

Einreihige Holzpfahlbuhnen im technischen Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern

Von DIETRICH WEISS

Zusammenfassung

In den über weite Strecken negativen Sedimenthaushalt der mecklenburg-vorpommerschen Küste greifen 900 Stück Buhnen ein, um eine Sandanreicherung auf Strand und Schorre zu erwirken und den Küstenrückgang zu vermindern oder aufzuheben. Ihre funktionelle und konstruktive Gestaltung erfuhren die Buhnen in der Regel durch die jeweils vorliegenden, oft wechselhaften Erfahrungen aus der Praxis.

Der Autor versucht für den häufigsten Typ, für die einreihigen Holzpfahlbuhnen, mit Hilfe von 14 Testgebieten eine Analyse vorzunehmen. Parameter wie Buhnenlänge, Buhnenabstand, Kronenhöhe, Pfahldurchmesser, Pfahlabstand und Buhndurchlässigkeit werden erfaßt und mit den Bedingungen des jeweiligen Küstenabschnitts (Morphologie, Belastung) in Beziehung gebracht. Einzelheiten der hydro- und sedimentdynamischen Prozesse werden nicht erforscht; statt dessen werden die resultierenden Wirkungen auf die Morphologie gezeigt. Für alle Testgebiete wird die Veränderung der Uferlinie vom Jahr des Buhnenbaus (das älteste untersuchte Buhnensystem ist aus dem Jahr 1936) bis zur Gegenwart verfolgt. Empfehlungen für den Entwurf von einreihigen Holzpfahlbuhnen werden gegeben.

Summary

Over 900 groynes are located on the reaches of the Mecklenburg-Vorpommern coast having a natural negative sediment balance, in order to generate sand replenishment and to reduce or eliminate coastal recession. The design criteria and construction details were essentially based on practical experience which often differed from situation to situation.

The author attempts an analysis of the most frequently used construction technique, namely single file wood piles, based on 14 test cases. The basic parameters: groyne length, spacing and transmissivity, pile spacing, height and diameter are correlated with the local coastal characteristics (morphology, loads). The evaluation involved the composite effect on the morphology as opposed to a detailed investigation of hydrodynamical and sedimentological processes. The changes in the coast line were determined for each test case following construction. The oldest structure was built in 1936. Design recommendations are also given for single file wood pile groynes.

Inhalt

1. Einleitung, Problemstellung	206
2. Buhnen an der mecklenburgisch-vorpommerschen Küste	206
2.1 Untersuchungsmethode	208
2.2 Ermittelte funktionelle und konstruktive Parameter	208
2.3 Wirkungen	220
3. Wertung, Ausblick	223
4. Schriftenverzeichnis	224

1. Einleitung, Problemstellung

Die einreihigen Holzpfahlbuhnen gehören als ins Wasser gerammte, hölzerne Pfahlreihen zu den konstruktiv einfachsten Ingenieurbauten. Nicht einfach aber ist für den entwerfenden Ingenieur der Umgang mit der Buhnenfunktion. Es klafft bis zum heutigen Tage eine Lücke zwischen mit dem Bau verbundenen Erwartungen und den eingetretenen Ergebnissen bei der Verbesserung der Sand- und Strandverhältnisse. Die Wirkungsweise scheint nicht hinreichend geklärt; die Buhnenwirkung nach Umfang und Zeit nicht exakt vorhersagbar. STUEMUND (1966), der Leiter des früheren Küstenschutzamtes in Graal-Müritz, charakterisierte in den 60er Jahren die Buhnenproblematik mit der Feststellung: „Will man gute Buhnenwirkung nachweisen, wählt man für den Buhnenbau einen entsprechend geeigneten Küstenabschnitt; will man Wirkungslosigkeit zeigen, einen entsprechend anderen.“ Danach ist die Erfüllung der Buhnenfunktion an abschnittseigene Verhältnisse, an die hydro- und sedimentdynamische Situation mit entsprechenden morphologischen Bedingungen gebunden.

Welche Ansichten Wasserbau- und Küsteningenieure seit mehr als 100 Jahren zum Einsatz von Buhnen entwickelt haben, geht aus der vor 30 Jahren erschienenen Publikation über Buhnenliteratur von PETERSEN (1961) hervor. Zusammenfassend lautet die Feststellung, daß eine Zahl offener Fragen und daraus resultierend weit voneinander abweichende Auffassungen zwischen Wirksamkeit und Wirkungslosigkeit von Buhnen die damalige Situation beherrschten.

Seither gab es eine Reihe von großangelegten Untersuchungen zur Buhnenwirkung, zu denen an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern die Arbeit von KOLP (1966) unter Verwendung von Farbsand zählt. Aus den jeweiligen räumlichen und zeitlichen Ausschnitten der komplexen Prozesse die gewünschten Verallgemeinerungen abzuleiten, stößt naturgemäß auf Schwierigkeiten.

Die „Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken – EAK 1981“ bilden die am weitesten anwendungsorientierte Zusammenfassung des Erkenntnisstandes; aber auch sie weisen ausdrücklich daraufhin, daß die „funktionelle Gestaltung nach wie vor problematisch“ ist (STÖVER, 1982).

Gliedert man die Küste in Systeme der Sedimentbilanz und erfaßt in diesen wiederum die Bereiche mit positivem, ausgeglichenem und negativem Sedimenthaushalt (GURWELL, WEISS, ZIELISCH, 1982), so sind es die letzteren, die als Abtragsbereiche an Flachküsten Maßnahmen zur Verbesserung der lokalen Materialbilanz benötigen. Denn Rückgang (z. B. als Reduzierung der Vorlandbreite oder der Dünenmächtigkeit) schwächt die Leistungsfähigkeit der Hochwasserschutzanlagen. Das Bilanzsystem ist geprägt durch die räumlich-zeitliche Gesamtheit der Wirkungen der Einzelereignisse. Schwankungen der Ereignisse verursachen Schwankungen der Wirkungen, schaffen räumliche und zeitliche Änderungen und Differenzierungen im Sedimenthaushalt, besonders schmerzlich spürbar in Abtragsbereichen. Mit Buhnen funktionell und konstruktiv derartig differenziert und treffend vorzugehen und entgegenzuwirken ist unmöglich (WEISS, 1989).

2. Buhnen an der mecklenburgisch-vorpommerschen Küste

Nach PETERSEN (1961) wurden die ersten Buhnen an der Ostsee auf der Insel Ruden im Jahre 1843 auf Vorschlag von HAGEN gebaut. Fast 150 Jahre später, im Jahre 1990, zählten 900 Buhnen zum Bestand der Anlagen an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern. Bei einem mittleren Abstand $BA = 74$ m sind somit 66,6 km der Küste mit Buhnen bebaut. Aus Tabelle 1

Tabelle 1. Übersicht über die Bühnensysteme an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern (nach JÄGER, B. und WEISS, D., 1986/1990)

Nr. System	Bühnensysteme				Bühnensysteme				Bühnensysteme				Konstruktionsart			
	Gesamtküste		Flachküste		Steilküste		einreihige offene Pfahlbuhnen		einreihige dichte Pfahlbuhnen		zweireihige dichte Pfahlbuhnen		B aus 2 Pfahlreihen mit Stein- auspackung			
	Stck.	km	Stck.	km	Stck.	km	Stck.	km	Stck.	km	Stck.	km	Stck.	km		
1 Poel	8	0,370	8	0,370	—	—	—	—	8	0,370	—	—	—	—		
2 Kühlungsborn	51	3,240	38	2,380	13	0,860	42	2,760	9	0,480	—	—	—	—		
3 Nienhagen	6	0,365	—	—	—	0,365	1	—	4	0,275	—	—	—	1		
4 Warnemünde-Graal	117	10,060	86	7,160	31	2,9	95	8,180	22	1,880	—	—	—	—		
5 Graal-Müritztz	56	4,150	56	4,150	—	—	27	1,815	29	2,335	—	—	—	—		
6 Dierhagen-Wustrow	123	7,450	109	6,755	14	0,695	54	3,095	66	4,200	3	0,155	—	—		
7 Ahrenshoop-Darß	124	6,420	112	5,840	12	0,580	71	3,600	14	0,655	3	0,125	36	2,040		
8 Prerow-Zingst	98	10,940	98	10,940	—	—	98	10,940	—	—	—	—	—	—		
9 Hiddensee	140	10,105	140	10,105	—	—	101	6,330	39	3,775	—	—	—	—		
10 Dranske	48	3,055	40	2,340	8	0,715	3	0,140	45 ¹⁾	2,915	—	—	—	—		
11 Glowe	35	1,750	31	1,550	4	0,200	22	1,100	7	0,350	6	0,300	—	—		
12 Zempin-Koserow	51	5,000	40	4,100	11	0,900	32	2,765	19	2,235	—	—	—	—		
13 Sreckelsberg-Stubbenfelde	25	2,110	7	0,620	18	1,490	—	—	25	2,110	—	—	—	—		
14 Bansin	18	1,625	18	1,625	—	—	18	1,625	—	—	—	—	—	—		
alle Bühnensysteme	900	66,640	783	57,935	117	8,705	564	42,350	287	21,580	12	0,580	37	2,130		
mittl. Bühnenabstand		74,04 m		73,99 m		74,40 m		75,09 m		75,19 m				57,57 m		

