung
Sandfüllung	bis etwa $B_L/2$ günstig	nachteilig – Neigung zur Vergrößerung der Sedimente	ungleichmäßig – zur Buhnensystemmitte hin abnehmend
Uferlinienverlauf	linear	sägezahnförmig	linear
Lee-Erosion	keine Angaben	keine Angaben	vorhanden
Beurteilung	gute Wirkung	schlechte Wirkung	gute Wirkung in Verbindung mit Sandaufspülungen

Tab. 2: Ergebnisse von Naturuntersuchungen mit durchlässigen Buhnen an der Niederländischen Küste (BAKKER et al., 1984)

Vorteile	Nachteile	Gegenmaßnahmen
<ul style="list-style-type: none"> <li>Abminderung der Küstenlängsströmung</li> <li>gleichmäßigere Geschwindigkeitsverteilung über dem Profil</li> <li>weniger Turbulenz im Bereich der Buhnenköpfe</li> <li>flexible Konstruktion; schnelle Anpassung an sich verändernde Randbedingungen im Profil</li> <li>kontinuierlicher Uferlinienverlauf</li> <li>geringe Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auswaschen der Pfähle im Bereich der Buhnenköpfe</li> <li>Umspülung der Buhnenwurzel am Dünenfuß</li> <li>Ausbildung von Rippströmungen</li> <li>Abminderung der Durchlässigkeit durch Muscheln im seewärtigen Bereich; dadurch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten im inneren Bereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sorgfältige Analyse von morphologischen Veränderungen</li> <li>ausreichende Einbindung der Buhnenwurzel in den Strand</li> <li>regelmäßige Entfernung von Muschelbewuchs</li> <li>Beachtung der Lee-Erosion</li> <li>Beachtung von Prielen in der Nähe von Buhnen</li> </ul>

dere die Erkenntnis, dass sich die Wirkungsweisen von Buhnen bei Strömungsversuchen mit und ohne Seegang grundsätzlich voneinander unterscheiden, ist bemerkenswert.

Durch die *Strömungsversuche ohne Seegang* kommt KRESSNER zu dem Ergebnis, dass die Entstehung von Strömungswalzen zu einer Verringerung an Strömungsenergie führt, wodurch sich Sediment ablagern kann. Durch Gefälleströmungen, als Folge von Wasserspiegelerhöhungen an den unterstrom gelegenen Buhnen, wird eine Strömung erzeugt, die die Ausbildung von Strömungswalzen in Buhnenfeldern begünstigt. Der maximal zulässige Buhnenabstand wird mit  $B_{A(\max)} = 5 B_L$  angegeben (Abb. 7).

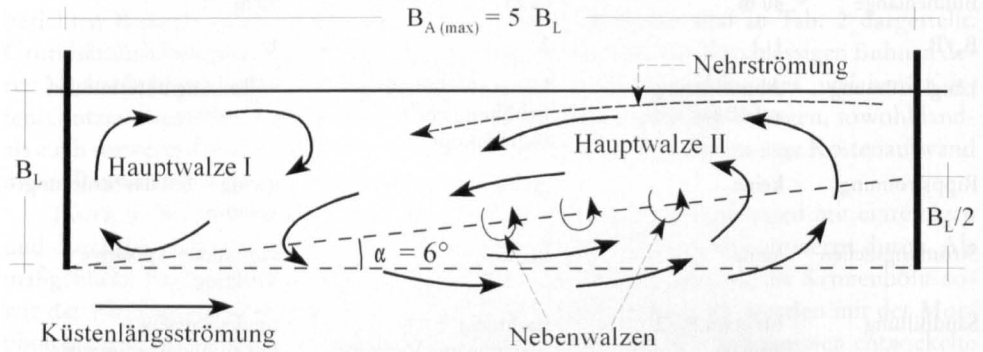


Abb. 7: Strömungsbild erzeugt durch Strömungen ohne Seegang nach KRESSNER (1928)

Die Strömungsverhältnisse bei den *Versuchen mit Seegang* waren erheblich komplizierter. Vor allem die durch die unterstrom gelegenen Buhnen hervorgerufenen Wasserspiegelveränderungen machte KRESSNER hierfür verantwortlich. Durch sie wurden die Strömungswalzen bedeutend verstärkt. Dieses Ergebnis ist besonders bemerkenswert, da in der Folgezeit den Wasserstandsverhältnissen in Buhnenfeldern keine Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Den optimalen Buhnenabstand gibt KRESSNER mit dem 2 bis 3-fachen der Buhnenlänge an. Trotz vieler Vereinfachungen, Modell- und Maßstabeffekten sind die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen von KRESSNER qualitativ sehr wertvoll.

FLEMING (1990) ist es gelungen, gesicherte Aussagen über die Beeinflussung der Brandungsströmung durch hohe und getauchte Buhnen für die Bereiche land- und seewärts der Streichlinie zu erarbeiten. Er kommt zu dem Schluss, dass durchlässige Buhnen grundsätzliche Vorteile gegenüber dichten Buhnen besitzen. Als übergeordnete Ergebnisse mit dichten Buhnen wurden eindeutig (i) die *Ausbildung von Strömungswalzen landwärts der Streichlinie*, (ii) eine *Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten seewärts der Streichlinie*, (iii) die *Entstehung von Rippströmungen in Luv der Buhnen*, (iv) die *Ausbildung von Kolken an den Buhnenköpfen* und (v) die *Lee-Erosion* nachgewiesen.

Die Untersuchungen von BAKKER et al. (1984) stellen den wichtigsten Beitrag zur Erforschung der Wirksamkeit von durchlässigen Buhnen dar. Sie heben sich vor allem durch eine sehr gute Systematik von den bisherigen Untersuchungen ab. Sie gingen von der Vorstellung aus, dass im Vergleich zu dichten Buhnen, die die gesamte Küstenlängsströmung vom Strand fern halten und damit den Sedimenttransport verhindern, durchlässige Buhnen lediglich als Dämpfungsmaßnahme wirken.

Sie konnten nachweisen, dass durchlässige Buhnen vor allem hinsichtlich (i) der *Beeinflussung der küstenparallelen Strömungen land- und seewärts der Streichlinie*, (ii) der *Redu-*

zierung von Rippströmungen in Luv der Buhnen, (iii) einer Abminderung der Kolke im Bereich der Buhnenköpfe und (iv) der Reduzierung der Lee-Erosion deutliche Vorteile gegenüber dichten Buhnen aufweisen.

### 2.4.3 Schlussfolgerungen für weitere Untersuchungen

Durch die Laborexperimente wurde eine Vielzahl von Einzelparametern untersucht. Grundlegende Zusammenhänge in Bezug auf die Buhnenlänge, den Buhnenabstand, die Buhnenorientierung zur Uferlinie, die Durchlässigkeit, die Strandneigung und die Strömungsvorgänge in Buhnenfeldern wurden qualitativ ermittelt. Eine Verifikation durch entsprechende Naturuntersuchungen blieb jedoch aus. Des Weiteren litten die Laborexperimente in der Vergangenheit unter mangelnder Systematik.

Trotz aller Mängel haben die bisherigen Untersuchungen gezeigt, dass durchlässige Buhnen Vorteile gegenüber dichten Buhnen aufweisen. Sie können wie folgt zusammengefasst werden: (i) verbesserte Auswirkung auf die küstenparallelen Strömungen land- und seewärts der Streichlinie, (ii) die Reduzierung von Rippströmen in Luv der Buhnen, (iii) die Abminderung der Kolke im Bereich der Buhnenköpfe, (iv) die Reduzierung der Lee-Erosion und (v) die geringeren Kosten beim Buhnenbau. Hieraus abgeleitet ergeben sich folgende praxisrelevante Fragestellungen für weitere Untersuchungen:

- (i) Erarbeitung von Strömungsmustern in Abhängigkeit von der Buhnendurchlässigkeit für die Beurteilung der großräumigen Strömungsverhältnisse.
- (ii) Ermittlung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen der Buhnendurchlässigkeit und der Strömungsreduktion land- und seewärts der Streichlinie.
- (iii) Ermittlung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen der Buhnendurchlässigkeit und der Entstehung von Rippströmungen.
- (iv) Untersuchungen zur Entstehung von lokalen Wirbeln im unmittelbaren Einflussbereich der Buhnenköpfe hinsichtlich der Ausbildung von Kolken.
- (v) Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstandsunterschieden auf das Strömungsgeschehen in Buhnenfeldern in Abhängigkeit von der Buhnendurchlässigkeit.

Um die Unterschiede bei der hydraulischen Wirkungsweise von dichten und durchlässigen Buhnen besser verstehen zu können, sollte sich bei weiteren Forschungsarbeiten vor allem auf die systematische Untersuchung der Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse in Buhnenfeldern konzentriert werden. Dies wird auch dazu führen eine Grenze der Buhnendurchlässigkeit zu ermitteln, ab der das Bauwerk in hydraulischer Hinsicht als dicht oder als durchlässig zu beurteilen ist.

Die Laborexperimente von KRESSNER (1928) und FLEMING (1990) haben gezeigt, dass es, aufgrund der vielen Modell- und Maßstabeffekte, von Vorteil ist, die Versuche mit fester Sohle durchzuführen. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist es im Labor nicht möglich, eine dreidimensionale Nachbildung aller Sedimenttransportvorgänge und die quantitative Übertragung der Ergebnisse auf die Natur vorzunehmen (KAMPHUIS, 1975).

Hauptziel der nachfolgenden Betrachtungen ist es, das Verständnis für die an sandigen und mit durchlässigen Buhnen geschützten Küstenabschnitten ablaufenden Prozesse weiter zu verbessern. Hierfür ist es notwendig, eine streng systematische Erforschung einiger weniger Parameter vorzunehmen, wobei sowohl der Zustand einer unverbauten Küste (als Referenzzustand) als auch der Zustand mit dichten Buhnen unbedingt in die Untersuchungen mit einzubeziehen sind. Der Schwerpunkt bei den Modellversuchen liegt auf den Strömungsprozessen, die als Transportmechanismus letztendlich die Ursache für die langfristi-

gen morphologischen Umlagerungen darstellen. Hierzu werden zunächst Einzelprozesse untersucht, um anschließend deren Einfluss auf das Gesamtgeschehen beurteilen zu können.

Durch die Erarbeitung charakteristischer Strömungsmuster für einzelne Buhndurchlässigkeiten werden die Strömungsprozesse in Buhnenfeldern bzw. am Abschluss eines Buhnenystems (Lee-Erosion) untersucht und das großräumige Strömungsverhalten in Buhnenfeldern beurteilt. Hieraus können dann Rückschlüsse auf morphologische Veränderungen gezogen werden.

Im Bereich der Buhnenköpfe, an der Grenzschicht zwischen hohen und niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten, bilden sich kleinräumige Wirbel mit zum Teil hohen Strömungsgeschwindigkeiten aus. Die Wirbel haben einen erheblichen Einfluss auf den Prozess der Sedimentmobilisierung und der Kolkbildung im Bereich der Buhnenköpfe. Deren Entstehung und räumliche Ausdehnung sind nur unzureichend bekannt.

Rippströmungen können unter bestimmten Randbedingungen das Durchströmen von Buhnenfeldern blockieren, obwohl das Bauwerk eine gewisse Durchlässigkeit aufweist. Der Zusammenhang zwischen der Buhndurchlässigkeit und der Ausbildung von Rippströmungen ist noch weitgehend unbekannt. Auch Wasserstandsveränderungen in Buhnenfeldern, die Gefälleströmungen hervorrufen, können einen maßgeblichen Einfluss auf das Strömungsregime in Buhnenfeldern haben und müssen als antreibende Kräfte für Strömungen angesehen werden. Die Vorgehensweise bei den nachfolgenden Laborexperimenten ist in Abb. 8 dargestellt.

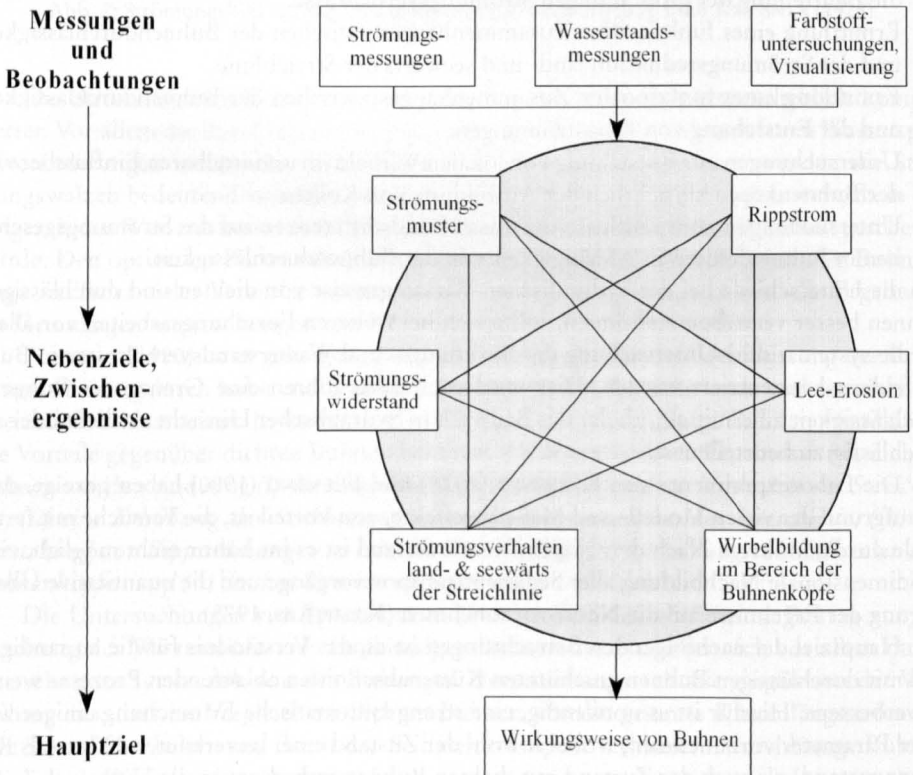


Abb. 8: Vorgehensweise bei der Datenanalyse, Haupt- u. Nebenziele sowie Wechselwirkungen einzelner Teilprozesse bei Modelluntersuchungen mit Strömungen und fester Sohle



Die Küste, 64 (2001), 235-275  
 3. Modellexperimente mit durchlässigen und  
 dichten Bühnen: Versuchsaufbau, Messtechnik  
 und Versuchsprogramm

Die nachfolgend auszugsweise wiedergegebenen Modelluntersuchungen sind in Eigenfinanzierung des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau (LWI) der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt worden. Hauptziel der Untersuchungen war die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für die Entwicklung von Empfehlungen für die Planung und den Bau durchlässiger, einreihiger Holzpfahlbühnen für Küstenabschnitte mit geringem Gezeiteinfluss.