¹⁾ 7 Bühnen haben am Kopf ein uferparalleles T-Stück

ist zu entnehmen, daß sich 87 % (783 Stück) der Buhnen an der Flachküste und 13 % (117 Stück) an der Steilküste befinden. Nach der Konstruktionsart dominiert mit 94,5 % (851 Stück) die einreihige Holzpfahlbuhne. Selten gebaut wurden und werden die doppelreihigen Pfahlbuhnen und die Buhnen aus zwei Pfahlreihen mit Stein- und Faschinentauspackung. Die vorherrschende Stellung der einreihigen Holzpfahlbuhnen führte zur Untersuchung funktionseller und konstruktiver Parameter ausgeführter Systeme dieses Typs (JÄGER u. WEISS, 1986/1990). Dafür wurden 14 Testgebiete ausgewählt (Abb. 1), die jeweils aus drei Buhnenfeldern und vier Buhnen bestehen und repräsentativ innerhalb der einzelnen Buhnenysteme liegen. Die Untersuchungen wurden in den Jahren 1985 bis 1990 durchgeführt.

2.1 Untersuchungsmethode

Um der vorhandenen Vielfalt der einreihigen Pfahlbuhnen gerecht zu werden, wurden fünf Systeme mit dichten und neun Systeme mit offenen Buhnen ausgewählt. Bei den offenen wurden sechs Systeme der 60er und 70er Jahre und drei der 80er Jahre, die sich ausdrücklich von den Vorgängern abheben, verwendet (Tabellen 2 und 3). Als Standorte der Testsysteme wurden Küstenabschnitte mit natürlichen Bedingungen ohne Inhomogenitäten in der Morpho-, Hydro- und Sedimentdynamik, wie z. B. Knick im Uferverlauf, Existenz von markanten Einbauten oder Durchführung von Aufspülungen, angestrebt. Die Untersuchungen sollen auch in Zukunft fortgeführt werden, wobei einige Testgebiete aufgrund von Aufspülungen aufgegeben und, wenn möglich, durch neue ersetzt werden sollen.

Im wesentlichen werden für die Charakterisierung der Buhnenysteme die Angaben zur Bauwerks- und Standortgeometrie und deren zeitliche Änderung herangezogen. Die Schorre ist durch das zwischen Uferlinie und 4-m-Isobathe herrschende Neigungsmaß m_4 ($\tan \alpha = 1:m_4$) beschrieben. Diese 4-m-Tiefenlinie liegt außerhalb des Hauptbrandungsraumes und dessen starken morphologischen Änderungen während der Sturmhochwasser. Die Riffkörper bleiben unberücksichtigt. Alle Untersuchungen sind auf Mittelwasser bezogen. Die Buhnen sind generalisiert rechtwinklig zur Uferlinie angesetzt; vorhandene Abweichungen werden als vernachlässigbar klein angesehen. Die maßgeblichen Parameter der Buhnen sind: Buhnenlänge (von Uferlinie bis Buhnenkopf) BL, Buhnenabstand (untereinander) BA, Kronenhöhe (über Normal) KH, Pfahldurchmesser PD, Pfahlabstand PA und daraus ermittelt Durchlässigkeit DU.

Die Buhnenlänge BL bezeichnet somit den in die hydro- und sedimentdynamischen Vorgänge bei mittleren Bedingungen eingreifenden Buhnteil. Mit den natürlichen, räumlich und zeitlich wechselnden Küstenveränderungen ändern sich die Funktionsbedingungen jedes Buhnenfeldes. Daher ist es schwer, vergleichende Untersuchungen (14 Testgebiete, Abb. 1) einander zuzuordnen. Im vorliegenden Fall wird versucht, durch die Untersuchungssituation „Bauzeitpunkt der Buhnen“ (mit Buhnenlänge BL_0) für alle den gleichen Punkt des Einflußprozesses zu treffen. Die Untersuchungssituation „Meßzeitpunkt“ (mit BL_t) erfaßt dagegen die einzelnen Testgebiete in möglicherweise sehr unterschiedlichen Entwicklungsphasen. Kontinuierliche Meßdaten über die Bauwerke und den Schorre-Strand-Bereich seit dem Buhnenbau liegen aber nicht vor.

2.2 Ermittelte funktionelle und konstruktive Parameter

Die Buhnenlänge BL wird in Abhängigkeit von einer maßgebenden Wellenlänge λ_b (bei Windgeschwindigkeit 7 Bft), von dem Schorreineigungsmaß m_4 und dem Grad der Küstenbe-

Tabelle 2. Parameter der einreihigen Holzpfehlbuhnen in den Testgebieten (Buhnenlänge, Bühnenabstand, Bühnenabstand, Kronenhöhe)

Nr.	Testgebiet; Küsten- abschnitt	Küsten- kilometer Kkm	mittl. Bühnenlänge (BL)		mittl. Bühnenabstand		$\frac{BA}{BL}$		mittl. Kronenhöhe (KH) (m ü MW)
			Bauzeitpunkt (m)	Messzeitpunkt (m)	Bauzeitpunkt (BA) (m)	Messzeitpunkt (1)	Bauzeitpunkt (1)	Messzeitpunkt (1)	
1	Kühlungsborn	122,500	16,30	15,30	55,97	3,43	3,66	0,46	
2	Markgrafenheide	153,250	62,80	52,83	88,47	1,41	1,67	0,21	
3	Graal	161,500	42,70	33,77	73,67	1,73	2,18	0,37	
4	Dierhagen	173,500	42,46	34,25	64,70	1,52	1,89	0,63	
5	Wüstrow	175,500	23,50	28,50	64,50	2,74	2,26	0,23	
6	Ahrenshoop	181,750	¹⁾	37,83	48,97	¹⁾	1,29	0,12	
7	Vordarf	183,500	41,00	50,65	48,40	1,18	0,96	0,18	
8	Zingst	208,500	88,38	79,75	145,37	1,65	1,82	0,21	
9	Neuendorf	H 6,800	67,50	47,38	89,33	1,32	1,89	0,51	
10	Zempin	U 17,000	53,75	53,75	57,87	1,08	1,08	0,21	
11	Bansin	U 34,000	77,75	40,60	99,90	1,28	2,46	0,28	
12	Rostocker Heide	158,500	85,25	74,95	89,33	1,05	1,19	0,53	
13	Rostocker Heide	160,250	98,50	64,90	89,70	0,91	1,38	0,40	
14	Vitte	H 10,200	67,75	62,05	61,07	0,90	0,98	0,12	
	Mittelwerte (1-14)		59,04	48,32	76,95	1,55	1,77	0,32	

¹⁾ nicht feststellbar; wahrscheinlich Landanschluß landwärts verlängert und Pfähle am Kopf zerstört

Tabelle 3. Parameter der einreihigen Holzpflahlbuhnen in den Testgebieten (Pflahldurchmesser, Pflahlabstand, Durchlässigkeit)

Nr.	Testgebiet; Küstenabschnitt	Küsten- kilometer Kkm	mittl. Pflahldurchmesser (PD)			mittl. Pflahlabstand (PA)			PA PD			mittl. Durchlässigkeit (DU)		
			Landseitige Hälfte (cm)	seesitige Hälfte (cm)	Gesamt (cm)	Landseitige Hälfte (cm)	seesitige Hälfte (cm)	Gesamt (cm)	Landseitige Hälfte (l)	seesitige Hälfte (l)	Gesamt (l)	Landseitige Hälfte (%)	seesitige Hälfte (%)	Gesamt (%)
1	Kühlungsborn	122,500	19,2	20,1	19,6	3,0	3,4	3,2	0,16	0,17	0,16	12,9	14,4	13,9
2	Markgrafenheide	153,250	23,2	26,9	25,0	8,5	19,7	14,1	0,37	0,73	0,56	26,8	42,1	36,0
3	Graal	161,500	21,7	25,8	23,9	2,3	2,8	2,6	0,11	0,11	0,11	9,6	9,9	9,8
4	Dierhagen	173,500	21,3	23,1	22,2	3,0	3,4	3,2	0,14	0,15	0,15	12,3	12,8	12,6
5	Wustrow	175,500	24,6	27,3	25,9	2,2	2,8	2,5	0,09	0,10	0,10	8,3	9,1	8,9
6	Ahrenschoop	181,750	19,3	22,9	21,2	11,4	15,3	13,4	0,59	0,67	0,63	37,2	39,9	38,7
7	Vordarfß	183,500	20,1	21,8	21,0	8,0	14,5	11,4	0,40	0,67	0,54	28,0	39,9	35,0
8	Zingst	208,500	24,4	26,4	25,4	16,0	23,8	19,9	0,65	0,90	0,78	39,6	47,3	43,9
9	Neuendorf	H6,800	24,7	25,6	25,2	2,2	2,3	2,3	0,09	0,09	0,09	8,1	8,2	8,2
10	Zempin	U17,000	22,2	25,5	23,9	12,5	19,7	16,2	0,56	0,77	0,68	35,8	43,6	40,3
11	Bansin	U34,000	28,5	27,8	27,2	9,2	13,0	11,1	0,35	0,47	0,41	25,7	31,4	28,9
12	Rostocker Heide	158,500	25,1	28,0	26,6	4,4	11,8	8,3	0,18	0,42	0,31	14,6	29,5	23,7
13	Rostocker Heide	160,250	25,6	26,6	26,1	4,7	15,1	9,9	0,18	0,57	0,37	15,6	36,1	25,9
14	Vitte	H10,200	24,6	27,9	26,3	9,6	11,4	10,5	0,39	0,41	0,40	28,0	28,8	28,5
	Mittelwerte (1-14)		23,0	25,4	24,3	6,9	11,4	9,2	0,30	0,45	0,38	21,6	28,1	25,3

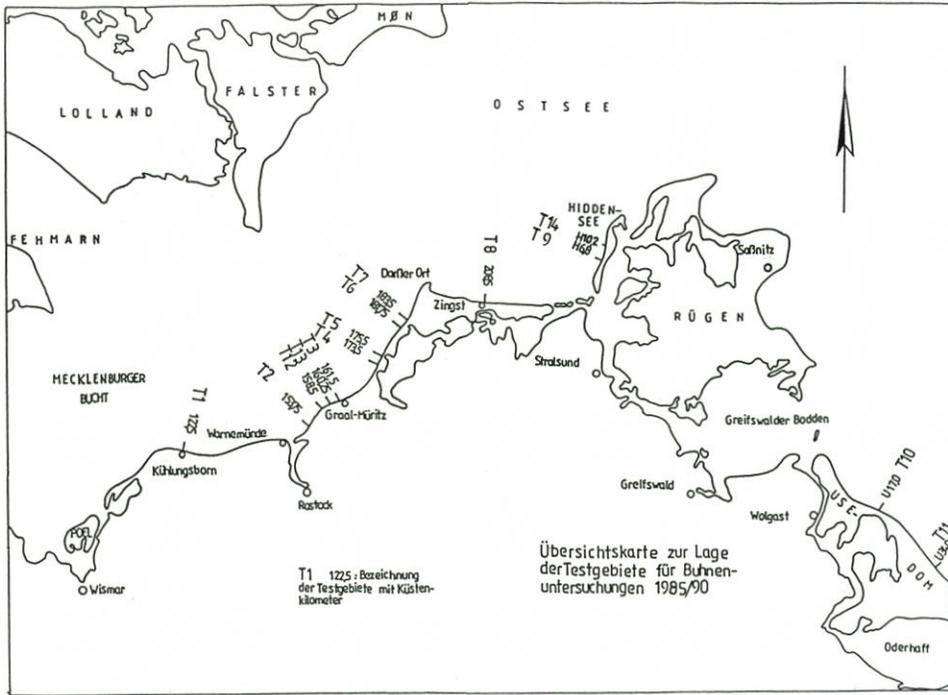


Abb. 1: Übersichtskarte zur Lage der Testgebiete für Buhnenuntersuchungen 1985/90

lastung (bei grober Einteilung) in Abb. 2 dargestellt. Bestimmend wirkt die Neigung. Bei einer maßgebenden Wellenlänge λ_b zwischen 25 und 30 m erreichen Buhnen bei mittlerem Belastungsgrad und flachen Neigungen $m_4 = 80$ bis 100 eine Länge $BL = 50$ bis 80 m; bei steilen Neigungen $m_4 = 50$ bis 60 dagegen $BL = 30$ bis 50 m. Die Testgebiete zeigen, daß es zweckmäßig ist, bei der Bestimmung der Buhnenlänge die angestrebte seewärtige Uferlinienverlagerung zu berücksichtigen. Zum Bauzeitpunkt sollen daher die relativen Parameter BL_o/λ_b über denen der Wirkungsbedingungen nach erfolgten positiven morphologischen Änderungen BL_t/λ_b liegen. Dies ist beispielsweise bei den Bauten der 80er Jahre (Testgebiete 11 bis 13) ausdrücklich der Fall (Abb. 2 oben und unten; Tabelle 2).

Der Buhnenabstand BA steht in engem Zusammenhang zur Buhnenlänge BL, weshalb auch der dimensionslose Verhältniswert BA/BL verwendet wird. Abb. 3 zeigt aber ebenso die Beziehung von BA zur Durchlässigkeit der Buhne und zur Küstenbelastung. Durch die morphologischen Veränderungen sind auch hier die Situationen „Bauzeitpunkt“ mit BL_o und „Meßzeitpunkt“ mit BL_t unterschiedlich, wobei im allgemeinen bei der angestrebten seewärtigen Uferlinienverlagerung $BA/BL_t > BA/BL_o$ gilt. Die Testgebiete weisen den Vorzugsbereich zwischen $BA/BL = 1$ bis 2,5 bei $DU \rightarrow 0\%$ und $BA/BL = 0,8$ bis 1,5 bei $DU = 35\%$ aus. Große Buhnenabstände, die zu $BA/BL = 4$ führen würden, sind bei Holzpfahlbuhnen selbst bei geringster Durchlässigkeit oder nahezu vollständiger Dichte ($DU \rightarrow 0\%$) generell nicht im Einsatz. Offenbar ist dann für einen ausreichenden Eingriff in die hydrodynamischen Vorgänge der Bauwerksquerschnitt zu leicht. Das Testgebiet 1 (Kühlungsborn) muß hier ausgenommen werden; es erfährt danach einen zusätzlichen überprägenden Einfluß.