Unter Anwendung von hydraulischen Laborexperimenten mit fester Sohle wurden charakteristische Strömungsmuster in Bühnenfeldern identifiziert und zur Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit der Bauwerke herangezogen. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei folgenden Aspekten gewidmet: (i) der *Beeinflussung der küstenparallelen Strömung land- und seewärts der Bühnenstreichlinie*, (ii) der *Ausbildung von Rippströmungen entlang der Bühnenflanken*, (iii) dem *nachteiligen Effekt der Lee-Erosion* und (iv) den *Wasserstandsverhältnissen in Bühnenfeldern*. Die Laboruntersuchungen wurden bewusst eng an bestehende Naturverhältnisse vor Warnemünde angelehnt, um die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse zumindest qualitativ zu gewährleisten.

Die Laborexperimente wurden in zwei Phasen durchgeführt: Phase I – Strömungsversuche ohne Seegang und Phase II – Versuche mit seegangsinduzierten Strömungen. Hierdurch können grundlegende Zusammenhänge zwischen (i) der *Bühnendurchlässigkeit und den Strömungsverhältnissen* und (ii) den *Strömungs- und Wasserstandsverhältnissen* erarbeitet werden.

Unter Berücksichtigung der Größe des nachzubildenden Untersuchungsgebietes, der Grenzen der Mess- und Modelltechnik (Modell- und Maßstabeffekte) sowie des FROUDschen Modellgesetzes, wurde ein dreidimensionales physikalisches Modell im geometrischen Maßstab von  $1:N_L = 1:20$  errichtet (Abb. 9). Auf der Grundfläche wurde ein repräsentatives Strandprofil, wie es sich im Zeitraum vor dem Bau des Bühnensystems vor Warnemünde/West ausgebildet hatte, eingebaut (Abb. 10).

Die Erzeugung von Längsströmungen ohne Seegang (*Phase I*) wurde über den Wasserstand geregelt. Durch den Einsatz von Strömungsleitblechen im Einlaufbereich sowie einer Strömungsleitwand wurden die Strömungsverhältnisse optimiert (Abb. 9).

Für die Untersuchungen mit seegangsinduzierten Strömungen (*Phase II*) stand eine Wellenklappenmaschine mit einer Schildlänge von 10 m zur Verfügung. Zur Vermeidung einer unkontrollierten Ausbreitung der Wellenenergie an den Rändern, wurden zwei Leitwände vorgesehen. Für eine stabile Wellenausbreitung vor der Wellenmaschine wurden ebenfalls Leitbleche eingesetzt. Die Modellbühnen wurden aus einzelnen Rundstäben mit einem Durchmesser von 10 mm hergestellt (Abb. 11). Als Geräteträger, mit deren Hilfe die Hauptmessungen durchgeführt wurden, stand eine küstenlängs verfahrbare Messbrücke zur Verfügung, an der acht Messpositionen ( $Y_0$  bis  $Y_7$ ) eingerichtet wurden. Zusätzlich wurden stationäre Wellenpegel im Modell vorgesehen.

Jede Messpositionen an der Messbrücke wurde mit einem Wellenpegel, einer Strömungssonde und einer Injektionsvorrichtung für Farbstoff ausgestattet (Abb. 12). Durch die Einleitung von Farbstoff war es möglich, die aufgezeichneten Strömungssignale visuell zu kontrollieren, und die aus den aufgezeichneten Daten gewonnen Erkenntnisse weiter zu verdichten. Die Dauer der Strömungs- und Wellenmessung in einem Messprofil wurde nach umfangreichen Vorversuchen auf  $\Delta t = 60$  s festgelegt.

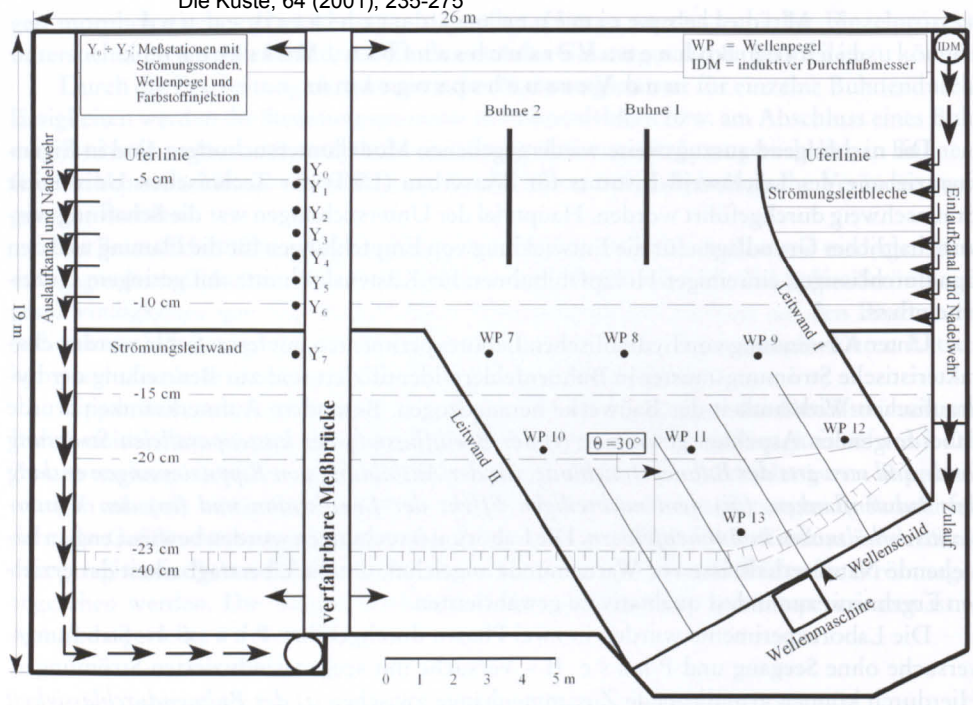


Abb. 9: Wellenbecken mit Einbauten für die Versuche mit seegangsinduzierter Strömung (Wellenanlenkung:  $\theta = 30^\circ$ ; exemplarisch)

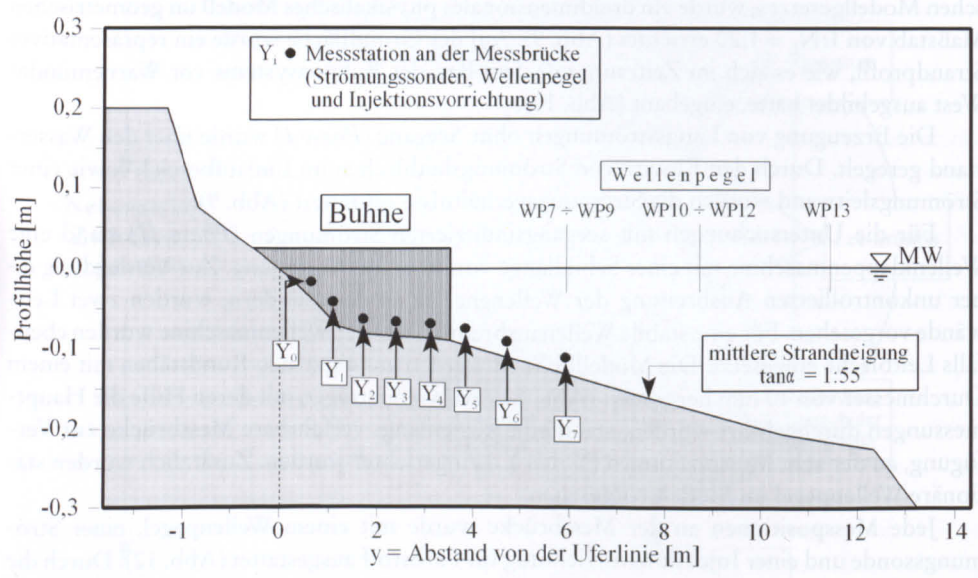


Abb. 10: Querschnitt des Modellprofils mit Messpositionen

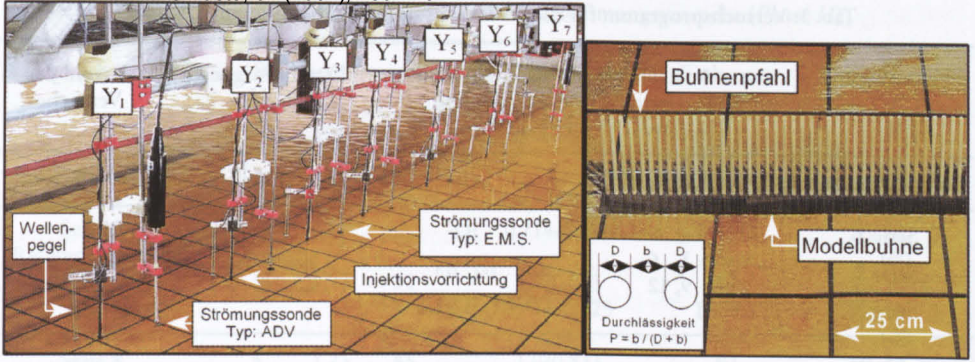


Abb. 11: Verfahrbare Messbrücke mit den Messpositionen (links) und Modellbühne mit einer Durchlässigkeit von  $P = 50\%$  (rechts)

In *Phase I* (gleichförmige Strömung ohne Wellen) wurden in insgesamt 76 Einzelversuchen systematisch die Anströmgeschwindigkeit, die Buhndurchlässigkeit und die Buhnenanzahl variiert (Tab. 3). Als Referenzzustand dienten die Ergebnisse aus den Versuchen ohne Einbauten ( $P = 100\%$ ). Die vier Anströmgeschwindigkeiten wurden aus den Naturverhältnissen vor Warnemünde abgeleitet (DETTE u. TRAMPENAU, 1998).

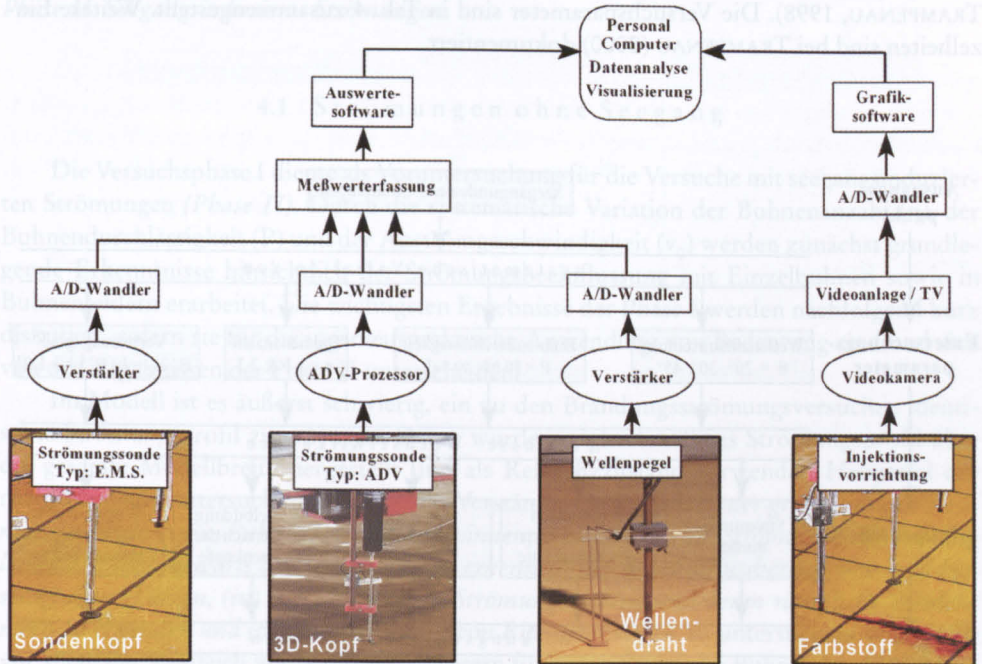


Abb. 12: Messgeräte und Ablaufdiagramm der Messdatenerfassung

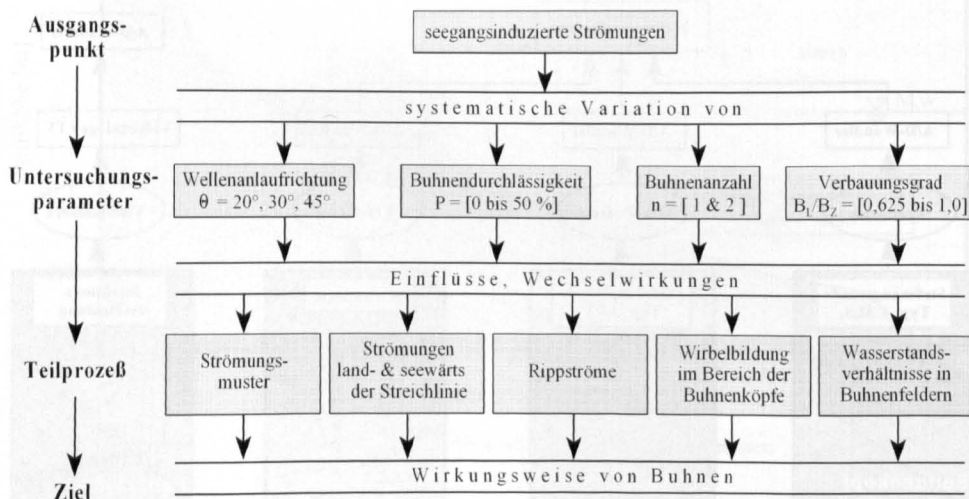


Tab. 3: Versuchsprogramm für die Strömungsversuche ohne Seegang (*Phase I*)

Versuchsserie	Anström- geschwindigkeit $v_0$ [cm/s]	Einbauten Buhne	Durchlässigkeit P [%]	Anzahl der Versuche
Referenzzustand	3, 6, 9, 12	keine	100	4
Serie 1	–	B2		
Serie 2	3, 6, 9, 12	B2, B3	50, 40, 30, 20, 10, 0	24
Serie 3		B1, B2, B3		

In *Phase II* (Brandungsströmung) haben vor allem die Wellenhöhe ( $H$ ) und Wellenanlauf-  
richtung ( $\Theta$ ) maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung der Brandungsströmung. Weitere  
Einflüsse, die sich aus den natürlichen Verhältnissen ableiten, sind der Wasserstand, die  
Strandneigung und die Breite der Brandungszone. Einflussparameter, die sich aus dem Ein-  
bau von Buhnen ergeben, sind die Buhndurchlässigkeit sowie das Verhältnis von Buhnen-  
abstand zur Buhnenlänge ( $B_A/B_L$ ) und von Buhnenlänge zur Brandungszonenbreite ( $B_L/B_Z$ ).  
Alle Parameter zeitgleich zu untersuchen ist unmöglich, so dass sich nachfolgend auf die  
wichtigsten Größen beschränkt wird (Abb. 13).

Die Definition des Parameters  $B_L/B_Z$  wird im Folgenden als der Verbauungsgrad des  
Fließquerschnittes der Brandungsströmung definiert, obwohl diese Bezeichnung für durch-  
lässige Buhnen nicht zutreffend ist. Die Buhndurchlässigkeit wird per Definition hierbei  
außer Acht gelassen. Ausgangspunkt bei der Wahl der Eingangsparameter waren For-  
schungsergebnisse über die natürlichen Seegangsverhältnisse vor Warnemünde (DETTE u.  
TRAMPENAU, 1998). Die Versuchsparameter sind in Tab. 4 zusammengestellt. Weitere Ein-  
zelheiten sind bei TRAMPENAU (2000) dokumentiert.

Abb. 13: Ablaufdiagramm für die Versuche mit Brandungsströmung (*Phase II*)

Die Küste, 64 (2001), 235-275  
 Tab. 4: Versuchsprogramm für die Brandungsströmungsversuche (*Phase II*)

Versuchsserie	Wellenparameter			Verbauungsgrad $B_L/B_Z$ [-]	Einbauten Buhne	Durchlässigkeit P [%]
	H [cm]	T [s]	$\Theta$ [°]			
Referenzzustand				–	keine	100
Serie 4	5	1,23	20	1,0/0,833	B1	50, 40, 30
Serie 5				0,714/0,625	B1, B2	20, 10, 0
Referenzzustand				–	keine	100
Serie 6	5	1,23	30	1,0/0,833	B1	50, 40, 30
Serie 7				0,714/0,625	B1, B2	20, 10, 0
Referenzzustand				–	keine	100
Serie 8	5	1,23	45	1,0/0,833	B1	50, 40, 30
Serie 9				0,714/0,625	B1, B2	20, 10, 0

\*  $B_L$  = Bühnenlänge,  $B_Z$  = Breite der Brandungszone

#### 4. Schlüsselergebnisse der Modellexperimente

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist es nicht möglich, eine dreidimensionale Nachbildung aller Sedimenttransportvorgänge im Labor vorzunehmen (KAMPHUIS, 1975). Aus diesem Grund und bezüglich der Modell- und Maßstabeffekte bei Modellen mit beweglicher Sohle, wurde ein Modell mit fester Sohle angewendet. Zusätzlich deuten die Modelluntersuchungen von KRESSNER (1928; dichte Bühnen) und BAKKER et al. (1984; durchlässige Bühnen) an, dass sich die Strömungsverhältnisse in Bühnenfeldern bei Strömungsversuchen mit und ohne Seegang generell voneinander unterscheiden. Deshalb wurde das Versuchsprogramm in zwei Versuchsphasen unterteilt: (i) *Phase I: Strömungen ohne Seegang* und (ii) *Phase II: Seeganginduzierte Strömungen*.

##### 4.1 Strömungen ohne Seegang

Die Versuchsphase I diente als Voruntersuchung für die Versuche mit seeganginduzierten Strömungen (*Phase II*). Durch die systematische Variation der Bühnenanzahl (n), der Bühnendurchlässigkeit (P) und der Anströmgeschwindigkeit ( $v_o$ ) werden zunächst grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich der Strömungsbeeinflussung mit Einzelbühnen sowie in Bühnenfeldern erarbeitet. Die wichtigsten Ergebnisse der Phase I werden nachfolgend kurz diskutiert, sofern sie für die ingenieurpraktische Anwendung von Bedeutung sind und sich von den Ergebnissen der Phase II unterscheiden.

Im Modell ist es äußerst schwierig, ein zu den Brandungsströmungsversuchen identisches Strömungsprofil zu erzeugen. Daher wurde ein gleichmäßiges Strömungsprofil über die gesamte Modellbreite hergestellt und als Referenzzustand verwendet. Hauptziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es, das Verständnis bezüglich (i) *der großräumigen Strömungsverhältnisse in Bühnenfeldern zu gewinnen*, (ii) *den Grad der Strömungsbeeinflussung landwärts und seewärts der Streichlinie zu erkennen*, (iii) *den Einflussbereich luv- und lee-seitig abzuschätzen*, (iv) *sich ausbildende Strömungswalzen und deren räumliche Ausdehnung zu erkennen* und (v) *die Ausbildung von Rippströmungen zu untersuchen*. Wichtig ist vor allem der Vergleich von Strömungsmustern für unterschiedliche Bühnendurchlässigkeiten sowie zwischen Einzelbühnen und Bühnensystemen.



Die Küste, 64 (2001), 235-275.

Die großräumigen Strömungsmuster in Abb. 14 lassen erkennen, dass sich das Strömungsverhalten bei Durchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$  und  $P \leq 10\%$  grundsätzlich voneinander unterscheidet. Bei Einzelbuhnen mit *Durchlässigkeiten*  $P \geq 20\%$  wird eine gleichmäßige Reduzierung der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit landwärts der Streichlinie bewirkt. Durch den Einbau mehrerer Buhnen können die küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten weiter schrittweise reduziert werden. Als Folge der Reduzierung wird seawärts der Streichlinie eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten bewirkt. Rippströmungen zeigen sich nur in Luv der ersten Buhne. Der seawärtige Einflussbereich der Rippströme reicht bis etwa  $0,8 B_L$  ( $B_L$  = Buhnenlänge). Im Buhnensystem treten keine Rippströme auf.

Bei *Durchlässigkeiten* von  $P \leq 10\%$  wurde kein Durchströmen der Buhnenfelder beobachtet. Hier werden großräumige Strömungswalzen zwischen den Buhnen und am Buhnen-systemabschluss erzeugt. Im ersten Buhnenfeld deutet sich ein kompliziertes Strömungsmuster an. Verglichen mit Durchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$  nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Buhnen wieder zu. Die größten Rippströmungen traten bei dichten Buhnen in Luv der ersten Buhne auf. Deren Einflussbereich erstreckt sich bis etwa  $1,0 B_L$  (Abb. 14).

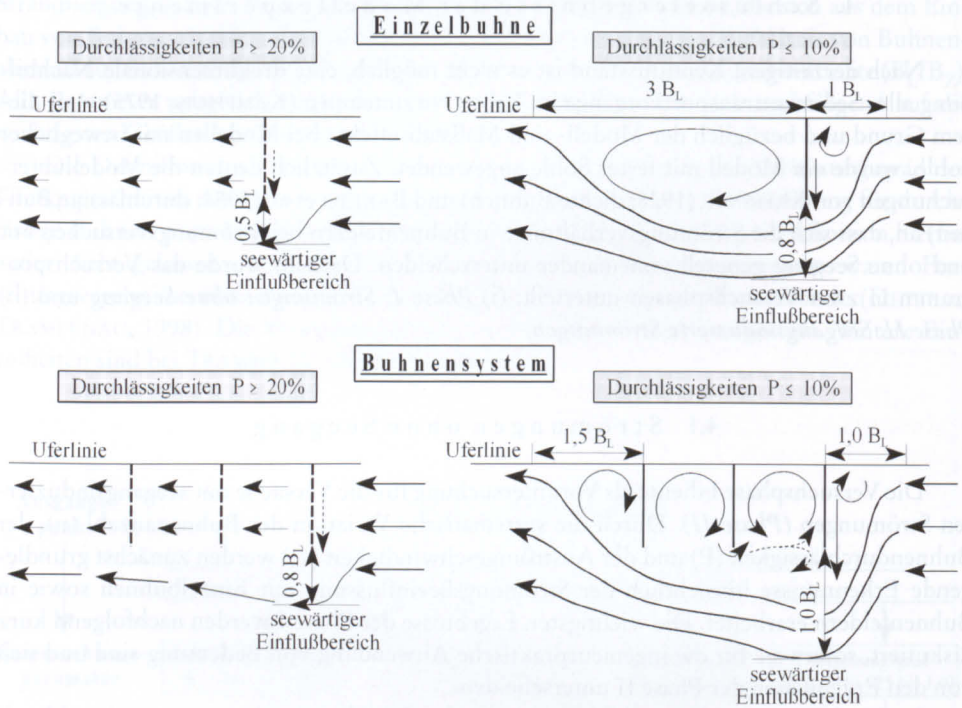


Abb. 14: Strömungszustände bei *Einzelbuhnen* (oben) und *Buhnensystemen* mit drei Buhnen (unten) mit Durchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$  und  $P \leq 10\%$  (schematisch)

Die erste Buhne eines Buhnensystems nimmt eine Sonderstellung bei der Wirkung des Gesamtsystems ein. Sie verhält sich wie eine Einzelbuhne. Während undurchlässige Einzelbuhnen ( $P \leq 10\%$ ) wie eine Strömungsleitwand wirken, die Rippströmungen erzeugen, wirken durchlässige Buhnen ( $P \geq 20\%$ ) dagegen als Strömungswiderstand.

Die Zusammenführung der Wasserstands- und Strömungsuntersuchungen zeigen, dass mit abnehmender Buhndurchlässigkeit der Einfluss von wasserstandsinduzierten Strö-

mungen erheblich zunimmt. Im Falle von dichten Bühnen ( $P \leq 10\%$ ) werden die Strömungsverhältnisse eindeutig von den Wasserständen dominiert, d.h. die Wasserspiegeldifferenzen werden so groß, dass großräumige Strömungswalzen entstehen.

Bei Durchlässigkeiten zwischen  $P = 0\%$  und  $P = 30\%$  wird am Bühnenkopf der jeweils ersten Bühne eines Bühnensystems eine Wirbelstraße erzeugt, deren Einfluss mit abnehmender Durchlässigkeit erheblich zunimmt (Abb. 15). Bei dichten Bühnen ( $P = 0\%$ ) kann die Wirbelgeschwindigkeit rd. das Vierfache des Vergleichswertes ohne Bühnen ( $v_0$ ) betragen. Die Wirbel nehmen mit zunehmender Entfernung vom Bühnenkopf ab und lösen sich auf. Sie besitzen ein großes Mobilisierungspotential und spielen somit für den Sedimenttransportprozess eine wichtige Rolle. Die Einflussbereiche der Wirbel in küstennormaler und -paralleler Richtung sind ebenfalls in Abb. 15 dargestellt.

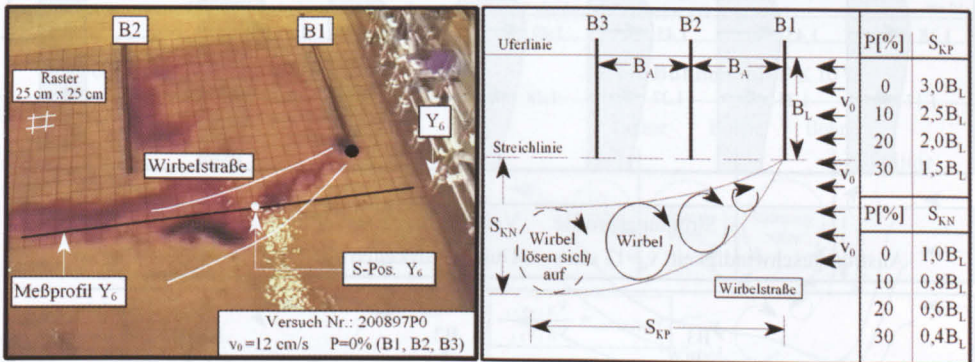


Abb. 15: Einflussbereiche der Wirbelbildung in küstennormaler ( $S_{KN}$ ) und küstenparalleler ( $S_{KP}$ ) Richtung in Phase I (Strömung ohne Seegang; Durchlässigkeiten:  $P = 30\%$  bis  $P = 0\%$ )

Die Untersuchung der Abnahme der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten landwärts der Streichlinie beruht auf folgendem Ansatz: für eine vorgegebene Bühnendurchlässigkeit und küstenparallele Anströmgeschwindigkeit ( $v_0$ ) wird, durch den Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in Lee und Luv der Bühnen, die prozentuale Veränderung der Geschwindigkeiten (Abnahmefaktor) ermittelt.

Entsprechend des Versuchsprogramms der Phase I (s. Tab. 3) wurden zunächst die prozentualen Veränderungen für Einzelbühnen (Anströmgeschwindigkeiten von  $v_0 = 3$  bis  $12 \text{ cm/s}$ ) bestimmt. Ein Zusammenhang zwischen der Wirkung der durchlässigen Bühnen als Strömungswiderstand und den Anströmgeschwindigkeiten konnte nicht festgestellt werden.

Die Auswertungen der Strömungsmuster ließen bereits erkennen, dass als Folge der Strömungsreduzierung landwärts der Streichlinie eine Erhöhung seawärts der Bühnenköpfe hervorgerufen wird. Deshalb wurden in Analogie zu den vorangegangenen Auswertungen Zunahmefaktoren für diesen Bereich ermittelt. Exemplarisch sind die ermittelten prozentualen Veränderungen ( $v_{rel}$ ) für durchlässige ( $P = 30\%$ ) und dichte Bühnen ( $P = 0\%$ ) in Abb. 16 für ausgewählte Messquerschnitte gegenübergestellt.

Durch die oberstrom gelegene Bühne (B1) mit einer Durchlässigkeit von  $P = 30\%$  ist es möglich, die küstenparallele Strömungsgeschwindigkeit bis hin zur Streichlinie gleichmäßig um ca. 60% zu reduzieren. Durch den Einbau von zwei Bühnen wird eine Reduktion um rd. 80% bewirkt. Seewärts der Bühnenköpfe wird die Strömungsgeschwindigkeit im Mittel auf etwa  $1,5 v_0$  erhöht (Abb. 16, oben).