Mit der traditionellen Einteilung in dichte und offene Buhnen ist die Rolle der Durchlässigkeit DU charakterisiert (Abb. 4). Während dichte Buhnen über die ganze Buhnenlänge

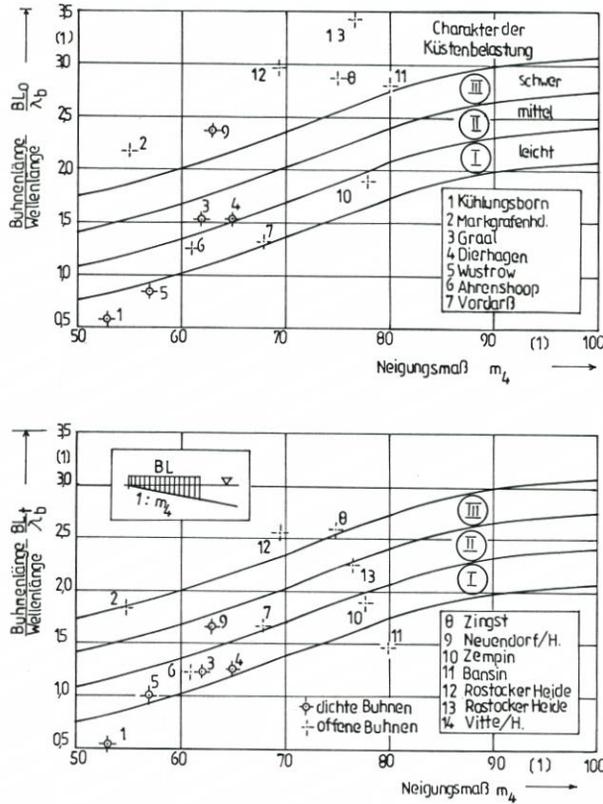


Abb. 2: Verhältnis von Bühnenlänge, maßgeb. Wellenlänge, Schorreignung und Küstenbelastung bei einreihigen Holzpfahlbuhnen (BL/λ_b : oben zum Bauzeitpunkt; unten zum Meßzeitpunkt)

gleichbleibend geringste Pfahlabstände besitzen, zeigt das Konstruktionsschema der offenen Bühnen (Abb. 5) in Richtung See eine gestaffelte Abstandsvergrößerung. Die gemessenen Durchlässigkeiten (Tabelle 3) entstammen dem Aufmaß 1985/90, bei dem stellvertretend für die Gesamtheit der Pfähle einer Bühne immer jeder 5. Pfahl und jeder 5. Abstand (5; 10; 15; . . . ; n-5) ab Uferlinie bestimmt wurden. Außer der Gesamtdurchlässigkeit wurde im Interesse einer vergleichenden Aussage die Durchlässigkeit der land- und seeseitigen Bühnenhälfte ermittelt.

Abb. 4 zeigt, daß seit dem Bühnenbau der 80er Jahre (Testgebiete 11 bis 13) die Durchlässigkeit stufenlos zwischen 8% und 45% verwendet wird. Dies entspricht der Variation der Einsatzbedingungen in der Natur. Die frühere Praxis, nach der entweder dichte ($DU = 8$ bis 15%) oder offene Bühnen ($DU = 35$ bis 45%) eingesetzt wurden und der Durchlässigkeitsbereich $DU = 15$ bis 35% nicht zur Anwendung kam, ist zu Ende. Nach Meinung des Autors könnte die Grenze zwischen dichten und offenen Bühnen (will man die Begriffe beibehalten) bei $DU = 20\%$ liegen. Die Verwendung von $DU > 35\%$ sollte aber im allgemeinen nicht bei Standardbühnen eines Systems, sondern nur bei Bühnensystemabschlüssen (Auflösungen) erfolgen. Die nahezu unveränderte Lage der Werte aus den Testgebieten 6, 8 und 10 ($BA/BL_t \approx BA/BL_0$) in Abb. 3 deutet auf eine ungenügende Wirkung von Bühnen mit $DU > 35\%$ hin.

Interessant ist im Zusammenhang mit der Durchlässigkeit die Feststellung, die aus Abb. 2

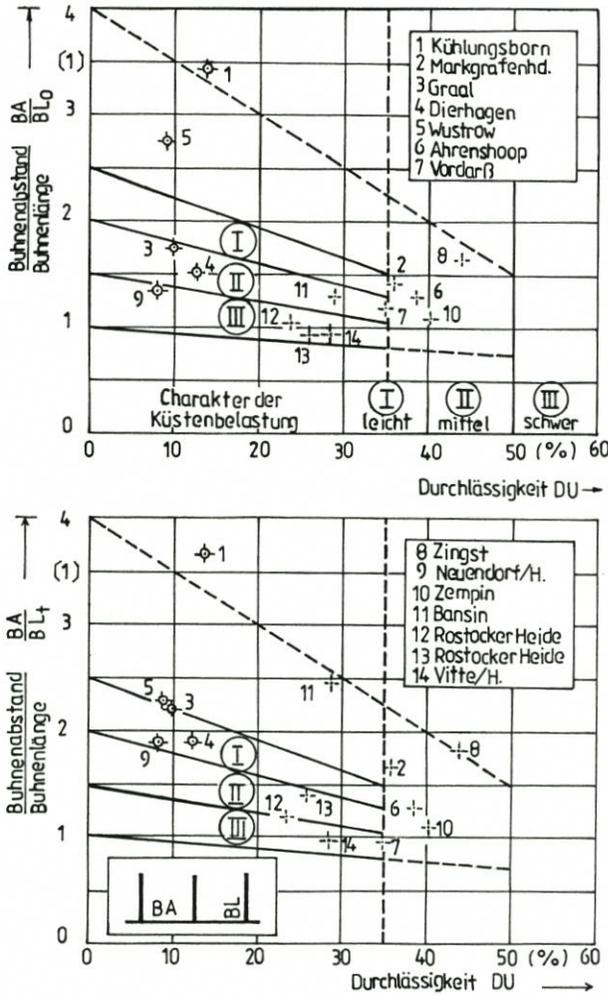


Abb. 3: Verhältnis von Buhnenabstand, Buhnenlänge, Durchlässigkeit und Küstenbelastung bei einreihigen Holzpfahlbuhnen (BA/BL: oben zum Bauzeitpunkt; unten zum Meßzeitpunkt)

sichtbar wird: Bei steilen Neigungen ($m_4 < 65$) kommen dichte Buhnen ($DU < 20\%$), bei flachen Neigungen ($m_4 > 65$) offene Buhnen ($DU > 20\%$) zum Einsatz.

Beispiele für die Staffelung der Pfahlabstände und der Durchlässigkeit (laut Projekt) von offenen Buhnen sowie für die dabei erreichte Gesamtdurchlässigkeit (DU an ausgeführten Buhnen gemessen) gibt Abb. 5. Die Durchlässigkeit im Bereich der Uferlinie soll klein gehalten werden ($PA_a \rightarrow 0$).

Mit einer positiven Wirkung auf den Sandhaushalt im Buhnensystem selbst ist eine negative im nachbarlichen, unverbauten Küstenbereich verbunden, die sogenannte *Lee-Erosion*. Ursache ist die unmittelbar anschließend an die letzte Buhne neu angefachte Brandungsströmung, die durch die hier wieder unbeeinflusst gegen das Ufer anlaufenden Wellen bei schrägem Auftreffwinkel entsteht. Die Strömung besitzt ein Sedimenttransportvermögen, welches nach Sättigung trachtet und daher Sandaufnahme und Abtransport erzeugt.

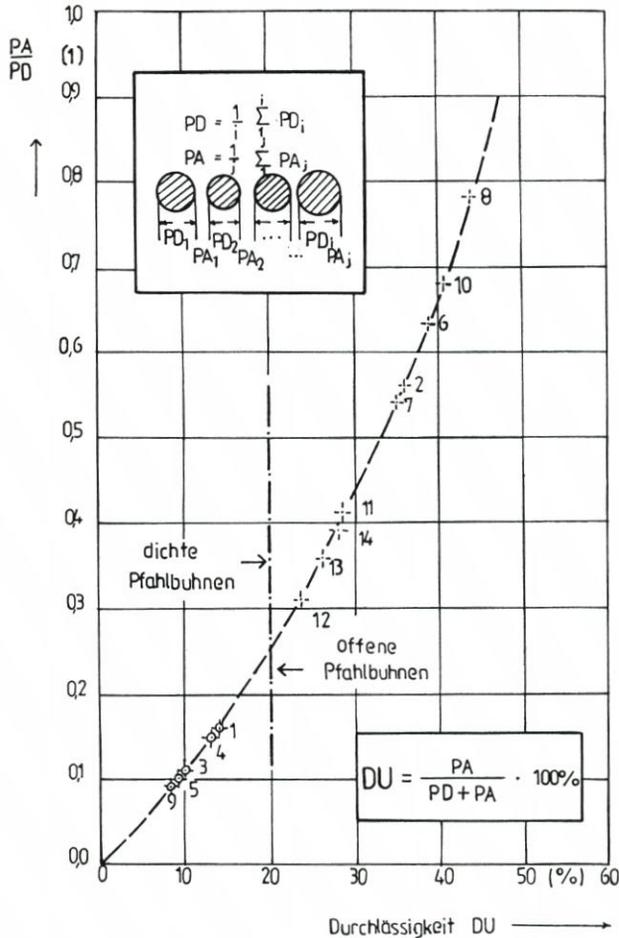


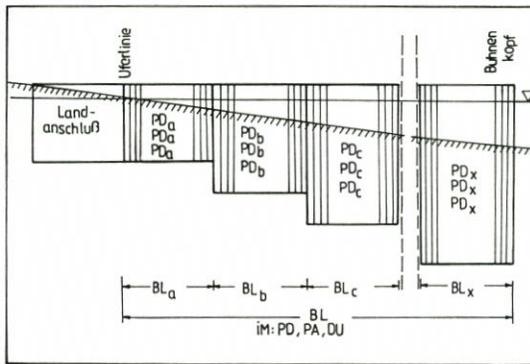
Abb. 4: Gemessene Durchlässigkeit von einreihigen Pfahlbuhnen an der Ostseeküste (PA Pfahlabstand; PD Pfahldurchmesser; DU Durchlässigkeit)