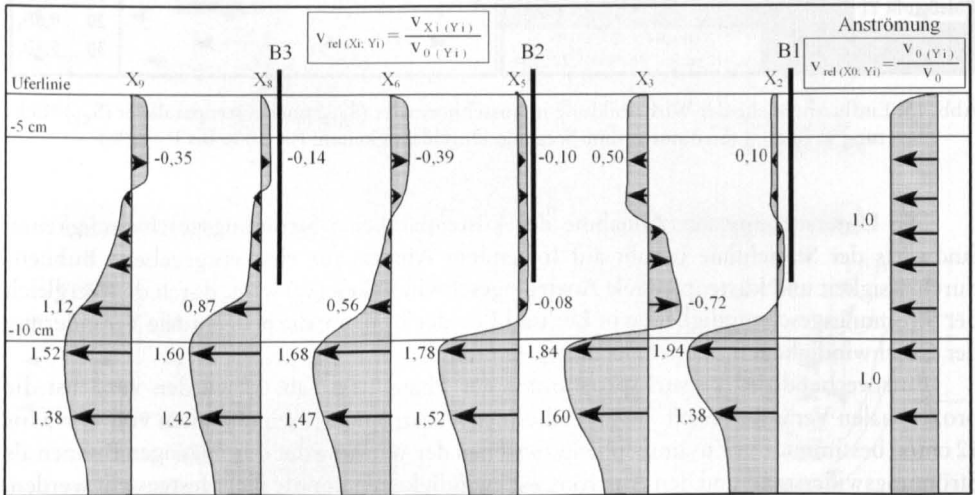
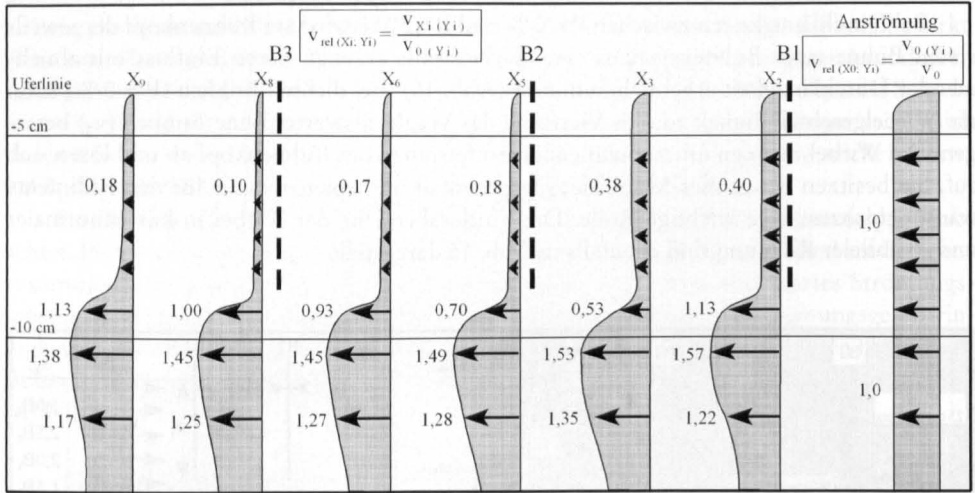


Abb. 16: Küstennormale Verteilung von prozentualen Veränderungen der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten für ausgewählte Messquerschnitte für Bühnensysteme mit Durchlässigkeiten von  $P = 30\%$  (oben) und dichte Bühnensysteme ( $P = 0\%$ ) (unten)

Ein anderes Bild ergibt sich dagegen bei den dichten Bühnen ( $P = 0\%$ ). Besonders auffällig ist das Strömungsverhalten in der Mitte der Bühnenfelder. Hier kommt es teilweise zu einer Strömungsumkehr, die durch die großräumige Walzenbildung hervorgerufen wird. In den Bühnenfeldern werden die Strömungen im Uferlinienbereich wieder bis auf 50 % der Ausgangsströmungsgeschwindigkeit ( $v_0$ ) erhöht. Die positive Wirkung von durchlässigen Bühnen wird entsprechend aufgehoben. Die Strömungsverhältnisse seawärts der Streichlinie

Die Küste 64 (2001) 235-275

haben sich, durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten auf rd.  $2 v_0$  ebenfalls erheblich verschlechtert. Die Probleme bei der Verwendung von dichten Bühnen liegen somit am Beginn eines Bühnensystems, d.h. in der Sonderstellung der ersten Buhne als Strömungsleitwand, und im ersten Bühnenfeld.

Die Untersuchung der Rippströmungen ergab keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Anströmungsgeschwindigkeit ( $v_0$ ) und der Bühnendurchlässigkeit (P). Sie treten lediglich als Folge der Strömungswalzen bei geringen Durchlässigkeiten auf und können eindeutig den Wasserstandsverhältnissen in den Bühnenfeldern zugeordnet werden. Die wichtigsten allgemeingültigen Ergebnisse aus den Untersuchungen mit Strömungen ohne Seegang (*Versuchsphase I*) sind in Tafel 1 zusammengefasst.

Tafel 1: Ergebnisse durch Laborexperimente mit Strömungen ohne Seegang (*Phase I*) bei Bühnen mit Durchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$  und dichten Bühnen ( $P \leq 10\%$ )

durchlässige Bühnen mit $P \geq 20\%$	dichte Bühnen mit $P \leq 10\%$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gleichmäßiges Durchströmen der Bühnenfelder</li> <li>• schrittweise Reduktion der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit mit mehreren Bühnen landwärts der Streichlinie</li> <li>• geringe Erhöhung der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit seawärts der Streichlinie</li> <li>• Wirkung der Bühnen als Strömungswiderstand</li> <li>• Rippströmungen nur in Luv der ersten Buhne</li> <li>• keine Rippströmungen innerhalb der Bühnenfelder</li> <li>• Ausbildung einer Wirbelstraße am Bühnenkopf der ersten Buhne bei <math>P \leq 30\%</math></li> <li>• küstenparallele Strömungen dominieren das Strömungsbild</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausbildung von Strömungswalzen</li> <li>• erneute Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten infolge der Strömungswalzen in der Mitte der Bühnenfelder</li> <li>• erhebliche Erhöhung der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten bis auf das 2-fache der Ausgangsströmung</li> <li>• Wirkung der Bühnen als Strömungsleitwand</li> <li>• starke Rippströmungen in Luv der ersten Buhne</li> <li>• geringe Rippströmungen in den Bühnenfeldern als Folge der Strömungswalzen</li> <li>• Ausbildung einer Wirbelstraße am Kopf der ersten Buhne mit max. Wirbelgeschwindigkeiten von rd. <math>4 v_0</math></li> <li>• wasserstandsinduzierte Strömungen in den Bühnenfeldern dominieren das Strömungsbild</li> </ul>

- Einzelbühnen bzw. die erste Buhne in einem Bühnensystem nehmen eine Sonderstellung bei der hydrodynamischen Wirkungsweise ein

## 4.2.1 Vorbemerkung

In Phase II (Brandungsströmungsversuche) wurden insgesamt 147 Einzelversuche (s. Tab. 4) durchgeführt. Hierbei wurden bewusst nur wenige Parameter (Durchlässigkeit, Bühnenanzahl und Verbauungsgrad) variiert, um eine systematische Untersuchung sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Aufgrund der großen Anzahl von Einzelversuchen ist es nicht möglich, sämtliche Versuchsauswertungen wiederzugeben. Für weitergehende Betrachtungen wird auf TRAMPENAU (2000) verwiesen.

Bei allen Versuchen wurden die Wellenhöhe ( $H$ ), die Wellenperiode ( $T$ ) und der Wasserstand ( $h$ ) konstant gehalten, weil (i) der Einfluss von unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten bereits in Phase I betrachtet wurde und des Weiteren (ii) die Untersuchung der Brandungsströmung an sich, (iii) Sturmflutverhältnisse sowie (iv) Brechvorgänge nicht Gegenstand der Modellexperimente waren. Die im Modell verwendeten Brandungsströmungsgeschwindigkeiten wurden mit theoretischen Werten nach KOMAR u. INMAN (1970) sowie mit Naturdaten, die an der Küste vor Warnemünde ermittelt wurden, überprüft.

## 4.2.2 Wasserstandsverhältnisse in Bühnenfeldern

Durch den Einbau von Bühnen wird erheblich in die lokalen Wasserstandsverhältnisse an einem Küstenabschnitt eingegriffen. Für ein verbessertes Verständnis der Strömungsverhältnisse in Bühnenfeldern ist es vor allem wichtig, das Wissen über die Wasserstandsverhältnisse weiter zu entwickeln. Die praktische Bedeutung von Wasserstandsunterschieden in Bühnenfeldern liegt vor allem darin, dass hierdurch lokale Gefälleströmungen hervorgerufen werden, die hauptsächlich für die Entstehung von großräumigen Strömungswalzen in Bühnenfeldern verantwortlich sind.

Wie bereits in Phase I festgestellt wurde, werden durch die wasserstandsinduzierten Strömungen großräumige Strömungswalzen bei dichten Bühnen erzeugt. Bei abnehmender Durchlässigkeit sind hierfür hauptsächlich zwei Gründe verantwortlich:

- (i) Der Diffraktionseinfluss am Bauwerk nimmt zu, wodurch die Wellenkämme senkrecht zur Bühnenachse verlaufen. Als Folge werden die antreibenden küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten reduziert (Abb. 17, oben).
- (ii) Die Wasserstandsunterschiede in Bühnenfeldern werden größer, wodurch eine küstenparallele Strömung entgegen der Anströmrichtung erzeugt wird (Abb. 17, unten).

Die beiden zuvor erwähnten Effekte bestimmen im Wesentlichen die Entwicklung der Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse, wie sie in Abb. 18 dargestellt sind. An einer Küste *ohne Bühnen* ( $P = 100\%$ ) zeigen sich die typische Verteilung der Brandungsströmung und der Brandungstau in den Wasserständen (Abb. 18, oben). Die küstenparallele Strömung wird eindeutig von der Brandungsströmung dominiert.

Werden durchlässige Bühnen, die gerade noch ein Durchströmen der Bühnenfelder zulassen, an einer Küste eingebaut (hier *Durchlässigkeit*  $P = 30\%$ ), werden die küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten landwärts der Streichlinie reduziert, ohne dass Strömungswalzen in Bühnenfeldern erzeugt werden. Zwei positive Haupteffekte müssen hierbei unterschieden werden:



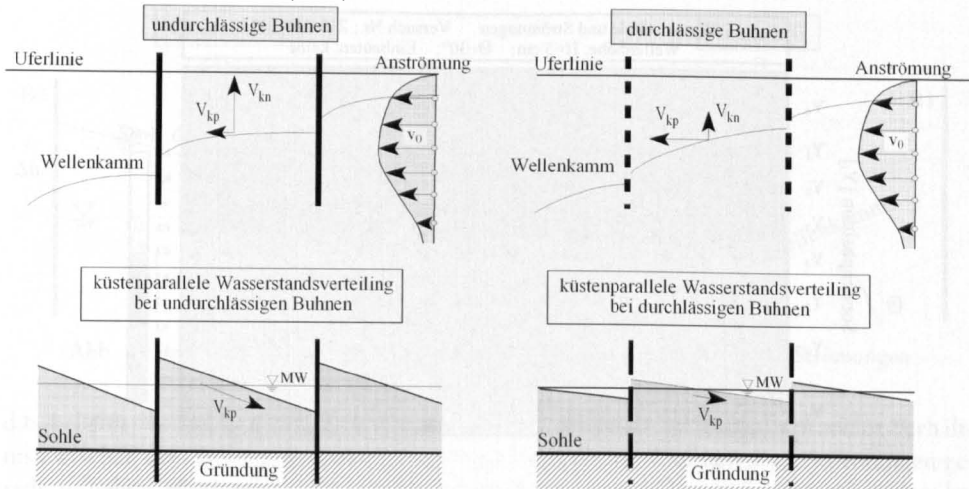


Abb. 17: Diffraction (oben) und küstenparallele Wasserstandsverteilung (unten) in undurchlässigen (links) und durchlässigen (rechts) Buhnenfeldern

- (i) Reduzierung der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit durch die Buhnenwirkung als Strömungswiderstand.
- (ii) Reduzierung der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit durch Wasserstandsunterschiede und als Folge durch Gefälleströmungen in Buhnenfeldern.

An Küsten mit *dichten Buhnen* ( $P = 0\%$ ) werden die Strömungsverhältnisse in den Buhnenfeldern erheblich verändert (Abb. 18, unten). Infolge der Undurchlässigkeit kommt es zu einer seewärtigen Strömungsablenkung und zu einer deutlichen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten seewärts der Streichlinie. Aufgrund der angepassten Wasserstandsverhältnisse werden landwärts der Streichlinie Strömungswalzen mit vergleichsweise hohen Strömungsgeschwindigkeiten erzeugt. Da ein Durchströmen der Buhnen nicht möglich ist, sind die Strömungen allein auf Wasserstandsunterschiede zurückzuführen. Die Richtung der Strömungsvektoren, die von den hohen zu den niedrigen Wasserständen zeigen, bestätigen dies. Detaillierte Betrachtungen zu küstennormalen und -parallelen Wasserstandsunterschieden in Buhnenfeldern sind bei TRAMPENAU (2000) zusammengestellt.

Ein Parameter, der nicht systematisch mit in die Modelluntersuchungen einbezogen wurde, ist der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis des Buhnenabstandes zur Buhnenlänge ( $B_A/B_L$ ) und der Buhndurchlässigkeit und somit den daraus resultierenden Strömungsverhältnissen in Buhnenfeldern. Es ist aber davon auszugehen, dass er ebenfalls einen Einfluss auf die Wirkungsweise von Buhnen hat. Dieser Einfluss wird nachfolgend, anhand eines Beispiels, kurz diskutiert (Abb. 19).