Da diese nicht durch die geringere Sandzufuhr aus dem angrenzenden Buhnenbereich (vermindertes Transportvermögen der Strömung durch Buhneneinfluß) ausgeglichen wird, herrscht Lee-Erosion mit Sedimentmangel und verstärktem Küstenrückgang, oft auf einer Länge vom Mehrfachen des Buhnenabstandes BA.

Der Unterbindung oder Verminderung der Lee-Erosion dient daher die gestaffelte Auflösung des Buhnenystems, bei der schrittweise über mehrere Buhnenfelder der Einfluß des Schorreverbau aufgehoben wird und gleichzeitig die Brandungsströmung mit ihren Wirkungen entsteht und Feld für Feld zunimmt. Die Auflösung ist durch Änderung der maßgeblichen Buhnenparameter BL, BA und DU, einzeln (Abb. 6) oder kombiniert möglich. Aufgrund von hydrodynamischen Überlegungen fanden die Verkürzung von BL (Abb. 6a) oder die Vergrößerung von BA (Abb. 6b), mit möglicherweise Heranführung einer vor den Buhnenköpfen laufenden küstenparallelen Strömung oder Schaffung von Einzelbuhnen ohne Systemwirkung, im Buhnenbau Mecklenburg-Vorpommerns keine Anwendung. Vielmehr wird seit Anfang der 70er Jahre die Variation der Durchlässigkeit DU (Abb. 6c, Tabelle 4)

lf. Nr.	Testgebiet			Bühnenlänge im Baujahr					Pfählabstand lt. Projekt				DU gemessen
	System	Kkm	Baujahr	BL	BL _a	BL _b	BL _c	BL _d	PA _a	PA _b	PA _c	PA _d	
				m	m	m	m	m	cm	cm	cm	cm	
2	Markgrafhd.	15325	1971	6285	1885	10,0	10,0	24,0	10	15	20	25	36,0
8	Zingst	20850	1964	8940	1440	24,0	24,0	26,0	10	15	20	25	43,9
10	Zempin	U1700	1962	5375	675	15,0	15,0	17,0	10	15	20	25	40,3
11	Bansin	U3400	1980	7775	1800	2775	32,0		≈ 3	10	15		28,9
12	Rost Heide	15850	1986	8525	4525	20,0	20,0		≈ 3	10	15		23,7
13	Rost Heide	16025	1981	9850	5850	20,0	20,0		≈ 3	10	15		25,9
14	Vitte	H 1020	1972	6775	1675	11,0	21,0	19,0	10	15	20	25	28,5

a) Beispiele der abgestuften Pfählabstände sowie der gemessenen Gesamtdurchlässigkeit



b) Konstruktionsschema

Abb. 5: Staffelung der Durchlässigkeit bei offenen, einreihigen Pfahlbuhnen

praktiziert. Dabei wird nach dichten Standardbuhnen des Systems eine Auflösung über drei oder vier Stufen bei Verwendung von fünf oder sechs Bühnen gewählt. Bei offenen Standardbuhnen dagegen werden Auflösungen mit zwei oder drei Stufen mit jeweils einer Bühne eingesetzt. Der Grundgedanke zur Dimensionierung der Pfählabstände $PA_Z = 1,5 \cdot PA_{Z-1}$ geht auf SCHOMANN (1970) zurück. Er ist im Beispiel Zempin (Tabelle 4) durchgehend verwirklicht. Die anderen Fälle zeigen Abwandlungen.

Schließlich noch einige Bemerkungen zur Kronenhöhe der Pfahlbuhnen. Aus allen vorangegangenen Darstellungen geht hervor, daß ein Bühnensystem dann die günstigsten Bedingungen für einen ausgeglichenen Sedimenthaushalt schafft und die geringste Lee-Erosion hervorruft, wenn das Sediment aus der dominierenden und der entgegengerichteten Brandungsströmung in möglichst gleichem Maße zur Akkumulation gebracht wird. An der mecklenburgisch-vorpommerschen Ostseeküste erzeugen die häufigen Südwest- und Westwinde über weite Strecken die dominierende Brandungsströmung von West nach Ost. Dabei herrschen Mittelwasser und Wasserstände mit ein oder zwei Dezimetern darunter. Anders bei Nord- und Nordostwinden und der entgegengerichteten Brandungsströmung; mit ihr sind häufig Wasserstände mit mehreren Dezimetern über Normal, bei Einzelereignissen auch mit mehr als einem Meter über Normal verbunden. Die Krone der Bühnen muß also aus funktionellen Gründen die für Holzpfähle mögliche Höhe von 0,5 bis 0,6 m über Normal ausschöpfen.

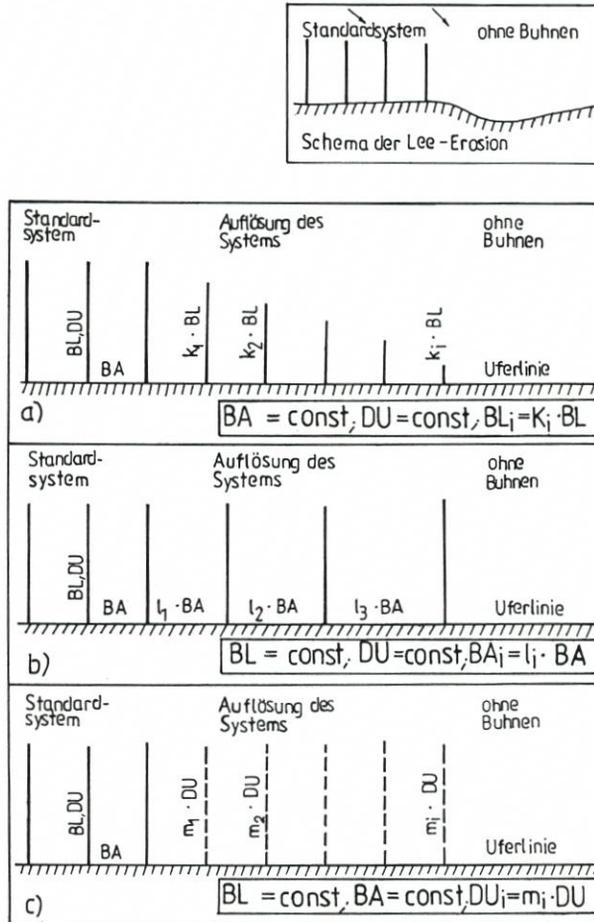


Abb. 6: Gestaffelte Auflösung von Bühnensystemen beim Übergang in einen natürlichen, unverbauten Küstenabschnitt a) Verkürzung von BL, b) Vergrößerung von BA, c) Vergrößerung von DU

Von den Testgebieten haben das System Dierhagen mit i. M. 0,63 m über Normal die größte und die Systeme Ahrenshoop und Vitte/Hiddensee mit i. M. 0,12 m über Normal die geringste Kronenhöhe. Während bei den älteren Systemen eine möglichst große Höhe angestrebt wurde, führte man in den 60er Jahren als Standardhöhe 0,2 m über Normal ein, wofür es nach Ansicht des Autors keine akzeptable Begründung gab. Erst in den 80er Jahren wurden wieder Bühnen mit 0,5 m über Normal gerammt. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen das 1936 vor Neuendorf/Hiddensee gerammte Bühnensystem mit der mittleren Kronenhöhe 0,51 m über Normal und einer mittleren Durchlässigkeit von 8,2 %. Anders dagegen das Bühnensystem Vitte/Hiddensee, was auf den Abb. 9 und 10 sichtbar ist. Die hier abgebildeten Bühnen wurden im Jahre 1972 gebaut, besitzen eine mittlere Kronenhöhe von 0,12 m über Normal und eine mittlere Durchlässigkeit von 28,5 %.