In einem Buhnenfeld, das durch zwei dichte Buhnen (B1 und B2) begrenzt wird und einen relativen Buhnenabstand von  $B_A/B_L$  aufweist, wird ein Wasserspiegelgefälle ( $\Delta h/B_A$ ) mit entsprechenden wasserstandsinduzierten Strömungen ( $v_{\Delta h}$ ) erzeugt (Querschnitt), die entgegen der Brandungsströmung gerichtet sind (Grundriss). Wird der Buhnenabstand zu klein, dominieren die wasserstandsinduzierten Strömungen und es bilden sich Strömungswalzen (s. Abb. 18, unten). Um diesen nachteiligen Effekt zu vermeiden bzw. abzumindern, d.h. um das Wasserspiegelgefälle zwischen den Buhnen zu reduzieren, bleiben nur zwei Möglichkeiten: (i) *Vergroßerung des Buhnenabstandes unter Beibehaltung der Buhndurchlässigkeit* oder (ii) *Vergroßerung der Buhndurchlässigkeit unter Beibehaltung des Buhnenabstandes*,

Die Küste, 64 (2001), 235-275

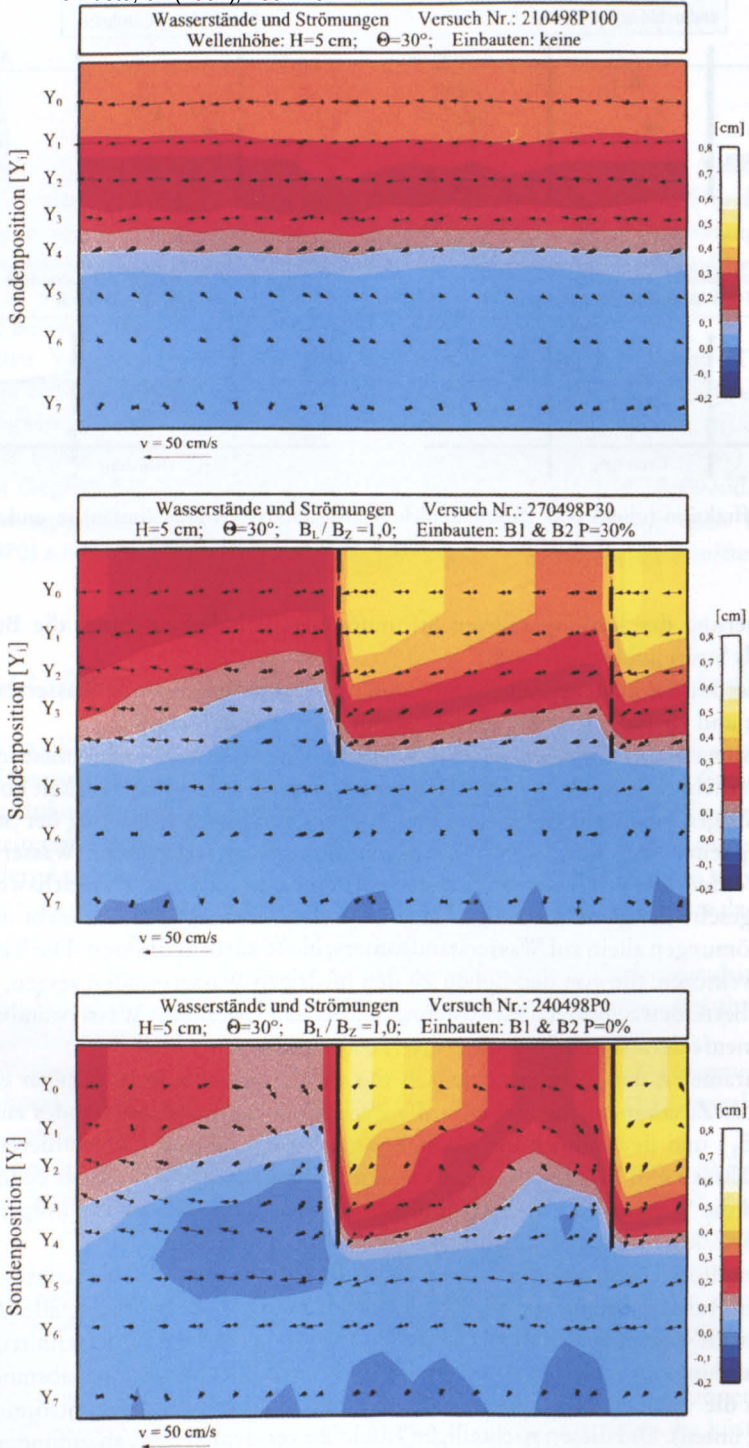


Abb. 18: Überlagerung von Wasserstandsverhältnissen und Strömungsmustern für den Referenzzustand ( $P=100\%$ , oben), für *Buhndurchlässigkeiten* von  $P=30\%$  (Mitte) und für *dichte Buhnen* ( $P=0\%$ , unten) bei einem *Verbauungsgrad* von  $B_L/B_Z=1,0$  (Wellenparameter:  $H=5$  cm,  $\Theta=30^\circ$ )

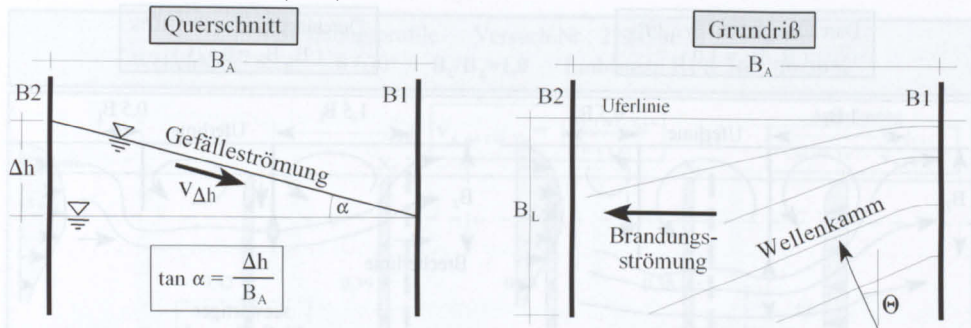


Abb. 19: Prinzipische Skizze zur Veranschaulichung von wasserstandsinduzierten Strömungen

d.h. bei einer bei einer vorgegebenen Buhndurchlässigkeit existiert ein optimales Verhältnis zwischen dem Buhnenabstand und der Buhnenlänge, bei dem sich diese Strömungen gerade aufheben. Hinsichtlich zu optimierender Strömungsverhältnisse bedeutet dies, dass bei hohen Durchlässigkeiten der Buhnenabstand, aufgrund des geringeren Wasserspiegelgefälles, vergleichsweise klein sein muss. Demzufolge könnte der Buhnenabstand bei Buhnen größer bemessen werden.

Die Kunst beim Buhnenbau liegt also darin, die Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse so aufeinander abzustimmen, dass optimale hydraulische Verhältnisse hinsichtlich der Sedimenttransportprozesse geschaffen werden.

#### 4.2.3 Allgemeine Strömungsmuster

Beim Einbau von Einzelbuhnen mit *Durchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$*  und für den Fall, dass die Brecherlinie auf Höhe der Buhnenköpfe liegt ( $B_L/B_Z = 1,0$ ), entsprechen die Strömungsverhältnisse generell denen aus Phase I. Die küstenparallelen Strömungen landwärts der Streichlinie werden reduziert und durchströmen die Buhnen gleichmäßig. Bei *Durchlässigkeiten  $P \leq 10\%$*  zeigen sich erhebliche Veränderungen. Großräumige Strömungswalzen werden in Lee der Buhne erzeugt, wobei deren Form und Größe nicht mit denen aus Phase I vergleichbar sind. Als Folge der Strömungsreduzierung erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit seewärts der Streichlinie. Durch den Welleneinfluss werden die Ausgangswerte der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit leeseitig der dichten Buhne bereits in einer Entfernung von rd.  $1,0 B_L$  erreicht (Phase I:  $3,0 B_L$ ). Der seewärtige Einflussbereich beträgt rd.  $0,5 B_L$  (Phase I:  $0,8 B_L$ ). Rippströme sind nur schwach ausgeprägt und von untergeordneter Bedeutung (Abb. 20).

Durch eine Verkürzung der Buhnen, d.h. eine Abnahme des Verbauungsgrades, wird die küstenparallele Ausdehnung der Strömungswalze in Lee der Buhne kleiner, relativ zur Buhnenlänge allerdings größer. Weiterhin verändert die Strömungswalze ihre Form von einem Kreis hin zu einer Ellipse, wobei die Strömungsgeschwindigkeiten der Walze zunehmen. Bei Einzelbuhnen mit Verbauungsgraden  $B_L/B_Z < 0,7$  bildet sich die lokale Strömungswalze in Luv der ersten Buhne an der Buhnenwurzel nicht mehr aus, und Rippströmungen werden unbedeutend.

Die wichtigsten Unterschiede zu den Ergebnissen aus Phase I bestehen darin, dass (i) die Drehrichtungen der Strömungswalzen ausschließlich im Uhrzeigersinn verlaufen, (ii) das Strömungsverhalten zwischen den Buhnen weniger kompliziert ist und (iii) die Beeinflussung der küstenparallelen Strömungen seewärts der Streichlinie erheblich geringer ist (vgl. Abb. 14



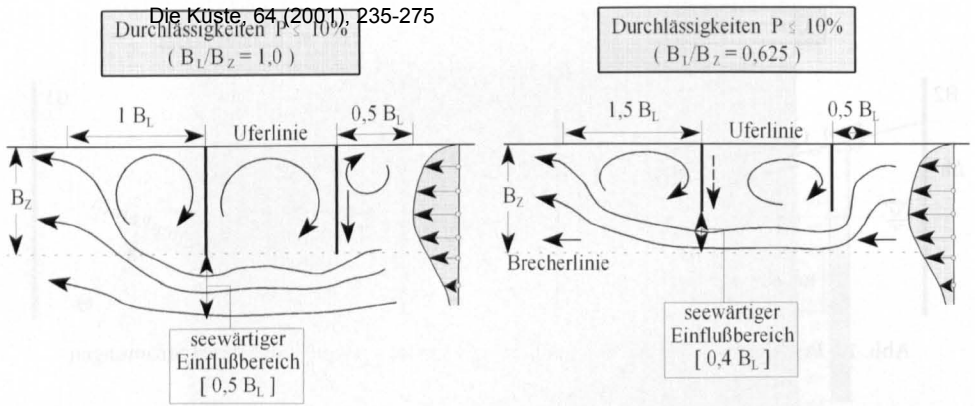


Abb. 20: Strömungszustände in einem Zwei-Buhnensystemen für Durchlässigkeiten von  $P \leq 10\%$  (Phase II, schematisch); (Wellenparameter:  $H = 5 \text{ cm}$ ,  $\Theta = 30^\circ$ )

und 20). Der Grund hierfür liegt im Massentransport, wodurch fortlaufend Wasser landwärts transportiert wird und so, verglichen mit denen in Phase I, veränderte Wasserstandsverhältnisse im Buhnenfeld erzeugt werden.

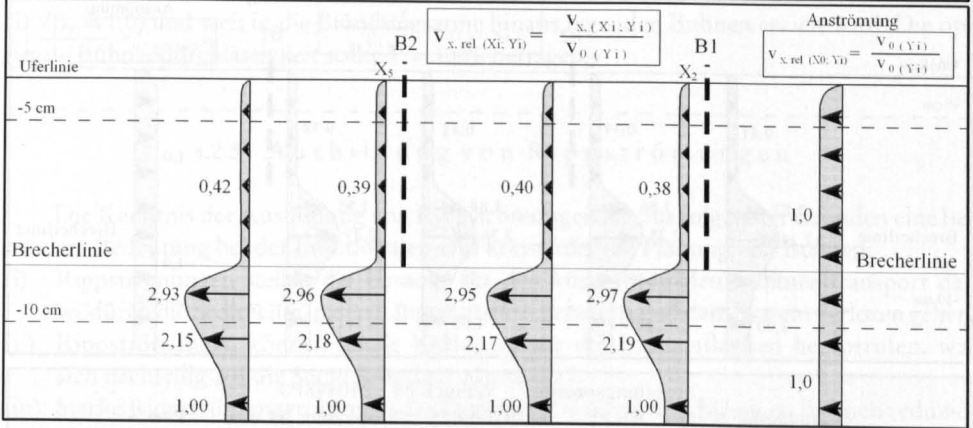
Die Strömungsverhältnisse beim Einbau von zwei dichten Buhnen mit unterschiedlichen Verbauungsgraden lassen erkennen, dass die Ergebnisse grundsätzlich für Einzelbuhnen in Luv der ersten Buhne und leeseitig der zweiten Buhne übertragbar sind. Ist der Verbauungsgrad hoch ( $B_L/B_Z = 1,0$ ), wird eine großräumige Walze mit vergleichsweise geringen Geschwindigkeiten im Buhnenfeld erzeugt. Bei kleineren Verbauungsgraden ( $B_L/B_Z \leq 0,714$ ) wird das Strömungsfeld in zwei Bereiche aufgeteilt: eine Walze mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten leeseitig der ersten Buhne und einen Bereich mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in Luv der zweiten Buhne (Abb. 20).

#### 4.2.4 Beeinflussung von küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten

In gleicher Weise wie in Phase I (vgl. Abb. 16) wurden durch den Vergleich der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten in Luv und in Lee der Buhnen die prozentualen Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten landwärts der Streichlinie ermittelt. Die Ergebnisse sind exemplarisch für einen Verbauungsgrad von  $B_L/B_Z = 1,0$  (Abb. 21) und von  $B_L/B_Z = 0,625$  (Abb. 22) zusammengestellt. Für beide Fälle werden die Ergebnisse für zwei repräsentative Buhnen durchlässigkeiten veranschaulicht: für *dichte Buhnen* ( $P = 0\%$ ) und für *Buhnen durchlässigkeiten von  $P = 30\%$* , die den Zustand darstellen, bei dem gerade noch ein Durchströmen der Buhnenfelder möglich ist, ohne dass nachteilige Strömungswalzen im System entstehen.

Die küstennormalen Verteilungen für Buhnen mit *Durchlässigkeiten von  $P \geq 30\%$*  bei Verbauungsgraden von  $B_L/B_Z = 1,0$  und  $B_L/B_Z = 0,625$  zeigen sowohl land- als auch seewärts der Streichlinie keine nennenswerten Unterschiede. Landwärts der Streichlinie werden die küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten gleichmäßig bis auf rd. 40% bzw. 10% der Anströmungsgeschwindigkeit ( $v_0$ ) reduziert. Eine empirische Formel zur Abschätzung dieser Strömungsreduzierungen in Abhängigkeit von der Buhnen durchlässigkeit wurde von TRAMPENAU (2000) entwickelt (Gl. 1). Sie ist gültig für Durchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$  bei einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,98$ .

Strömungsprofile Versuch Nr.: 270498P30  
 Wellenhöhe: 5 cm  $\theta = 30^\circ$   $B_L/B_Z = 1,0$  Einbauten: B1 & B2  $P = 30\%$



Strömungsprofile Versuch Nr.: 240498P0  
 Wellenhöhe: 5 cm  $\theta = 30^\circ$   $B_L/B_Z = 1,0$  Einbauten: B1 & B2  $P = 0\%$

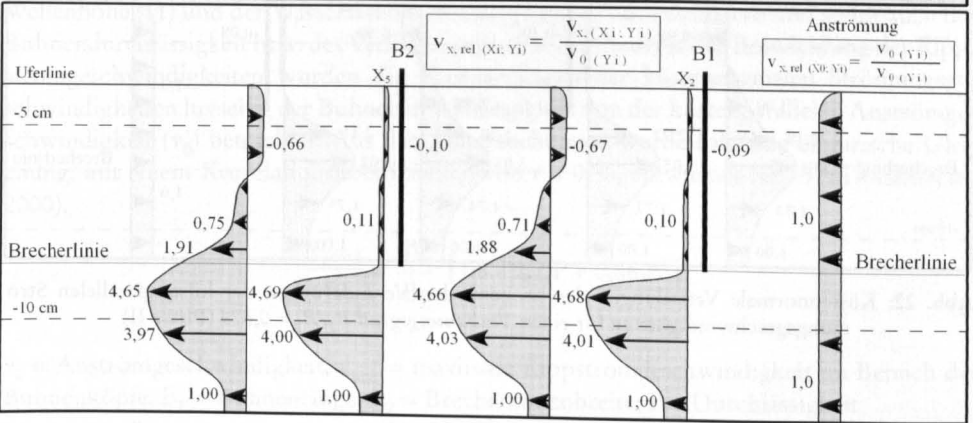


Abb. 21: Küstennormale Verteilungen der prozentualen Veränderungen der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten für einen *Verbauungsgrad*  $B_L/B_Z = 1,0$  (Phase II)

$$A_{X_i} = \frac{v_x(X_i, Y_i)}{v_0(Y_i)} = 1,03 \tanh^{2,0}(2,4 P) \quad (1)$$

- $A_{X_i}$  = Abnahmefaktor direkt in Lee der ersten Buhne im Messquerschnitt  $X_i$
- $v_{(X, Y_i)}$  = Küstenlängsströmung im Messquerschnitt  $X$  an der Sondenposition  $Y_i$
- $v_0(Y_i)$  = Anströmgeschwindigkeit in Luv der ersten Buhne an der Sondenposition  $Y_i$

Seewärts der Streichlinie nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten maximal bis auf rd. 300 % ( $B_L/B_Z = 1,0$ ) bzw. 230 % ( $B_L/B_Z = 0,625$ ) der Vergleichsströmung ( $v_0$ ) zu. Die Abschätzung der max. Zunahme der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten seewärts der Streichlinie in Abhängigkeit vom Verbauungsgrad und der Buhnedurchlässigkeit kann durch Gl. 2 vorgenommen werden (Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,99$ )



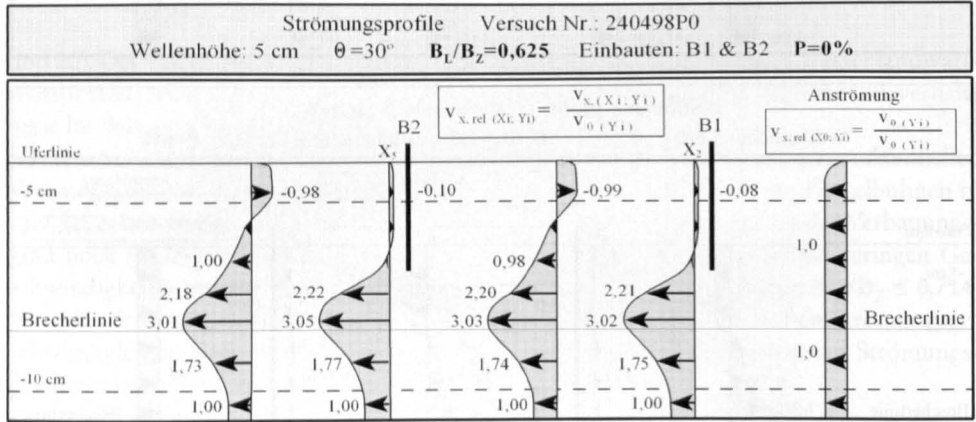
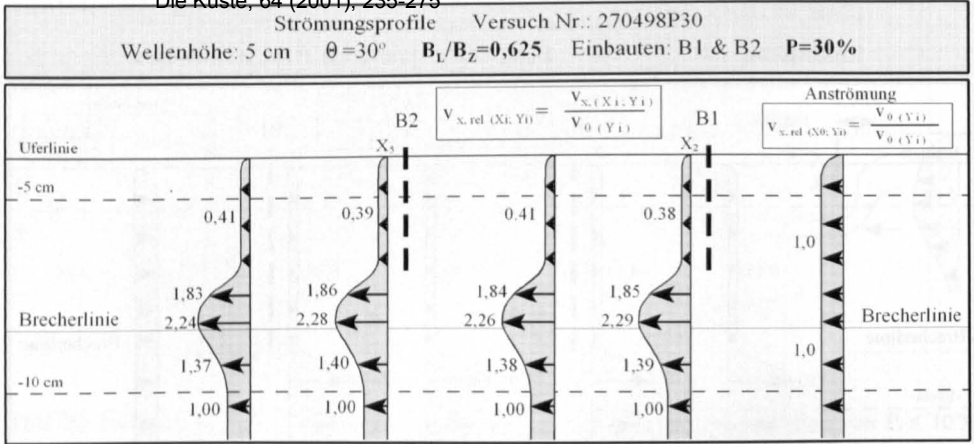


Abb. 22: Küstennormale Verteilungen der prozentualen Veränderungen der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten für einen Verbauungsgrad  $B_L/B_Z=0,625$  (Phase II)

$$A_{\max}(X_i) = \frac{v_{x, \max}(X_i, Y_i)}{v_0(Y_i)} = 4,7 \frac{B_L}{B_Z} - \left[ \left( 4,7 \frac{B_L}{B_Z} - 0,9 \right) \tanh^{2,0}(2,4 P) \right] \quad (2)$$

Bei *dichten Buhnen* ( $P=0\%$ ) sind der Einfluss des Verbauungsgrades und die prozentualen Veränderungen der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit erheblich größer. Zusätzlich sind die Strömungsverhältnisse komplizierter. Vor allem in Buhnenfeldmitte und leeseitig der letzten Buhne (B2) zeigen sich nachteilige Auswirkungen. Der Grund hierfür liegt in den veränderten Wasserspiegelverhältnissen und den dadurch bewirkten Gefälleströmungen in Buhnenfeldern. Landwärts der Streichlinie wird eine Rückströmung hervorgerufen. Bei kleinen Verbauungsgraden (z.B.  $B_L/B_Z=0,625$ ) werden sogar die Ausgangswerte im Bereich der Uferlinie, wie sie für den Referenzzustand ohne Buhnen ermittelt wurden, bewirkt. Seewärts der Streichlinie nehmen die Strömungen in beiden Fällen erheblich zu (rd. 470 % bei  $B_L/B_Z=1,0$  bzw. 300 % bei  $B_L/B_Z=0,625$  der Vergleichsströmung ( $v_0$ )).

Zusammenfassend haben die Strömungsauswertungen land- und seewärts der Streichlinie gezeigt, dass der Bau von zu kurzen und dichten Buhnen den ungünstigsten hydrau-

lischen Zustand darstellt, da hierdurch zum Teil schlechtere Bedingungen auf dem Vorstrand geschaffen werden, als dies ohne Buhnen der Fall wäre. Es kann also bezüglich der Strömungsverhältnisse festgestellt werden, dass die beste Buhnenwirkung mit möglichst langen ( $B_L/B_Z = 1,0$ ) und weit in die Brandungszone hinaus ragenden Buhnen erzielt wird. Die optimale Buhndurchlässigkeit sollte  $P = 30\%$  betragen.

#### 4.2.5 Ausbildung von Rippströmungen

Die Kenntnis der Ausbildung von Rippströmungen hat aus folgenden Gründen eine besondere Bedeutung bei der funktionalen und konstruktiven Planung von Buhnen:

- (i) Rippströmungen stellen die Ursache für den küstennormalen Sedimenttransport dar, wodurch die Sedimente in den Längstransport gelangen und dem System verloren gehen.
- (ii) Rippströmungen können lokale Kolke entlang der Buhnenflanken hervorrufen, was sich nachteilig auf die Standsicherheit auswirkt.
- (iii) Starke Rippströmungen können das Durchströmen von durchlässigen Buhnen reduzieren. Durch sie kann die küstenparallele Strömung seawärts abgelenkt werden, so dass es zu einer Blockierung der Strömung kommt, obwohl das Bauwerk selbst durchlässig ist.

Die Stärke der Rippströmungen ist eine Funktion der Wellenanlaufriechung ( $\Theta$ ), der Wellenhöhe ( $H$ ) und der Wasserstandsverteilung ( $\Delta h$ ) in Buhnenfeldern und somit auch der Buhndurchlässigkeit bzw. des Verbauungsgrades. Zur Analyse der Entwicklung der Rippstromgeschwindigkeiten wurden die Veränderungen der küstennormalen Strömungsgeschwindigkeiten luvseitig der Buhnen in Abhängigkeit von der küstenparallelen Anströmungsgeschwindigkeit ( $v_0$ ) betrachtet. Aus den Untersuchungen wurde folgende empirische Gleichung, mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,98$ , entwickelt (Gl. 3) (TRAMPENAU, 2000).

$$\frac{v_{(\max)}}{v_0} = \frac{B_L}{B_Z} [1,8 - 2,7 P + 0,86 P^2] \quad (3)$$

$v_0$  = Anströmungsgeschwindigkeit;  $v_{\max}$  = maximale Rippstromgeschwindigkeit im Bereich der Buhnenköpfe;  $B_L$  = Buhnenlänge;  $B_Z$  = Brecherzonenbreite;  $P$  = Durchlässigkeit

Die Ergebnisse deuten an, dass im Vergleich zu den dichten Buhnen bei Verwendung von durchlässigen Buhnen (hier  $P = 30\%$ ) die maximalen Rippstromgeschwindigkeiten um rd. 60 % reduziert werden können. Grundsätzlich zeigen die Rippströmungen bei den Versuchen ohne (Phase I) und mit (Phase II) Seegang ein vergleichbares Verhalten, wobei jedoch festzustellen ist, dass die größten prozentualen Veränderungen für die Versuche mit Brandungsströmung (Phase II) ermittelt wurden.

#### 4.2.6 Wirbelbildung an den Buhnenköpfen

Ein wichtiges Ergebnis der Versuchsphase I ist die Ausbildung einer Wirbelstraße seawärts der Streichlinie, verbunden mit einer Zunahme an Strömungsgeschwindigkeiten bei abnehmenden Buhndurchlässigkeiten (s. Abb. 13). Durch die Farbstoffuntersuchungen in Phase II deutete sich bereits an, dass aufgrund des vorhandenen Welleneinflusses keine Wirbelstraße seawärts der Streichlinie ausgebildet wird. Diese Beobachtung bestätigte die Ge-

genüberstellung einzelner Zeitreihen repräsentativer Sondenposition in der Mitte der Buhnfelder. Hierin zeigt sich die Dominanz der Orbitalströmungen. Aufgrund dieser Ergebnisse kommt TRAMPENAU (2000) zu dem Schluss, dass die lokalen Wirbel aufgrund der Periodizität der Orbitalgeschwindigkeiten quasi „zerschlagen“ werden. Eine detaillierte Analyse des Zerfallsprozesses der Wirbel konnte mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik leider nicht vorgenommen werden. Da dieser Prozess aber äußerst wichtig für die Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit von Buhnen ist, sollte er in jedem Fall Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein, um zu sicheren Aussagen zu gelangen.

#### 4.3 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Gemeinsamkeiten der Ergebnisse aus den Phasen I und II bestehen vor allem bei der Wirkung als Strömungswiderstand bei durchlässigen Buhnen und der Wirkung als Strömungsleitwand bei dichten Buhnen. Die Anwendung von dichten Buhnen ist generell mit (i) der Ausbildung von großräumigen Strömungswalzen in Buhnfeldern, (ii) der Entwicklung von Rippströmungen und (iii) einer Zunahme der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit seewärts der Streichlinie verbunden. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass mit dichten Buhnen erheblich in die Wasserstandsverhältnisse in Buhnfeldern eingegriffen wird. Die Gefälleströmungen spielen demzufolge eine wichtige Rolle bei der hydraulischen Wirkungsweise von dichten Buhnen.

Andererseits können mit Buhndurchlässigkeiten von  $P \geq 20\%$  (Phase I) bzw.  $P \geq 30\%$  (Phase II) die o.g. negativen Effekte, die mit dichten Buhnen gekoppelt sind, reduziert bzw. vermieden werden, d.h. (i) eine gleichmäßige Abnahme der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit landwärts der Streichlinie, (ii) keine Ausbildung von Strömungswalzen, (iii) keine signifikanten Wasserstandsunterschiede und entsprechend keine Gefälleströmungen in Buhnfeldern sowie (iv) Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten seewärts der Streichlinie und der (v) Einflussbereiche der Buhnen auf rd. die Hälfte, verglichen mit dichten Buhnen.

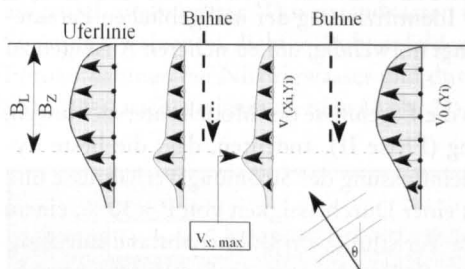
Die Ergebnisse aus Phase II deuten zudem an, dass sich aufgrund der überlagerten Orbitalgeschwindigkeiten keine Wirbelstraße im System ausbilden kann. Ferner wurde festgestellt, dass jede Buhne eines Buhnsystems in etwa die gleiche hydraulische Wirkung aufweist und im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Phase I quasi wie eine Einzelbuhne wirkt. Die Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse sind somit auf mehrere Buhnfelder übertragbar. Die Ursachen für das veränderte Strömungsverhalten bei den Brandungsströmungsversuchen wird ausschließlich auf den Welleneinfluss zurückgeführt.

In Tafel 1 wurden bereits die wichtigsten Ergebnisse für die Versuche mit gleichmäßigen Strömungen ohne Welleneinfluss (Phase I) zusammengefasst. In gleicher Weise sind in Tafel 2 die Unterschiede in der hydraulischen Wirkungsweise von dichten und durchlässigen Buhnen für die Versuche mit Brandungsströmung (Phase II) gegenübergestellt.