Tabelle 4. Beispiele für ausgeführte Auflösungen (Abschlüsse) von Bühnensystemen an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern

Nr. System	Baujahr	Standardbühne (Z=0)				Auflösung																		
		PA _a	PA _b	PA _c	PA _d	1. Stufe (Z=1)			2. Stufe (Z=2)			3. Stufe (Z=3)			4. Stufe (Z=4)									
		PA _a	PA _b	PA _c	PA _d	n	PA _a	PA _b	PA _c	PA _d	n	PA _a	PA _b	PA _c	PA _d	n	PA _a	PA _b	PA _c	PA _d	n			
1	Zempin	10	15	20	25	1	15	23	30	38	1	23	35	45	57									
2	Glowe		dicht			4	10	15	20	25	1	15	23	38		1	23	35	57					
3	Bansin	15				1	10	15	20	25	1	15	25	30	40	1	20	35	45	55				
4	Wustrow		dicht			2	dicht	10	15		1	dicht	10	15	20	1	10	20	25		1	15	25	38

PA Pfahlabstände in cm; PA_a ... PA_d nach Schema in Bild 5; n Anzahl der Bühnen je Stufe



Abb. 7: Buhnensystem Neuendorf/Hiddensee mit BL_t (i. M.) = 47,4 m und BA (i. M.) = 89,3 m; Baujahr 1936 (Foto: D. WEISS; Aug. 1990)

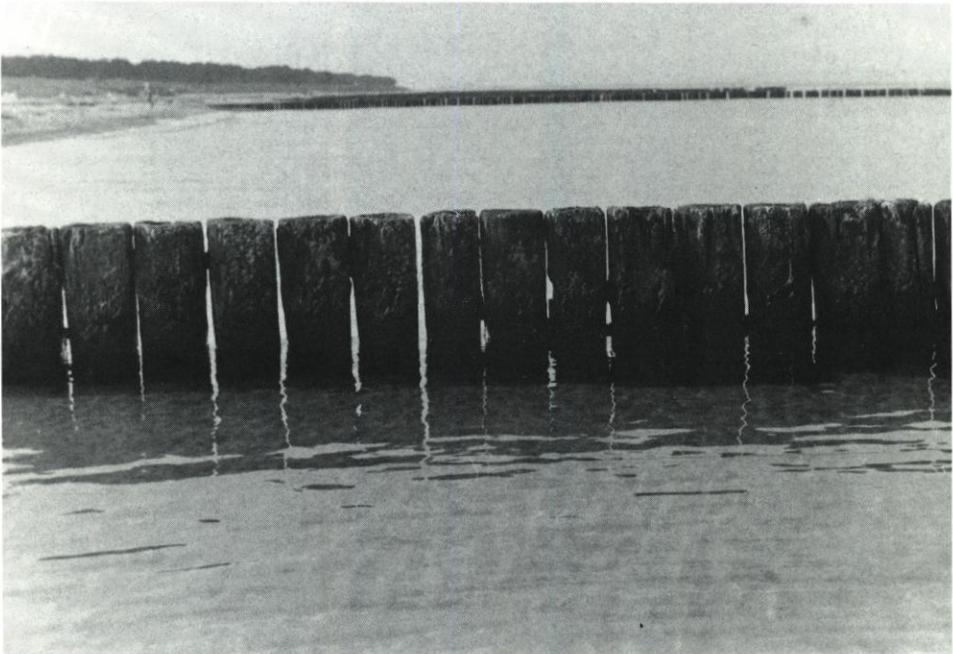


Abb. 8: Buhnensystem Neuendorf/Hiddensee; dichte, einreihige Pfahlbuhnen aus Holzpfählen mit begradigten Seiten, mit DU (i. M.) = 8,2% und KH (i. M.) = 51 cm über Normal (Foto: D. WEISS; 29. 8. 1990 bei Wasserstand 5 cm unter Normal)

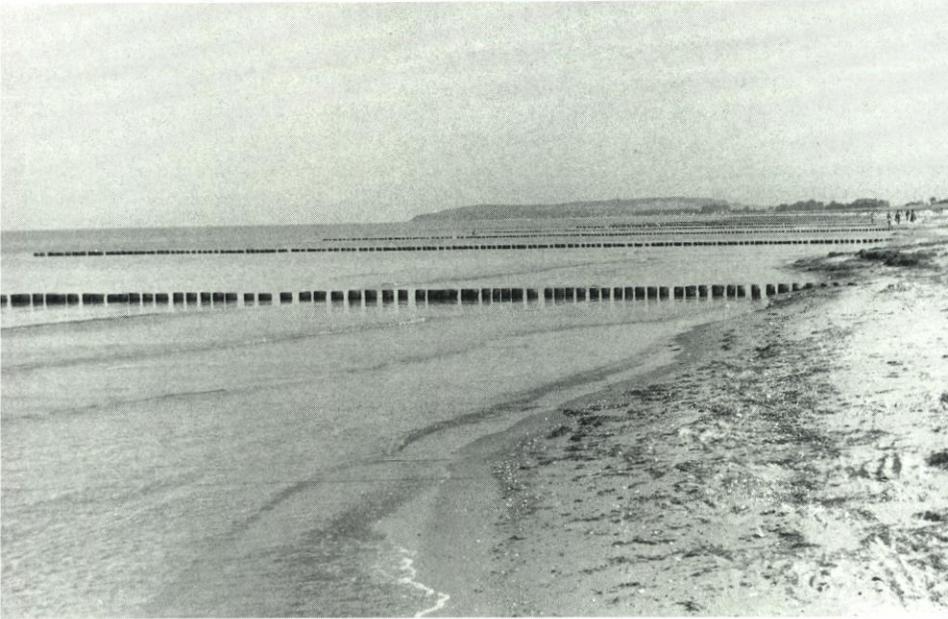


Abb. 9: Buhensystem Vitte/Hiddensee mit BL_{τ} (i. M.) = 62,1 m und BA (i. M.) = 61,1 m; Baujahr 1972
(Foto: D. WEISS; Aug. 1990)

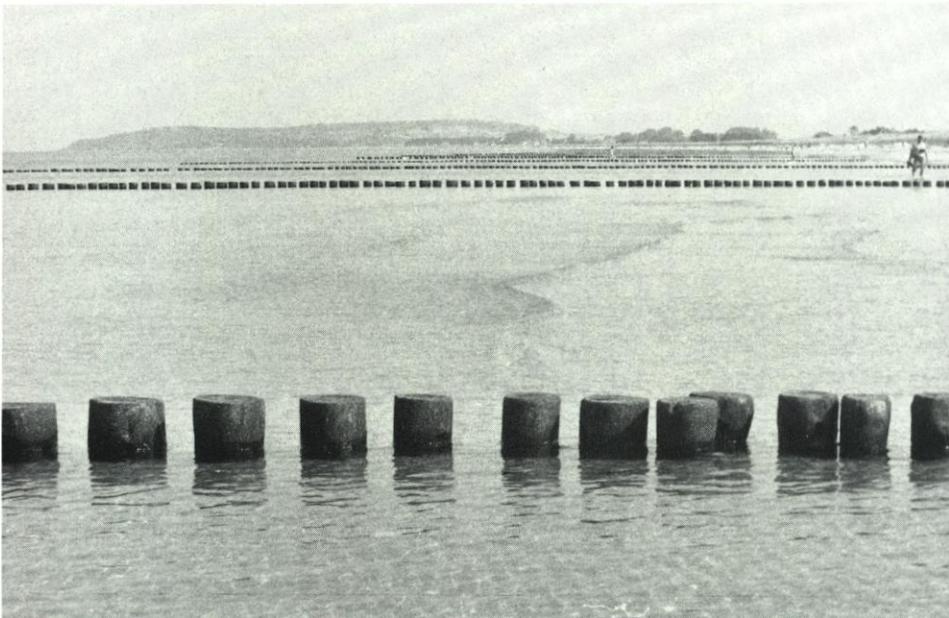


Abb. 10: Buhensystem Vitte/Hiddensee; offene, einreihige Holzpfahlbuhnen mit DU (i. M.) = 28,5 %
und KH (i. M.) = 12 cm über Normal (Foto: D. WEISS; 29. 8. 1990 bei Wasserstand 5 cm unter Normal)