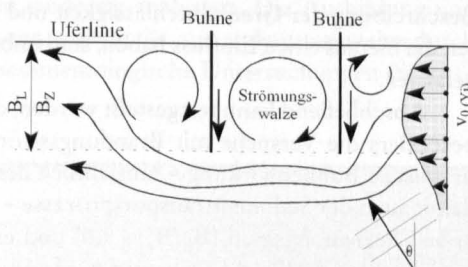
Zusätzlich zu den Unterschieden der hydraulischen Wirkungsweise von dichten und durchlässigen Buhnen werden in Tafel 2 empirische Formeln zur Abschätzung der (i) Strömungsreduzierung landwärts der Streichlinie als Funktion der Buhndurchlässigkeit ( $P$ ), (ii) der maximalen Zunahme der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit und (iii) der maximalen Zunahme der Rippstromgeschwindigkeiten im Bereich der Buhnenköpfe als Funktion der Buhndurchlässigkeit ( $P$ ) und des Verbauungsgrades ( $B_L/B_T$ ) sowie (iv) der Wasserstandsveränderungen ( $\Delta h$ ) in Abhängigkeit von der Wellenhöhe ( $H$ ) und der Buhndurchlässigkeit angegeben.

Tafel 2: Ergebnisse aus Laborexperimenten mit *Brandungsströmung* bei Buhnen mit einer *Durchlässigkeit* von  $P = 30\%$  und *dichten Buhnen* ( $P = 0\%$ ) exemplarisch für einen Verbauungsgrad von  $B_L/B_Z = 1,0$  (Wellenparameter:  $H = 5\text{ cm}$ ,  $\Theta = 30^\circ$ )

### durchlässige Buhnen ( $P = 30\%$ )



### undurchlässige Buhnen ( $P = 0\%$ )



Abnahme der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit landwärts der Streichlinie

$$A_{Xi} = \frac{v_x(Xi, Yi)}{v_0(Yi)} = 1,03 \tanh^{2,0}(2,4 P)$$

maximale Zunahme der küstenparallelen Strömung seewärts der Streichlinie

$$A_{\max}(Xi) = \frac{v_{x, \max}(Xi, Yi)}{v_0(Yi)} = 4,7 \frac{B_L}{B_Z} - \left[ 4,7 \frac{B_L}{B_Z} - 0,9 \right] \tanh^{2,0}(2,4 P)$$

maximale Rippstromgeschwindigkeit im Bereich der Buhnenköpfe

$$B_{\max} = \frac{v_{y, \max}(Yi)}{v_0(Yi)} = \frac{B_L}{B_Z} [1,8 - 2,7 P + 0,86 P^2]$$

Einflussbereiche der Buhnen auf die Strömungsgeschwindigkeiten

<u>leeseitig</u>	<u>luvseitig</u>	<u>seewärts</u>	<u>leeseitig</u>	<u>luvseitig</u>	<u>seewärts</u>
$\leq 0,4 B_L$	$\leq 0,2 B_L$	$\leq 0,2 B_L$	$\leq 1,0 B_L$	$\leq 0,5 B_L$	$\leq 0,5 B_L$

Wasserspiegeländerungen erzeugt durch die Buhndurchlässigkeit

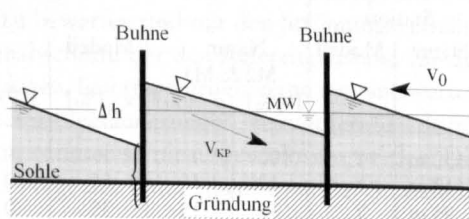
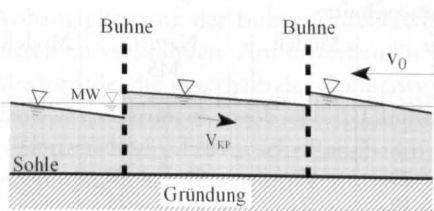
innerhalb eines Buhnsystems

$$\frac{\Delta h}{H} = 0,54 - 0,79 P + 0,25 P^2$$

letzte Buhne in einem Buhnsystem

$$\frac{\Delta h}{H} = 0,80 - 1,15 P + 0,35 P^2$$

küstenparallele Wasserstandsverteilungen





Ein wichtiges Ergebnis ist die Grenze der Buhnendurchlässigkeit, ab der durchlässige Buhnen ein vergleichbares hydraulisches Verhalten wie dichte Buhnen aufweisen, vor allem hinsichtlich des Auftretens von Gefälleströmungen als Folge von veränderten Wasserspiegelverhältnissen in Buhnenfeldern. Diese Grenzdurchlässigkeit lag bei den Modellexperimenten zwischen  $P = 20\%$  (Phase I) und  $P = 30\%$  (Phase II). Weitere Untersuchungen zur Beschreibung der Grenzdurchlässigkeit und zur Identifizierung der maßgeblichen Parameter, die hierauf einen Einfluss haben, sind unbedingt notwendig, um zu sicheren Aussagen zu gelangen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Modelluntersuchungen, besonders die Versuche mit Brandungsströmung (Phase II), andeuten, dass die beste hydraulische Buhnenwirkung – hinsichtlich der Beeinflussung der Strömungsverhältnisse und damit auch der Sedimenttransportprozesse – mit einer Durchlässigkeit von  $P = 30\%$ , einem hohen Verbauungsgrad ( $B_L/B_Z \approx 1,0$ ) und einem Verhältnis von Buhnenabstand zur Buhnenlänge von  $B_A/B_L \approx 1,0$  erreicht wird. An dieser Stelle wird aber nochmals darauf hingewiesen, dass die erzielten Ergebnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt ausschließlich für die im Modell verwendeten Randbedingungen Gültigkeit besitzen und eine Extrapolation auf Naturverhältnisse nicht ohne zusätzliche Untersuchungen vorgenommen werden kann.

## 5. Naturuntersuchungen mit durchlässigen und dichten Buhnen

Durch umfangreiche hydrologische, sedimentologische und morphologische Untersuchungen am Küstenabschnitt Warnemünde/West (1993 bis 1997) war es möglich, die im Modell ermittelten Strömungsverhältnisse zu verifizieren und eine Verknüpfung zwischen diesen Strömungen und langfristigen morphologischen Reaktionen in der Natur herzustellen. Da die Naturuntersuchungen zeitlich vor den Modelluntersuchungen durchgeführt wurden, war eine optimale Positionierung der Messsonden, hinsichtlich der Strömungsverhältnisse im Modell, nicht gegeben. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse aus den Naturuntersuchungen kurz wiedergegeben, sofern sie zur Verbesserung des Verständnisses der Buhnenwirkung beitragen (s. auch TRAMPENAU, 2000).

Durch analoge Strömungsauswertungen der Naturdaten konnte nachgewiesen werden, dass die Strömungsverhältnisse im Modell und in der Natur qualitativ gut übereinstimmen (Tab. 5). Dies gilt sowohl für die Strömungsreduktion landwärts der Streichlinie als auch der Strömungszunahme seewärts der Buhnenköpfe.

Tab. 5: Gegenüberstellung von prozentualen Veränderungen von küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_{rel}$ ) aus Naturuntersuchungen im Untersuchungsgebiet Warnemünde/West und aus Modellversuchen mit Brandungsströmung  
(Wellenparameter:  $H = 5\text{ cm}$ ,  $\Theta = 30^\circ$ , Verbauungsgrad  $B_L/B_Z = 0,714$ )

Station		Messquerschnitte								
Natur	Modell	Natur M2 & M3			Natur M4			Natur M5		
		P [%]	$v_{rel}$ [%]	$v_{rel}$ [%]	P [%]	$v_{rel}$ [%]	$v_{rel}$ [%]	P [%]	$v_{rel}$ [%]	$v_{rel}$ [%]
130 m	$Y_3$	100	–	–	–	–	–	100	200	185
113 m	$Y_2$	40	45	55	0	25	15	0	70	80
95 m	$Y_1$	30	15	35	0	10	0	0	–25	–20



Die Küste, 64 (2001), 235-275

Die Wirkungsweise der Modellbuhnen wurde hinsichtlich der Durchlässigkeit mit Hilfe der Naturuntersuchungen bestätigt. Sowohl die Buhnenwirkung als Strömungswiderstand (durchlässige Buhnen,  $P = 30\%$ ) als auch als Strömungsleitwand (dichte Buhnen,  $P = 0\%$ ) hat sich bestätigt. Ob und zu welchen Teilen die Umlenkung der Strömung am Bauwerk oder Wasserspiegelgefälle für die Entstehung der Strömungswalzen verantwortlich sind, wurde aufgrund ungeeigneter Wasserstandsdaten nicht eindeutig analysiert. Die Ausbildung von Strömungswalzen in dichten Buhnenfeldern konnte ebenfalls nur andeutungsweise durch Fotoaufnahmen bei Niedrigwasser und durch sedimentologische Untersuchungen (SCHRAEDER, 1999) nachgewiesen werden (Abb. 23).

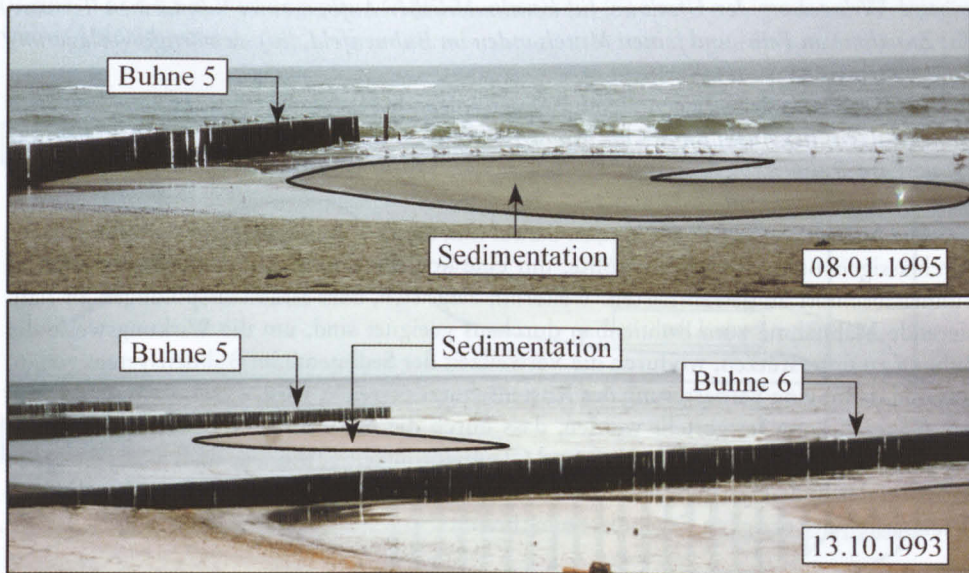


Abb. 23: Fotoaufnahmen im Buhnenfeld 5–6 bei Niedrigwasser vom 8.1.1995 und 13.10.1993 im Untersuchungsgebiet Warnemünde/West

In der Mitte des Buhnenfeldes 5–6 ist deutlich eine typische morphologische Formation (Sedimentation) der Unterwassertopographie zu erkennen, die auf die Ausbildung einer Strömungswalze schließen lässt. Die Sedimentation ist mit dem Bereich niedriger Strömungsgeschwindigkeiten einer Strömungswalze, wie er in den Modellversuchen ermittelt wurde, verbunden. An den Rändern wurde dagegen die Unterwassertopographie vertieft, was auf erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten hindeutet. Alle Indizien sprechen dafür, dass bei Durchlässigkeiten von  $P \leq 20\%$  eine Strömungswalze erzeugt wird.

Durch morphologische Untersuchungen an vier Lokationen mit unterschiedlichen baulichen Randbedingungen war es möglich, langfristige Entwicklungen von Strandprofilen in Abhängigkeit von der Buhnendurchlässigkeit zu bewerten und mit den Strömungsverhältnissen zu verknüpfen. Am unverbauten Küstenabschnitt, der den Referenzzustand für die Messprofile, die innerhalb des Buhnenfeldes lagen, lieferte, wurden keine nennenswerten Profilveränderungen beobachtet. Langfristige Profilveränderungen, hervorgerufen durch veränderte hydrodynamische Randbedingungen, konnten somit ausgeschlossen werden. Die morphologischen Umlagerungen sind allein als Folge des Buhnenbaus bzw. der Strandaufspülungen zu werten (TRAMPENAU, 2000).

Die Naturergebnisse lassen darauf schließen, dass Buhnen mit Durchlässigkeiten von  $P \geq 35\%$  keine nennenswerten Veränderungen der Unterwasserstrandprofile bewirkt haben. Buhnen mit Durchlässigkeiten  $P < 35\%$  zeigen dagegen gute Eigenschaften hinsichtlich eines langfristigen Strandprofilaufbaus, wobei bei Buhnen mit Durchlässigkeiten von  $P \leq 20\%$  Strömungswalzen in Buhnenfeldern entstehen. Die optimale Durchlässigkeit bezüglich der hydraulischen Buhnenwirkung liegt also im Bereich zwischen  $P > 20\%$  und  $P < 35\%$ . Weiterhin wurden eindeutige Zusammenhänge zwischen der Durchlässigkeit und den Strömungsverhältnissen sowie den Strandprofilen nachgewiesen.

Die positiven Wirkungsweisen von durchlässigen Buhnen, wie sie durch Naturuntersuchungen ermittelt wurden, werden durch folgende Aspekte verdeutlicht: (i) *deutliche seawärtige Verlagerung der Uferlinie*, (ii) *kontinuierlicher Aufbau einer submarinen Terrasse*, (iii) *Zunahme an Fein- und feinen Mittelsanden im Buhnenfeld*, (iv) *seewärtige Verlagerung des äußeren Riffs*.

Im Gegensatz dazu zeigen dichte Buhnen folgende Nachteile: (i) *Ausbildung von Strömungswalzen*, (ii) *Ausbildung von Rippströmungen entlang der Buhnenflanken*, (iii) *Lee-Erosion am Buhnenabschluss*, (iv) *Versteilung des Profils seawärts der Streichlinie*, (v) *Vergrößerung der Sedimente*.

Die Naturuntersuchungen weisen darauf hin, dass ein Buhnensystem vornehmlich aus durchlässigen Buhnen bestehen sollte, um eine kontinuierliche Sedimentzufuhr in jedem Buhnenabschnitt zu gewährleisten. Weiterhin zeigt sich, dass Strandaufspülungen als flankierende Maßnahme zum Buhnenbau durchaus geeignet sind, um die Wirkungsweise der Buhnen zu unterstützen, wodurch die Verweilzeit der Sedimente im Buhnensystem verlängert und damit eine Verbesserung des Küstenschutzes erreicht wird.