2.3 Wirkungen

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse sind nicht in der Lage, den Wirkungsmechanismus der Buhnen zu erklären. Statt dessen wurde der Frage nachgegangen, in welchem Umfang und über welche Zeit die errichteten Buhnen die Schorre des Flachwasserbereiches stabilisieren, ihre Mobilität einschränken können. Erfahrungen über die Lebensdauer von Holzpfahlbuhnen sind vorhanden. Holzpfähle mit im Mittel 25 cm Durchmesser werden aus Standsicherheitsgründen zwei Drittel der notwendigen Pfahllänge in den Boden gerammt. Abhängig von hydro- und sedimentdynamischen Verhältnissen und der Instandsetzungsarbeit erreichen derartige Buhnen ein Alter von 50 Jahren und mehr (Abb. 7 und 8). Zur Frage nach dem räumlichen und zeitlichen Ausmaß der Buhnenwirkung sind für 10 Testgebiete mit Hilfe von über 200 Einzelprofilen (Wasserlinie bis 4 m Tiefe) aus einem Zeitraum bis zu 40 Jahren Buhnenexistenz sogenannte Typusprofile bestimmt worden (Abb. 11). Der Auswer-

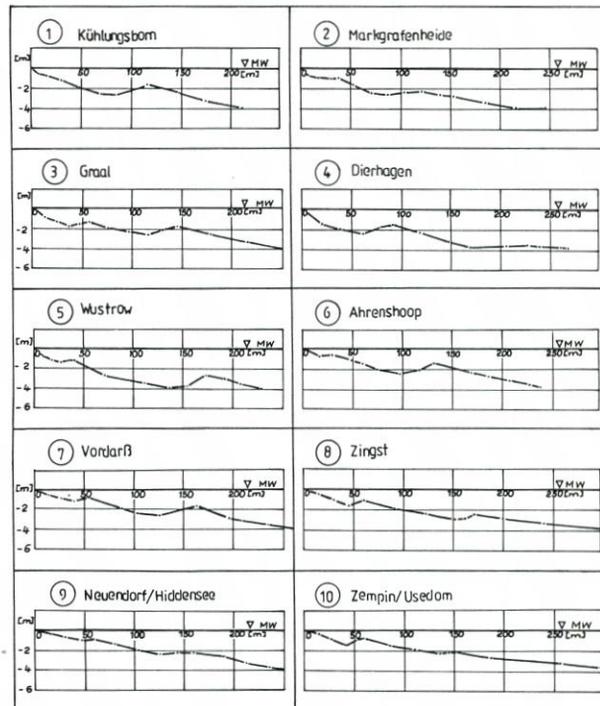


Abb. 11: Fiktive morphologische Profile (Typusprofile) im Bereich von 10 Buhnentestgebieten

tung lag das morphologische Schema nach Abb. 12 (oben) zugrunde. Dabei entstanden die Typusprofile durch Mittelbildung für jeweils gleiche morphologische Punkte der nach dem Schema gegliederten Einzelprofile. Zur Kennzeichnung der Morphodynamik der ufernahen Schorre wurde die Variation von Uferentfernung (L) und Tiefe (d) des Hauptriffs ermittelt. Jeweils sind die Extremwerte (gemäß Schema) für L und d in Absolutgrößen (Meter) bestimmt und dargestellt worden (Abb. 12). Außerdem wurde das Verhältnis der Schwankungsbreite (Max-Min) zum „morphologischen Mittelwert“ im jeweiligen Testgebiet ausgewiesen. Aus

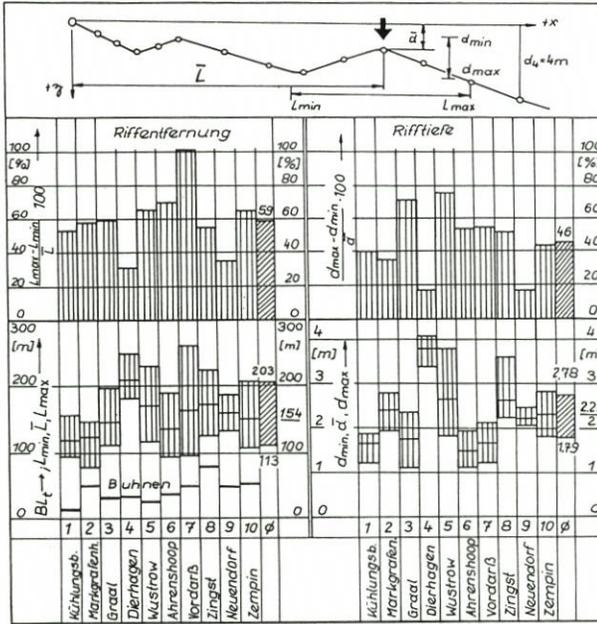


Abb. 12: Veränderungen der Riffmorphologie im Bereich von 10 Bühnentestgebieten

den Daten der 10 Abschnitte errechnen sich für die Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern folgende mittlere Bedingungen zur Riffdynamik:

$$\begin{aligned} \bar{L} &= 154 \text{ m}; L_{min} = 113 \text{ m}; L_{max} = 203 \text{ m} \text{ sowie} \\ [(L_{max} - L_{min}) : \bar{L}] \times 100 &= 59 \% \\ \bar{d} &= 2,25 \text{ m}; d_{min} = 1,79 \text{ m}; d_{max} = 2,78 \text{ m} \text{ sowie} \\ [(d_{max} - d_{min}) : \bar{d}] \times 100 &= 46 \% \end{aligned}$$

Demgegenüber stehen die mittlere Bühnenlänge zum Meßzeitpunkt, $BL_t = 48,32 \text{ m}$ (Tabelle 2) sowie die einzelnen Bühnenlängen (Abb. 12). Es kann festgestellt werden, daß in einer Uferentfernung von dem Mehrfachen der Bühnenlänge die Mobilität des Haupttriffs als Kennzeichen der Schorredynamik abläuft.

Offenbar findet die Bauwerkswirkung im wesentlichen innerhalb der Bühnenfelder, also zwischen Bühnenwurzel und Bühnenkopf, ihren Niederschlag. In Abb. 13 sind die mittleren Uferlinienveränderungen in den Testgebieten, bezogen auf die Situation zum Zeitpunkt des Bühnenbaus, aufgeführt. Verminderung des Rückgangs, Stabilisierung der Uferlinie oder Zuwachs und seawärtige Verlagerung der Uferlinie sind die Formen. Je nach dem räumlichen und zeitlichen Ausmaß dieser Wirkungen sind Strandverbreiterung und Sandaufhöhung die Folge und damit wiederum eine Reduzierung der Belastung von Düne oder Kliff. Damit ist ein Beispiel für den engen Zusammenhang zwischen Küsten- und Hochwasserschutz an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern gegeben.

Zur Wertung der Bühnenwirkungen (Abb. 13) sind die hydro- und sedimentdynamischen Verhältnisse der jeweiligen Küstenabschnitte, ihre Stellung innerhalb des Sedimentbilanzsystems, maßgebend. Neuendorf/Hiddensee z. B. hat, bezogen auf die Gesamtaußenküste der Insel, den Charakter der Transitstrecke (nach GURWELL, WEISS, ZIELISCH, 1982),

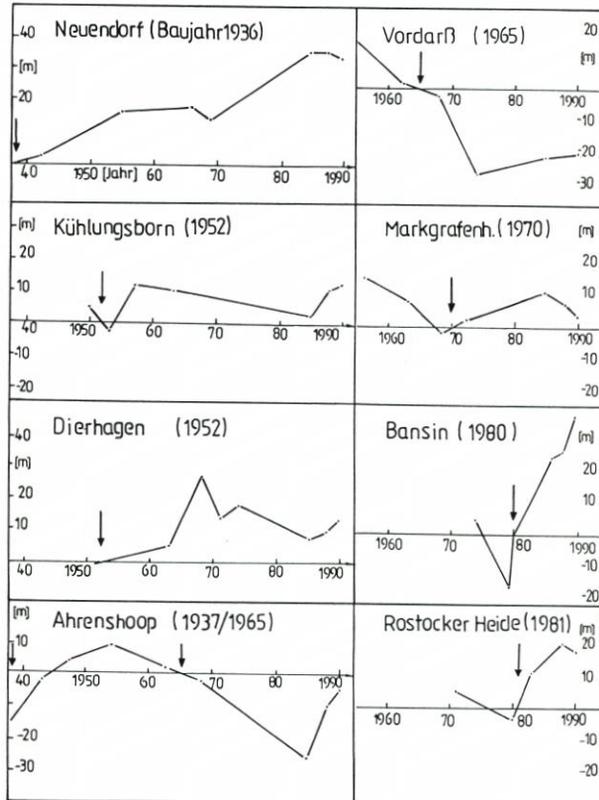


Abb. 13: Mittlere Uferlinienveränderung in 8 Testgebieten bezogen auf das Jahr des Bühnenbaus

weshalb die Bühnen die deutliche seewärtige Verlagerung von Uferlinien erwirken konnten. Die anderen Abschnitte besitzen einen negativen Sedimenthaushalt und sind langfristig im Rückgang begriffen. Bemerkenswert ist dabei die Situation in den Testgebieten Ahrenshoop und Vordarß. Hier waren 1937 etwa 100 m lange, dichte Stahlbühnen (Spundwand-Bühnen) gerammt worden, wonach auch eine deutliche seewärtige Uferlinienverlagerung einsetzte. Wahrscheinlich aber sorgten die zunehmende Seegangsbelastung infolge der laufenden Schorvertiefung im Bereich der Streichlinie und der defekte, lückenhafte Zustand der Stahlbühnen (Sandschliff, Korrosion) für die Abnahme und schließlich für das Ende der Akkumulationswirkung. Mitte der 50er Jahre begann die Rückverlagerung der Uferlinie. Nach der Stahlbühnenbeseitigung wurden 1965 die einreihigen offenen Holzpfahlbühnen gerammt, die allerdings die eingesetzte Uferlinienrückverlagerung bis landwärts der Situation während des Stahlbühnenbaus nicht stoppen konnten.

Die Darstellung der Uferlinienveränderung, also von Zuwachs und Rückgang in der Zeit zeigt einen unterschiedlichen Verlauf in den einzelnen Bühnenfeldern (Abb. 13). Als Gemeinsamkeit fällt aber der Zuwachs in Verbindung mit dem Zeitpunkt des Bühnenbaus auf. Als Maximalwert für den Zuwachs wurden mit Hilfe der verfügbaren Registrierungen 37 Meter bestimmt. Der Durchschnittswert für die gemessenen Uferlinienveränderungen (alle Abschnitte, gesamte Zeitdauer seit Bau) durch einreihige Holzpfahlbühnen bei natürlichem Sedimenthaushalt liegt bei 7,2 m Zuwachs. Aber es steht der Sedimenthaushalt eines einzelnen

Abschnitts im engen Zusammenhang mit dem übergeordneten Bilanzsystem. Buhnen können daher nicht den negativen Sedimentcharakter eines Abschnittes verändern und dauerhaft den Rückgang verhindern.

Leider existieren kaum gesicherte Meßdaten, nach denen der Zeitpunkt bestimmt werden kann, an dem die Uferlinie wieder die Ausgangslage vor dem Buhnenbau erreicht hat. Bei einer Reihe von Buhnensystemen wurde gerade in den letzten Jahren durch Sandaufspülung im nachbarlichen Küstenabschnitt (z. B. bei Kühlungsborn, Markgrafeneheide, Dierhagen, Ahrenshoop) auch der Sandhaushalt der Buhnenfelder indirekt künstlich angereichert. Wenn dadurch auch die Untersuchungen über die Buhnenwirkung auf die natürliche Morpho- und Sedimentdynamik gestört ist, läßt sich die Erhöhung der Lagestabilität der „künstlich“ seawärts verschobenen Uferlinie durch die Buhnen bestätigen.

3. Wertung, Ausblick

An den 40 oder 50 Jahre alten einreihigen Holzpfehlbuhnen, die mit äußerst geringer Durchlässigkeit und großen Kronenhöhen gebaut wurden, sind bei durchschnittlich negativem Sedimenthaushalt Erfolge in der Uferlinienstabilisierung nachweisbar. Gleichzeitig aber brachte der abrupte Übergang von den wirkungsvollen Bauten in die unverbauten Nachbarabschnitte Probleme der Lee-Erosion, an Flachküstenabschnitten Gefährdungen der Hochwassersicherheit. Buhnensysteme wurden deshalb oft verlängert. Eine Abhilfe sollten offene Buhnen mit großer Durchlässigkeit und geringer Kronenhöhe, beides über das ganze Buhnensystem, schaffen. Dieser in den 60er und 70er Jahren beschrittene Weg hat aufgrund der stark reduzierten Wirkung ausdrückliche Zweifel an der prinzipiellen Eignung von Buhnen aufkommen lassen.

Mit der Entwicklung der in ihrer Durchlässigkeit gestaffelten Systemabschlüsse und durch die als Ergebnis der Untersuchungen vorliegenden Empfehlungen zu Länge, Abstand, Durchlässigkeit und Kronenhöhe der Standardbuhnen eines Systems wurde eine veränderte Situation geschaffen, die prägend für Neubau und Rekonstruktion der vorhandenen Buhnen sein kann. Ein Buhnensystem besteht danach aus einem wirkungsvollen Zentrum und aus den im Einfluß schrittweise zurücktretenden Abschlüssen. Eine besondere Wertung erfährt der uferliniennahe Teil der Standardbuhnen. Kronenhöhe und Dichtigkeit sind hier Voraussetzung für die wichtigste angestrebte Einflußnahme, d. h. für die Sandanreicherung am oberen Schorrehang und die Stabilisierung oder seawärtige Verlagerung der Uferlinie. Die in der Regel bei steileren Neigungen und mit geringerer Länge gebauten dichten Buhnen erfüllen diese Bedingungen. Dagegen haben an Küstenabschnitten mit flachen Schorreneigungen die langen Buhnen größere Durchlässigkeitswerte, wobei sie seawärts zunehmen. Hier muß in Uferliniennähe auf ausreichende Dichtigkeit geachtet werden.

Bei den Buhnenbauten der 80er Jahre wurden auf Anregung des Autors die genannten Grundsätze schrittweise eingeführt (Testgebiete 11 bis 13 in Abb. 2 (Kronenhöhe) und Abb. 5 (PA)). Bei den Maßnahmen 1990/91, Neubau wie Rekonstruktion, werden die Empfehlungen gleichfalls verwirklicht. Dabei gibt das System Warnemünde/West erstmalig Gelegenheit zu mehrjährigen Beobachtungen der hydro- und morphodynamischen Vorgänge vor, während und nach dem Buhnenbau.

4. Schriftenverzeichnis

- GURWELL, B. R., WEISS, D. und ZIELISCH, E.: Beitrag zur Charakterisierung von physiographischen Einheiten und Bilanzsystemen an Ostseeküstenstrecken der DDR. Zeitschrift für geol. Wissenschaften, 10, Berlin, 1982.
- JÄGER, B. und WEISS, D.: Untersuchungen zur Wirkungsweise von Buhnen in ausgewählten Küstenabschnitten. Teil 1 Testgebiete (Weiss), Teil 2 Kataster (Jäger). WWD Küste Warnemünde, 1986/1990 (unveröff. Bericht).
- KOLP, O.: Untersuchungen über die Wirksamkeit von Seebuhnen mit farbigem Sand. Beiträge zur Meereskunde, Berlin, H. 17/18, 1966.
- PETERSEN, M.: Das deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten. Die Küste, Jg. 9, 1961.
- STÖVER, H. P.: Buhnen als Küstenschutz. In: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken – EAK 1981. Die Küste, H. 36, 1981.
- STUDEMANN, H.: Persönliche Mitteilung, 1966.
- WEISS, D.: Sicherungsmaßnahmen an Flach- und Steilküsten der DDR-Ostseeküste und ihre Wirkungen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, 54, Berlin 1989.