Generell kann festgestellt werden, dass durch die Naturuntersuchungen die Modellergebnisse erheblich an Aussagekraft und Glaubwürdigkeit gewinnen, auch wenn die große Variation der hydrodynamischen Randbedingungen während des Messzeitraumes die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse einschränkt.

## 6. Praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse

In der Vergangenheit wurde die Wirkungsweise von Buhnen mangels ausreichender Kenntnis der an sandigen Brandungsküsten ablaufenden Prozesse oftmals falsch ein- bzw. überschätzt. Dies zeigt z.B. die Annahme, Buhnen könnten als ein universelles Küstenschutzbauwerk entwickelt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde im Wesentlichen versucht, durch die Veränderung der Buhnengrundrisse, -formen und -materialien deren Wirkungsweise zu optimieren und an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Auf Grundlage der Modell- und Naturuntersuchungen wird nachfolgend die Wirkungsweise von durchlässigen Buhnen kurz diskutiert, und es werden neue Aspekte vorgestellt.

Durch Buhnen können die unmittelbaren Ursachen (Seegangseinwirkungen), die für die Erosion verantwortlich sind, nicht beseitigt werden. Es ist aber möglich, mit ihnen auf bestimmte Prozessabläufe positiv im Sinne des Küstenschutzes einzuwirken. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass Buhnen nicht an jeder Küste gleich gute Ergebnisse geliefert haben. Hier stellt sich die Frage, an welchen Küstenabschnitten Buhnen eingesetzt werden können und welche Prozessabläufe sie positiv beeinflussen. Da Buhnen quer zur Küste angeordnet sind, können sie nur an solchen Küstenabschnitten schützend wirken, an denen vorwiegend küstenparallele Strömungsgeschwindigkeiten mit entsprechendem küstenparallelen Sedimenttransport vorherrschen. Eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit wird dabei immer vorausgesetzt.

Weiterhin ist von Bedeutung, unter welchen hydrodynamischen Randbedingungen Buhnen ihre volle Wirkung entwickeln. Unter Sturmflutbedingungen können Buhnen nur eingeschränkt wirken. Bei solchen Verhältnissen dominieren aufgrund des Refraktionseinflusses küstennormale Wellenanlauchtungen, verbunden mit vorherrschend küstennormalen Sedimenttransportprozessen. Eine maßgebliche Schutzwirkung gegen den Wellenangriff besteht aufgrund der küstennormalen Ausrichtung der Bauwerke dementsprechend nicht. Gerade dies sind aber die Verhältnisse, für die Buhnen entwickelt wurden und bei denen ein Küstenabschnitt den Schutz der Bauwerke benötigt. Worin besteht also die Buhnenwirkung? Die Ergebnisse dieser Arbeit zum grundsätzlichen Wirkkonzept von Buhnen führen zu dem Schluss, dass sich die Buhnenwirkung aus zwei Hauptwirkmechanismen zusammensetzt: (i) eine *direkte* Wirkungsweise (Abb. 24, oben) und (ii) eine *indirekte* Wirkungsweise (Abb. 24, unten).

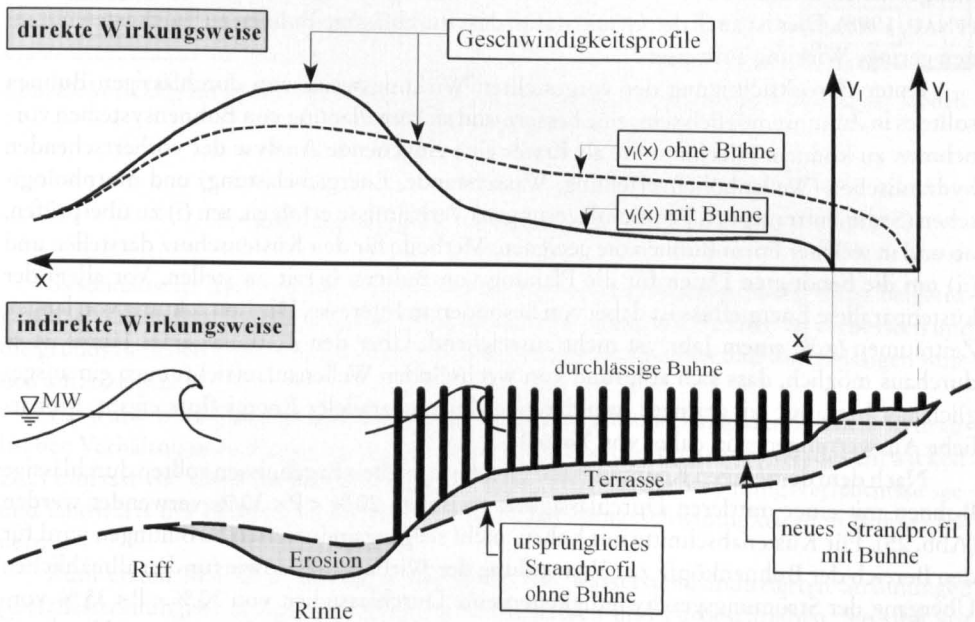


Abb. 24: Gegenüberstellung der indirekten (oben) und direkten (unten) Wirkungsweise von durchlässigen Buhnen an Küsten mit geringem Gezeiteneinfluss (schematisch)

Die *direkte Wirkungsweise* besteht in der Wirkung als Strömungswiderstand an Küstenabschnitten mit vorherrschenden küstenparallelen Strömungen und bei normalen bis mittleren Seegangsverhältnissen. Durch die direkte Wirkungsweise werden die küstenparallelen Strömungen landwärts der Streichlinie auf Kosten einer seewärtigen Strömungsgeschwindigkeitserhöhung reduziert. Durch die Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten wird weniger Turbulenz an der Sohle erzeugt, und die Transportprozesse werden verlangsamt. Als Folge werden weniger Sedimente mobilisiert und transportiert. Unter diesen hydrodynamischen Randbedingungen können feinere Kornfraktionen sedimentieren, was langfristig zum Aufbau des Vorstrandprofils in Buhnenfeldern führt. Die Naturuntersuchungen lassen erkennen, dass diese Sedimente bei starken Seegangsverhältnissen aus dem



Strandbereich in die Bühnenfelder transportiert werden, wo sie sich aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten ablagern.

Die *indirekte Wirkungsweise* der Bühnen besteht darin, dass bei Sturmflutverhältnissen ein aufgehöhhtes Vorstrandprofil (Terrasse) vorliegt. Die auf die Küste zulaufenden Wellen werden deshalb frühzeitig, d.h. in einer größeren Entfernung von der Uferlinie, gebrochen. Die Wirkungsweise von Bühnen setzt sich somit aus der Kombination der direkten Wirkung als Strömungswiderstand und dem daraus resultierenden langfristigen Aufbau des Vorstrandes (indirekte Wirkungsweise) zusammen. Die Ausführungen lassen aber auch erkennen, dass das so für Sturmflutverhältnisse künstlich geschaffene „Küstenschutzbauwerk“ empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen ist. So zeigen die Naturuntersuchungen, dass bereits mittlere Seegangsverhältnisse, verbunden mit niedrigen Wasserständen, in der Lage sind, die abgelagerten feinen Sedimente zu mobilisieren und in tiefere Regionen umzulagern. Sowohl die großräumigen als auch die kleinräumigen Wasserstandsverhältnisse haben somit einen maßgeblichen Einfluss auf die Strandprofilentwicklung in Bühnenfeldern (DETTE u. TRAMPENAU, 1998). Dies ist auch der Grund dafür, dass durchlässige Bühnen an Tideküsten nur eine geringe Wirkung aufweisen.

Unter Berücksichtigung der vorgestellten Wirkungsweise von durchlässigen Bühnen sollte es in Zukunft möglich sein, eine bessere und sichere Planung von Bühnensystemen vornehmen zu können. Hierfür sollte als Erstes eine eingehende Analyse der vorherrschenden hydraulischen (Wellenhöhenverteilung, Wasserstände, Energiebelastung) und morphologischen (Sedimenttransport, Profilumlagerungen) Verhältnisse erfolgen, um (i) zu überprüfen, ob und in welcher Form Bühnen die geeignete Methode für den Küstenschutz darstellen und (ii) um die benötigten Daten für die Planung von Bühnen bereit zu stellen. Vor allem der küstenparallele Energiefluss ist dabei von besonderem Interesse. Die Betrachtung von langen Zeiträumen (z.B. einem Jahr) ist nicht ausreichend. Über den Zeitraum eines Jahres ist es durchaus möglich, dass sich aufgrund von wechselnden Wellenanlauffrichtungen ein ausgeglichener bzw. nur ein geringer resultierender küstenparalleler Energiefluss ergibt. Monatliche Auswertungen sind daher von Vorteil.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand und den erzielten Ergebnissen sollten durchlässige Bühnen mit einer mittleren Durchlässigkeit zwischen  $20\% < P < 30\%$  verwendet werden (Abb. 25). Für Küstenabschnitte mit hohen, nicht seeganginduzierten Strömungen wird für den Bereich der Bühnenköpfe zur Vermeidung der Wirbelstraße sowie für den allmählichen Übergang der Strömungsgeschwindigkeiten eine Durchlässigkeit von  $30\% < P < 35\%$  vorgeschlagen. Dies gilt in gleicher Weise für die erste Bühne in einem Bühnensystem. Hierdurch lassen sich lokale Kolke erheblich reduzieren. Die Bühnenwurzel sollte mit Durchlässigkeiten zwischen  $20\% < P < 25\%$  ausgeführt werden. Als optimaler Bühnenabstand wird eine Bühnenlänge angesehen ( $B_A/B_L \approx 1,0$ ). Sämtliche Bühnen sollten durchlässig sein, damit ein gleichmäßiges Durchströmen des Bühnensystems gewährleistet ist. Anderenfalls muss mit Lee-Erosion gerechnet werden. Die Bühnen sollten möglichst weit in die Brandungszone hinaus ragen ( $B_L/B_Z \approx 1,0$ ). Limitierende Faktoren sind hier sicherlich die Wassertiefe und die Kolkbildung an den Bühnenköpfen. Erfahrungen an der Ostseeküste zeigen, dass Pfahlbühnen i.d.R. bis in Wassertiefen von rd. 2,5 bis 3,0 m sicher gerammt werden können. Eine Kronenhöhe von 0,5 m über Mittelwasser hat sich in der Vergangenheit bewährt und wird für den gezeitenarmen Ostseeraum als ausreichend angesehen.





Aus den Ergebnissen der Modell- und Naturuntersuchungen wurde ein neues Wirkkonzept abgeleitet, mit dem die hydraulische Wirkungsweise von durchlässigen Buhnen erklärt werden kann. Die *direkte Wirkungsweise* ist verbunden mit den verbesserten Strömungsverhältnissen landwärts der Buhnenstreichlinie bei mittleren Seegangsverhältnissen. Hierdurch werden die Ausbildung einer submarinen Terrasse in Buhnenfeldern und die seewärtige Verschiebung der Uferlinie begünstigt. Die *indirekte Wirkungsweise* ist gekoppelt mit den morphologischen Veränderungen. Bei Sturmbedingungen liegen verbesserte morphologische Bedingungen in den Buhnenfeldern vor, so dass hohe Wellen frühzeitig brechen und die Wellenenergie über einen größeren Bereich dissipiert wird. Die relativ empfindliche Stabilität dieser Terrasse bei veränderlichen Wasserstandsbedingungen mag erklären, warum durchlässige Buhnen an gezeitenarmen Küstenabschnitten eine bessere Wirkung versprechen.

In der Vergangenheit wurden i.d.R. dichte Buhnen zum Küstenschutz verwendet. Die Modell- und Naturuntersuchungen zeigen aber, dass durchlässige Buhnen erhebliche Vorteile hinsichtlich der hydraulischen Buhnenwirkung aufweisen. Deshalb wird empfohlen, den Forschungsschwerpunkt in Zukunft auf die Verbesserung der Wirkungsweise von durchlässigen Buhnen zu legen. Bei sorgfältiger weiterer Erforschung der küstennahen Prozesse sowie deren Wechselwirkungen mit durchlässigen Buhnen kann es gelingen, für die Zukunft ein Bauwerk zu entwickeln, mit dem zuverlässig und sicher der Küstenschutz gewährleistet werden kann.

## 8. Danksagung

Die zur Überprüfung der Modellergebnisse herangezogenen Naturmessdaten (Abschnitt 5) wurden im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Wirkungsweise von Einbauten in See“, das dankenswerterweise durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter der Nr. MTK 0546 gefördert wurde, gewonnen. Die hydraulischen Modelluntersuchungen im Wellenbecken, die den eigentlichen Gegenstand dieses Beitrages bilden, wurden in Eigenfinanzierung des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, durchgeführt.

## 9. Schriftenverzeichnis

- BAKKER, W. T., HULSBERGEN, C. H., ROELSE, P., DE SMIT, C. u. SVASEK, J. N.: Permeable groynes: Experiments and practice in The Netherlands. Proceedings of the 19th Conference on Coastal Engineering, Vol. 2, pp. 2026–2041, USA, 1984.
- DETTE, H. H. u. TRAMPENAU, T.: Wirkungsweise von Einbauten in See (Abschlussbericht). Teilprojekt: Hydrologische Untersuchungen. Leichtweiß-Institut für Wasserbau TU Braunschweig, Bericht Nr. 828, 1998 (unveröffentlicht).
- EAK: Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen: Empfehlungen für Küstenschutzwerke, EAK 1993, Die Küste, Heft Nr. 55, 1993.
- FLEMING, C. A.: Guide on the uses of groynes in coastal engineering. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Report 119, 1990.
- JÄGER, B. u. WEISS, D.: Untersuchungen zur Wirkungsweise von Buhnen in ausgewählten Küstenabschnitten. Teil 1 Testgebiet (Weiss), Teil 2 Kataster (Jäger). WWD Küste Warnemünde, 1986/90 (unveröffentlicht).
- KAMPHUIS, J. W.: The coastal mobile bed model – does it work? Proceedings Modelling '75, San Francisco, pp. 993–1009, 1975.
- KOLB, O.: Farbsandversuche mit lumineszenten Sanden in Buhnenfeldern. Ein Beitrag zur Hydrographie der ufernahen Meereszone. Petermanns Geographische Mitteilungen, 114. Jg., Heft 2, 1970.

